



საქართველოს ტექნიკური
უნივერსიტეტი
1922 წლიდან

გიორგი თურმანიძე

ბეტონის შეკლების და ბზარმედგობის ექსპერიმენტულ-თეორიული კვლევა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად სადოქტორო

პროგრამა მშენებლობა

შიფრი 0732

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი თბილისი, 0160, საქართველო

2022წ

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ფაკულტეტი სამშენებლო

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით გიორგი თურმანიძეს მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ბეტონის შეკლების და ბზარმედეგობის ექსპერიმენტულ-თეორიული კვლევა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის საინჟინრო, ტექნოლოგიური და საბუნებისმეტყველო საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

-----, ----- 2022 წელი

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: აკადემიური დოქტორი, პროფესორი გიორგი დალაქიშვილი

რეცენზენტი: -----

რეცენზენტი: -----

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2022წ

ავტორი: გიორგი თურმანიძე

დასახელება: „ბეტონის შეკლების და ბზარმედეგობის ექსპერიმენტულ-თეორიული კვლევა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის მეთოდით“

სადოქტორო პროგრამა: მშენებლობა

მისანიჭებელი კვალიფიკაცია: მშენებლობის ინჟინერიის დოქტორი

სხდომა ჩატარდა _____

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა _____

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

შინაარსი

1. ლიტერატურის მიმოხილვა	20
2. კვლევა, შედეგები და მათი განსჯა	62
2.1 ცემენტის ქვისა და ბეტონის შეკვრის ვადებისა და სტრუქტურის ჩამოყალიბების გამოკვლევა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით.....	62
2.2 შეკვრის ვადების განსაზღვრა სხვადასხვა მარკის ცემენტებზე ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით	65
2.3 ჰოლოგრაფიის მეთოდის გამოყენება ბეტონისა და რკინაბეტონის დეფორმირებული მდგომარეობის შესასწავლად	72
2.4 ბეტონის შეკვლების კვლევა.....	75
2.5 ბეტონის შეკლება გამკვრივების ადრეულ სტადიაზე	77
2.6 ცემენტის ქვის შეკლება ასაკოვან ასაკში	87
2.7 შემვსების გავლენა ცემენტის ქვის შეკვლების დეფორმირებულობის ხასიათზე.....	88
2.8 ექსპერიმენტული მონაცემების შეფასება	90
2.9 ბეტონის ბზარმდეგობის შესწავლა.....	95
2.10 დანამატებიანი მსუბუქი ბეტონების ბზარმდეგობა	103
2.11 ბეტონის დეფორმაციის ველის განსაზღვრა ტემპერატურული ზემოქმედებისგან შიგა დამაბულობების განვითარებისას.....	107
2.12 კვლევის მეთოდიკა.....	113
2.13 ბეტონის რღვევის მექანიკა.....	124
3 დასკვნები.....	136
გამოყენებული ლიტერატურატურის ნუსხა.....	139

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1 დროის ინტერვალი ექსპონირებებს შორის	66
ცხრილი 2 ცემენტის ნარევისა და ბეტონის შეკვრის ვადები.....	67
ცხრილი 3 ცემენტის სახეობები	97
ცხრილი 4 გამოკვლეულია 6 მინერალური შემადგენლობის ცემენტი.....	98
ცხრილი 5 ბეტონის შედგენილობა	104
ცხრილი 6 გამოცდების შედეგები	106
ცხრილი 7 ცალკეული წერტილების გადაადგილებები X და Y ღერძების გასწვრივ მიკრომეტრებში	115

ნახაზები ნუსხა

ნახ.1 შემხვედრ კონებში ჰოლოგრამების რეგისტრაციის სქემა	46
ნახ.2 ლაზერი, ჩამკეტი, სარკე საყრდენი კონა, ლინზა, სარკე;.....	47
ნახ. 3 გადაადგილების საანგარიშო გეომეტრიული სქემა.	52
ნახ.4 საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, სამშენებლო ფაკულტეტის „ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის სასწავლო, სამეცნიერო-საკვლევო ლაბორატორია“ სტაციონალური ვიბროდამცავი ოპტიკური მაგიდის პროექტი.	58
ნახ. 5 ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამების ჩაწერის ორსხივიანი სქემა..	68
ნახ. 6 გადაადგილების ვექტორის ნორმალური კომპონენტის სიდიდის დამოკიდებულება ნარევის ხნოვანებაზე (ცემენტის ნარევი წ/ც 0,46 M-400)70	
ნახ. 7 გადაადგილების ვექტორის ნორმალური კომპონენტის სიდიდის დამოკიდებულება ნარევის ხნოვანებაზე (ცემენტის ნარევი წ/ც 0,46 M-300)71	
ნახ. 8 ცემენტის ქვის შეკლების მრუდი.	88
ნახ. 9 ცემენტის ქვის ცალკეული წერტილების გადაადგილების დიაგრამა. შემვსებები - კერამიტი.....	89
ნახ. 10 ცემენტის ქვის ცალკეული წერტილების გადაადგილების დიაგრამა. შემვსებები - ვულკანური წიდა.	89
ნახ.11 წერტილების გადაადგილებები ნიმუშის სიბრტყეში X. მიმართულებით ($\Delta x, \Delta y$)	116
ნახ.12 წერტილების გადაადგილებები ნიმუშის სიბრტყეში X. მიმართულებით ($\Delta x, \Delta y$)	116
ნახ.13 წერტილების გადაადგილებები ნიმუშის სიბრტყეში X. მიმართულებით ($\Delta x, \Delta y$)	117
ნახ.14 წერტილების გადაადგილებები ნიმუშის სიბრტყეში X. მიმართულებით ($\Delta x, \Delta y$)	117
ნახ.15 წერტილების გადაადგილებები ნიმუშის სიბრტყეში X. მიმართულებით ($\Delta x, \Delta y$)	118

ნახ.16 წერტილების გადაადგილებები ნიმუშის სიბრტყეში X. მიმართულებით $(\Delta x, \Delta y)$	118
ნახ.17 წერტილების გადაადგილებები ნიმუშის სიბრტყეში X. მიმართულებით $(\Delta x, \Delta y)$	119
ნახ.18 წერტილების გადაადგილებები ნიმუშის სიბრტყეში X. მიმართულებით $(\Delta x, \Delta y)$	119
ნახ.19 წერტილების გადაადგილებები ნიმუშის სიბრტყეში X. მიმართულებით $(\Delta x, \Delta y)$	120
ნახ.20 წერტილების გადაადგილებები ნიმუშის სიბრტყეში X. მიმართულებით $(\Delta x, \Delta y)$	120
ნახ.21 ბზარის სამი ძირითადი ტიპი	128
ნახ. 22 გრაფიკი ბზარის წვეროს გარჩევისუნარიანობა	134

სურათების ნუსხა

სურ. 1. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, სამშენებლო ფაკულტეტის „ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის სასწავლო, სამეცნიერო-საკვლევო ლაბორატორია.....	18
სურ.2 სტაციონალური ვიბროდამცავი ოპტიკური მაგიდა, ლაზერი და ოპტიკური სამაგრები.	19
სურ.3 გადასატანი ანაკრები და სტანდარტული ვიბროდამცავი ოპტიკური მაგიდეები (მწარმოებელი აშშ)	56
სურ.4 გადასატანი სტანდარტული ვიბროდამცავი ოპტიკური მაგიდა.....	57
სურ.5 გადასატანი სტანდარტული ვიბროდამცავი ოპტიკური მაგიდა, ოპტიკური და მექანიკური სამაგრებით (მწარმოებელი ლიეტუა).	57
სურ. 6 -არხიანი DATA500PRO 8-არხიანი DATA500	59
სურ.7 გადამწოდი KS48C	60
სურ. 8 ვიბრაციის ამპლიტუდა.....	61
სურ. 9 ცემენტის ნარევი წ/ც 0,3 ნიმუშის ხნოვანება 50 წთ.	68
სურ. 10 იმავე ნიმუშის ხნოვანება 75 წთ.	69
სურ.11 იმავე ნიმუშის ხნოვანება 110 წთ.	69
სურ.12 ნიმუშისა და ჩარჩოს ხედი	76
სურ. 13 გრანიტის ფილა ხისტად ჩამაგრებული ცილინდრებით.....	77
სურ. 15. ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 16 სთ.	80
სურ. 16. ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 40 სთ.	81
ნახ. 17 ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 64 სთ.	81
სურ. 18 ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 89 სთ.	82
სურ. 19 ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 170 სთ.	82
სურ. 20 ცემენტის ქვის ინტერფეროგრამები ხისტად ჩამაგრებული მსხვილი გრანიტის შემვსების დროს. ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 16 სთ.	83

სურ. 21 ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 60 სთ.	83
სურ. 22 ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 62 სთ.	84
სურ. 23 ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 91 სთ.	84
სურ. 24 ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 120 სთ.	85
სურ. 25 ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 489 სთ.	85
სურ. 26 სტელაჟი ნიმუშებით.....	99
სურ. 27 ნიმუშების ინტერფეროგრამა დატვირთვიდან 2 საათის შემდეგ ..	100
სურ. 28 ნიმუშების ინტერფეროგრამა დატვირთვიდან 14 საათის შემდეგ	100
სურ. 29. ნიმუშების ინტერფეროგრამა დატვირთვიდან 18 საათის შემდეგ	101
სურ. 30. ნიმუშების ინტერფეროგრამა დატვირთვიდან 20 საათის შემდეგ	102
სურ. 31 ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამა. ბეტონი საკონტროლო, დანამატის გარეშე.....	105
სურ. 32 ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამა. ბეტონი Nanocast 500 დანამატით.....	105
სურ. 33 ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამა. ბეტონი Nanoment 1045 დანამატით.....	106
სურ. 34 ბეტონის მოდელი მსხვილი შემვსებებით	113
სურ.35 ცალკეული წერტილების გადაადგილებების სქემა X და Y დერძების გასწვრივ.....	115
სურ. 36 ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამა მოდელის გაცხელებისას ტ- 45C ⁰	121
სურ. 37 ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამა მოდელის გაცხელებისას ტ- 55C ⁰	121
სურ. 38 ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამა მოდელის გაცხელებისას ტ- 65C ⁰	122
სურ. 39 ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამა მოდელის გაცხელებისას ტ- 70C ⁰	122

მადლიერების გვერდი

მადლობას ვუხდით ჩემს სამეცნიერო ხელმძღვანელს, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის აკადემიურ დოქტორს გიორგი დალაქიშვილს უდიდესი დახმარებისთვის ამ სადისერტაციო ნაშრომის წარმატებით დასრულების საქმეში, თითქმის ყოველდღიური პრაქტიკულ-თეორიული კომუნიკაციისთვის და სამუშაოების ეფექტური ორგანიზებისთვის;

მადლობას ვუხდით საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის დეკანს პროფესორ ზურაბ გვიშიანს ჩემი, როგორც დოქტორისთვის გაწეული სამუშაოსა და ხელსეწყობისთვის;

მადლობას ვუხდით სტუ-ს პროფესურას, რომელთაც სასარგებლო კრიტიკული შენიშვნები მომცეს კოლოკვიუმების და თემატური სემინარების ჩატარებისას

მადლობას ვუხდით სტუ-ს სადისერტაციო საბჭოს წევრებს, რეცენზენტებს, რომლებმაც განიხილეს მოცემული სადისერტაციო ნაშრომი;

მადლობას ვუხდით ოჯახის წევრებს განუსაზღვრელი დახმარებისთვისა და მორალური მხადაჭერისთვის.

რეზიუმე

ბეტონმცოდნეობაში ერთ-ერთი აქტუალური საკითხია ბეტონის შეკლებისა და ბზარმდეგობის ბუნების შესწავლა გამყარების ადრეულ ასაკში, და სხვადასხვა ფაქტორის ზეგავლენა აღნიშნულ პროცესზე, რადგან ყველაზე ნაკლებად არის ცნობილი და გამოკვლეული ის პროცესები რომლებიც მიმდინარეობს საწყის ეტაპზე. აქედან გამომდინარე ჩვენი მხრიდან შერჩეული იქნა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდი რომელსაც სხვა ექსპერიმენტულ მეთოდებთან შედარებით გააჩნია ის უპირატესობა რომ საკვლევ ნიმუშზე არ ხდება არანაირი ზემოქმედება და უკონტაქტოდ შესაძლებელია მოხდეს პირველი წუთებიდან დაკვირვება საკვლევ ნიმუშზე მაღალი სიზუსტით. ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის გამოყენებით განისაზღვა სხვადასხვა მარკის ცემენტის შეკვრის ვადები ინტერფეროგრამებზე ნათლად გამოჩნდა, რომ ნარევის შეკვრა იწყება ქვედა ფენიდან და დროთა განმავლობაში წაინაცვლებს მაღლივი ფენებისაკენ, ამაზე მეტყველებს ინტერფერენციული ზოლები ფირფიტის გამჭვირვალე ნაწილში. ამ ფაქტის ახსნა შეიძლება იმით, რომ თავისუფალი წყალი, რომელიც არ შედის რეაქციაში ცემენტთან ვიბროდაყალიბების შედეგად ამოდის ნიმუშის ზედა ფენებში და შესაბამისად წყალცემენტის ფარდობა ნაკლებია ნიმუშის ქვედა ფენაში, რაც იწვევს სწორედ ამ ფენის შეკვრის პერიოდის უფრო სწრაფ დაწყებას. შეკვრის ვადები ასევე განსხვავებულია სხვადასხვა მარკის ცემენტის ნარევებში. სტრუქტურის ფორმირების დასაწყისად მიღებულია ის მომენტი, რომელსაც მინის ფირფიტის შეღებილ და შეუღებავ მხარეს გაჩნდება იდენტური ინტერფერენციული ზოლები, ხოლო სტრუქტურის ფორმირების პერიოდის დასასრულად, როდესაც ინტერფერენციული ზოლები გაქრება მინის ფირფიტის ორივე მხარეს.

ჩატარდა ბეტონის შეკლების კვლევა ორ შემთხვევაში როდესაც მსხვილი შემვსები იყო თავისუფალ მდგომარეობაში ასევე როდესაც მსხვილი შემვსები იყო ხისტად ჩამაგრებული, იმ შემთხვევაში, როცა შემვსების მარცვლების გადაადგილება არ იყო შეზღუდული და ისინი, „ცურავდნენ“ რა მატრიცაში, თავისუფლად შეეძლოთ მიჰყოლოდნენ ამ უკანასკნელის დეფორმაციებს და დაკვირვების პერიოდში (7 დღე-ღამეზე მეტი) ბზარები ნიმუშებში არ გამოჩენილა, ხოლო როდესაც მარცვლების გადაადგილების შესაძლებლობა შეზღუდული იყო ნიმუშის დამზადებიდან მე-60 საათზე მასში შემვსების ერთ-ერთ მარცვალთან წარმოიშვა შეკლების ბზარი ვიზუალურად ნიმუშის 4-ჯერადი გამადიდებელი ლუპით დათვალიერებისას, ის ჯერ კიდევ არ იყო შესამჩნევი.

გამოკვლეული იქნა ტემპერატურული ზემოქმედების დროს ბეტონის დეფორმაცია, ინტერფეროგრამების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ჰოლოგრამის

გადაღების დაწყებისთანავე ტემპერატურული ზემოქმედების დროს (43-45⁰) მოდელი არსებობდა ბზარები საკონტაქტო ზონებში მატრიცასა და შემვსების მარცვლებს შორის. ეს გარემოება აისახა შიგა ძაბვების განვითარების ხასიათზე, რომლებიც ცალკეულ შემთხვევებში ტემპერატურის ზრდასთან ერთად მცირდებოდა. შემცირება შეინიშნებოდა, სახელდობრ იმ წერტილებში, სადაც ინტერფეროგრამაზე მონიშნული იყო ბზარები.

ბზარების არარსებობის დროს, ტემპერატურის ზრდასთან ერთად გადაადგილება იზრდებოდა, მაგრამ იქ, სადაც ჩნდებოდა ბზარი, შეინიშნებოდა გადაადგილების მონოტონური ცვლილების დარღვევა. ბზარების გავლენა შედარებით სუსტად აისახებოდა უჯრედების შუა ნაწილში განლაგებული წერტილებში

ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის გამოყენებით მოხდა მიმდინარე პროცესის როგორც რიცხობრივი ისე ვიზუალური ინფორმაციის დაფიქსირება არა გამოსაკვლევ მოდელეებზე, არამედ უშუალოდ ბეტონის კონსტრუქციულ ელემენტზე დიდი სიზუსტით, უკონტაქტოდ, რაზეც შემდეგში დიდად არის დამოკიდებული ბეტონისა და რკინაბეტონის კონსტრუქციების მდგრადობა და ხანგამძლეობა

ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით მოხდა დაკვირვება ბეტონებში ბზარის ჩასახვაზე, მის განვითარებასა და დეფორმაციის ველზე მისი წვეროს მახლობლად. გაზომვის სიზუსტე ამ მეთოდით ხარისხით მეტია (633 ნ.მ.) ვიდრე სხვა მეთოდები, მოხდა მთლიანი პროცესის ვიზუალიზაცია.

რღვევის მექანიკის პარამეტრებიდან მნიშვნელოვანია K - ძაბვის ინტესიურობის კოეფიციენტი, რომელმაც საინჟინრო პრაქტიკაში ერთ-ერთი ძირითადი ადგილი დაიკავა დრეკადობის მოდულსა და პუასონის კოეფიციენტთან ერთად. იგი ითვლება მასალის მუდმივ სიდიდედ და ბზარმედევობის ძირითად მახასიათებლად. K ერთადერთი პარამეტრია, რომლის მემვობითაც გამოითვლება დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა ბზარის არეში. K_{Ic} კოეფიციენტის განსაზღვრისათვის გამოცადეთ ნიმუში, რომლითაც დადგინდა, რომ ამ ნიმუშისათვის ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტი შეადგენს $K_{Ic}=0,41$ რომელიც წარმოადგენს ბზარმედევობის კოეფიციენტს. K_{Ic} -ს უშუალო გაზომვებმა ცხადყო, ჩვენ მიერ არჩეული წრფივი მოდელი მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული წყალ-ცემენტის ფარდობაზე.

ამდენად ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით მასალების თვისებების შესწავლა მისი გამყარების საწყისი სტადიიდან და შემდგომში რღვევის მექანიკის კრიტერიუმებზე დაყრდნობით მასალის მექანიკური პარამეტრების დადგენა, სტრუქტურის გათვალისწინებით და თანამედროვე ფიზიკური მეთოდების გამოყენებით პერსპექტიულია და ვიმედოვნებთ, რომ შემდგომში კვლევა საშუალებას მოგვცემს, უფრო ღრმად

ჩვენთვის აღნიშნულ საკითხებს და კვლევის საფუძველზე გამოქვეყნებულია მეთოდური მითითებები ლაბორატორიული სამუშაოების შესასრულებლად „ბეტონისა და რკინაბეტონის დეფორმაციის და ბზარმედგობის პროცესების შესწავლა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის მეთოდით“ ლაბორატორიული და კვლევითი სამუშაოების შესასრულებლად ბაკალავრების, მაგისტრანტების, დოქტორანტების და სხვა დაინტერესებული სამშენებლო პროფილის ინჟინერ-ტექნიკური პერსონალისათვის.

Summary

One of the topical issues in concrete science is to study the nature of concrete shrinkage and cracking resistance at an early age of hardening, and the influence of various factors on this process, as the processes undergoing at the initial stage are the least known and researched.

Therefore, the method of holographic interferometry chosen by us has the advantage over the other experimental methods that implies that no exposure is subject to a research sample and it is possible to observe a research sample with high accuracy and without contact from the first minutes. By applying holographic interferometry, it has been determined the binding terms for different brands of cement. It has clearly appeared on the interferograms that the binding of the mixture starts from the lower layer and over time, it is shifted to the upper layers, as evidenced by the interferential stripes in the transparent part of the plate. This fact may be explained by the fact that free water, which does not react with the cement due to vibro-casting, rises in the upper layers of the sample and consequently, the ratio of water-cement is less in the lower layer of the sample, which leads to a faster onset of binding period for this layer.

Binding times also vary in different brands of cement mixtures. Beginning of the structure formation is assumed the moment, when identical interferential stripes appear on the painted and unpainted sides of the glass plate, and the end of the period for the structure formation is considered disappearance of the interferential stripes on both sides of the glass plate.

The study of concrete shrinkage was conducted in two cases, when the large filler was in the free condition as well as when the large filler was rigidly fixed, in the case when the movement of the filling grains was not restricted and they were "swimming" in the matrix, they could freely follow the deformations of the latter and no cracks appeared in the samples during the observation period (more than 7 days), and when the ability to move the grains was limited at 60 hours after the sample was made, a shrinkage crack appeared near one of the filling grains when visually examining the sample with a 4x magnifier, it was not still noticeable.

Deformation of concrete during temperature exposure has been studied, interferogram analysis shows that upon hologram shooting within the temperature exposure (43-45°), the model had cracks in the contact zones between the matrix and the filler grains. This circumstance had an impact on the nature of the development of internal voltages, which in certain cases decreased with increasing temperature. Reduction was observed specifically at the points, where cracks were marked on the interferogram.

In the absence of cracks, the displacement increased with increasing temperature, but where a crack appeared, disruption of the monotonic change in displacement was observed. The impact of the cracks has been relatively weakly revealed in the points located in the middle of the cells.

Using holographic interferometry, both the numerical and visual information of the current process was recorded not on the research models, but directly on the concrete structural element with great accuracy, without contact, on which the strength and durability of concrete and reinforced concrete structures depend.

The method of holographic interferometry was used to observe the producing cracks in concretes, on its development and the deformation field near its tip. The measurement accuracy under this method is qualitatively higher (633 nm) than other methods, the whole process was visualized.

Among the parameters of the fracture mechanics, the K-voltage intensity ratio is important, which has occupied one of the main places in the engineering practice in line with the modulus of elasticity and the Poisson ratio. It is considered constant value of the material and the main characteristic of cracking resistance.

K is the only parameter through which the stress-deformed condition in the crack area is calculated. In order to determine the K_{Ic} coefficient, we tested a sample, by which it has been found out that the critical intensity coefficient for this sample is $K_{Ic}=0.41$, which is the ratio of crack resistance. Direct measurements of K_{Ic} revealed that the linear model we chose was significantly dependent on the water-cement ratio.

Thus the study of the properties for materials by the holographic interferometry method from the initial stage of its hardening and subsequent determination of the mechanical parameters of the material based on the criteria of fracture mechanics, considering the structure and using modern physical methods gain perspective, and we hope that further study will allow us to gain a deeper understanding of these issues and based on the study, methodical guidelines for performance of laboratory work "Study of processes for deformation and cracking resistance of concrete and reinforced concrete by the holographic interferometry method" for bachelors, master, doctoral students and other interested engineering and technical staff with construction profile are published.

შესავალი

ბეტონისა და რკინაბეტონის ნაგებობების ხანგამძლეობაზე გავლენის მომხდენ ფაქტორებს შორის დიდ როლს ასრულებს ბეტონში მიმდინარე ხანგრძლივი პროცესები, როგორცაა: შეკლება და ცოცვადობა. ისინი, ბეტონის აგებულების სტრუქტურულ თავისებურებებთან, გარემოს პირობებთან და დატვირთვისთან შეთავსებით ბზარწარმოქმნის პროცესის რეგლამენტირებას ახდენს, რომლის განვითარების ინტენსიურობაზე არის, პირველ რიგში, დამოკიდებული ბეტონისა და რკინაბეტონის ხანგამძლეობა.

ამიტომ, ბზარწარმოქმნის პროცესის არსის შესწავლა და მის განვითარებაზე ზეგავლენის მომხდენი მრავალრიცხოვანი ფაქტორების (მათ შორის ბეტონის შეკლებისა და ცოცვადობის) როლის დადგენა დიდ ინტერესს ჰბადებს.

ბოლო წლებში ბევრი რამ არის გაკეთებული ბეტონისა და რკინაბეტონის თეორიისა და კერძოდ, ბეტონის შეკლებისა და ცოცვადობის თეორიის განვითარებისთვის. ეს განვითარება ხდებოდა როგორც ბეტონისა და რკინაბეტონის კონსტრუქციების ხანგრძლივ დატვირთვებზე საიმედო მეთოდებით გაანგარიშების მიმართულებით, ისე შესაბამისი ექსპერიმენტული მონაცემების დაგროვების მიმართულებითაც. ეს უკანასკნელი აუცილებელია, როგორც საცნობარო მონაცემების საიმედოობის ასამაღლებლად, ისე ბეტონის შეკლებისა და ცოცვადობის მათემატიკური თეორიების შემდგომი განვითარებისთვისაც, რომელნიც, ცხადია, კიდევ დიდხანს ატარებენ ფუნდამენტურ ხასიათს.

მაგრამ ამასთან ერთად სულ უფრო მეტი ყურადღება ეთმობა ბეტონის შეკლებისა და ბზარმედეგობის ბუნების შესწავლას. ეს სამუშაოები აუცილებელია იმ ფიზიკური თეორიების შესამუშავებლად, რომლებითაც უნდა დასრულდეს ბეტონის შეკლებისა და ცოცვადობის მრავალწლიანი გამოკვლევები. ვინაიდან ბეტონის შეკლებისა და ცოცვადობის ბუნების შესწავლისას მკვლევარებს შეხება უწევთ საკმაოდ რთული აგებულების მასალებთან და დამაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე ზეგავლენის

მომხდენი ფაქტორების დიდი რაოდენობის არსებობასთან, ერთიანი აზრი ბეტონის შეკლებისა და ბზარმდეგობის ბუნებაზე ჯერ არ არსებობს. ასე რომ ბეტონის შეკლების ბუნებისა და მექანიზმის განვითარების აღსაწერად შემოთავაზებულია 10-ზე მეტი თეორია.

ამასთან დაკავშირებით, ბეტონის შეკლებისა და ბზარმდეგობის ბუნების შესახებ კვლევების გაღრმავება, ფიზიკისა და ფიზიკური ქიმიის უახლესი მიღწევების მოზიდვით, ამჟამად ბეტონმცოდნეობის ერთ-ერთ ყველაზე აქტუალურ ამოცანად ითვლება.

კვლევის მიზანია შეკლებითი დეფორმაციების განვითარების ხასიათის კვლევა და ცალკეული ფაქტორების როლის დადგენა (მატრიცისა და შემვსებების მარცვლების გადაადგილების შეზღუდვის ხარისხის, ცემენტის სახეობის, წყალ-ცემენტის თანაფარდობის და სხვ.) ამ დეფორმაციების განვითარებაში. ასევე, მიზანს წარმოადგენდა შეკლებითი ბზარების წარმოქმნისა და განვითარების პროცესის გამოკვლევა და ამ პროცესზე ცემენტის სახეობის (მინერალოგიური შედგენილობის) ზეგავლენა. ბეტონში სტრუქტურული დამაბულობების შესწავლის თაობაზე სხვადასხვა მკვლევარის მიერ ჩატარებული შრომების ანალიზმა აჩვენა, რომ მათში განხილული იყო ან მეტისმეტად გამარტივებული მათემატიკური მოდელები, რომლებიც მათი ანალიზური აღწერის ჩატარების საშუალებას იძლეოდნენ, ანდა შესწავლილი იყო ფიზიკური მოდელები, რომლებშიც ბეტონის ერთ-ერთი კომპონენტი ჩანაცვლებული იყო მოდელური (ოპტიკურ-მგრძნობიარე) მასალით. ამგვარი ცვლილების დროს გარდაუვალად ცემენტის ქვასა და შემვსების მარცვალს შორის ურთიერთქმედების რთული სურათის ცალკეული მხარეების დაკარგვა ხდებოდა. ზემოთქმულის გათვალისწინებით, ცემენტის ქვის დეფორმირებული მდგომარეობის შესასწავლად გადაწყდა, რომ ნაშრომში გამოყენებული ყოფილიყო ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდი, რომელსაც არ გააჩნია მითითებული ნაკლი - როგორცაა საკვლევ ფიზიკურ მოდელში ოპტიკურად მგრძნობიარე მასალის ჩართვის აუცილებლობა.

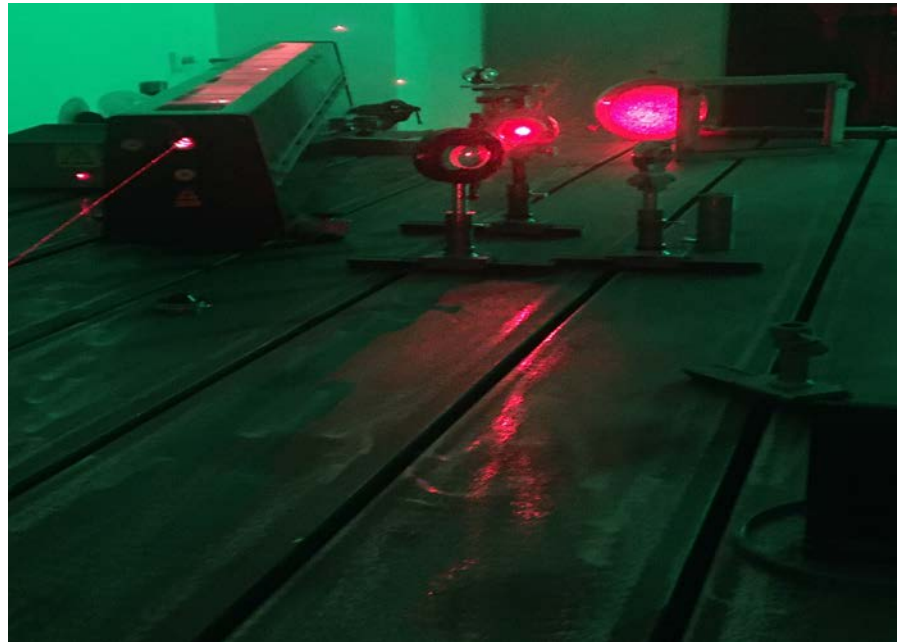
ჰოლოგრაფია, რომელმაც ფართო გამოყენება პოვა ლითონებისა და პოლიმერული მასალებისგან მომზადებული ნაკეთობების და კონსტრუქციების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის გამოკვლევისას, ბეტონისა და რკინაბეტონის კვლევებისას ჯერ კიდევ ნაკლებად გამოიყენება. მეტიც, ყველა არსებულ ნაშრომში, როგორც წესი, მიმდინარეობდა მხოლოდ ხანმოკლედ მიმდინარე პროცესების შესწავლა. ცემენტის ქვის და ბეტონის შეკლების დეფორმაციების და ბზარმდეგობის კვლევების მიმართ გამოყენების კუთხით ჰოლოგრაფია ადრე არავის გამოუყენებია. ცხადია, რომ ეს დაკავშირებულია ხმაურიანი ეფექტებისა და ვიბრაციების მოცილების დიდ ექსპერიმენტულ სიძნელებებთან, რომელთა გაჩენის ალბათობაც ექსპერიმენტის ხანგრძლივობის ზრდასთან ერთად ძლიერ იმატებს.



სურ. 1. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, სამშენებლო ფაკულტეტის „ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის სასწავლო, სამეცნიერო-საკვლევო ლაბორატორია

2019 წელს, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის, სამშენებლო ფაკულტეტზე ჩამოყალიბდა „ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის სასწავლო, სამეცნიერო და საკვლევო ლაბორატორია“ სურ.1 და სურ.2, სადაც მიმდინარეობს კომპოზიტური მასალების და კონსტრუქციული

ელემენტების ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის მეთოდით კვლევა (სსიპ შოთა რუსთაველის ფონდი, საგრანტო პროექტი FR 18-11671).



სურ.2 სტაციონალური ვიბროდამცავი ოპტიკური მაგიდა, ლაზერი და ოპტიკური სამაგრები

ნაშრომში მოყვანილია ამ კვლევების შედეგები. ისინი შეიძლება სასარგებლო აღმოჩნდეს ღონისძიებების შემუშავებისას, რომელიც მიმართულია შეკლებითი დეფორმაციების განვითარების პროცესების რეგულირებაზე და მიკრო სტრუქტურული დამაბულობების განვითარების რეგულირებაზე. ის შეიცავს მეთოდოლოგიურ მითითებებს ბეტონის ბზარმდეგობის შესასწავლად ჰოლოგრაფიის გამოყენების თაობაზე.

1. ლიტერატურის მიმოხილვა

შეკლება - ბეტონის სპონტანური დეფორმაცია, რომელიც განპირობებულია ცემენტის წყალთან ურთიერთქმედებისას მიმდინარე ქიმიური და ფიზიკური პროცესებით, ცემენტის ქვაში ტენის შემცველობის ცვლილებით, მისი გამოშრობისას და კარბონიზაციით. შესაბამისად ის შედგება კონტრაქციული, ტენიანობისა და კარბონიზაციული კომპონენტებისაგან.

კონტრაქციული შეკლება გამოწვეულია იმით, რომ კვლავ წარმოქმნილ ნაერთს სისტემიდან ცემენტი + წყალი ნაკლები მოცულობა აქვს, ვიდრე საწყისი მასალების მოცულობების ჯამია. კონტრაქციული ეფექტი ძირითადად ვლინდება ცემენტის ქვის მოხვეწისა და გამყარების საწყის პერიოდში, ხოლო შემდეგ მიღევადი ხდება. ამაზე მიუთითებენ გამყარების პროცესში მყოფ ცემენტის ცომში ვაკუუმის მოვლენის შესწავლის შედეგები, აგრეთვე კონტრაქციული ეფექტის პირდაპირი გაზომვები.

შეკლების კარბონიზაციული კომპონენტი ყველაზე ნაკლებად არის გამოკვლეული, თუმცა ის საკმაოდ მნიშვნელოვან როლს ასრულებს შეკლებითი ძაბვების განვითარებაში, რაც იმით აიხსნება, რომ ჩვეულებრივ, ტენიანობისა და კარბონიზაციული შეკლების გამოვლინება ბეტონში შეინიშნება ერთდროულად, ამიტომ ექსპერიმენტალური მონაცემები ბეტონის შეკლების შესახებ, რომელიც შრება ნორმალურ საექსპლუატაციო პირობებში, უკვე ამ კომპონენტების ჯამს მიეკუთვნება. სწორედ ამით აიხსნება ის, რომ ბეტონის შეკლების შესწავლისას, როგორც წესი, არ განიხილავენ მათ ცალ-ცალკე და ოპერირებენ მათი ერთობლივი ზემოქმედების ეფექტით [1,2,3].

ყველაზე მრავალრიცხოვანია ნაშრომები ბეტონის ტენიანი შეკლების შესწავლის თაობაზე, მაგრამ ამჟამადაც ეს საკითხი კვლავ განაგრძობს მკვლევრების ყურადღების მოზიდვას. ეს აიხსნება როგორც განსახილველი მოვლენის სირთულით, ისე შემკვრელების მახასიათებლების ცვლილებით (გაუმჯობესების მხარეს) და ბეტონების ახალი სახეობების გაჩენით. ამან, იმ გარემოებასთან შეთავსებით, რომ შეკლება დამოკიდებულია მრავალ

ფაქტორზე (შემკვრელებისა და ბეტონის შემადგენლობაზე, მომზადების ტექნოლოგიაზე და ექსპლუატაციის პირობებზე), გამოიწვია ის, რომ როგორც უკვე ზემოთ იქნა აღნიშნული, ჯერ კიდევ არ არსებობს საყოველთაო აღიარებული აზრი შეკლების დეფორმაციის განვითარების მექანიზმის თაობაზე. მკვლევრებს ჯერ კიდევ არ აქვს ერთიანი აზრი ამ ფაქტორების ბეტონის შეკლების სიდიდეზე ზეგავლენის შესახებაც.

ბეტონის შეკლების ფიზიკური თეორიებზე შეჩერების გარეშე, რომელთა სრული მიმოხილვა მოყვანილია ნაშრომში და ქვემოთ გაანალიზებულია მონაცემები ცემენტის ქვისა და ბეტონის შეკლების სხვადასხვა ფაქტორის ზეგავლენის შესახებ.

როგორც უკვე აღნიშნული იყო, ცემენტის ქვისა და ბეტონის შეკლების პროცესის განვითარებაზე გავლენას ახდენს მრავალი ფაქტორი. მათი ზემოქმედების ბუნება და ხასიათი ასევე დიდი მრავალფეროვნებით გამოირჩევა, თუმცა, თუ განსხვავების ნიშნად მივიღებთ იმ მიზეზს, რომელიც განაპირობებს ამა თუ იმ ფაქტორის მნიშვნელობას, მაშინ არსებული ლიტერატურული მონაცემების მიხედვით შეიძლება მათი დაყოფა შემდეგ ჯგუფებად.

ფაქტორები, რომლებიც დაკავშირებულია ცემენტის ქვისა და ბეტონის მომზადებისას გამოყენებული მასალების თვისებებთან და თანაფარდობებთან, როგორცაა, ცემენტის მინერალოგიური შემადგენლობა და მისი დაფქვის სიწმინდე, ცემენტის დანამატის სახეობა და მისი რაოდენობა, ქვიშის სახეობა და მარცვლოვანი შედგენილობა, ქანი (მინერალოგიური შედგენილობა), მარცვლოვანი შედგენილობა, მსხვილი შემკვების სიმტკიცე და დეფორმაციული თვისებები; წყალ-ცემენტის თანაფარდობა და ნარევის შედგენილობა.

ტექნოლოგიური ფაქტორები: ბეტონის ნარევის მომზადების და გამკვრივების ხერხები; გამყარების პირობები და ხანგრძლივობა.

ექსპლუატაციის პირობებთან დაკავშირებული ფაქტორები: გარემოს ტენიანობა და ტემპერატურა; ტენის გაცვლის პირობები კონსტრუქციების

ზედაპირზე (ზედაპირის დაცულობის ხარისხი, ქარის და პირდაპირი მზის სხივების მოხვედრის პირობები და სხვ.).

ჩამოთვლილ ფაქტორებს შეიძლება დაემატოს ფაქტორები, რომლებიც განპირობებულია კონსტრუქციის გეომეტრიით, მაგალითად, ზედაპირის მოდულით (თხელკედლიანი ან მასიური კონსტრუქციები); აორთქლებისადმი ღია ზედაპირების სხვადასხვა რაოდენობით (რაც გავლენას ახდენს ტენის მიგრაციაზე კონსტრუქციული ელემენტის სხეულში) და სხვ.

ამჟამად შეკლებაზე აღნიშნული ფაქტორების უკვე შესწავლილი ზეგავლენის დონე არა მარტო არ იძლევა მისი სიდიდის გაანგარიშებით განსასაზღვრავად დამოკიდებულების შემოთავაზების საშუალებას, არამედ არც ნაკლებად მნიშვნელოვანი ფაქტორების გამოსარიცხად ექსპერიმენტალურად დასაბუთებული რანჟირების წარმოების საშუალებასაც.

ქვემოთ მოყვანილია ბეტონის შეკლებაზე სხვადასხვა ფაქტორის ზეგავლენის შესწავლის შესახებ ნაშრომების მიმოხილვა. ამ დროს ხდება მხოლოდ იმ ნაშრომების რეფერირება, რომელნიც ჩვენი აზრით, შეიცავს სწორედ იმ ინფორმაციას, რომელიც აუცილებელია ცემენტის ქვის შეკლების შედეგად ბეტონში წარმოქმნილი ძაბვების განვითარების მექანიზმის კვლევისთვის, რაც საბოლოოდ ბზარების წარმოქმნას იწვევს.

საყოველთაოდ აღიარებული აზრის მიხედვით, ბეტონის ელემენტის შეკლების თავისუფალი განვითარებისას ძაბვების წარმოქმნის მიზეზს წარმოადგენს, როგორც ცემენტის ქვის არაერთგვაროვნება, ისე მთლიანად ბეტონისაც, ანუ შეკლების დამაბულობა ბეტონის სტრუქტურის მიკრო და მაკრო არაერთგვაროვნების შედეგს წარმოადგენს.

ცემენტის ქვის არაერთგვაროვნება განპირობებულია მასში სხვადასხვა ზომის არასრულად დეჰიდრატირებული კლინკერის ნაწილაკების (ცემენტის ფხვნილის პოლი-დისპერსიულობის შესაბამისად), აგრეთვე მინერალური დანამატების არსებობა; ჰიდრატული ახალ წარმონაქმნების ზომებში და აგებულებაში არსებული განსხვავება მათი კონტაქტის პირობებში; სხვადასხვა ზომის ფორის და მოხაზულობის არსებობა და სხვ.

ბეტონის მაკრო არაერთგვაროვნება განპირობებულია მსხვილი და წვრილი შემცველების არსებობით; სხვადასხვა ზომის, მოხაზულობის და მინერალოგიური შემადგენლობის მარცვლების არსებობით; მათი ფიზიკური და მექანიკური თვისებების განსხვავებით; მარცვლების ერთმანეთისგან განსხვავებული შეფუთვით და სხვ.

ცალკეული სტრუქტურული ელემენტების ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტების სიდიდეებში, დრეკადობის მახასიათებლებში და სორბციულ თვისებებში არსებული განსხვავებები იმას იწვევენ, რომ გარე ნივთიერების ან აირის შთანთქმა, ტემპერატურის ან ტენის შემცველობის ცვლილების ზეგავლენით სტრუქტურული ელემენტების დეფორმირება სხვადასხვანაირად ხდება. ცალკეული სტრუქტურული ელემენტების დეფორმაციის შეუთანხმებლობა მათი თავისუფალი დეფორმირების შეზღუდვის გამო, თავის მხრივ იწვევს ძაბვის წარმოქმნას ბეტონში. ცემენტის ქვაში და ბეტონში ძალისხმევის წარმოქმნის მიზეზს წარმოადგენენ, აგრეთვე გამყარების პროცესში მყოფ ცემენტის ქვაში მიმდინარე ფიზიკურ-ქიმიური პროცესები, რომლებსაც თან სდევს ახალწარმონაქმნების ფორმისა და ზომების ცვლილება, კრისტალიზაციის წნევის განვითარება და სხვ.

იმისათვის, რომ წარმოვიდგინოთ ძაბვის განვითარების დინამიკა ცემენტის ქვაში, აუცილებელია ცემენტის პასტის ჰიდრატაციებისა და გამყარების მექანიზმის ცოდნა. სამწუხაროდ, მოცემულ საკითხებზე ცალსახა პასუხის გაცემა ამჟამად არ არის შესაძლებელი. ცალკეულ ავტორებს სხვადასხვაგვარი წარმოდგენა აქვთ, როგორც ცემენტსა და წყალს შორის მიმდინარე ურთიერთქმედების მექანიზმზე, ისე ამ ურთიერთქმედების შედეგად წარმოქმნილი ცემენტის ქვის სტრუქტურის ხასიათზე.

ჩვენ არ შევხებით ცემენტის ფხვნილისა და წყლის ურთიერთქმედების საკითხს, რომელიც ცემენტის ქიმიის სპეციალისტების და ფიზიკოს-ქიმიკოსების კვლევების საგანს წარმოადგენს, ჩვენ ვეცდებით გადმოვცეთ ზოგიერთი შეხედულება ცემენტის ქვის სტრუქტურაზე.

ა. ე. შეიკინის თანახმად, გამყარების პროცესში ცემენტის ქვაში წარმოიქმნება ორი კომპონენტი - კრისტალური შეზრდა და გელი (რომელნიც წარმოადგენენ ბმულს წყალს სუბმიკროსკოპული კრისტალების ნარევეთან). კრისტალური შეზრდა თითქოსდა ახდენს გელის არმირებას, რომელიც ავსებს მის ჩონჩხს. კრისტალურ შეზრდას ახასიათებს მაღალი სიხისტე, მცირე დეფორმირებულობა, მაშინ, როდესაც გელი არის ბლანტი, ადვილად დეფორმირებადი, როგორც გარე ზემოქმედებისგან, ისე გამოშრობის დროს. განსხვავება დეფორმაციულ თვისებებში შიგა დაძაბულობების წარმოქმნის მიზეზს წარმოადგენს. მაგ, ცემენტის ქვის გაშრობის დროს, რომელიც შეკლების დეფორმაციას იწვევს, გელის მოცულობა მიისწრაფვის შემცირებისკენ. ამას ეწინააღმდეგება კრისტალური შეზრდა, შედეგად კრისტალური შეზრდა აღმოჩნდება შეკუმშული, ხოლო გელი - გაჭიმული.

თანაფარდობა ცემენტის ქვის სტრუქტურული კომპონენტების მოცულობებს შორის დამოკიდებულია ცემენტის კლინკერის მინერალოგიურ შედგენილობაზე.

შემდგომში ა. შეიკინმა უფრო დაწვრილებით ახსნა თავისი შეხედულება ცემენტის ქვის სტრუქტურაზე, აღნიშნა რა, რომ ლიტერატურაში ჰიდრატაციის ყველა პროდუქტს, ჩვეულებრივ „ცემენტის გელს“ უწოდებენ, თუმცა აღიარებენ ამ ტერმინის პირობითობას. ა. შეიკინი გვთავაზობს გამაგრების პროცესში მყოფ ცემენტის ქვაში შემდეგი სამი ძირითადი სტრუქტურული კომპონენტის გამოყოფას, როგორცაა: 1) კრისტალური შეზრდა, რომელიც წარმოიქმნა ერთმანეთთან შეზრდილი კალციუმის ჰიდრო-ალუმინატების, კალციუმის ჟანგის ჰიდრატის, აგრეთვე კალციუმის ჰიდრო სულფო ალუმინატისა და ჰიდრო-სულფო ფერიტის პატარა კრისტალებით; 2) ტობერმორიტის გელი, რომელშიც დისპერსიულ ფაზას წარმოადგენენ კალციუმის ჰიდროსილიკატების სუბმიკროკრისტალები და 3) ბოლომდე არა ჰიდრატირებული ცემენტის მარცვლები.

თვით ცემენტის ქვის სტრუქტურა კი წარმოდგენილია შემდეგი სახით: ან ჩვენ გვაქვს ერთიანი კრისტალური შეზრდა, რომელიც წარმოიქმნა ერთ მთელად გაერთიანებული მრავალი მიკროსკოპული კრისტალური შეზრდების შედუღაბებით, ანდა გვაქვს სტრუქტურა, როდესაც ცემენტის ქვაში არსებობს მიკროსკოპული კრისტალური შეზრდის ჩანართები, განცალკევებული ტობერმორიტის გელის მიერ. ამა თუ იმ ტიპის სტრუქტურის წარმოქმნაში დიდ როლს ასრულებს ცემენტის ქვის მინერალოგიური შემადგენლობა, აგრეთვე გამაგრების რეჟიმი.

პ. რეზინდერმა, რომელმაც დიდი წვლილი შეიტანა დისპერსიული სხეულების სტრუქტურების წარმოქმნის პროცესების კვლევაში, შესთავაზა ბუნებაში არსებული ყველა სტრუქტურის მრავალფეროვნების კლასიფიცირება სამ ძირითად სახეობად: კოაგულაციური, კონდენსაციური და კრისტალიზაციური. ქვისებრი სტრუქტურა, რომელიც ცემენტის გამაგრებისას წარმოიქმნება, მან კრისტალიზაციური ტიპის სტრუქტურებს მიაკუთვნა. ის წარმოიქმნება პირველადი კოაგულაციური სტრუქტურის ბაზაზე და, როგორც ეს აჩვენა ე. სეგალოვამ თანამშრომლებთან ერთად, მწიფე ცემენტის ქვის კრისტალიზაციურ სტრუქტურაში კონტაქტების ნაწილი კვლავ კოაგულაციური რჩება.

სტრუქტურაში პატარა კრისტალებს შორის ორი ტიპის კონტაქტების არსებობა, როგორცაა - ხისტი, წარმოქმნილი მათი უშუალო შეზრდის შედეგად და მოძრავი პატარა კრისტალებს შორის, რომლებიც განცალკევებულია კონტაქტის ადგილებში წყლის თხელი ფენებით, განაპირობებენ არათანაბარ განაწილებას ძალისხმევების სტრუქტურაში, რომლებიც წარმოიქმნება გარე მექანიკური დატვირთვის, ტემპერატურის ცვლილების, შეკლების და გაჯირჯვების ან გადაკრისტალიზაციის პროცესების ზემოქმედებით.

ცემენტის ქვაში კრისტალიზაციური და კოაგულაციური ტიპის კონტაქტების ფარდობითი შემცველობა დამოკიდებულია მთელ რიგ

ფაქტორზე და, პირველ რიგში, ცემენტის მინერალოგიურ შემადგენლობაზე და მისი გამყარების რეჟიმზე.

ცემენტის ქვაში კლინკერის ისეთი ნაწილაკების არსებობას, რომლებმაც რეაგირება არ მოახდინეს, არაერთგვაროვნების დამატებითი ელემენტი შემოაქვს, ვინაიდან თავისი ფიზიკური და მექანიკური თვისებების მიხედვით კლინკერული მინერალები ძლიერ განსხვავდება ჰიდრატაციის პროდუქტისგან. საჭიროა იმის აღნიშვნაც, რომ კლინკერის ნარჩენები, რომლებმაც რეაგირება არ მოახდინეს, ხანგრძლივი დროის განმავლობაში ჰიდრატაციის პროდუქტების მიღების წყაროებს წარმოადგენენ. მკურნალობენ რა მიკრობზარებს, აგრეთვე აძლიერებენ რა კონტაქტებს ახალი წარმონაქმნებით მათი შემოზრდის შედეგად, კლინკერის ნარჩენები ბეტონის სიმტკიცის ხანგრძლივად ზრდას უწყობენ ხელს. ამასთან ერთად ისინი ხელს უწყობენ ძალისხმევის განვითარებასაც კრისტალიზაციური წნევის წარმოქმნის ხარჯზე ისეთ ადგილებში, სადაც პატარა კრისტალების ზრდის თავისუფლება შეზღუდულია.

ბეტონში, მექანიკური დატვირთვის არარსებობისას ძაბვების წარმოქმნის განმაპირობებელ ერთერთ ფაქტორს, რომელიც ხშირად ბზარების გაჩენას იწვევს, ცემენტის ქვის მოცულობის ცვლილება, კერძოდ, მისი შეკლება წარმოადგენს.

ამიტომ, შეკლების მიმდინარეობის პროცესის და მასზე სხვადასხვა ფაქტორის ზეგავლენის ხასიათის შესწავლას ეთმობოდა და ეთმობა დიდი ყურადღება. ამასთან, შემთხვევების უმრავლესობაში, დასახული ჰქონდა რა პრაქტიკული მიზნებიც, კვლევის საგანს წარმოადგენდა არა ცემენტის ქვა, არამედ ბეტონი. მკვლევრების განსაკუთრებულ ყურადღებას ცემენტის მინერალოგიური შემადგენლობა და დაფქვის სიწმინდის ზეგავლენა, შემვსების, წყალ-ცემენტის თანაფარდობა, გამაგრების რეჟიმი, ნიმუშების ფორმების როლი და სხვა რამ იზიდავდა.

ერთ ერთი ყველაზე ადრეული ნაშრომი, რომელშიც მიმდინარეობდა ბეტონის შეკლების განვითარებაში ცემენტის მინერალოგიური შემადგენ-

ლობის როლის კვლევა, იყო გლენვილის ნაშრომი, რომელშიც ერთმანეთთან შედარებული იყო ბეტონი თიხამიწოვან და პორტლანდცემენტზე. ნაშრომში მოყვანილი მონაცემების მიხედვით თიხამიწოვანი ცემენტი გამაგრების 7 დღის განმავლობაში იძლეოდა თითქმის წელიწადნახევრიანი შეკლების 40%-ის შეკლებას, მაშინ, როდესაც ამ დროში პორტლანდცემენტის შეკლება არ აჭარბებდა წელიწადნახევრიანი შეკლების 8%-ს. სხვა თანაბარ პირობებში ასეთივე თანაფარდობაშია ბეტონების შეკლება, რომლებიც მომზადებულია ცემენტის აღნიშნულ სახეობებზე მონაცემების მიხედვით. შეკლების პროცესის სხვაგვარი მიმდინარეობა ბეტონში თიხამიწოვან ცემენტზე, ვიდრე პორტლანდ ცემენტზე აღნიშნულია გუმელის ნაშრომშიც. გლენვილის, ნ. მოჰჩიარსკის და გუმელის მონაცემებისგან განსხვავებით, ნევილი ამტკიცებს, რომ ცემენტის თვისებები უმნიშვნელო გავლენას ახდენენ ბეტონის შეკლებაზე. ასე მისი მონაცემებით ბეტონებს თიხამიწოვან ცემენტზე შეკლებას იგივე სიდიდეები აქვთ, როგორც ბეტონებს პორტლანდცემენტზე, მაგრამ მათში შეკლება დროში ძალიან სწრაფად ხდება. ცემენტის ქიმიური შედგენილობის ზეგავლენა შეკლებაზე ვლინდება მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როდესაც ცემენტის შედგენილობაში თაბაშირის არასაკმარისი რაოდენობაა. ეს უკანასკნელი ბეტონის შეკლების მატებას იწვევს. ინტერესს იწვევს მითითება შვანდეს კვლევაზე, რომელმაც ნევილის სიტყვებიდან გამომდინარე, აჩვენა, რომ სუფთა ცემენტის ქვის შეკლების უფრო მაღალი სიდიდე არ განაპირობებს ამ ცემენტზე მომზადებული ბეტონის უფრო მაღალ შეკლებას.

შეკლებაზე ცემენტის მინერალოგიური შემადგენლობის ზეგავლენის შესახებ ექსპერიმენტული მონაცემების განსხვავებულობაზე მეტყველებენ ნაშრომში მოყვანილი როუპერის, კარლსონის და ტეილორის კვლევების შედეგები. მაგ, როუპერის მონაცემებით, რომელმაც გამოიკვლია მინერალოგიური შედგენილობით, აგრეთვე დაფქვის სიწმინდით განსხვავებული 16 საქარხნო ცემენტი, განსხვავება დიდად მნიშვნელოვანი არ ყოფილა. კარლსონი კი აღნიშნავს, რომ განსხვავება შეკლებაში სხვა-

დასხვა სახის ცემენტების გამოყენების ხარჯზე შეიძლება 50%-მდე იზრდებოდეს. ცემენტის მინერალოგიურ შემადგენლობას დიდ მნიშვნელობას ანიჭებს ტეილორიც, რომელმაც შესთავაზა ფორმულა ბეტონის შეკლების განსაზღვრისთვის ცემენტში ოთხი ძირითადი კლინკერული მინერალის პროცენტულ შემცველობაზე დამოკიდებულებით.

შეხედულებებში არსებული განსხვავება შეიძლება შეგვხვდეს ცემენტის დაფქვის სიწმინდის შეკლებაზე ზეგავლენის თაობაზეც. მაგ, თუ ვ. სტოლნიკოვი და რ. ლიტვინოვა თვლიან, რომ კუთრი ზედაპირის ზრდა დიდ გავლენას ახდენს შეკლებაზე და მის მატებას იწვევს, მაშინ ო. გრაფის მონაცემებით დაფქვის სიწმინდე უმნიშვნელო ფაქტორია ბეტონის შეკლების განვითარებაში, რომელსაც ანგარიში არ უნდა გაეწიოს. თუმცა მ. გორდელი თავის ცდებში ადასტურებს, რომ შეკლება იზრდება დაფქვის სიწმინდის ზრდისას, მაგრამ გარკვეულ ზღვრამდე.

მონაცემების მიხედვით საშუალო მინერალოგიური შემადგენლობის პორტლანდცემენტის ქვის წრფივი შეკლების სიდიდე ჰაერზე ხანგრძლივად გამაგრებისას საშუალოდ შეადგენს 3 მმ-დან 4 მმ-მდე, ხოლო ამავე ცემენტზე მომზადებული მსხვილ შემვსებიანი ჩვეულებრივი ბეტონის შეკლება ანალოგიურ პირობებში და გამაგრების ვადებში საშუალოდ იცვლება 0,2 მმ-დან 0,35 მმ-მდე ფარგლებში ბეტონში ცემენტისა და გამყარების წყლის შემცველობაზე დამოკიდებულებით (წვრილმარცვლოვანი ბეტონის) ნარევის შეკლების სიდიდე საშუალოდ შეადგენს 0,6 მმ – 0,8 მმ-ს. ხოლო რ. ლერმიტის მონაცემებით, ცემენტის ქვის, დუდაბისა და ბეტონის შეკლების სიდიდის თანაფარდობა სხვა ყველა დანარჩენი თანაბარი პირობებისას დაახლოებით შეადგენს 5 : 2 : 1. ინგლიზის მონაცემებით ბეტონის შეკლება მასში ცემენტის ქვის რაოდენობის შემცველობის პირდაპირპროპორციულია. უდავოა, რომ შემვსები შემაკავებელ გავლენას ახდენს ბეტონის შეკლებაზე, თუმცა ამ ზეგავლენის ხარისხი არსებითად დამოკიდებულია არამარტო შემვსების რაოდენობაზე, არამედ მის სახეობაზეც. შემვსების სახით გამოყენებული ფორიანი ქვის

მასალები უფრო ადვილად დეფორმირდება, გარდა ამისა, თვითონ განიცდიან შეკლებას გაშრობისას, თუმცა მათი ტენიანი დეფორმაციები მნიშვნელოვნად ნაკლებია, ვიდრე ცემენტის ქვის.

დევისის, აგრეთვე გუმელის და რიუმის ცდებში შედარებული იყო სხვადასხვა მინერალოგიური შედგენილობის შემვსების ზეგავლენა ბეტონის ტენიან დეფორმაციებზე. გატარებული იქნა ზომები იმისათვის, რომ მსხვილი შემვსების გარდა ბეტონის სხვა პარამეტრები იდენტური ყოფილიყო. ამ ცდების შედეგებმა აჩვენეს შემვსების მინერალოგიის ძლიერი ზეგავლენა. მაგ, ბეტონს ქვიშაქვის შემვსებებზე არსებითად მეტი შეკლება ჰქონდა, ვიდრე ბეტონს გრანიტის, ბაზალტისა და მარმარილოს შემვსებებზე. ამავე დროს ნაშრომში დადგენილი იქნა, რომ კარბონატურ ღორღზე მომზადებული ბეტონების შეკლებითი დეფორმაციები უმნიშვნელოდ აჭარბებს გამძლე ქვიშაქვოვანი ქანების შემსებებზე მომზადებული ბეტონების შეკლებას და არ არის დამოკიდებული მათ სტრუქტურულ აგებულებაზე [4].

კარლსონის ცდებში ნაჩვენებია, რომ ბეტონის შეკლების სიდიდეზე გავლენას ახდენს, აგრეთვე შემვსების გრანულომეტრიული შედგენილობა და, კერძოდ, შემვსების ზედაპირის მოდული, ვინაიდან ის განაპირობებს ცემენტის გარსის ფარდობით ზომას, რომელიც გარს ერტყმის შემვსების მარცვალს.

ზემოხსენებულის საწინააღმდეგოდ ნევილი აღნიშნავს, რომ მსხვილი შემვსების სიდიდე და ფორმა თავისთავად არ ახდენს გავლენას ბეტონის შეკლებაზე, თუმცა, რაც უფრო მსხვილია შემვსები, მით უფრო თხელი შეიძლება იქნეს ბეტონის ნარევი. ხოლო ცემენტის შემცველობის შემცირება შეკლების სიდიდის შემცირებას იწვევს. მართლაც, შემვსების მაქსიმალური სიმსხვილის ზრდისას 6-დან 150 მმ-მდე ნევილის მონაცემებით შემვსების შემცველობა ნარევაში იზრდება 60-დან 80%-მდე, რაც შეკლების სიდიდის სამჯერ შემცირებას იწვევს. ზუსტად ასევე, ერთნაირი გამძლეობისას (წყალ-ცემენტის (წ/ც) ერთნაირი თანაფარდობის დროს) ბეტონის ნარევი დაბალი

ადვილად ჩაწყობადობით შეიცავს მეტ შემვსებს, ვიდრე ნარევი იმავე ზომების მქონე შემვსებით, მაგრამ უფრო მაღალი ადვილად ჩაწყობადობით. შემვსების შემცველობის მომატება თუნდაც მხოლოდ რამდენიმე პროცენტით არსებითად ამცირებს შეკლებას. მაგ, ნევილის მონაცემებით შემვსების რაოდენობის ზრდა ბეტონში 71-დან 74%-მდე წ/ც ერთნაირი თანაფარდობისას შეკლების დაახლოებით 20%-ით შემცირების საშუალებას იძლევა.

ძლიერ გავლენას ბეტონის შეკლებაზე ახდენენ შემვსების მარცვლების დრეკადი თვისებები, მაგალითად, ლითონის შემვსებების გამოყენება იწვევს ბეტონის შეკლების სიდიდის შემცირებას 1/3-ით, ხოლო კერამზიტის შემვსებების შემთხვევაში 1/3-ით ჩვეულებრივ შემვსებებზე მომზადებულ ბეტონთან შედარებით. შემვსების სახეობაზე შეკლების სიდიდის დამოკიდებულებაზე ძლიერი ზეგავლენა შეიძლება მოახდინოს თიხოვანი მინარევების შემცველობამ, რომელმაც დიდი მოცულობითი დეფორმაციებისადმი მიდრეკილების გამო ტენიანობის შეცვლისას შეიძლება გაზარდოს ბეტონის შეკლება 70%-ით.

ვინაიდან ბეტონის შეკლება გამოწვეულია ცემენტის ქვის შეკლებით (ფოროვანი შემვსებების გამოყენების შემთხვევაში გარკვეულწილად, აგრეთვე, მათი ტენიანი დეფორმაციებითაც), ხოლო ეს უკანასკნელი განისაზღვრება სტრუქტურების თავისებურებებით, კერძოდ, ცემენტის ქვის ფოროვანი სტრუქტურის აგებულების თავისებურებებით, მაშინ, ბუნებრივია, იბადება კითხვა შეკლებაზე წყალ-ცემენტის თანაფარდობის ზეგავლენის შესახებ. საინტერესოა, რომ ლიტერატურაში ამ საკითხზეც სხვადასხვაგვარი შეფასების ნახვაა შესაძლებელი.

რკინაბეტონის ხიდების მშენებლობის თაობაზე” თანახმად, 200 – 600 მარკის ბეტონების შეკლების, განსაზღვრა შემოთავაზებულია ფორმულის მეშვეობით, რომელიც შეიცავს მხოლოდ ერთ ცვლადს - წყლის ხარჯს, ანუ იგულისხმება, რომ აღნიშნული ბეტონების შემთხვევაში არც ცემენტის ხარჯი, არც წყალ-ცემენტის თანაფარდობის სიდიდე არ ახდენენ

ზეგავლენას ბეტონის შეკლების სიდიდეზე, ან თუ ახდენენ, ეს გავლენა უმნიშვნელოა.

ეს თვალსაზრისი, რომელიც შემუშავებული იქნა ე. შჩერბაკოვის ნაშრომებში, დაექვემდებარა კრიტიკას ს. ალექსანდროვსკის, ა. დესოვის და კ. კრასილნიკოვის მხრიდან. გუმელმა თანამშრომლებთან ერთად დაადგინა, რომ ბეტონის საბოლოო შეკლება წყალ-ცემენტის თანაფარდობის ცვლილებასთან ერთად მონოტონურად არ იცვლება, ანუ მას შეიძლება ადგილი ჰქონდეს მაშინ, როდესაც უფრო მეტ წ/ც-ს შეესაბამება ნაკლები შეკლება და პირიქით.

ნევილის აზრით წყლის შემცველობა ბეტონის ნარევი აისახება ბეტონის შეკლებაზე მხოლოდ შემვსების საერთო შემცველობის ცვლილების შედეგად. როუპერის მონაცემებით კი ცემენტის ქვის შეკლება წ/ც-ის თანაფარდობის პროპორციულად იცვლება. წ/ც-ის თანაფარდობის ზრდასთან ერთად იზრდებოდა ცემენტის ქვის შეკლება და ზ. წილოსანის ექსპერიმენტებშიც. თუმცა ხსნარების ნიმუშებზე ეს არ შეიმჩნეოდა. ცემენტის ხსნარისა და ბეტონის შეკლებაზე წყალ-ცემენტის თანაფარდობის შესამჩნევი ზეგავლენის შესახებ მიუთითებს ს. ვ. ალექსანდროვსკი.

ლიტერატურაში უკვე არსებული მონაცემების გაცნობა ცხადყოფს, რომ ბეტონის შეკლებაში წ/ც-ის თანაფარდობის როლის შეფასებისას და სხვადასხვა კვლევის შედეგების შეპირისპირებისას უნდა მოხდეს ცემენტის ქვისა და ბეტონის მკაფიო გამიჯვნა. პირველ შემთხვევაში შეიძლება შემჩნეული იქნეს მკაცრი დამოკიდებულება - წ/ც-ის თანაფარდობის მატებასთან ერთად იზრდება შეკლების სიდიდეც, თუმცა არაპროპორციულად. როგორც ნაჩვენებია ს. ალექსანდროვსკის, ზ. წილოსანის, ა. შეიკინის და სხვათა ნაშრომებში, ცემენტის ქვიდან მოცილებული მთელი წყალი არ იწვევს შეკლებას, არამედ მხოლოდ მისი გარკვეული ნაწილი. ბეტონის შემთხვევაში წყლის გავლენა შეკლებაზე ასევე მკაფიოდ არ ჩანს. სხვა ფაქტორების ზედდების გამო წ/ც-ის გავლენა ვლინდება საკმაოდ სუსტად. მეტიც, შეკლების სიდიდე წ/ც-ის თანაფარდობის ცვლილებისას ცალკეულ

ექსპერიმენტებში იცვლებოდა არა მონოტონურად (მაგალითად, გუმელისა და სხვათა ცდებში).

დიდ გავლენას ბეტონის შეკლებაზე ახდენს მისი ტემპერატურა და გარემოს ტენიანობა. ტემპერატურის მომატება ზრდის ბეტონის ტენის გადაცემის კოეფიციენტს და, მათსადამე, შრობის პროცესის ინტენსიფიცირებას ახდენს. სხეულის მოცულობაზე ტემპერატურის არათანაბარი განაწილებისას, როგორც ამას ადგილი აქვს ბეტონის გახურებისას ეკზოთერმიისგან, შრობის გარკვეულ აჩქარებას იწვევს, აგრეთვე, ტენის თერმოდინამიკის მოვლენაც. საბოლოოდ, ყოველივე ამას ბეტონის შეკლების ზრდა მოჰყვება. გარემოს ტემპერატურის მომატება იმავე მიმართულებით მოქმედებს, ვინაიდან ეს უკანასკნელი ჰაერის ფარდობითი ტენიანობის შემცირებას იწვევს. გარემოს ტენიანობის ბეტონის შეკლებაზე გავლენის შესასწავლად მიმართული ცდები ჩატარებული იქნა დევისის და მისი თანამშრომლების, დიუტონის, მამიიანის, დე ლა პენიას, როდრიგესის და სხვათა მიერ. მონაცემები გარემოს ტენიანობის ბეტონის შეკლებაზე გავლენის შესახებ შეიძლება მიღებული იქნეს ს. ალექსანდროვსკის ცდებიდანაც, რომლებიც ჩატარებული იყო რკინაბეტონის სამეცნიერო-კვლევით ინსტიტუტში ნიმუშების სხვადასხვა სერიაზე. ამ სამუშაოების მიხედვით შეიძლება გამოვიტანოთ ზოგადი დასკვნა, რომ ჰაერის ტენიანობის შემცირებასთან ერთად იზრდება ბეტონის ტენის კარგვა, რაც ბეტონის შეკლების ზღვრული სიდიდის ზრდას იწვევს.

შეიძლება ამგვარი მტკიცებულებებიც შეგვხვდეს. ნევილს მიაჩნია, რომ ბეტონის ხანგრძლივად შენახვა ტენიან პირობებში ანელებს შემდგომ შეკლებას, თუმცა გამაგრების ამგვარი რეჟიმის გავლენა შეკლების სიდიდეზე საკმაოდ მცირეა. მაგ, მხრივ, სუფთა ცემენტის ქვის ტენიან გარემოში ხანგრძლივად გამაგრებისას ცემენტის დიდი რაოდენობის ჰიდრატირება ხდება მთლიანად და შესაბამისად, მცირდება ცემენტის მარცვლების არა ჰიდრატირებული მარცვლების რაოდენობა, რომელნიც

ამცირებენ შეკლებას, ანუ ასეთი გამაგრება იწვევს ცემენტის ქვის შეკლების მომატებას.

და მაინც, გამაგრების რეჟიმი არსებით გავლენას ახდენს ბეტონის შეკლების სიდიდესა და მიმდინარეობის ხასიათზე. გაორთქვლამ 75 - 80°C ტემპერატურაზე გამოიწვია შეკლებითი დეფორმაციების შემცირება 28,5%-ით, ხოლო 95°C ტემპერატურაზე - 37,8%-ით. შეკლებითი დეფორმაციების განსაკუთრებით მკვეთრი შემცირება გამოიწვია ბეტონის ავტოკლავურმა დამუშავებამ. შეკლების დეფორმაციებმა შეადგინეს ნორმალური გამყარების ბეტონის შეკლების დეფორმაციების მხოლოდ 8 - 9%. სხვა მონაცემების მიხედვით გაორთქლილი ბეტონის შეკლება 15 - 40%-ით ნაკლები იყო, ვიდრე ბეტონის, რომელიც ჰაერზე მყარდება. ამასთან, რაც უფრო მაღალი იყო გაორთქლის ტემპერატურა, მით ნაკლები აღმოჩნდებოდა ხოლმე შემდგომი შეკლება. ბეტონს, ავტოკლავური დამუშავების გავლის შემდეგ, შეკლება უმცირდებოდა კიდევ უფრო მეტი ხარისხით - მისი სიდიდე დაახლოებით ორჯერ ნაკლები იყო ჰაერზე გამყარებული ბეტონის შეკლებაზე.

შეკლება დაკავშირებულია ბეტონიდან ტენის აორთქლებასთან, ხოლო ეს უკანასკნელი მიმდინარეობს მისი ზედაპირიდან და შეკლების სიდიდე, დამოკიდებულია ნიმუშის ფორმაზე და ზომებზე, რადგან წარმოადგენს მისი ზედაპირის მოდულის ფუნქციას. ნიმუშის ზომების ზეგავლენა მისი მოცულობის ცვლილებაზე განპირობებულია, აგრეთვე, ბეტონის კარბონიზაციის პროცესით.

მასშტაბური ფაქტორის გავლენა ბეტონის შეკლებაზე შესწავლილი და გამოკვლეული იქნა ს. ალექსანდროვსკის, ი. პროკოპოვიჩის, ი. ულიცკის, კარაპეტანის, ვაილის და სხვათა ნაშრომებში. თუმცაღა აღნიშნული მკვლევრების ცდებში ადგილი ჰქონდა არსებით განსხვავებას ბეტონების მახასიათებლებში და გარემოს რეჟიმებში, მათი მიხედვით დადგენილი იქნა ბეტონის შეკლებაზე ნიმუშის ზომების ზეგავლენის საკმაოდ ცხადად გამოხატული კანონზომიერება. ელემენტის ზომების ზრდასთან ერთად

ბეტონის შეკლება მცირდება. ნიმუშების შრობის ხასიათი ასევე არსებით გავლენას ახდენს შეკლების მიმდინარეობაზე და მის სიდიდეზე. ს. ალექსანდროვსკის სპეციალურად დადგმულ ცდებში ნაჩვენებია, რომ პრიზმული ფორმის ნიმუშების შეკლება, რომელნიც მხოლოდ გვერდითი ზედაპირიდან შრებოდნენ, ვითარდებოდა უფრო ინტენსიურად და მისი სიდიდე მეტია, ვიდრე ტყუპი ნიმუშების შემთხვევაში, რომლებიც მხოლოდ ტორსებიდან შრებოდნენ [5].

შეკლების პროცესი ნელა ვითარდება შრობადი ზედაპირიდან ბეტონის სიღრმისკენ. ერთი თვის შემდეგ ბეტონის გაშრობის სიღრმე 8 სმ-ს აღწევს, ხოლო 10 წლისთვის - 60 სმ-ს. სხვა მიზეზებთან ერთად ეს იმას იწვევს, რომ ბეტონის შეკლების პროცესი კი არ სრულდება რომელიმე გარკვეული დროისთვის, არამედ ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში მიმდინარეობს. ზოგი მკვლევარი აკვირდებოდა შეკლებას 28 წლის განმავლობაში. მართალია, რომ სხვადასხვა მიზეზით ბეტონის შეკლების დეფორმაციები დროში შედარებით სწრაფად მცირდება. მაგ, ნაშრომში აღნიშნულია, რომ 20 წლის განმავლობაში დაგროვილი შეკლების საერთო სიდიდიდან, პირველ ორ კვირაზე მოდის 14-დან 34%-მდე, სამ პირველ თვეზე - 40-დან 80%-მდე, პირველ წელზე - 66 – 85%. ბეტონის შეკლებაზე არსებით გავლენას ახდენს ასაკიც, შრობის დაწყების მომენტისთვის; მაგრამ შეკლების დეფორმაციები, რომელნიც ვითარდება ნორმალური გამყარების პირველ საათებში და დღეებშიც კი ნაკლებადაა შესწავლილი. შეიძლება აღვნიშნოთ ვეიგლერის სტატია, რომელშიც განხილულია საკითხები, დაკავშირებული დამაბულობებთან ახალ ბეტონში, მისი სიმტკიცის მატებასთან და ბეტონის დეფორმაციებთან. სტატიაში მოყვანილია დეფორმაციის მრუდი, სადაც დეფორმაცია იყოფა სამ არედ. პირველი 2,5 საათის განმავლობაში დეფორმაციის სიჩქარე დიდია (1-ლი ფაზა); გამყარების აჩქარებით ბეტონში საგრძნობად იმატებს ტემპერატურა, რაც აფერხებს წრფივ შეკლებას (მე-2 ფაზა); 3 საათის შემდეგ აღინიშნება ნიმუშების უმნიშვნელო წაგრძელება, რომელიც გრძელდება გამყარების 12 საათამდე, მიუხედავად იმისა, რომ უკვე 8 საათის შემდეგ ბეტონის

ტემპერატურა დაცემას იწყებს (მე-3 ფაზა). გამყარების 12 საათის შემდეგ წრფივი დეფორმაციები პრაქტიკულად არ არსებობს.

ნაშრომში მოკლედ არის მოთხრობილი ბეტონის შეკლებაზე ცემენტის სახეობის გავლენის შესახებ, აგრეთვე ინტერესს იწვევს ბეტონის შეკლების კავშირი გარემო პირობებთან. თავის კვლევებში ავტორები დიდ ყურადღებას უთმობენ დეფორმაციასა და ახალი ბეტონის სიმტკიცეს შორის დამოკიდებულების შესწავლას.

როგორც ბეტონის შეკლების შესწავლისადმი მიძღვნილი ნაშრომების აშკარად არასრული მიმოხილვიდან შეიძლება დავინახოთ, ამ საკითხით დაინტერესებული არიან როგორც ჩვენს ქვეყანაში, ისე მის ფარგლებს გარეთაც. არსებობს სხვადასხვა შეხედულება არამარტო ამ რთული მოვლენის ბუნებაზე, არამედ სხვადასხვა ფაქტორის ზეგავლენის ხასიათზეც. ექსპერიმენტული მონაცემების დაგროვება ხელს შეუწყობს ერთიანი შეხედულების გამომუშავებას, მით უმეტეს, თუ მათი ჩატარება ახალი მეთოდებით მოხდება, რომლებსაც უფრო დიდი შესაძლებლობები აქვს და შესასწავლი მოვლენის სხვადასხვა ასპექტს მოიცავენ.

როგორც უკვე აღნიშნული იყო, ბეტონის შეკლება მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ბეტონისა და რკინაბეტონის კონსტრუქციების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ჩამოყალიბებაში. შეკლება მათში ძალისხმევების განვითარების მიზეზი ხდება, რომელნიც რიგ შემთხვევებში ბზარების წარმოქმნას და, მაშასადამე, სიხისტის და ხანგამძლეობის შემცირებას, კონსტრუქციის შეღწევადობის ამაღლებას და სხვ. იწვევენ. ბეტონის შეკლებით განპირობებული არახელსაყრელი დაძაბული მდგომარეობა, შეიძლება არსებობდეს ჯერ კიდევ კონსტრუქციის ჩატვირთვამდე, მეტიც, როგორც შეკლების შედეგს, შეიძლება ადგილი ჰქონდეს მნიშვნელოვან ბზარწარმოქმნას.

ეს მტკიცება ყველაზე ცხადია არმირებული ელემენტების შემთხვევაში. ჯერ კიდევ წინა საუკუნის ბოლოს კოსინდერი სწავლობდა რა ცემენტის ქვის შეკლებას, აღმოაჩინა, რომ არმატურა ძლიერად აკავებს

ცემენტის ხსნარის შეკლების გამო მიმდინარე დეფორმაციებს. ყველა შემდგომმა კვლევამ იგივე დაადასტურა.

დიდი ხანია, რაც აღნიშნული იყო დაძაბულობების წარმოქმნის მიზეზი ბეტონის ელემენტებში, რომელთა კვეთის გასწვრივ არსებობს ტენიანობის გრადიენტი.

პირველ შემთხვევაში დაძაბული მდგომარეობის წარმოქმნა დაკავშირებულია ბეტონისა და ფოლადის არმატურის დრეკადობის მოდულების საგრძნობ განსხვავებასთან და მათ შორის შეჭიდულობის არსებობასთან. ბეტონი, როდესაც მცირდება ზომში, ცდილობს გაიყოს მასთან შეჭიდული არმატურა. თუმცა, ეს ამ უკანასკნელს თავისი სიხისტის წყალობით არ შეუძლია მიჰყვეს მას. შედეგად არმატურა იკუმშება, ბეტონში კი ვითარდება გამჭიმავი დაძაბულობები, რომლებსაც ხშირად ბზარების წარმოქმნამდე მივყავართ. ეს ბზარები შეიძლება მნიშვნელოვან საფრთხეს უქმნიდეს აგრესიულ გარემოში მომუშავე რკინაბეტონის კონსტრუქციების ხანგამძლეობას. კერძოდ, ისინი შეშფოთებას იწვევს სატრანსპორტო ნაგებობების სპეციალისტებს შორის.

ს. დმიტრიევს და ვ. გრემროზს მოჰყავთ ცხელ მშრალ ჰავაში რკინაბეტონის ნაგებობების შემოწმების მონაცემები და მათში ბზარების წარმოქმნის ხასიათი. ისინი აღნიშნავენ, რომ კონსტრუქციებში ბზარების გაჩენის გამომწვევ ძირითად მიზეზებს ბეტონის მომატებული შეკლება და ტემპერატურული ზემოქმედება წარმოადგენს. ავტორები ყურადღებას აქცევენ კონსტრუქციების გაანგარიშების აუცილებლობას შეკლებითი და ტემპერატურული ზემოქმედებების გათვალისწინებით [6].

შეკლებითი ბზარების წარმოქმნის წინააღმდეგ ბრძოლის ზომის სახით ხშირად რეკომენდებულია შეკლების საწინააღმდეგო არმირების გამოყენება. მაგ, ნაშრომში აღნიშნულია, რომ კონსტრუქციის ბზარწარმოქმნის შემცირებას ხელს უწყობს მათი გრძივი არმირების გაზრდა. ბეტონის შეკუმშვის (შემცირების) შემაფერხებელი არმატურა მისი შეკლების გამო იკუმშება; ბეტონი კი იჭიმება თანაბრად, მთელი არმატურის

სიგრძეზე. რაც უფრო მაღალია არმირების პროცენტი, მით მეტია ბეტონის გაჭიმულობა და ნაკლებია რკინაბეტონის ელემენტის დამოკლება. ი. ლუდკოვსკის და სხვ. მონაცემების მიხედვით, თუ არმირება შეადგენს 0,5%-ს, რკინაბეტონის ელემენტის დეფორმაცია მცირდება 15%-ით, თუ 1%-ს - 25 - 30%-ით, ხოლო თუ 5 - 8%-ით - რკინაბეტონის ელემენტი საერთოდ არ მოკლდება. ცხადია, რომ ასეთი ელემენტი დამაგრებულია ბოლოებით და მას არა აქვს თავისუფლად დეფორმირების შესაძლებლობა, მაშინ კონსტრუქციაში შეკლებისგან წარმოშობილი შინაგანი ძალები, შემცირდება. ამასთან, აუცილებლად უნდა აღინიშნოს, რომ ძალები განსახილველი ელემენტის ბეტონში ამ დროს არ შემცირდება. გარდა ამისა, არმირება, ზღუდავს რა შეკლების დეფორმაციის განვითარებას, შეიძლება შეზღუდოს ცალკეული ბზარების გახსნა, მაგრამ ვერ შეაფერხოს მათი წარმოქმნა საერთოდ. პირიქით, ისინი ჩნდება, თან დიდი ოდენობით, მაგრამ არმატურის დაცულობისთვის საშიშ ზომებამდე არ ვითარდება ვიდრე არ გაჩნდება მაპროვოცირებელი ფაქტორები.

შეკლებითი ძალისხმევის სიდიდის შესახებ შეიძლება ვიმსჯელოთ ნაშრომის მიხედვით, რომელშიც მოყვანილია მინაბლოკებში დამაბულობების სიდიდეების თეორიული განსაზღვრის შედეგები, რომელნიც წარმოიქმნება შემოკვრით ბეტონი და მინარკინაბეტონის პანელების ნაკერების ხსნარის შეკლების შედეგად. ნაშრომი აჩვენებს, რომ შეკუმშული მინაბლოკების დამაბულობები აჭარბებს საანგარიშო წინააღმდეგობას და შეიძლება მინაბლოკების რღვევა გამოიწვიოს.

არმირების გავლენა რკინაბეტონის ელემენტის ხანგრძლივი დეფორმირების ხასიათზე გამოკვლეული იყო ნაშრომებში. ექსპერიმენტალურად გამოკვლეული იყო შეკლებითი ბზარების როლი ცემენტ-ქვიშაქვის ხსნარისგან შესრულებული და ფოლადის ბადეებით არმირებული მოსაღუნი ნიმუშების ხანგრძლივი დეფორმაციების განვითარებაში. აღმოჩნდა, რომ შეკუმშულ ზონაში ან სიმეტრიულად არმირებული ნიმუშები, დატვირთვის ხანგრძლივი მოქმედებისას

განიცდიდნენ ჩალუნვას უფრო ინსტენსიურად მშრალ გარემოში, ვიდრე ტენიანში. ეს მოვლენა აიხსნება შეკლებითი ბზარების წარმოქმნით, რომლებიც ზუსტად აღმოჩენილი იყო მიკროსკოპის ქვეშ კოჭების ზედაპირის გამოკვლევის დროს. აღნიშნული ავტორების მიერვე ექსპერიმენტალურად იყო შეფასებული შიგა დამაბულობები, რომლებიც წარმოიქმნა არმირებულ ხსნარის ნიმუშებში. ისინი ნიმუშის კვეთის 1 სმ²-ზე 600 ნ-ის რიგის აღმოჩნდა. ხოლო ვალცის მონაცემების მიხედვით ბეტონის შეკლების შედეგად ფოლადის არმატურაში წარმოქმნილი მკუმშავი ძაბვები 420 ნ/სმ²-ს აღწევდეს.

აღნიშნულს უნდა დაემატოს, რომ მნიშვნელოვანი შინაგანი ძაბვები, რომლებსაც ბზარების წარმოქმნის უნარი აქვთ, შეიძლება განვითარდეს არა არმირებულ ბეტონშიც, განივ კვეთში ტენიანობის გრადიენტის არ არსებობის დროსაც. მაგ, ნაშრომში შლიფების მიკროსკოპული გამოკვლევისა და ბეტონის ხანგრძლივი დეფორმაციების მრუდების ანალიზის გზით მოხერხდა იმის ჩვენება, რომ ერთდროულად შეკლებისა და გარე დატვირთვის ზემოქმედების დროს ინტენსიურად ვითარდება ძაბვები, რომელნიც ცემენტ-ქვიშის მატრიცაში და შემვსების მარცვლებთან საკონტაქტო ზონებში მიკრობზარების წარმოქმნას იწვევენ. მიკრობზარები ჩნდებოდა, მართალია, მნიშვნელოვნად ნაკლები რაოდენობით და უფრო მცირე ზომის, მხოლოდ შეკლების მოქმედების დროსაც კი.

აღნიშნულიდან ჩანს, რომ კონკრეტულ პირობებზე დამოკიდებულიებით შეკლების შედეგები შეიძლება გამოვლინდეს სხვადასხვაგვარად: გამოიწვიოს დამატებითი ძაბვები კონსტრუქციების ელემენტებში, ბეტონში და ცალკეული კონსტრუქციული ელემენტების არმატურაში და თვით ბეტონის ცალკეულ კომპონენტებში. პრაქტიკაში ისინი, როგორც წესი, ვლინდება ერთდროულად და ედება ერთმანეთს. თითოეული მათგანის უპირატესი გამოვლინება დამოკიდებულია ნაგებობების აგებისას განსახორციელებელ კონსტრუქციულ და ტექნოლოგიურ ღონისძიებებზე.

ბზარების წარმოქმნაში გამოხატული ბეტონის შეკლების შედეგების სერიოზულობის გამო მათი კვლევით დაინტერესდნენ მკვლევრები.

ბზარების წარმოქმნის გამომწვევი ძალების ხასიათის გაანალიზებისას ი. ნილენდერმა დაყო ისინი მიკრო და მაკროსტრუქტურულ ძაბვებად.

მიკროსტრუქტურული ძაბვების ქვეშ იგულისხმება ძაბვები, რომელთა გაწონასწორება ხდება მოცულობებში, რომელნიც თანაზომადია უჯრედის "შემვსების მარცვალი - გარსი ცემენტის ქვისგან". ი. ნილენდერის შეხედულებით მაკრო სტრუქტურული ძაბვების ქვეშ უნდა გვესმოდეს საკუთარი ძაბვები, რომელთა გაწონასწორება ხდება კონსტრუქციის ცალკეული ელემენტების მოცულობებში. გ. გორჩაკოვის და სხვების ნაშრომებში ჩამოყალიბებულია ბეტონის სისტემის ბზარწარმოქმნის სამი ძირითადი პირობა: ბეტონის კომპონენტების დასკდომა გარე ძალებისა და გარემოს ზემოქმედებით; დასკდომა ბეტონის, როგორც უწყვეტი იზოტროპული სტრუქტურის გარემოსთან ურთიერთქმედების ძალების ზემოქმედების ქვეშ (მაკრო სტრუქტურული დაძაბულობები, ან 1-ლი რიგის დაძაბულობები) და დასკდომა ბეტონის კომპონენტების ურთიერთ-ქმედების ძალების ზეგავლენის ქვეშ (მიკრო სტრუქტურული ძაბვები, ან მეორე რიგის ძაბვები).

ძაბვები ვლინდება გარემოს ზემოქმედების ქვეშ ბეტონის კონგლომერატის კომპონენტების ერთმანეთთან ურთიერთქმედების შედეგად. მათ იწვევენ სხვადასხვა სახის დეფორმაციები და ისინი განპირობებულია ბეტონის კომპონენტების, აგრეთვე „შემვსები-ცემენტის ქვა“ საკონტაქტო ზონის სხვადასხვაგვარი ფიზიკურ-ქიმიური და დრეკადი თვისებებით (შემვსები ან ცემენტის ქვა). „გარემოს ზემოქმედების“ ქვეშ ავტორები გულისხმობენ ზემოქმედებას, რომელიც იწვევს ტენიანობის, ტემპერატურულ და მექანიკურ დეფორმაციებს [7].

ბეტონის კომპონენტების მახასიათებლების სხვადასხვაგვარობის გამო, რომელთაგან ყველაზე მნიშვნელოვნებს წარმოადგენენ, დრეკადობის მოდული, გაჭიმულობა, ტემპერატურული და ტენიანობის გაფართოების კოეფიციენტები, გარემოს ზემოქმედების ქვეშ ბეტონის სხეულში ჩნდება სიდიდის მიხედვით განსხვავებული და ცვლად ნიშნიანი დეფორმაციები, რაც საკუთარი დაძაბული მდგომარეობის გაჩენას და საბოლოოდ

დასკდომას იწვევს. განსაკუთრებული ადგილი ამგვარი ბზარწარმოქმნისას უკავიათ მიზეზებს, რომლებიც განპირობებულია ბეტონის სხვადასხვა სტრუქტურული მახასიათებლით (მაგალითად, შემვსების კონცენტრაცია, ცემენტის ქვის ჭეშმარიტი წყალ-ცემენტის თანაფარდობა, საკონტაქტო ზონის ხარისხი).

წინამდებარე ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს იმ მოვლენების კვლევა, რომლებიც მიკრო სტრუქტურული დამაბულობებისა და ბზარების წარმოქმნას იწვევენ, უფრო ზუსტად რომ ითქვას, ცემენტის ქვისა და ბეტონის დეფორმირების ხასიათის შესწავლა მისი ტენიანობის ცვლილებისას და მასზე სხვადასხვა ფაქტორების ზემოქმედების დროს. ამასთან დაკავშირებით ქვემოთ მოყვანილია იმ ნაშრომების მიმოხილვა, რომლებშიც იკვლევდნენ დეფორმაციებს და ძაბვებს „მიკრო სტრუქტურულ დონეზე“.

იმ ძაბვების გამოსაკვლევად, რომლებიც ბზარებისა და რღვევების წარმოქმნის მიზეზს წარმოადგენს, მკვლევრები მიმართავენ სხვადასხვა ხერხს, როგორცაა: მათემატიკური მოდელების, ანდა სხვადასხვა სახის ფიზიკური მოდელის კვლევა.

ბუნებრივია, რომ ბეტონის კონგლომერაციულ სტრუქტურაში მიმდინარე პროცესის მათემატიკური აღწერის მცდელობებისას, რომელიც ხასიათდება აგებულების როგორც მიკრო ისე მაკრო არაერთგვაროვნებით, აუცილებელია გამარტივების ამა თუ იმ ხარისხისადმი მიმართვა.

მაგ. გ. გორჩაკოვის ნაშრომში ბეტონის გამყარებისა და გაყინვისას წარმოქმნილი მიკრო სტრუქტურული დამაბულობების მათემატიკური ანალიზისას და ბეტონის შიგა დასკდომას და ცემენტის ქვის ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებს შორის ხარისხობრივი კავშირის დადგენისას, როგორცაა შეკლება, ზღვრული დეფორმაციულობა და სხვ., გამოყენებულია მოდელი ქვის (შემვსების მარცვლების) ორი ნაჭრისა და მათ შორის შემადუღაბებული (მაცემენტირებული) ფენის სახით.

აღნიშნულ ნაშრომში მსჯელობის არსი გულისხმობდა იმას, რომ შემადუღაბებელი (მაცემენტირებელი) ფენა არ დასკდება, თუ ფენის შუაში წარმოქმნილი უდიდესი წაგრძელება არ გადააჭარბებს მისი ზღვრული დეფორმაციის წაგრძელებას. ხენკი, სმიტი და სხვები იყენებდნენ ბეტონის სტრუქტურული უჯრედის მოდელს მუდმივი სისქის გარსით დაფარული სფერული მარცვლის სახით. გაშრობისას გარსი და მარცვალი იკუმშება. ცემენტის ქვისა და ბეტონის ხსნაროვანი კომპონენტის შეკლების დეფორმაცია მნიშვნელოვნად აჭარბებს შემავსებლის სახით გამოყენებული სამთო ქანების ფარდობით შეკუმშვას. მაშასადამე, ცემენტის გარსი კუმშავს მარცვალს და იწვევს მასში მომჭერ (რადიალურ) დაძაბულობებს, მაშინ, როდესაც თვით გარსში წარმოიქმნება გამჭიმავი ძაბვები, რომელნიც დამოკიდებულია მარცვლისა და გარსის დეფორმაციული უნარების განსხვავებულობაზე. სფერულ გარსში ნორმალური დაძაბულობების განსაზღვრისთვის გამოყენებულია ლიამეს გადაწყვეტილება შიგა თანაბრად განაწილებული წნევის ზემოქმედების ქვეშ მყოფი ღრუ სფეროსთვის. როგორც აღნიშნული იყო ნაშრომში, ამგვარი მოდელის გამოყენებას ის ნაკლი აქვს, რომ მასში შემვსებები განიხილება, როგორც იზოლირებული ბურთი, რომელიც გარშემორტყმულია ხსნარის სქელი გარსით. ასეთი სქემისას ხსნარის შეკლება იწვევს ბურთის რადიალურ შეკუმშვას და დაძაბულობებს, რომლებიც იწვევს ბზარების გაჩენას ხსნარში იმავე მიმართულებით. მიმართულებები კი, რომელნიც იწვევენ ბზარებს შემვსებისა და ხსნარის კონტაქტის გასწვრივ, მხედველობის არის მიღმა რჩება. ეს ეწინააღმდეგება ექსპერიმენტულ მონაცემებს.

რამდენადმე მეტად უახლოვდება ბეტონის რეალურ სტრუქტურას მოდელი, რომელიც განხილულია თომასის და ხსიუს ნაშრომში. ის შედგება შემვსების მრგვალი ხისტი (მყარი) დისკებისგან, რომლებიც განლაგებულია ოთხკუთხედის კუთხეებში და გარშემორტყმულია ხსნარით. ამოცანის ამოხსნისას მიღებულია, რომ ეს უკანასკნელი იცვლება მოცულობაში (ცემენტის და წყლის ურთიერთქმედების შედეგად) დატენიანების, შრობის,

ტემპერატურული ცვლილების და ა. შ. დროს. განიხილება ორი სახის ბზარები: 1) შემვსების გარშემო მყოფ ხსნართან კონტაქტის ზონაში (შეჭიდულობის ბზარები) და 2) თვით ხსნარში (ხსნარის ბზარები).

ნაშრომში განხილული მოდელი უფრო უახლოვდება ბეტონის რეალურ სტრუქტურას, ვიდრე წინანდელი, მაგრამ მაინც არ შეიძლება არ შევამჩნიოთ ის, რომ ის შედგება შემვსების მრგვალი ხისტი (მყარი) დისკებისგან, რომელნიც განლაგებულია ოთხკუთხედის სახით და გარშემორტყმულია ხსნარით. ანუ განიხილება ძლიერ იდეალიზებული რეგულარული სქემა. მაგრამ ის მაინც იძლევა ბეტონში წარმოქმნილი დაძაბულობების ველის შესახებ ხარისხიანი წარმოდგენის ქონის შესაძლებლობას.

სტრუქტურის მიხედვით ისეთ რთულ მასალაში, როგორცაა ბეტონი, დაძაბულობების ჭეშმარიტი ველის წარმოდგენა ანალიზური გზით შეუძლებლად მიგვაჩნია. ამასთან, საქმე არამარტო სტრუქტურის სირთულეში მდგომარეობს. ცემენტ-ქვიშაქვის მატრიცა, რომელშიც ჩართულია მსხვილი შემვსების მარცვლები, დეფორმაციას განიცდის უკვე ცემენტის მოხვეწისა და გამაგრების ადრეულ სტადიებზე. ამასთან იცვლება ცემენტ-ქვიშაქვის ნარევის დეფორმაციული მახასიათებლები. ბლანტი დენადი ნარევი თანდათან გადადის მყარის მაგვარ დრეკად-ბლანტ სხეულში და, მაშასადამე, ამ დროს განვითარებად დეფორმაციებსა და დაძაბულობებს შორის კავშირის ხასიათი მუდმივად იცვლება. ბუნებრივია, იცვლება სხეულის დრეკად-ბლანტი მახასიათებლებიც. თუ ნათქვამს დავამატებთ იმას, რომ დეფორმირების პროცესის ნელა მიმდინარეობისას, როგორც ამას ადგილი აქვს შეკლების დროს, დიდ როლს ასრულებს რელაქსაცია და ცოცვადობა, ცხადი გახდება ის დაუძლეველი სირთულეები, რომლებიც ჩნდება ამოცანის ზუსტი ანალიზური განხილვისას. მაგრამ ზემოთქმული მიუთითებს დაძაბული მდგომარეობის ექსპერიმენტალური გზით განსაზღვრის ამოცანის სირთულეზეც. აქედან გასაგები ხდება ინტერესი დაძაბულობების უშუალოდ გაზომვის მეთოდების ძიებისადმი,

იმ მეთოდების, რომელნიც ბეტონის გამყარების პროცესში დაძაბული მდგომარეობის ჩამოყალიბებაზე თვალყურის დევნების საშუალებას იძლევა. ამ მიზნისთვის ტენზომეტრული ხელსაწყოების გამოყენება პრაქტიკულად გამორიცხულია, ვინაიდან, როგორც უკვე ითქვა, ცემენტის ქვის გამაგრების პროცესში დაძაბულობის კავშირი დეფორმაციასთან უცნობია, აგრეთვე ნიმუშებში შესაბამისი ხელსაწყოების ჩაყენება ტექნიკურად რთული.

აღნიშნული ამოცანის ამოხსნის მიეზაში შემოთავაზებული იყო პოლარიზაციულ-ოპტიკური მეთოდები. მაგ, ტეპემ, ვ. სახაროვმა ბეტონის დაძაბული მდგომარეობის განსაზღვრისთვის გამოიყენეს ოპტიკურად მგრძნობიარე საფარები, რომელთა დაწებება ხდებოდა ამრეკლი ფენით კონსტრუქციის არეზე, სადაც იზომებოდა დეფორმაციები. კონსტრუქციაში გაჩენილი დეფორმაციები, გადაეცემოდა საფარს და ოპტიკურ ეფექტს იწვევდნენ, რომელიც არეკლილ სინათლეში იზომებოდა პოლარიზაციულ-ოპტიკური ხელსაწყოების მეშვეობით. ამ მეთოდით ავტორებმა მიიღეს გარე დატვირთვის ზემოქმედების ქვეშ მყოფი მძიმე და მსუბუქი ბეტონების დეფორმირებული მდგომარეობის სურათები. მაგრამ ზემოაღნიშნული მიზეზებით მათ მხოლოდ დაახლოებით შეუძლიათ ბეტონში საკუთარი დაძაბულობების განსაზღვრა. ასევე უნდა აღინიშნოს, რომ ოპტიკურად მგრძნობიარე საფარების დატანა შეიძლება მხოლოდ ბეტონის მშრალ ზედაპირზე, რაც სერიოზულ მინუსს წარმოადგენს შეკლებასთან დაკავშირებული მოვლენების კვლევისას, გარდა ამისა, ოპტიკურად მგრძნობიარე საფარებს არ გააჩნიათ საკმარისი მგრძნობელობა შედარებით მცირე შეკლებითი დეფორმაციების დასაფიქსირებლად. ამ ნაკლისგან თავისუფალია ოპტიკურად მგრძნობიარე გადამწოდი, რომელიც თავის ნაშრომში გამოიყენეს ა. დესოვმა და ვ. ჩერნიშევმა. ის ცემენტის მასალაში მისი მომზადების მომენტის შემდეგ განვითარებული ძალისხმევების განსაზღვრის საშუალებას იძლეოდა. ა. დესოვისა და ვ. ჩერნიშევის მიერ შესწავლილ მოდელს წარმოადგენდა ხსნარის რგოლი მასში ჩაყალიბებული

ოპტიკურად მგრძობიარე ფირფიტით ზომით 5x7,3 სმ და სისქით 0,4 სმ თუმცა უნდა აღინიშნოს, რომ აღნიშნული გადამწოდი არ ახდენს შემვსების ქცევის იმიტირებას, რადგანაც მის დრეკად მახასიათებლებს არ ეთმობოდა ყურადღება და, მაშასადამე, მოდელის ქცევა მთლიანობაში უნდა განსხვავდებოდეს რეალური ბეტონის ფრაგმენტის ქცევისაგან.

იგივე უნდა ითქვას ი. ახვერდოვის და ვ. სკოჩელიასის ნაშრომში. მათ მიერ შესწავლილი მოდელი წარმოადგენს ბრტყელ მართკუთხა ფირფიტას ოპტიკურად მგრძობიარე პლასტმასისგან (ეპოქსიდური ფისი საფუძველზე) სიმეტრიულად განლაგებული თითბრისა და ალუმინის დისკებით. დისკებით ხდებოდა შემვსების მარცვლების მოდელირება, ხოლო პლასტმასის ფირფიტით - ცემენტის ქვის მატრიცის. როგორც მოდელის დადებით მხარედ უნდა აღინიშნოს ის, რომ საშუალებას იძლეოდა გარკვეულწილად მოგვეხდინა „შემვსები-ხსნარის“ განყოფილების ზედაპირის ქცევის მოდელირება, კერძოდ, შემვსების შეჭიდება ხსნართან. მაგრამ აღნიშნული მოდელი ავტორების მიერ გამოიყენებოდა გარე მექანიკური დატვირთვით გამოწვეული დაძაბულობის შიგა ველის შესასწავლად. შეკლებითი დაძაბულობების შესასწავლად ის ნაკლებად გამოსადეგია.

ცემენტის ქვის შეკლებით გამოწვეული მიკრო სტრუქტურული საკუთარი ძაბვები გამოკვლეული იქნა ა. ორენტლიხერისა და ი. ნოვიკოვას ნაშრომში. ბეტონის მოდელი წარმოადგენდა 300 მმ დიამეტრის დისკს, რომელშიც მსხვილი შემვსების სახით ჩართული იყო გადამწოდები ეპოქსიდური პოლიმერის ედ-6-ის საფუძველზე ოპტიკურად მგრძობიარე მასალისაგან. გადამწოდები იყო 8 – 10 მმ სისქის რგოლების სახით, 30 მმ გარე დიამეტრით და ცვლადი შიგა დიამეტრით (26-დან 5 მმ-მდე). რგოლების ცვლადი სისქე მათი სიხისტის ცვლის საშუალებას იძლეოდა და ამით ავტორები შემვსებების დრეკადობის სხვადასხვა მოდულის იმიტირებას ახდენდნენ. დისკები, მათში ჩაყალიბებული რგოლებით, დამზადებული იყო ცემენტის ცომის ან ხსნარისაგან. მაშასადამე, არსებობდა შეკლებით ძალეებზე თვალყურის დევნების შესაძლებლობა. ამ მოდელის

დადებითი თვისებების სათანადოდ შეფასებასთან ერთად (შემვსების სხვადასხვა დამყოლობის იმიტაციის შესაძლებლობა, თვალყურის დევნება ძაღვების განვითარებაზე არა მოდელოზ მასალაში, არამედ ცემენტის ქვისგან ან ხსნარისგან დამზადებულ რეალურ ნიმუშში) არ შეიძლება არ აღვნიშნოთ, რომ შემოთავაზებული მოდელო არ იძლევა შესაძლებლობას გამოკვლეული იქნეს „შემვსები-ხსნარის“ განყოფილების ზედაპირის თავისებურებების ზეგავლენას, კერძოდ, შეჭიდულობის სიდიდის გავლენა, აგრეთვე მასურ-გაცვლითი მოვლენების გავლენა, რომლებსაც ადგილი აქვთ მატრიცას (ცემენტის ქვა, ხსნარი) და შემვსების მარცვლებს შორის. როგორც ქვემოთ იქნება ნაჩვენები, პროცესის ამ მხარეების იგნორირებამ შეიძლება შესამჩნევად დაამახინჯოს სურათი. აგრეთვე დავძენთ, რომ განხილულ მოდელოზე, ცხადია, არ არის შესაძლებელი მიკრო მოცულობებში შეკვლების დეფორმაციებზე შემვსების ფორმის გავლენის შესწავლა.

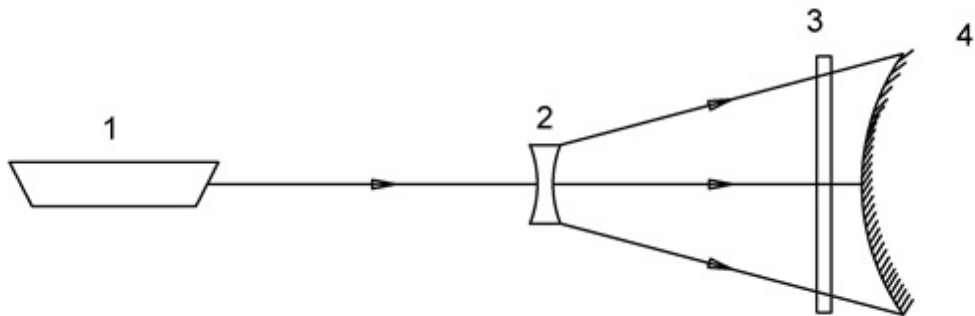
შესასწავლი ფიზიკური მოდელების ბეტონის რეალურ თვისებებთან მეტად მიახლოების მიზნით ფოტოდრეკადობაზე დაფუძნებული დრეკადობის კვლევის ოპტიკური მეთოდების ნაცვლად ჩვენ მიერ ჰოლოგრაფიის გამოყენების მცდელობა განხორციელდა. ჰოლოგრაფიაც, აგრეთვე, კვლევის ოპტიკურ მეთოდებს მიეკუთვნება, მაგრამ არ მოითხოვს მოდელოური (ფოტოდრეკადი) მასალების გამოყენებას და ამიტომ მისი გამოყენება საკმაოდ მიმზიდველი ჩანს. არსებობს იმ ვარაუდის საფუძველი, რომ ის უფრო მეტად დაგვაახლოვებს ბეტონში შეკვლებითი დეფორმაციების განვითარების რეალური სურათის გახსნასთან, თუმცა სირთულეები, რომლებიც დაკავშირებულია დეფორმაციების გაზომვიდან დაძაბულობებზე გადასვლასთან ამ შემთხვევაშიც არის შენარჩუნებული.

ყველა ამ მეთოდს გააჩნია, როგორც დადებითი, ისე უარყოფითი მხარეები, მეცნიერული, პრაქტიკული და ეკონომიკური თვალსაზრისით, ამიტომ მეთოდის გამოყენება ძირითადად დამოკიდებულია ამოცანაზე, რომელიც დგას მკვლევრის წინ და იმ (ინტელექტუალურ, ტექნიკურ და მატერიალურ) საშუალებებზე, რომელიც მას გააჩნია.

ჰოლოგრაფია - ეს არის ტალღების რეგისტრაციის და შემდგომი აღდგენის ხერხი, რომელიც 1948 წელს გამოიგონა დენის გაბორმა. ტალღები შეიძლება იყოს ნებისმიერი - სინათლის, რენტგენის, კორპუსკულარული, აკუსტიკური და ა. შ.

სიტყვა „ჰოლოგრაფია“ მომდინარეობს ბერძნული ენიდან, რაც ნიშნავს „მთელს“, „მთლიანს“. ამით ჰოლოგრაფიის გამომგონებელს უნდოდა ხაზი გაესვა იმისთვის, რომ ჰოლოგრაფიაში ხდება ტალღის შესახებ სრული - როგორც ამპლიტუდური, ისე ფაზური ინფორმაციის რეგისტრირება [8,9].

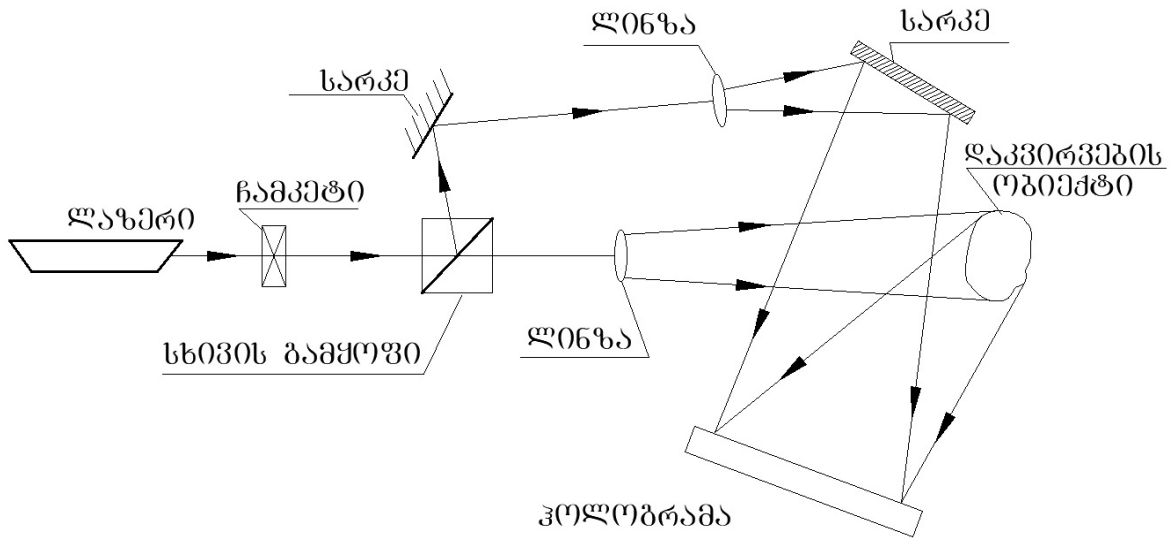
ჩვეულებრივ ფოტოგრაფიაში რეგისტრირდება მხოლოდ ამპლიტუდის განაწილება ობიექტის ორგანზომილებიან პროექციაში ფოტოსურათის სიბრტყეზე. ამიტომ, ფოტოსურათის სხვადასხვა კუთხის ქვეშ დათვალიერებისას ჩვენ ვერ ვიღებთ ახალ რაკურსებს, არ შეგვიძლია, მაგალითად, იმის დანახვა, თუ რა ხდება იმ საგნებს მიღმა, რომელნიც განთავსებული არის წინა პლანზე.



ნახ.1 შემხვედრ კონებში ჰოლოგრამების რეგისტრაციის სქემა (დენისიუკის სქემა) 1 - ლაზერი 2 - გამშლელი ლინზა 3 - ფოტოფირი 4 - ობიექტი

ხოლო ჰოლოგრამა აღადგენს არა საგნის ორგანზომილებიან გამოსახულებას, არამედ მის მიერ გაბნეული ტალღის ველს. ამ ტალღური ველის ფარგლებში დაკვირვების წერტილის გადაადგილებით ჩვენ დავინახავთ საგანს სხვადასხვა კუთხით და აღვიქვამთ მის მოცულობას და რეალურობას.

1962 წელს შემოთავაზებული იქნა ტალღური ფრონტების ჩაწერის კიდევ ორი მეთოდი. საბჭოთა მეცნიერმა ი. ნ. დენისიუკმა შესთავაზა შემხვედრ კონებში სქელფენიან ემულსიებზე ჰოლოგრამების ჩაწერის მეთოდი და ამერიკელმა მეცნიერებმა ე. ლეიტმა და ი. უპატნიექსმა ჰოლოგრაფირების ორსხივიანი სქემა (ნახ.1, 2).



ნახ.2 ლაზერი, ჩამკეტი, სარკე საყრდენი კონა, ლინზა, სარკე; სინათლის დამყოფი, საგნობრივი კონა, ლინზა, H ჰოლოგრამა.ჰოლოგრამების რეგისტრაციის ორსხივიანი სქემა.

ამჟამად ჰოლოგრაფია იმყოფება კვლევებისა და ცალკეული ტექნიკური სისტემების დაპროექტებაზე გადასვლის ეტაპზე იქ, სადაც შეინიშნება ჰოლოგრაფიის მიღწევების პრაქტიკაში დანერგვის შესაძლებლობების დანახვა. ასობით მკვლევარმა დაწვრილებით და ყოველმხრივ შეისწავლა ჰოლოგრაფიული პროცესი და ფაქტორები, რომლებიც გავლენას ახდენენ ჰოლოგრამის და მის მიერ აღდგენილი გამოსახულების ხარისხზე. დაინერგა თანამედროვე ნახევარგამტარიანი ლაზერები, მოხდა ჰოლოგრამების ავტომატური ფიქსაციის დანადგარები, ოპტიკურ და ციფრული მეთოდების გამოყენება, რაც გარკვეულ ხარჯებთან არის დაკავშირებული.

ჰოლოგრაფია გამოიყენება სხვადასხვა სხეულის დეფორმაციების გასაზომად, აეროდინამიკაში გაზის ნაკადების სტრუქტურის გამოსავლენად, ოპტიკურ სისტემებში დამახინჯებების აღმოსაფხვრელად, დიფრაქციული ცხაურების დასამზადებლად, რადიოლოკაციაში ობიექტების ოპტიკური გამოსახულებების მისაღებად, გამოთვლით ტექნიკაში სახეების ამოსაცნობად.

აკუსტიკური ჰოლოგრაფია შეიძლება გამოყენებული იქნეს წყალქვეშა კვლევებისთვისაც. დაბალი სიხშირის კარგად შეღწევადი ტალღების გამოყენებით შეიძლება მიწის წიაღის შესწავლა, მაგალითად, ნავთობის დაზვერვის მიზნით. სხვა დარგებში, როგორცაა მედიცინა და ბიოლოგია, გეოგრაფია ახალ, საოცრად საინტერესო გადაწყვეტებს სთავაზობს. ადამიანის სხეულის შიგა ორგანოების ჰოლოგრაფირება შეიძლება იმის წყალობით, რომ ქსოვილების აკუსტიკური გამჭვირვალეობა სხვადასხვაა. ავადმყოფისთვის ყოველგვარი საფრთხის შექმნის გარეშე შეიძლება ნებისმიერი ორგანოს გამოკვლევა სამ განზომილებაში.

არქეოლოგიაში აკუსტიკური ჰოლოგრაფია სამ განზომილებაში იმ ობიექტების გამოსახულებების აღდგენის შესაძლებლობას იძლევა, რომლებიც ჩაშენებულია დიდი მყარი მასების სისქეში ისე, რომ ამ ობიექტების დაზიანების შიში არ გქონდეთ.

ჰოლოგრაფიის სპეციფიკა იმაში მდგომარეობს, რომ ის წარმოადგენს გარკვეულ, გარე სამყაროს კვლევის საკმაოდ უნივერსალურ იარაღს.

1965 წელს დაწყებულმა შესაბამისმა ექსპერიმენტებმა საბოლოოდ მიიყვანეს ინტერფერომეტრიის ახალი დარგის - ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის შექმნამდე. მას შემდეგ ინტერფერომეტრია გახდა ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი მიმართულება ჰოლოგრაფიის გამოყენებისას.

ტალღა, რომელიც რეგისტრირებული იყო ჰოლოგრამაზე, შეიძლება შენახული და შემდგომში აღდგენილი და გამოყენებული იქნეს. ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის საგანს წარმოადგენს ინტერფერენციული სურათების მიღება და ინტერპრეტაცია, რომელნიც ჩნდება,

როდესაც ადრე არსებული და ჰოლოგრამაზე ჩაწერილი ტალღები შემდგომში აღდგება და ინტერფერირებს შესადარის ტალღასთან. ტალღების შენახვისა და შემდგომში აღდგენის შესაძლებლობა ჩვეულებრივ ოპტიკურ ინტერფერომეტრისთან შედარებით ჰოლოგრაფიული მეთოდის უნიკალურ უპირატესობას წარმოადგენს. ეს დეფორმაციას დაქვემდებარებული დიფუზიურად ამრეკლი ან გამფანტავი ზედაპირების ინტერფერომეტრიულად შედარების საშუალებას იძლევა ამავე ზედაპირებთან მათ საწყის მდგომარეობაში.

არსებობს ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის მეთოდის რამდენიმე ვარიანტი: ინტერფერომეტრია რეალურ დროში, ორი ექსპოზიციის ან დროითი ინტერვალის მეთოდი, დროში გასაშუალების მეთოდი და სტრობოსკოპიური მეთოდი. აღსანიშნავია შ. ყაყჩაშვილის წვლილი ჰოლოგრაფიის განვითარებაში, „პოლარიზაციული ჰოლოგრაფია“ აღმოჩენა N214, 1979 წ. (1-ლი აღმოჩენა საქართველოში).

კლასიკურისგან განსხვავებით ჰოლოგრაფიულ ინტერფერომეტრის აქვს მნიშვნელოვნად უფრო დიდი გამოყენების არე, რაც საშუალებას იძლევა, კერძოდ, გამოკვლეული იქნეს სამგანზომილებიანი დიფუზიურად ამრეკლავი ობიექტები, ჰიდრო და აეროდინამიური პროცესები, მოვლენები, რომლებიც მიმდინარეობს ნივთიერებებში დარტყმითი ტალღების გავრცელებისას, თერმოდინამიური მოვლენები ნაკადებში, მასისა და სითბოცვლის, ორთქლწარმოქმნის, გამჭვირვალე გარემოში აკუსტიკური ტალღების გავრცელების პროცესები და სხვა არა სტაციონარული პროცესები [10,11].

ჰოლოგრაფიულმა ინტერფერომეტრამ ფართო გავრცელება პოვა მრეწველობაში: ის მასალების და მზა ნაკეთობების საიმედოობის შემოწმების საშუალებას იძლევა მათი გაფუჭების გარეშე. ჰოლოგრამა იწერს სინათლის ტალღების ფაზას - მახასიათებელს, რომელიც იცვლება ობიექტის ნებისმიერი წანაცვლებისას. ამიტომ მისი დახმარებით შეიძლება

როგორც სტატიკური, ისე დინამიკური ზემოქმედების პირობებში წარმოქმნილი დეფორმაციების აღმოჩენა და რაოდენობრივად შეფასება.

დიფუზიურად ამრეკლავი ობიექტების გადაადგილებების გასაზომად აღნიშნული მეთოდი უფრო ეფექტური აღმოჩნდა, ვიდრე ისეთი მეთოდები, როგორიცაა მუარის ზოლების მეთოდი, პოლარიზაციულ-ოპტიკური მეთოდი და გაზომვები გადამწოდების სხვადასხვა ტიპების მეშვეობით.

ბოლო დროს მყარი ტანების მდგომარეობის შესწავლისას ჩვენ მიერ გამოყენებული ორექსპოზიციური ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდის ფართოდ გამოყენება დაიწყო. ამ მეთოდის არსი მდგომარეობს იმაში, რომ ფოტოგრაფიულ დამუშავებამდე ჰოლოგრამის ექსპონირება ხდება ორჯერ: ერთხელ, როდესაც ზედაპირი საწყის მდგომარეობაში იმყოფება, მეორედ, როდესაც ის დეფორმირებულია. ექსპონირებებისას გამოიყენება ერთნაირი საწყისი ტალღა. ამიტომ არ ჩნდება აღდგენილი ტალღის შეთავსების პრობლემა საგნიდან გამომავალ ტალღასთან. იმის შემდეგ, რაც ჰოლოგრამის ექსპონირება დასრულებულია, ჩვენ უკვე აღარ გვინტერესებს არც თვით საგანი, არც ჰოლოგრაფიული დანადგარის ოპტიკური ელემენტები. აღმდგენი კონის მიმართ წაყენებულია იგივე მოთხოვნები, რაც ნებისმიერი ჩვეულებრივი ჰოლოგრამის განათებისას. დამახინჯებები, რომლებიც განპირობებულია ემულსიის შეკლებით, ერთნაირია ორივე აღმდგენი ტალღისთვის და ამიტომ არ ახდენს გავლენას მათი ინტერფერენციის დროს წარმოქმნილი ზოლების განლაგებაზე [12,13].

შეკლების უწყვეტი პროცესის ფიქსაციისთვის მიღებული იქნა შემდეგი მეთოდიკა. პირველი ექსპონირების შემდეგ ჰოლოგრაფიული ფოტოფირფიტა რჩებოდა ჩარჩოში 1 საათით განმეორებითი გადაღებისთვის. მეორე ექსპონირების შემდეგ ფირფიტას იღებდნენ ჩარჩოდან და ამჟღავნებდნენ. გადაღების ციკლი მეორდებოდა. ფოტოფირფიტის შეცვლაზე დახარჯული დრო არ აჭარბებდა 5 წუთს, რომელთა განმავლობაშიც ფოტოფირფიტის მინის ფუძის საკუთარი დამაბულობების გათანაბრება ხდებოდა. ექსპონირების დრომ შეადგინა 1 წუთი. ამ დროში

ნიმუშებში არ შეიძლება მომხდარიყო არსებითი გადაადგილებები შეკლებისგან. ამან საშუალება მოგვცა ჩავვეთვალა, რომ ჩვენი პროცესი, რომელიც მიმდინარეობს პირველი ფირფიტის პირველი ექსპონირებიდან მეორე ფირფიტის მეორე ექსპონირებამდე შუალედში, ფიქსირდებოდა უწყვეტად. ფირფიტების ანალოგიურად ჩანაცვლების გაგრძელებით ჩვენ ვახდენდით საკვლევი ნიმუშის შეკლების პროცესის ჰოლოგრაფიულად რეგისტრირებას, საშუალოდ, 30 საათამდე დროის შუალედში.

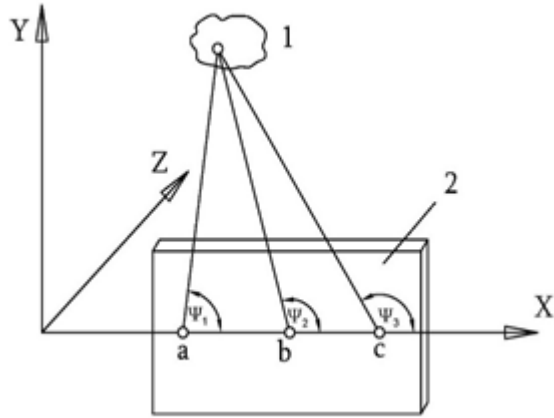
შეკლების დეფორმაციის კვლევისას მიღებული ინტერფეროგრამების მიხედვით შესაძლებელია ნიმუშის ზედაპირის ნებისმიერ წერტილში და ნებისმიერი მიმართულებით მიმდინარე გადაადგილებების რაოდენობრივი განსაზღვრა [14].

წინამდებარე ნაშრომში გადაადგილებების გაზომვა ხდება ორი მიმართულებით, ორი ღერძის x და y მიხედვით.

მიღებული ინტერფეროგრამების მიხედვით შეკლების კვლევისას შესაძლებელია ცემენტის ქვაში მიმდინარე გადაადგილებების რაოდენობრივი განსაზღვრა. შემოთავაზებულ სამუშაოში ეს გადაადგილებები განისაზღვრებოდა სამ წერტილში, შემვსების მარცვლის სიახლოვეს, ნიმუში-დისკის რადიუსის შუაში და იმ ფენაში, რომელიც ეკვრის ლითონის ფორმას.

ორჯერ ექსპონირებული ჰოლოგრამის განათება არამარტო საგნის მიერ დროის სხვადასხვა მომენტში გაფანტული ორი ტალღის ერთდროულად აღდგენის, არამედ, იდეალიზებულ პირობებში მათ ინტერფერენციაზე მეთვალყურეობის საშუალებას იძლევა.

წინამდებარე ნაშრომში გადაადგილებები იზომება ორი მიმართულებით, ორი ღერძის x და y გასწვრივ. დავუშვათ, რომ გარკვეული მიმართულებით არჩეულ A წერტილში (ნახ.3) აღინიშნება მუქი და ნათელი ზოლი. წყაროდან გამოსული და გადაადგილებულ წერტილზე გამავალი, დამკვირვებლისკენ მიმართული სინათლის სხივის კონით შექმნილი ფაზათა სხვაობა,



ნახ. 3 გადაადგილების საანგარიშო გეომეტრიული სქემა
 1 დაკვირვების ობიექტი. 2 ჰოლოგრამა.
 დაკვირვების პოზიციის - a, b, c წერტილები
 Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 - დაკვირვების კუთხეები

საწყის წერტილზე გამავალ კონასთან შედარების შედეგად ტოლი იქნება:

$$\delta_1 = 2\pi/\lambda [\Delta x (\cos \Psi_1 - \cos \varphi) + \Delta z (\sin \Psi_1 - \sin \varphi)], \quad (1).$$

სადაც λ - განათების გამოსხივების ტალღის სიგრძეა, φ - განათების კუთხეა; Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 - დაკვირვების კუთხეებია.

დაკვირვების კუთხის ცვლილებით, თუ განათების კუთხე მუდმივია, ვიღებთ ანალოგიურ გამოსახულებას:

$$\delta_2 = 2\pi/\lambda [\Delta x (\cos \Psi_2 - \cos \varphi) + \Delta z (\sin \Psi_2 - \sin \varphi)], \quad (2).$$

თუ დავთვლით დაკვირვების წერტილზე გამავალ K_{12} ზოლების რიცხვს დაკვირვების კუთხის ცვლილების პროცესში და ვისარგებლებთ ცნობილი დამოკიდებულებებით, მივიღებთ:

$$\delta_2 - \delta_1 = 2\pi/\lambda [\Delta x (\cos \Psi_2 - \cos \Psi_1) + \Delta z (\sin \Psi_2 - \sin \Psi_1)] = \pm 2\pi K_{12} \quad (3).$$

ან

$$\Delta x (\cos \Psi_2 - \cos \Psi_1) + \Delta z (\sin \Psi_2 - \sin \Psi_1) = \pm K_{12} \lambda \quad (4).$$

თუ მოვახდენთ კიდევ ერთ დაკვირვებას, მივიღებთ დამატებით განტოლებას, რაც საკმარისია გადაადგილების ორი კომპონენტის Δx და Δz განსაზღვრისათვის:

$$\Delta x (\cos \Psi_3 - \cos \Psi_2) + \Delta z (\sin \Psi_3 - \sin \Psi_2) = \pm K_{23} \lambda \quad (5).$$

სადაც K_{23} - ზოლების რიცხვია დაკვირვების მიმართულების ცვლილების დროს Ψ_2 -სა და Ψ_3 შორის.

გამოყენებული მეთოდი გადაადგილების განსაზღვრის საშუალებას იძლევა ნიშნის სიზუსტით. მოცემულ ნაშრომში გადაადგილების მიმართულება აპრიორი ცნობილია და შემდგომში განტოლებებში ნიშნებს არ დაწვევთ, რადგან ჩვენ გვინტერესებს გადაადგილების აბსოლუტური მნიშვნელობა. ამრიგად ვიღებთ განტოლებათა სისტემას:

$$\Delta x (\cos \Psi_2 - \cos \Psi_1) + \Delta z (\sin \Psi_2 - \sin \Psi_1) = \pm K_{12} \lambda .$$

$$\Delta x (\cos \Psi_3 - \cos \Psi_2) + \Delta z (\sin \Psi_3 - \sin \Psi_2) = \pm K_{23} \lambda \quad (6).$$

სისტემის ამოხსნა იწერება შემდეგი სახით:

$$\Delta x = D x / D, \quad (7)$$

$$\Delta z = D z / D,$$

$$D = \sin (\Psi_2 - \Psi_1) + \sin (\Psi_3 - \Psi_2) + \sin (\Psi_2 - \Psi_3) ,$$

$$D x = \lambda [K_{12} (\sin \Psi_3 - \sin \Psi_2) - K_{23} (\sin \Psi_2 - \sin \Psi_1)] , \quad (8)$$

$$D z = \lambda [K_{23} (\cos \Psi_2 - \cos \Psi_1) - K_{12} (\cos \Psi_3 - \cos \Psi_2)] ,$$

ცდომილებები $\delta(\Delta x)$ და $\delta(\Delta z)$, რომლებიც გაზომვის პროცესში წარმოიქმნენ

$$\delta(\Delta x) = \delta D x / D + D x \delta D / D^2 , \quad (9)$$

$$\delta(\Delta z) = \delta D z / D + D z \delta D / D^2 ,$$

ფარდობითი ცდომილების სიდიდეები Δx და Δz ტოლია:

$$\delta(\Delta x) / \Delta x = \delta D x / D x + \delta D / D , \quad (10)$$

$$\delta(\Delta z) / \Delta z = \delta D z / D z + \delta D / D ,$$

$$\delta D = 2 [|\sin (\Psi_2 - \Psi_1) / 2 * \sin (\Psi_2 + \Psi_3 - 2\Psi_1) / 2| + |\sin (\Psi_3 - \Psi_1) / 2 * \sin (\Psi_3 + \Psi_1 - 2\Psi_2) / 2| + |\sin (\Psi_1 - \Psi_2) / 2 * \sin (\Psi_1 + \Psi_2 - 2\Psi_3) / 2|] \delta \Psi , \quad (11)$$

$$\delta D x = \lambda [K_{23} |\cos \Psi_1| + (K_{12} + K_{23}) |\cos \Psi_2| + K_{12} |\cos \Psi_3|] \delta \Psi ,$$

$$\delta D z = \lambda [K_{23} |\sin \Psi_1| + (K_{12} + K_{23}) |\sin \Psi_2| + K_{12} |\sin \Psi_3|] \delta \Psi ,$$

$$\delta \Psi = \delta \Psi_{\text{დაბ3}} + \delta \Psi_{\text{დაწ}} + \delta \Psi_{\text{ზ.გ.დ.}} \quad (12)$$

აქ $\delta \Psi$ - დამკვირვებლის კუთხის განსაზღვრის ცდომილებაა, რომელიც წარმოადგენს ლიშის მიმართვის, ობიექტის მოცემულ წერტილზე მაჩვენებლის დაყენების და ზოლის ცენტრში დაყენების

ცდომილებების ჯამს. მიმართვის ცდომილება დამოკიდებულია კუთხის საზომი ხელსაწყოს ლიშის სიზუსტეზე და დამკვირვებლის პირად შეცდომაზე. ამისთვის გამოყენებული იყო თეოდოლიტის ლიშში, ცდომილებად მიღებული იყო $\delta\Psi_{\text{დამკ}} \pm 0,05$.

ობიექტის მოცემულ წერტილზე მაჩვენებლის დაყენების ცდომილება განისაზღვრებოდა მაჩვენებლის დაყენების ტესტური გაზომვებით. ამისთვის გამოიყენებოდა ვარვარების ნათურა რეიტერზე რეგულირებადი ინტენსიურობით, რომელიც რეკონსტრუირებული ჰოლოგრამული გამოსახულების საკვლევ წერტილში დგებოდა. ეს ცდომილება დადგენილი იყო ექსპერიმენტალურად და ტოლი აღმოჩნდა $\delta\Psi_{\text{დან}} = \pm 0,1$.

ზოლის ცენტრში დაყენების ცდომილება ასევე განსაზღვრულია ტესტური გაზომვებით და დაახლოებით ტოლია $\delta\Psi_{\text{ზ.ც.დ.}} = \pm 0,1$.

ამრიგად, გაზომვების ჯამური ცდომილება ტოლი გამოდის $\pm 0,25^\circ$. ამას ყველა Δx -ისთვის მივყავართ არა უმეტეს 6% ფარდობით ცდომილებამდე, ხოლო Δz -ისთვის 12%, რაც ასეთი ტიპის გაზომვებისთვის შეიძლება ჩაითვალოს საკმაოდ მაღალი ხარისხის სიზუსტედ.

ბოლო წლებში ბევრი რამ შეიქმნა ბეტონის და რკინაბეტონის თეორიის განვითარებისათვის, ასევე შესაბამისი ექსპერიმენტული მეთოდების დიდი მოცულობის დაგროვების მიმართულებით, რომელიც აშკარაა კიდევ დიდხანს ატარებს ფენომენოლოგიურ ხასიათს, ვინაიდან მშენებლობა ყოველთვის დაკავშირებულია ეკონომიკასთან, მშენებლობის ხანგრძლივობასთან და უსაფრთხოებასთან. მეცნიერული კვლევები მიმდინარეობს ახალი მასალების, ფორმების, ტექნოლოგიების და ბეტონის ოპტიმალური შედგენილობის დადგენაზე, აგრეთვე სხვადასხვა კომპოზიტური მასალების და კონსტრუქციული ელემენტების დამაბულ დეფორმირებული თვისებების გამოკვლევაზე უახლესი ურღვევი მეთოდების გამოყენებით. მათ შორის აღსანიშნავია ლაზერული ტექნიკის შესაძლებლობაც, კერძოდ ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდი, რომელიც იძლევა დეფორმაციის რეგისტრაციის ფართო დაკვირვების

შესაძლებლობას, იგი საგნების გამოსახულების მიღების პრინციპულად ახალი მეთოდია, რომელიც დამყარებულია სინათლის ინტერფერენციაზე (ნანოტექნოლოგიური მეთოდი).

ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამების ჩაწერის ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს მოთხოვნას წარმოადგენს ინტერფერენციული ველის მაღალი სტაბილურობა, ამიტომ აუცილებელია ოპტიკური დანადგარის, ვიბროდამცავი ოპტიკური მაგიდის მაქსიმალური სიხისტის უზრუნველყოფა ნახ.4 მაგიდის ვიბრაციაზე მგრძნობიარობა ძალზე მნიშვნელოვანია, რადგან (სინათლის) ინტერფერენციულ ზოლებს შორის დაშორება მიკრომეტრის რიგის სიდიდისაა. იმ შემთხვევაში, თუ ექსპერიმენტის მსვლელობის პერიოდში ცალკეული ელემენტები გადაადგილდება ისე, რომ ინტერფერენციული ზოლები გადაინაცვლებს მაქსიმუმიდან მინიმუმამდე და საპირისპიროდ, ჰოლოგრაფირებისას საერთოდ გაქრება ინტერფერენციული სტრუქტურა და რეგისტრირებული ობიექტი საერთოდ გაშავდება. აღნიშნული არასასურველ შედეგს გვაძლევს, ხოლო შუალედურ შემთხვევაში მცირდება ინტერფერენციული ზოლების კონტრასტი, რაც ფაზის ფლუქტუაციიდან გამომდინარეობს. ფლუქტუაცია შეიძლება იყოს გამოწვეული რამოდენიმე მიზეზით: ვიბროდამცავი მაგიდის არასაკმარისი სიხისტით, გარემო პირობების აკუსტიკური ან თბური ხასიათით (თბოგადაცემის უთანაბრობით).

ჰოლოგრაფიაში ლაბორატორიული სამუშაოების ჩატარების დროს ძირითადად გამოიყენება უწყვეტი მოქმედების ლაზერები, მათი სიმძლავრე ისეთია, რომ გამოსაკვლევი ობიექტის ჰოლოგრაფირებისას დროის დაყოვნება ერთიდან რამდენიმე წამს შეადგენს, ამიტომ აუცილებელია ვიბროდამცავი მაგიდის მაქსიმალური სიხისტის დაცვა.

ჰოლოგრაფიაში ექსპერიმენტის ჩასატარებლად გამოიყენება ოპტიკური და მექანიკური ელემენტების კომპლექტები, რომელთა საშუალებითაც შესაძლებელია ჰოლოგრამების ჩაწერის რეალიზაცია სხვადასხვა ოპტიკური სქემის საშუალებით, ასეთი სისტემის ძირითადი მექანიკური ელემენტია

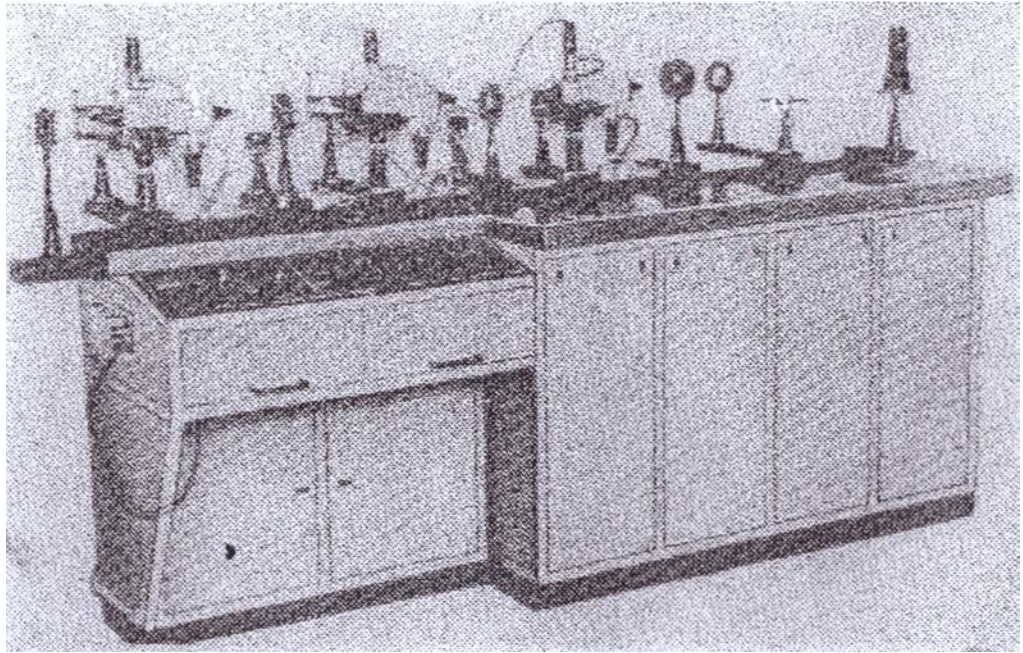
ოპტიკური მაგიდა, რომლის სიხისტის უზრუნველსაყოფად კომპაქტურ მძიმე ზედა ფილას ათავსებენ მასიურ ფუნდამენტზე. ამისათვის ძირითადად გამოიყენება ლითონის ან გრანიტის ფილები, რომელთა ზედაპირიც კარგად არის დამუშავებული (გახეხილი). ფილის სისქე ისე უნდა იყოს შერჩეული, რომ არ მოხდეს მისი ჩაღუნვა (მიკრონის დონეზე), რაც ასევე დამოკიდებულია ოპტიკური მაგიდის პარამეტრებზე [15].



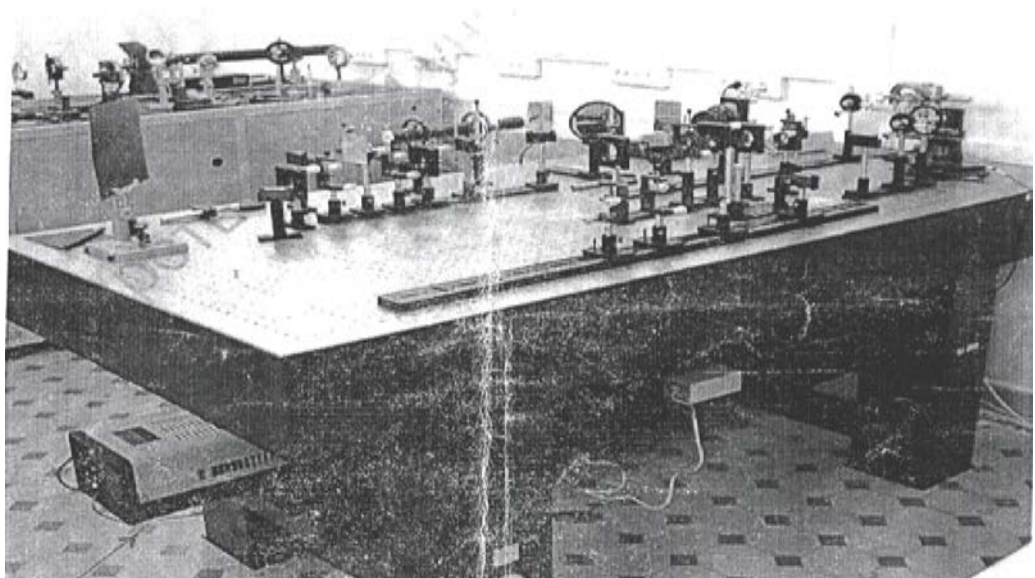
სურ.3 გადასატანი ანაკრები და სტანდარტული ვიბროდამცავი ოპტიკური მაგიდები (მწარმოებელი აშშ)

პრაქტიკაში გამოიყენება გადასატანი (ასაწყობი სურ.4,5,6) და სტაციონარული ვიბროდამცავი ჰოლოგრაფიული მაგიდები, რომელთა სიგრძე აღწევს 10 მეტრს. უნივერსალური ფიჭური კონსტრუქციის ბლოკები, რომელსაც ამზადებს (აშშ Newport Corporation) კომპანია, იძლევა სხვადასხვა ფორმის და კონფიგურაციის ოპტიკური მაგიდის აწყობის საშუალებას. ჰოლოგრაფიულ დანადგარზე ვიბრაციის არსებობა შეიძლება გაკონტროლდეს ოპტიკური ხელსაწყოს (OCK) საშუალებით, რომელიც განთავსებულია ოპტიკურ მაგიდაზე ჰოლოგრამის სიახლოვეს. ინტერფერენციული ზოლების სტრუქტურის უძრაობა კონტროლდება სამიზნეული სკალის საშუალებით იმ შემთხვევაში, თუ ინტერფერენციული ზოლების გადადგილდება, აუცილებელია გაკონტროლდეს სქემის ცალკეული ელემენტები მექანიკურ სტაბილურობაზე. ოპტიკური მაგიდის

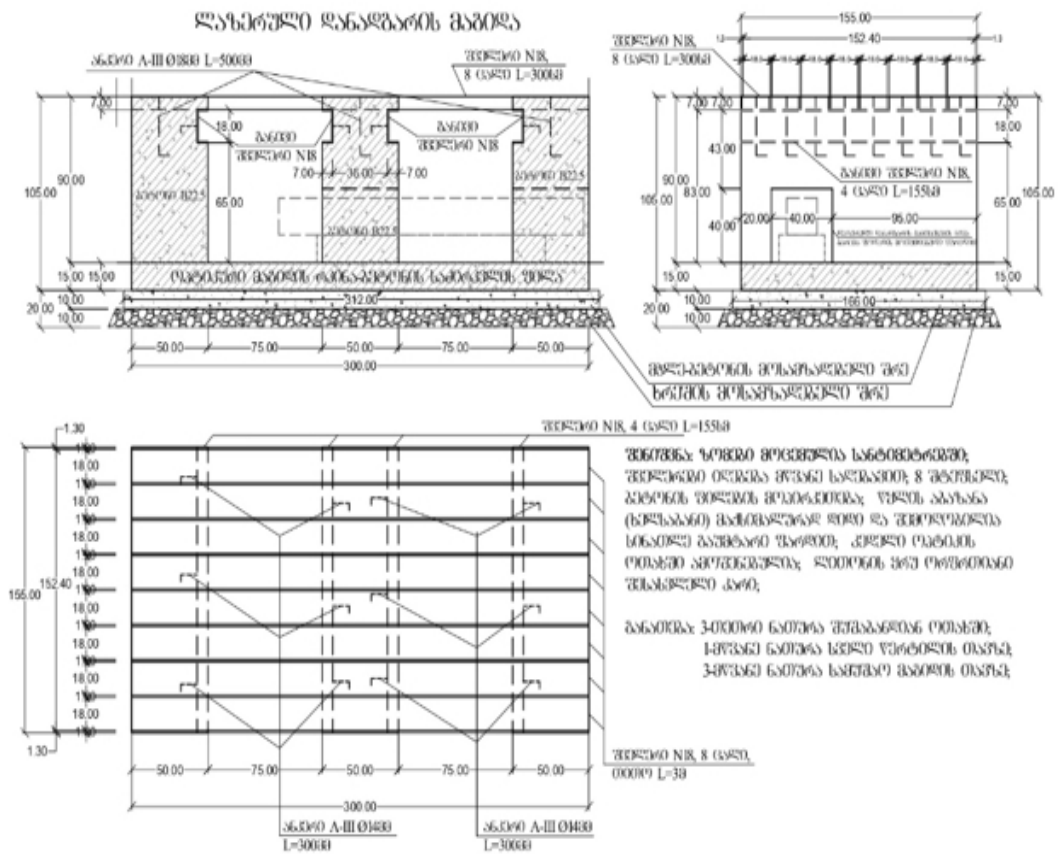
ვიზრაციის აღმოსაფხვრელად ხშირად გამოიყენება ავტომობილებსა და მრეწველობაში ცნობილი სხვადასხვა ტიპის ამორტიზატორი და პნევმატური ბალიში.



სურ.4 გადასატანი სტანდარტული ვიბროდამცავი ოპტიკური მაგიდა



სურ.5 გადასატანი სტანდარტული ვიბროდამცავი ოპტიკური მაგიდა, ოპტიკური და მექანიკური სამაგრებით (მწარმოებელი ლიეტუვა)



ნახ.4 საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, სამშენებლო ფაკულტეტის „ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის სასწავლო, სამეცნიერო-საკვლევო ლაბორატორია“ სტაციონალური ვიბროდამცავი ოპტიკური მაგიდის პროექტი

ნახ.4-ზე მოცემულია ვიბროდამცავი სტაციონალური ოპტიკური მაგიდის პროექტი, მისი მონტაჟი შესრულებულია ნაშრომის ავტორების მიერ (ზომებით 3X1,5მ, სიმაღლე 1 მ), იმისთვის რომ დაგვედგინა რამდენად არის უზრუნველყოფილი მაქსიმალური სიხისტე, ჩატარებული იყო შემდეგი სახის ექსპერიმენტი.

შესრულებული მოდელირება და ანალიზი ეფუძნება ვიბრაციის წყაროსა და მიმღებს შორის ვიბრაციის გავრცელების გაანგარიშების მეთოდს გრუნტის ჩამხოში თვისებებისა და შენობაში პირველადი გაძლიერებისა და მიღების მოვლენების გათვალისწინებით. ვიბრაციის წარმოშობა განსაზღვრულია ანალოგიური სამუშაოების ექსპერიმენტულ მონაცემთა ბაზების მიხედვით, რომლებიც ითვალისწინებს ყველა იმ

კატეგორიის მანქანა-დანადგარების გამოყენებას, რომლებიც საჭიროა დაგეგმილი სამუშაოს შესასრულებლად

DATA500 სურ.6 მოქნილი სისტემაა, რომელსაც კონფიგურაციის მრავალი ვარიანტი აქვს, რაც შესაძლებლობას ქმნის ერთდროულად გაეწიოს მონიტორინგი სხვადასხვა ტიპის სენსორებიდან მიღებულ ინფორმაციას.

სისტემა უზრუნველყოფს საუკეთესო პროგრამულ მხარდაჭერას კონსტრუქციულ ან სამოქალაქო მშენებლობაში, მრღვევი და არამრღვევი მეთოდით კვლევისთვის განკუთვნილი მოწყობილობებისთვის. იგი შეიძლება გამოყენებულ იქნას, როგორც ლაბორატორიაში ისე საველე სამუშაოებზე.



სურ. 6 -არხიანი DATA500PRO; 8-არხიანი DATA500

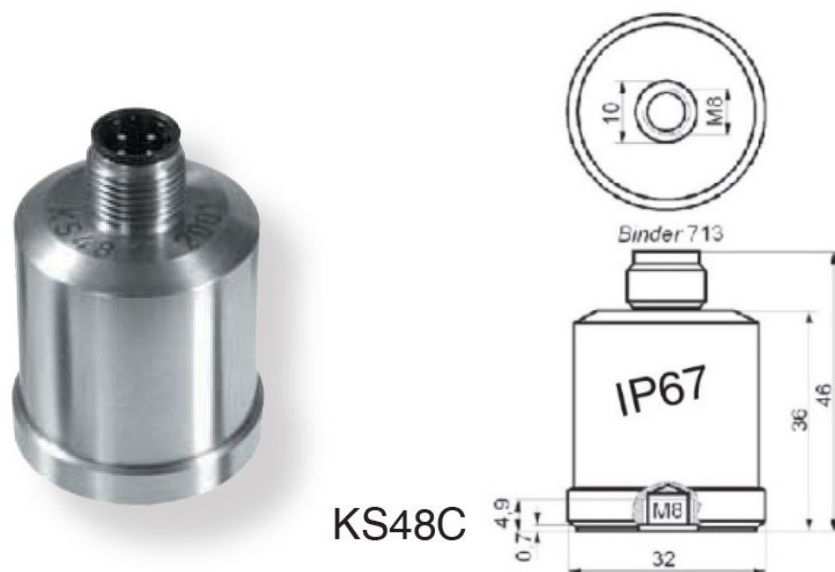
სისტემას აქვს 24 ბიტის ერთდროულად მიმუშავე 8 არხი. ყველა არხი დამოუკიდებელია, რაც სხვადასხვა სენსორზე ერთდროულად დაკვირ-

ვების საშუალებას იძლევა. ეს გარემოება, შესაბამისად, უზრუნველყოფს საკვლევი ობიექტის სრულყოფილ და დეტალურ მონიტორინგს.

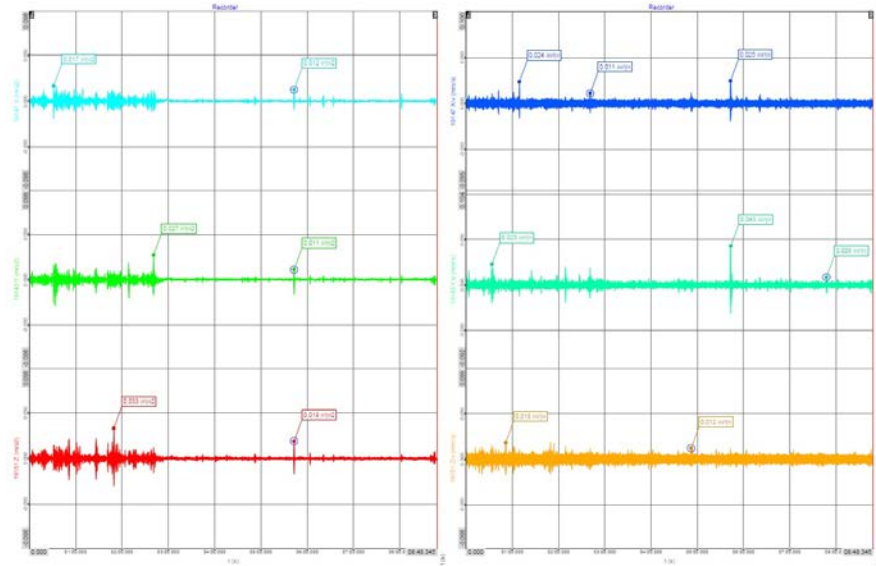
შესაძლებელია DATA 500-ის რამდენიმე სისტემა მუშაობდეს ერთდროულად, რაც ერთი მონიტორიდან ჯამში 32 არხზე, ანუ ამდენივე სენსორზე დაკვირვების საშუალებას იძლევა.

შესაბამისი დამაკავშირებლების და მოდულების გამოყენებით DATA500-ის სისტემა შესაძლებელია დაკავშირებული იქნას კომერციულ ბაზარზე არსებულ ნებისმიერ სენსორთან.

დაბალი სიხშირის ვიბრაციების სიგნალის მისაღებად გამოიყენება გადაადგილების გამზომი სურ.7, მაღალი მგრძობელობის, ერთდერძიანი, სეისმიკური სენსორი. ეს სენსორები პიოზოელექტრული ერთეულებია (PZT-keramika), რომლებიც შენობაზე ან კონსტრუქციაზე მუდმივი ვიბრაციის ზემოქმედების ანალიზისთვის ან პერმანენტული მონიტორინგისთვის იდეალურია, მისი მაღალი მგრძობიარობის გამო. პიეზოსისტემა უზრუნველყოფს სენსორის ულტრამგრძობელობას, მკვეთრ გამოსახულება და ხმაურის დაბალ დონეს. ასევე აღჭურვილია შემშლელი რეზონანსის ჩამხშობით.



სურ.7 გადამწოდი KS48C



სურ. 8 ვიბრაციის ამპლიტუდა

ჩატარებული კვლევის საფუძველზე დადგინდა სურ.8, რომ ვიბროდამცავი მაგიდის ვიბრაციები არის მინ 0,012 მმ/წმ - მაქს 0,042მმ/წმ, რაც სავსებით აკმაყოფილებს ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის მეთოდის სტანდარტით მოთხოვნილ მონაცემებს.

2. კვლევა, შედეგები და მათი განსჯა

2.1 ცემენტის ქვისა და ბეტონის შეკვრის ვადებისა და სტრუქტურის ჩამოყალიბების გამოკვლევა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის მეთოდით

ბეტონის საექსპლუატაციო თვისებებზე (სიმტკიცე, ბზარმდეგობა, ხანგამძლეობა, კოროზიამდეგობა) შემადგენელ კომპონენტებთან ერთად დიდ გავლენას ახდენს ბეტონის სტრუქტურა, რომელიც ხარისხობრივად ფორმირდება გამყარების ადრეულ სტადიაში. სტრუქტურის ფორმირება ძირითადად ხდება პერიოდში, რომელიც განისაზღვრება ნარევის სტრუქტურული სიმტკიცის მკვეთრი მომატებით მის სტაბილიზაციამდე.

ბეტონმცოდნეობაში დიდი ყურადღება ექცევა სტრუქტურის ჩამოყალიბების შესწავლას საწყის სტადიაში, როგორც თანამედროვე თვალთახედვით ამ საკითხის შესწავლამ დაგვანახა, ცხადი ხდება ბევრი ისეთი ფაქტორის გამოვლენა, როგორიცაა მინერალოგიური შემადგენლობა, წყალცემენტის ფარდობა, აგრეთვე გარეშე ფაქტორები (ტემპერატურა, ტენიანობა), რომელთა გავლენა დიდია ჩამოყალიბებული სხეულის ფიზიკურ თვისებებზე, სხეულის სტაბილურ სიმტკიცეზე.

თუ გავეცნობით აღნიშნული საკითხის შესწავლის თანამედროვე მდგომარეობას, ვნახავთ, რომ მეთოდები და საშუალებები მეტად ფართო და მრავალფეროვანია. ვფიქრობთ, ინტერესმოკლებული არ იქნება შევჩერებულიყავით ზოგიერთ მეთოდზე.

განსაკუთრებულ ყურადღებას იპყრობს კვლევის კომპლექსური მეთოდები, ვინაიდან ერთი მეთოდით მიღებული მონაცემები, რაც არ უნდა სრულყოფილად იქნას იგი მიჩნეული, არ არის საკმარისი მასალათა თვისებების შესასწავლად. კომპლექსური მეთოდი გამორიცხავს კვლევის ცალმხრივობას და იძლევა მიღებული რეზულტატების საიმედოობის გარანტიას.

მიუხედავად იმისა, რომ ფართოდ გამოიყენება აპარატული ფიზიკო-ქიმიური მეთოდები, ანალიზური ქიმიის კლასიკურ მეთოდებს დიდი ადგილი უჭირავს სილიკატური საშენი მასალების კვლევაში.

აქვე საჭიროა აღინიშნოს, რომ ცემენტის კლინკერის ქიმიური შემადგენლობის დასადგენად დიდ გამოყენებას პოულობს მიახლოებითი ექსპრეს მეთოდები, რომელიც ცემენტის წარმოებაში ფართოდ არის დანერგილი.

ანალიზის მეთოდები, რომლებიც დაფუძნებულია მასალათა ოპტიკური თვისებების განსაზღვრაზე, ოპტიკურ მეთოდებადაა ცნობილი, ასეთი მეთოდებია ოპტიკური და ელექტრონული მიკროსკოპის მეთოდები.

მკვლევართა დიდ ინტერესს წარმოადგენს თვისობრივად და რიცხობრივად შეფასდეს მასალების ქიმიური შემადგენლობა და მიღებული იქნას ინფორმაცია მასში ამა თუ იმ ქიმიური ელემენტის არსებობის შესახებ (რენტგენოსპექტრალური ანალიზით), დაადგინეს ნივთიერებათა ფაზური შემადგენლობა (რენტგენოფაზური ანალიზით), ატომურ-მოლეკულური აგებულება, ზომები, ორიენტაცია, შინაგანი დაძაბულობები და კრისტალური გარდაქმნები (რენტგენოსტრუქტურული ანალიზი), სისქე სიმკვრივე და შიგა დეფექტები (რენტგენული დეფექტოსკოპია).

ნივთიერებათა სხვადასხვა აგრეგატულ მდგომარეობაში ფართოდ გამოიყენება ელექტროფიზიკური და ელექტროქიმიური თვისებების ცვლაზე დაფუძნებული მეთოდები, როგორცაა კულონომეტრია, კონდუქტომეტრია.

ბევრ ფიზიკურ-ქიმიურ პროცესს თან სდევს ქიმიური ეფექტები. ფიზიკური ეფექტების შეცვლის დამოკიდებულებას ტემპერატურაზე სწავლობენ თერმული მეთოდების გამოყენებით.

თერმული ანალიზის გავრცელებული სახეებია დიფერენციალური თერმული ანალიზი კალორიმეტრია და სხვ.

სტრუქტურის შესწავლის კარგად დახვეწილი მეთოდებია ულტრაბგერითი მეთოდები, რომელთა დახმარებითაც საზღვრავენ საშენი

მასალების ტენიანობას, სწავლობენ ცემენტის ქვისა და ბეტონის შეკვრისა და გამყარების პროცესებს.

არსებობს კომპოზიტური მასალების შეკვრის ვადების განსაზღვრის ხერხი, სადაც შეკვრის პროცესის დასაწყისად მიჩნეულია საინვენტარო ჭურჭელში მოთავსებული ნარევის ზედაპირის ინტენსიური დაწევა, ხოლო დასასრულად კი ზედაპირის დაწევის სტაბილიზაცია. ზედაპირს აკვირდებიან მიკროსკოპით და საკმაოდ მაღალი სიზუსტით საზღვრავენ მის დაწევას. აღნიშნული ხერხის ნაკლი ის გახლავთ, რომ არ დაიმზირება სტრუქტურის ჩამოყალიბება სიღრმით ფენებში და მასალა, რომლის შეკვრის დროს საზღვრავენ, თავსდება დაბალი სიმძლავრის საინვენტარო ჭურჭელში. დაბალი სიმძლავრის გამო ტენის მცირედი აორთქლებაც კი გამოიწვევს ზედაპირის მკვეთრ დაწევას და შემოიტანს დიდ ცდომილებას შეკვრის ვადების შეფასებაში.

ჩვენი ყურადღება მიპყრობილი იქნა შეგვესწავლა საშენი მასალების, კერძოდ კი ცემენტის ქვისა და ბეტონის შეკვრის ვადების განსაზღვრისა და სტრუქტურის ჩამოყალიბებაზე დაკვირვების შესახებ არსებული მეთოდები.

მაღალი სიზუსტის დანადგარი და გამარტივებული კონსტრუქციის ხელსაწყო, რომელთა გამოყენებით ხორციელდება ცემენტის ქვის შეკვრის ვადების განსაზღვრა კარგად ცნობილი ვიკის მეთოდია, რომლის საშუალებითაც ხდება ცემენტის ცომში ჩარჭობის სიღრმის გაზომვა, ნემსით უფრო ნაკლები სიღრმით ჩავა ცომის სიღრმეში, რაც უფრო მეტია ამ უკანასკნელის მიერ შემენილი სიმტკიცე.

ჩვენს მიერ შემოთავაზებული ხერხი მიზნად ისახავს მაღალი სიზუსტით განისაზღვროს შეკვრის ვადები პუცოლანური პორტლანდცემენტი მარკით M 300-ის და პორტლანდცემენტი M 400-ის ცემენტზე მომზადებული ნარევისათვის, აგრეთვე მოხდეს სტრუქტურის ჩამოყალიბების პროცესის ვიზუალიზაცია.

ცემენტზე მომზადებულ ნარევთა გამყარების რთულ პროცესში ძირითადად დამახასიათებელია სამი სტადია.

თანამედროვე თვალთახედვით ცნობილია, რომ მოსამზადებელ პერიოდში, რომელიც მოდის ცემენტის წყალთან შერევის საწყის პერიოდზე. ქიმიური რეაქციის შედეგად ხსნარიდან ხდება ისეთი ახალწარმონაქმნების დალექვა, როგორცაა - კალციუმის ჰიდროჟანგი და ეტრინგიტი.

გარკვეული დროის შემდეგ ნარევი შედის ჰიდრატაციის მეორე სტადიაში, რომლისთვისაც დამახასიათებელია ძალიან მცირე ზომის კალციუმის კრისტალების წარმოქმნა, საწყისი მაღალდისპერსიული შემკვრელი ნივთიერება გადადის ხარისხობრივად სახეცვლილ მეტასტაბილურ სისტემაში.

მესამე სტადია პროცესისა ხასიათდება ხსნარიდან კალციუმის ჰიდროჟანგის გამოკრისტალებით ხდება ძირითადი სტრუქტურის ფორმირება. ნარევი შეიკვრება, რაც იწვევს სტრუქტურული სიმტკიცის მკვეთრ ცვლილებას.

სტრუქტურის ფორმირების პროცესი ხასიათდება მოცულობითი ცვლილებებით, გამყარების პირობებიდან (გამომდინარე) დამოკიდებულებით ნარევი შეიძლება გადიდდეს ან შემცირდეს მოცულობაში, უკანასკნელი უფრო ხშირად ხდება და ამ პროცესს შეკლება ჰქვია.

2.2 შეკვრის ვადების განსაზღვრა სხვადასხვა მარკის ცემენტებზე

ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით

ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის გამოყენებით შემოთავაზებული ხერხი მიზნად ისახავს მაღალი სიზუსტით განისაზღვროს შეკვრის ვადები ცემენტზე მომზადებული ნარევისთვის, აგრეთვე მოხდეს სტრუქტურის ჩამოყალიბების პროცესის ვიზუალიზაცია.

საკვლევი მასალა თავსდება მეტალის სტანდარტულ ფორმაში. (კუბები: 10X10X10 სმ, რომლის ერთი გვერდის ზედაპირი გამჭვირვალეა, ამ ზედაპირს აქვს შუშის კედელი ამრეკლი ვერტიკალური ზოლით.

ფორმა თავსდება ორექსპოზიციან ოპტიკურ სქემაში, რომელიც ჰოლოგრაფიული კვლევებისათვის სპეციალურ ჰოლოგრაფიულ დანადგარებზეა აწყობილი (ლაზერის ტალღის სიგრძე 633 ნ.მ.).

ზემოთ აღწერილი მეთოდიკით შესწავლილ იქნა იმ შედგენილობის ცემენტის ნარევის გამყარების პროცესი, რომელიც შემდეგ გამოყენებული იქნა პროექტით გათვალისწინებულ ექსპერიმენტულ ნიმუშებში.

ცვალებად ფაქტორად მიღებულ იქნა წყალ-ცემენტის ფარდობა, რომელიც აღებული იქნა 0.2, 0.3 და 0.4-ის ტოლად. პუცოლანური პორტლანდცემენტი მარკით M 300-ის და პორტლანდცემენტი M 400-ის ცემენტზე მომზადებული ნარევი წყალთან შეერთებისთანავე თავსდება ფორმაში ზომით 10X10X10 სმ.

ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამების მიღება ხდებოდა შემდეგი მეთოდიკით. მას შემდეგ, რაც ფორმა ნარევით თავსდებოდა ჰოლოგრაფიულ სქემაში, ვახდენდით მის პირველ ექსპონირებას, გარკვეული დროის გავლის შემდეგ იმავე ფოტოფირზე ხდებოდა მეორე ექსპონირება ცხრილი 1, რის შემდეგაც ფოტოფირი იცვლებოდა და გრძელდებოდა ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამების მიღება.

ცხრილი 1

დროის ინტერვალი ექსპონირებებს შორის

ნიმუშების ხნოვანება, სთ	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
დრო ექსპონირებებს შორის, წთ	5	6	8	11	14	16	19	23	26	30

ცხრ.2-ში მოცემულია აღწერილი მეთოდიკით განსაზღვრული M-300 – M-400 მარკის ცემენტის ნარევისა და ბეტონის შეკვრის ვადები:

ცემენტის ნარევისა და ბეტონის შეკვრის ვადები

შეკვრის ვადები \ წ/ც	0,2	0,3	0,4	ბეტონი M – 400, წ/ც - 0,46
შეკვრის დასაწყისი წთ	75	110	150	85
შეკვრის დასასრული წთ	410	600	660	540

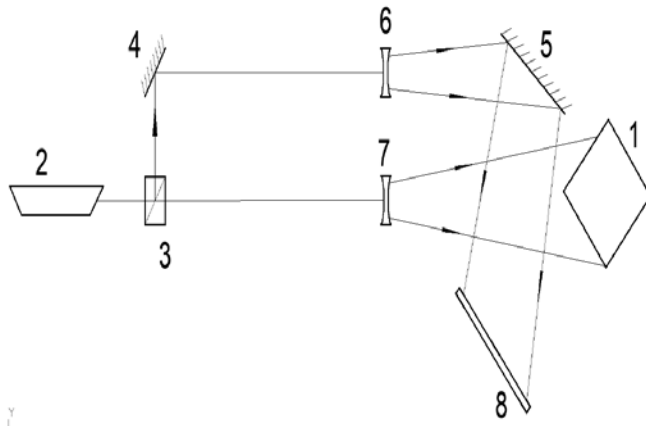
შეკვრის ვადები \ წ/ც	0,2	0,3	0,4	ბეტონი M – 300, წ/ც - 0,38
შეკვრის დასაწყისი წთ	60	90	120	105
შეკვრის დასასრული წთ	270	495	540	505

როგორც ცხრილებიდან ჩანს შეკვრის პროცესის დასაწყისი და მისი მიმდინარეობა დიდად არის დამოკიდებული წყალ-ცემენტის ფარდობაზე და ცემენტის მარკაზე. ბეტონისა და დაბალცემენტიანი ნარევის ფარდობის (0,2) ცემენტის ნარევის შეკვრის ვადების იდენტურობა იმას მიუთითებს, რომ ბეტონის ნარევისათვის ჭეშმარიტი წყალცემენტის ფარდობა გაცილებით ნაკლებია, რაც გამოწვეულია მსხვილი და წვრილი შემვსების არსებობით, მათი წყალმოთხოვნილებით.

ამის გარდა მოცემულმა ხერხმა საშუალება მოგვცა შეგვესწავლა გამყარების პროცესი ნიმუშის ვერტიკალურ ჭრილში ნახ.5 მოცემულია სურ. 9, 10, 11 ნიმუშის ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამების ფოტოები. ინტერფეროგრამებზე ნათლად ჩანს, რომ ნარევის შეკვრა იწყება ქვედა ფენიდან და დროთა განმავლობაში წაინაცვლებს მაღლივი ფენებისაკენ, ამაზე მეტყველებს ინტერფერენციული ზოლები ფირფიტის გამჭვირვალე ნაწილში. ამ ფაქტის ახსნა შეიძლება იმით, რომ თავისუფალი წყალი, რომელიც არ შედის რეაქციაში ცემენტთან ვიბროდაყალიბების შედეგად

ამოდის ნიმუშის ზედა ფენებში და შესაბამისად წყალცემენტის ფარდობა ნაკლებია ნიმუშის ქვედა ფენაში, რაც იწვევს სწორედ ამ ფენის შეკვრის პერიოდის უფრო სწრაფ დაწყებას. შეკვრის ვადები ასევე განსხვავებულია სხვადასხვა მარკის ცემენტის ნარევებში

ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამების გაშიფრვამ საშუალება მოგვცა რიცხობრივად შეგვეფასებინა შეკვრის პროცესი. ინტერფეროგრამების გაშიფრვა ხდებოდა ალექსანდროვსკისა და ბონჩ-ბრუევიჩის ცნობილი მეთოდიკით.

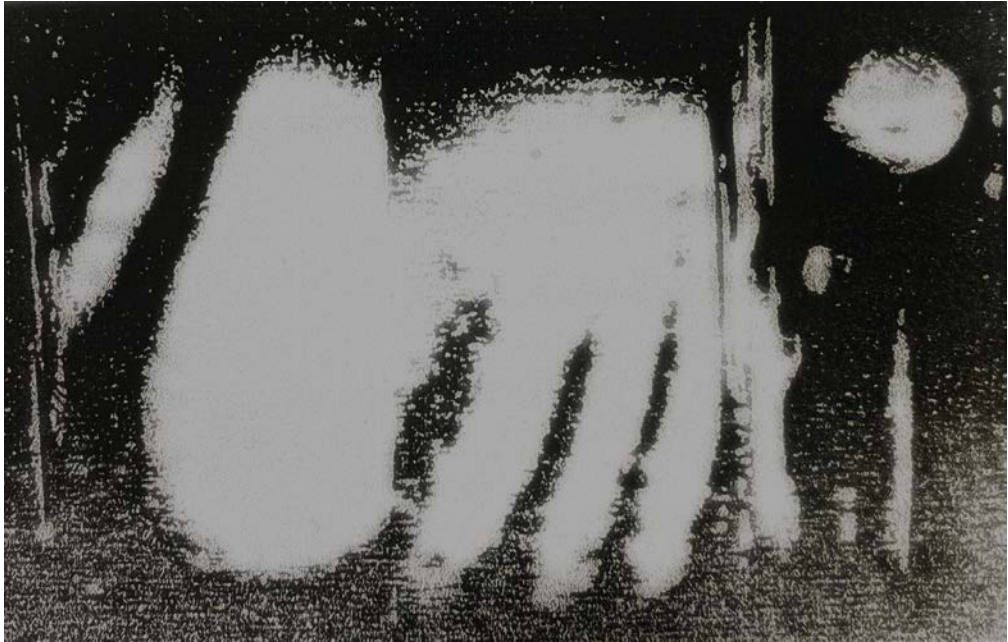


ნახ. 5 ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამების ჩაწერის ორსხივიანი სქემა

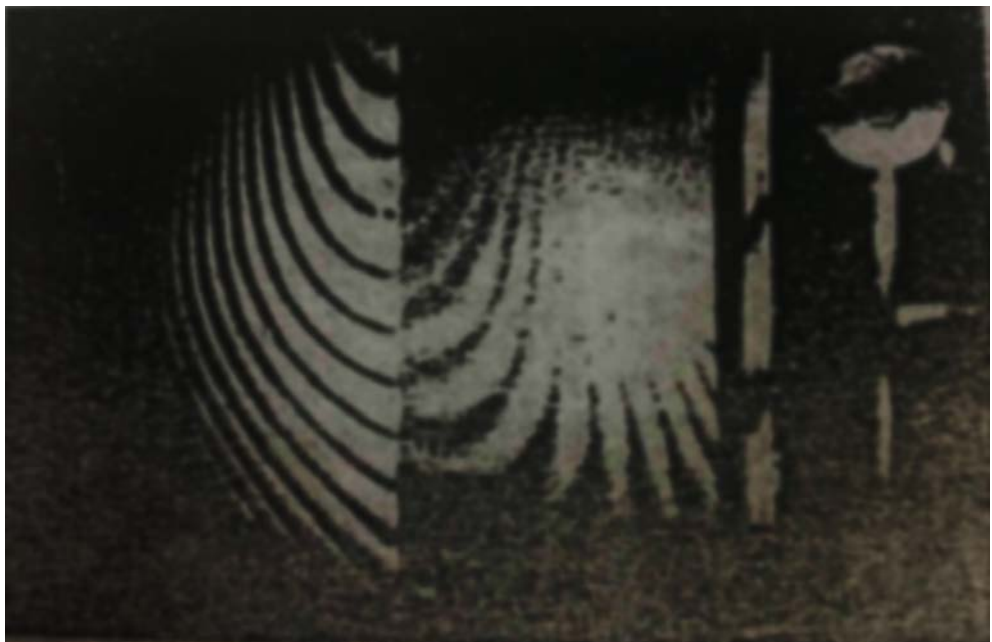
1. დაკვირვების ობიექტი (ნიმუში); 2. ლაზერი; 3. სხივის გამყოფი; 4. სარკე; 5. სარკე; 6, 7. ლინზა; 8. ჰოლოგრამა.



სურ. 9 ცემენტის ნარევი წ/ც 0,3 ნიმუშის ხნოვანება 50 წთ



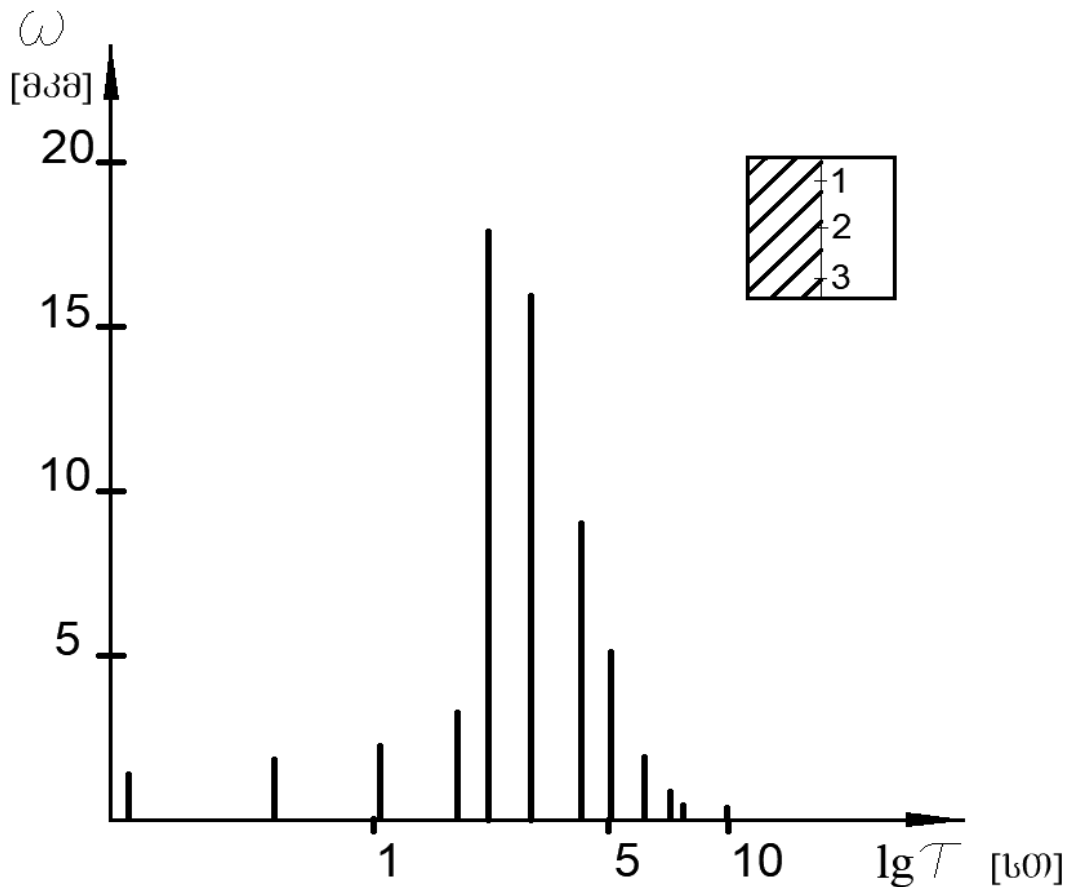
სურ. 10 იმავე ნიმუშის ხნოვანება 75 წთ.



სურ.11 იმავე ნიმუშის ხნოვანება 110 წთ.

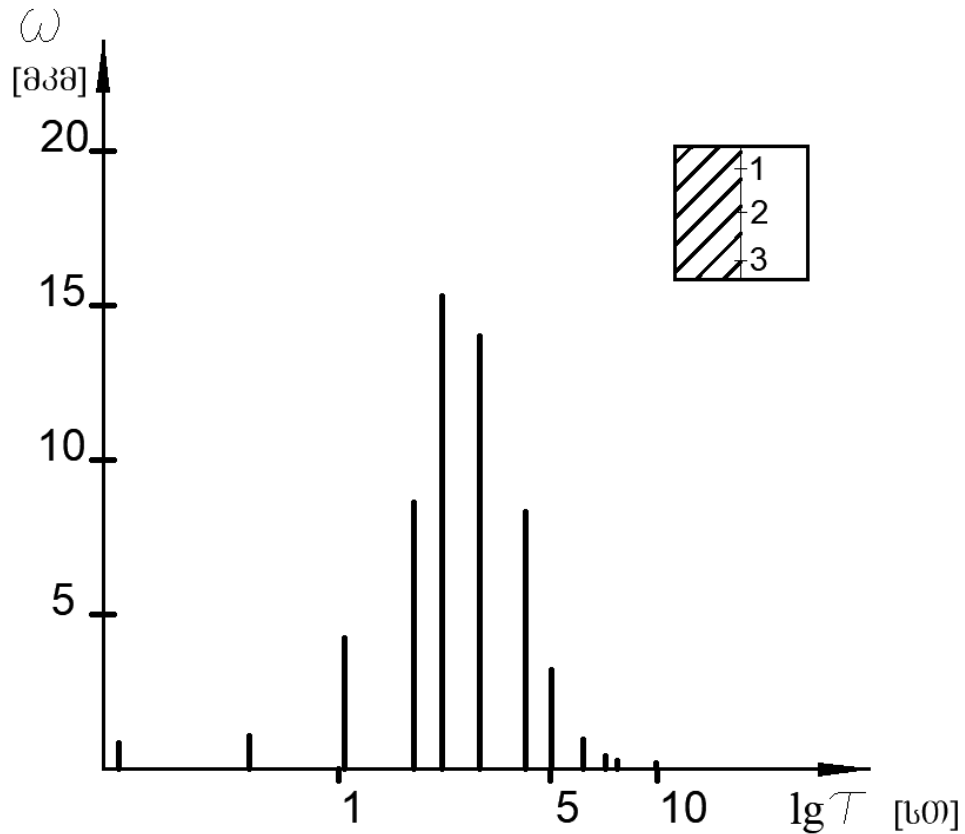
აღსანიშნავია, რომ მოცემულმა ხერხმა, საშუალება მოგვცა შეგვესწავლა გამყარების პროცესი ნიმუშის ვერტიკალურ ჭრილში. (სურ. 9, 10, 11 და ნახ. 6, ნახ.7) მოცემულია ნიმუშის ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამების ფოტოები, სადაც ნათლად ჩანს, რომ ნარევის შეკვრა იწყება ქვედა ფენიდან და დროთა განმავლობაში წაინაცვლებს მაღლივი

ფენებისკენ, ამაზე მეტყველებს ინტერფერენციული ზოლები ფირფიტის გამჭვირვალე ნაწილში. ამ ფაქტის ახსნა შეიძლება იმით, რომ თავისუფალი წყალი, რომელიც არ შედის რეაქციაში ცემენტთან ვიბროდაყალიბების შედეგად ამოდის ნიმუშის ზედა ფენებში და შესაბამისად წყალცემენტის ფარდობა ნაკლებია ნიმუშის ქვედა ფენაში, რაც იწვევს სწორედ ამ ფენის შეკვრის პერიოდის უფრო სწრაფად დაწყებას. M-300 მარკის ცემენტის ნარევი ალნიშნული პროცესი მიმდინარეობს უფრო ადრეულ სტადიაზე ნახ.7, ვიდრე M-400 მარკის ცემენტის ნარევი ნახ.6.



ნახ. 6 გადაადგილების ვექტორის ნორმალური კომპონენტის სიდიდის დამოკიდებულება ნარევის ხნოვანებაზე (ცემენტის ნარევი წ/ც 0,46 M-400)

რიცხოვრივი მონაცემების მისაღებად (გასაშიფრად შერჩეული იყო სამი წერტილი M-300 მარკის ცემენტის ნარევი ნიმუშის ფორმის კედლის გაუმჭვირვალე ზედაპირზე.



ნახ. 7 გადაადგილების ვექტორის ნორმალური კომპონენტის სიდიდის დამოკიდებულება ნარევის ხნოვანებაზე (ცემენტის ნარევი წ/ც 0,46 M-300)

გრაფიკზე აშკარად ჩანს გამყარების პროცესის სამივე სტადია: პირველი სტადია ხასიათდება შეკლების მცირედი დეფორმაციებით, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ ქიმიური რეაქცია ცემენტსა და წყალს შორის ჯერ კიდევ არ არის დამთავრებული. მეორე სტადიაზე მთელი ცემენტის მასამ განიცადა ჰიდრატაცია - შეკლების დეფორმაცია მოცულობის მის მაქსიმალურ მნიშვნელობაზე. ამის შემდეგ, იწყება მესამე სტადია, ნარევი იკრებს სტრუქტურულ სიმტკიცეს, რომელიც ეწინააღმდეგება შეკლების დეფორმაციას და ეს უკანასკნელი მცირდება.

გაშიფვრის შედეგად მიღებული შედეგები კარგად ემთხვევა მოცემულ შედეგებს. ამასთან ნათლად ჩანს ჩვენს მიერ შემუშავებული მეთოდის უპირატესობა.

მოცემული მეთოდი საშუალებას გვაძლევს ვიზუალურად დავაკვირდეთ გამყარების სამივე სტადიას: ვერტიკალურ ჭრილში და რიცხობრივად დავადგინოთ დიდი სიზუსტით გადაადგილების ვექტორის სიდიდის დამოკიდებულება ნარევის ხნოვანებასთან, რასაც დიდი მნიშვნელობა აქვს ბეტონმცოდნეობაში და განსაკუთრებით ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მშენებლობაში.

მიღებული ინტერფეროგრამების საშუალებით შეიძლება შევავსოთ სტრუქტურის ფორმირების პერიოდის შეფასება. სტრუქტურის ფორმირების დასაწყისად მიღებულია ის მომენტი, რომელსაც მინის ფირფიტის შეღებილ და შეუღებავ მხარეს გაჩნდება იდენტური ინტერფერენციული ზოლები, ხოლო სტრუქტურის ფორმირების პერიოდის დასასრულად, როდესაც ინტერფერენციული ზოლები გაქრება მინის ფირფიტის ორივე მხარეს.

2.3 ჰოლოგრაფიის მეთოდის გამოყენება ბეტონისა და რკინაბეტონის დეფორმირებული მდგომარეობის შესასწავლად

ბეტონის დეფორმირებული მდგომარეობის შესწავლისას ჰოლოგრაფიულმა ინტერფერომეტრიამ ჯერ ვერ იპოვა ისეთი ფართო გამოყენება, როგორც სხვა მასალების შესწავლისას. არსებობს მხოლოდ რამდენიმე ნაშრომი, რომელიც ჰოლოგრაფიის შესაძლებლობის ილუსტრირებას იძლევა ბეტონის დეფორმირებული მდგომარეობის შესწავლის დროს [16]. ამასთან, ჰოლოგრაფიის გამოყენება ბეტონის დეფორმირებული მდგომარეობის შესასწავლად საკმაოდ პერსპექტიულია. სხვა მეთოდებთან შედარებით მას აქვს უდავო უპირატესობა. მაგალითად, წინააღმდეგობის ელექტრონული სენსორებით დეფორმაციების გაზომვის ჩვეულებრივად გამოყენებად მეთოდს აქვს რიგი ხარვეზის - ტენზორეზისტორების დაწებებისა და კავშირის მავთულების მირჩილვის დიდი მოცულობის სამუშაო, ზედაპირის მომზადების აუცილებლობა, სტრუქტურული

არაერთგვაროვნების ძლიერი გავლენა და სხვ. ამას გარდა, წინააღმდეგობის სენსორების გამოყენება ყოველთვის შესაძლებელი არ არის.

კერძოდ, ადრეულ ასაკში ცემენტის ქვის დეფორმაციის კვლევისას, როცა ცემენტის ქვის ნიმუშები ტენიანია, ტენზომეტრიის მეთოდის გამოყენება პრაქტიკულად შეუძლებელია, რადგან არ ხერხდება სენსორების საიმედო ფიქსაცია ნიმუშის ზედაპირზე. ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდი კი დეფორმაციის გაზომვის საშუალებას იძლევა ნებისმიერი ტენიანობის დროს და ობიექტის ნებისმიერ წერტილში, ასევე შეიძლება ძაბვების კონცენტრაციის განსაზღვრა ათობით მიკრონებისგან შემდგარ მიკრომოცულობებში.

უკანასკნელი გარემოება ასევე აძლიერებს ჰოლოგრაფიისადმი ინტერესს, რადგან შეკვლების დეფორმაციის გაზომვის გამოყენებული ხერხები ჩვეულებრივად ინტეგრალურ ცნობებს იძლევა და საშუალებას არ იძლევა ვიმსჯელოთ დეფორმაციის განაწილების ხასიათზე, ისეთი რთული კომპოზიციური მასალის სხვადასხვა წერტილში, როგორც ბეტონია. ეს გვაიძულებს მივმართოთ მოდელირების და გამარტივების სხვადასხვა ხერხებს დეფორმაციის და ძაბვების სიდიდეების განსაზღვრავად სხვადასხვა წერტილში, მაგალითად, პოლარიზაციულ - ოპტიკურ მეთოდს. როგორც უკვე აღვნიშნეთ, უკანასკნელ შემთხვევაში ვიყენებდით ოპტიკურად - მგრძობიარე მასალებისა და ბეტონის ერთ-ერთი კომპონენტის - ცემენტის ქვის ან შემვსების მარცვლების კომბინაციებს.

გამოსაკვლევად ბეტონში დეფორმაციის და სტრუქტურულ ძაბვების დასადგენად გამოყენებული პოლარიზაციულ-ოპტიკური მოდელები იმსახურებენ ყურადღებას, თუმცა არ შეიძლება არ შევნიშნოთ, რომ სამოდელო მასალებით ცემენტის ქვის ან შემვსების შეცვლისას, შეუძლებელი ხდება მის სტრუქტურულ ელემენტებს შორის ურთიერთმოქმედების ხასიათის სრული ასახვა.

როგორც აღნიშნული იყო, ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით ბეტონის (ცემენტის ქვის) დეფორმაციული თვისებების შესწავლა,

ჯერ ნაკლებად გამოიყენება, შეიძლება აღინიშნოს მხოლოდ რამდენიმე ნაშრომი.

ნაშრომში [17] ჩატარებული იყო ბეტონის ჰოლოგრაფიული კვლევა, მოყვანილია დუდაბის სპეციალური მოდელის ჰოლოგრამები. მოდელი წარმოადგენდა 7 x 7 x 3,5 სმ ნიმუშს, რომლის ცენტრში მოთავსებული იყო 8 მმ დიამეტრის გლუვი არმატურა. მიღებული იყო ნიმუშის დეფორმაციის ინტერფეროგრამები 0,1 ნ დატვირთვის და არმატურის ღეროს 5⁰ C-ით გათბობის პირობებში, ჰოლოგრამა, რომელიც ასახავდა ჯამურ გათბობას და დატვირთვას და ჰოლოგრამა, რომელს ასახავდა მის მოცულობაში ზრდას დატენიანების დროს. ამრიგად, აღნიშნულ ნაშრომში ნაჩვენებია იყო ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდის გამოყენების შესაძლებლობა ბეტონის დეფორმაციული თვისებების შესწავლისას.

უჯრედოვანი ბეტონის რღვევის განსაკუთრებულობის შესწავლის შედეგები მოცულობითი და ცალმხრივი გაყინვის დროს ჰოლოგრაფიის მეთოდების გამოყენებით მოყვანილია ნაშრომში. დადგენილია არსებითი განსხვავება ზედაპირულ ფენებსა და ბეტონის ბირთვში სიმტკიცის დაქვეითებისას და დეფორმაციის შეფასებები ბეტონის სტრუქტურაში მისი ციკლური გაყინვების დროს.

ნაშრომში „ჰოლოგრაფიის დახმარებით ბეტონში ბზარების აღმოჩენა“, ბეტონში ბზარების ფიქსაციისთვის გამოყენებული იყო ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრია.

აღსანიშნავია ნაშრომში „ცემენტის ხსნარების შეკვლების კვლევა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით“ გადაადგილების ველების რეგისტრაციის მეთოდების გამოყენება, ფართო შესაძლებლობებს ხსნის ბეტონის ნაგებობებზე რემონტის ტექნოლოგიის ოპტიმიზაციის სამუშაოების ჩასატარებლად, რემონტის ზონაში ძველი და ახალი ბეტონის დეფორმირების თავისებურებების, ადჰეზიური თვისებებისა და გეომეტრიული კავშირის გათვალისწინებით.

ავტორები მიუთითებენ, რომ ჰოლოგრამებზე ბზარები უფრო ადრე იკითხებოდა, ვიდრე მათი აღმოჩენა იყო შესაძლებელი შეუიარაღებელი თვალით. ასეთი ბზარების განვითარებაზე დაკვირვება გრძელდებოდა რღვევამდე.

2.4 ბეტონის შეკლების კვლევა

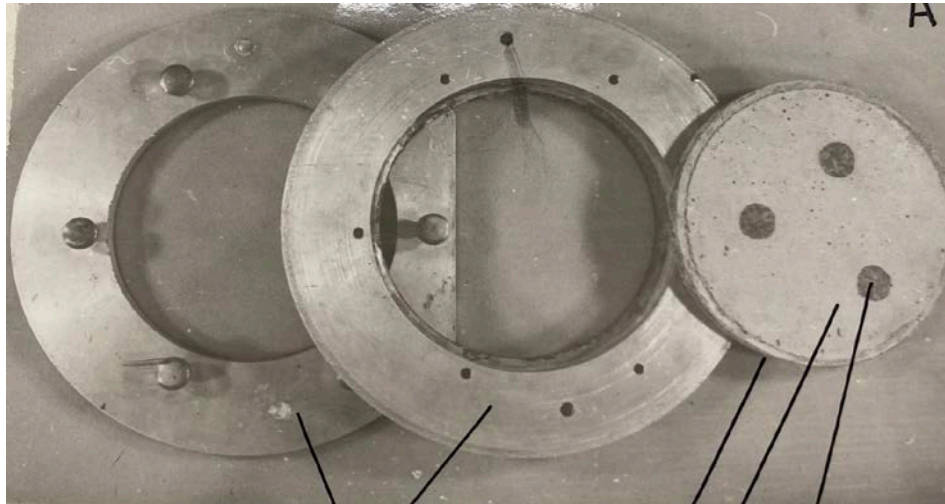
ცნობილია, რომ შეკლება მოცულობაში მიმდინარე რთული პროცესია. ამასთან, რადგან ის გამოწვეულია ტენის აორთქლების შედეგად, ხოლო აორთქლება ინტენსიურად მიმდინარეობს ზედაპირებიდან, სიღრმისეული ფენებიდან კი ხდება ტენის უფრო შენელებული გაცემა, შეკლების პროცესი მოცულობაში მიმდინარეობს არათანაბრად. ამ არათანაბრობის ხარისხზე მრავალი ფაქტორი მოქმედებს (ელემენტის ზომა და ფორმა, ბეტონის სტრუქტურა, ტენიანობის ცვლილების პირობები სხვადასხვა ორიენტაციის ზედაპირებზე, შეკლების დეფორმაციის თავისუფალი გამოვლინების შესაძლებლობა და სხვ.).

თუ ამას გავითვალისწინებთ და ასევე მხედველობაში მივიღებთ, რომ ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით შეკლების პროცესის გამოკვლევა, რამდენადაც ჩვენთვის ცნობილია, პირველად ხდებოდა, სამუშაოს მოცემულ ეტაპზე მოხდა მცდელობა გამარტივებულიყო შესასწავლი პროცესი. სახელდობრ, მიღებული იყო გადაწყვეტილება, რომ შეკლების პროცესის კვლევა ძირითადად ჩატარებულიყო ნიმუშებზე, რომლებშიც შეიძლებოდა ბრტყელი დეფორმირებული (დამაბული) მდგომარეობის არსებობის დაშვება. ამას გარდა, შევეცადეთ გვეჩონოდა სიმეტრიული ამოცანა.

ამ პირობებს ყველაზე მეტად აკმაყოფილებდნენ თხელი ნიმუში - დისკები, რომელთა გამოკვლევაც ჩატარდა.

კვლევისთვის დამზადდა ნიმუშები წიდაპორტლანდცემენტისგან მარკით 400. ცემენტის ცომი დამზადდა წყალ-ცემენტის შეფარდებით 0,5, რითიც მიღწეული იყო სხვადასხვა ფორიანობის ცემენტის ქვის ფორმირება.

ცემენტის ცომის მოზელა ხდებოდა ხელით 5 წუთის განმავლობაში. ნიმუშის მოსამზადებელი ფორმები წარმოადგენდნენ მეტალის რგოლებს გარე დიამეტრით 150, სიმაღლით 10 და კედლის სისქით 10 მმ. ექსპერიმენტის პირველი სერიაში ფორმაში ისხმებოდა წიდაპორტლანდ-ცემენტის ცომი და ცემენტის ცომში იღებოდა სამი შემდგომის მარცვალი - 20 მმ დიამეტრის (სურ. 12) გრანიტის ცილინდრები [18,19].



სურ.12 ნიმუშისა და ჩარჩოს ხედი

წიდაპორტლანდცემენტის ფორმირებული ნიმუშები ექსიკატორში ეწყობოდა. წყლის ზემოთ მათ 10 საათის განმავლობაში ვაჩერებდით. ამ დროის განმავლობაში მთავრდებოდა შეკვრის პროცესი და ნიმუში იძენდა გარკვეულ სიმტკიცეს, რის შემდეგაც მას ვათასებდით ჩარჩოში. გრანიტის გარდა გამოიყენებოდა კერამზიტის და ასევე ვულკანური წილის მარცვლები.

იმ შემთხვევაში, როცა ექსპერიმენტის პირობის მიხედვით მოითხოვებოდა შემდგომის მარცვლების ურთიერთგადაადგილება, ნიმუშები მზადდებოდა შემდეგნაირად. ფორმა (რგოლი) ივსებოდა ცემენტის ცომით, რომელშიც შემდეგ იპრესებოდნენ გრანიტის ფილაში დამაგრებული შემდგომის მარცვლები (სურ.12). ამ მდგომარეობაში ნიმუშებს ტოვებდნენ, სანამ ცემენტის ქვა არ მიიღებდა საკმარის სიმტკიცეს, რაც მათ ვერტიკალურ მდგომარეობაში დაყენების საშუალებას იძლეოდა. ცემენტის ქვის ადრეული გამოშრობის თავიდან ასაცილებლად ის იფარებოდა ტენიანი ტომრით.



სურ. 13 გრანიტის ფილა ხისტად ჩამაგრებული ცილინდრებით

2.5 ბეტონის შეკლება გამკვრივების ადრეულ სტადიაზე

ბეტონის შეკლება გამკვრივების ადრეულ სტადიაზე მნიშვნელოვან როლს თამაშობს დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ფორმირებაში ბეტონის და რკინაბეტონის კონსტრუქციის ელემენტებში, ვინაიდან ამ სტადიაზე განვითარებული საკუთარი ძაბვები არც თუ იშვიათად ქმნის ბზარების გაჩენის წინაპირობა გარე დატვირთვების მოდებამდე. ხშირად, საკუთარი ძაბვების განვითარების შედეგად, წარმოიშობა გამჭიმავი ძაბვების მიმართ დაქვეითებული წინაღობის უბნები, რითიც ფიქსირდება ბზარების წარმოშობის ყველაზე მეტად სავარაუდო უბნები კონსტრუქციის ექსპლუატაციის პროცესში. ყოველივე ამას მივყავართ კონსტრუქციის სიხისტის და ხანგრძლივობის დაქვეითებამდე, მათი შეღწევადობის გაზრდამდე, რაც ექსპლუატაციის პირობებით დაუშვებელია. ამიტომ, გამკვრივების ადრეულ სტადიაზე ბეტონის შეკლებისა და ამის გამო წარმოშობილი დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის კვლევებს უფრო მზარდი ყურადღება ეთმობა.

აღნიშნული იყო, რომ ამ მიზნისთვის ჩვეულებრივად გამოყენებული მეთოდები საშუალებას არ იძლევა მივიღოთ ბეტონში დამაბულ - დეფორმირებული მდგომარეობის ფორმირების საკმარისად სრული სურათი სხვადასხვა სტადიაზე მისი გამკვრივების დროს. ასე, რომ ნიმუშის შეკლების ჯამური დეფორმაციის გაზომვები ცოტა რამეს თუ მოგვცემენ საკუთარი ძაბვების შესასწავლად, რომლებიც ბეტონში წარმოიშობა მისი სტრუქტურული ელემენტების დეფორმაციული თვისებების განსხვავების გამო. პროცესის ანალიზური აღწერის მცდელობის დროს, რომელიც ბეტონის კონგლომერატულ სტრუქტურაში მიმდინარეობს და ხასიათდება აგებულების როგორც მაკრო, ასევე მიკრო არაორდინალურობით, აუცილებელია მივმართოთ უკანასკნელის ძლიერ სქემატიზაციას. ამიტომ, მკვლევრები ხშირად მიმართავენ ფიზიკურ მოდელებს, სწავლობენ მათ დამაბულ - დეფორმირებულ მდგომარეობას პოლარიზაციულ - ოპტიკური მეთოდებით. თუმცა, როგორც უკვე აღვნიშნეთ, უკანასკნელის გამოყენება ასევე დაკავშირებულია გარკვეულ შეზღუდვებთან.

ზემოთქმულის ფონზე ყურადღებას იმსახურებს ჰოლოგრაფია, კერძოდ, ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდი. ის არ მოითხოვს სამოდელო (ფოტოდრეკადი) მასალების გამოყენებას. ამიტომ, არსებობს საფუძველი ვივარაუდოთ, რომ ჰოლოგრაფიული მეთოდების გამოყენება საშუალებას მოგვცემს უფრო მივუახლოვდეთ შეკლების დეფორმაციების განვითარების რეალური სურათის გახსნას სხვადასხვა სტადიაზე ბეტონის გამკვრივების დროს და დამაბული მდგომარეობის ფორმირებას მიკრო მოცულობებში შემვსების მარცვლებს შორის და საკონტაქტო ზედაპირებზე „ცემენტის ქვა - შემვსებები“.

ამასთან უნდა აღინიშნოს, რომ დამაბული მდგომარეობის რაოდენობრივი შეფასება დაკავშირებულია დამატებით სირთულეებთან, რომელთა შესახებაც ნათქვამი იყო; თუმცა, ეს სირთულეები ჩნდება ბეტონის დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის კვლევის სხვა მეთოდებით (როგორც ანალიზური, ისე ექსპერიმენტული) სარგებლობის დროსაც. ამიტომ, მოცემულ ნაშრომში ჩვენ შემოვიფარგლებით მხოლოდ დეფორმი-

რებული მდგომარეობის კვლევის შედეგების გადმოცემით, რომელიც შექმნილია ახალგაზრდა ბეტონში სხვადასხვა დროს ცემენტის ქვის შეკლების შედეგად. ქვემოთ მოცემულია ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამები, რომლებიც გადაღებულია 10 საათსა და მეტ დროში ნიმუშების შექმნის მომენტიდან. ადრე გამოკვლეული მოდელებისგან განსხვავებით, ისინი, გარდა სხვა საკითხებისა, საშუალებას იძლევა შევაფასოთ შემვსების მარცვლების გადაადგილების სიმჭიდროვის გავლენა დეფორმირებული ველის ფორმირებაზე. ვინაიდან შეკლება სიღრმეში მიმდინარეობს არაერთგვაროვნად - უფრო ინტენსიურად გარე ფენებში, ნაკლებად ინტენსიურად შიგა ფენებში - მსხვილი შემვსების მარცვლები თავისუფლად ვერ მიჰყვება ცემენტ-ქვიშიანი მატრიცის დეფორმაციებს. ისინი იჭედება ქვედა ფენებში, რომლებიც განიცდის ნაკლებ შეკლებას. ამოცანის როგორც ანალიზური განხილვა, ფიზიკური მოდელების კვლევის დროს, ამ გარემოებას ყურადღებას არ აქცევენ. შეისწავლება მოდელები, სადაც შემვსების მარცვლები თავისუფლად მიჰყვება მატრიცის დეფორმაციებს. როგორ შემდეგ გამოჩნდება, ეს ძლიერ ამახინჯებს შეკლების დროს ბეტონის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის კვლევის შედეგებს.

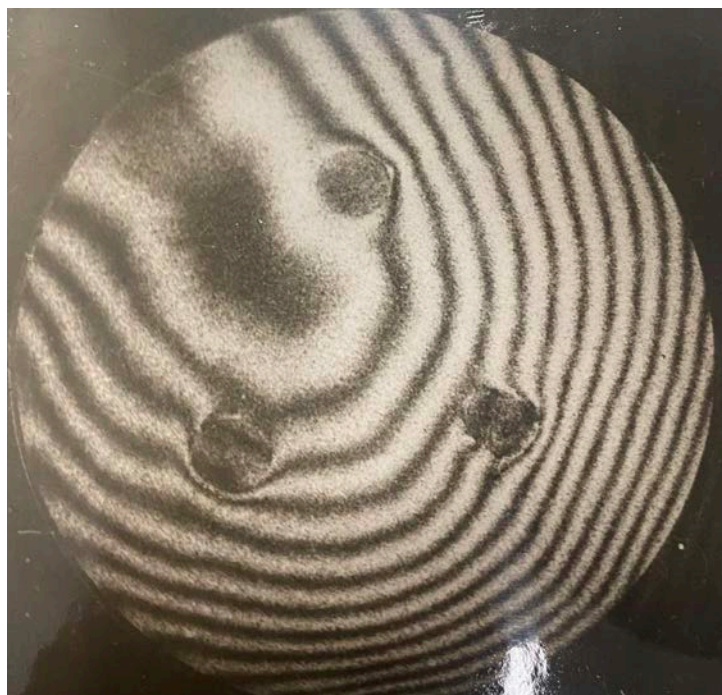
სურ. 14 – 19 მოცემულია ინტერფეროგრამები, რომლებიც საშუალებას იძლევა ვიმსჯელოთ შეკლების დეფორმაციის თანდათანობით განვითარებაზე, როცა შემვსების მარცვლებს საშუალება ჰქონდათ თავისუფლად მიჰყოლოდნენ მატრიცის დეფორმაციას, ხოლო სურ. 20 – 25 - როცა მარცვლები ხისტად იყო დამაგრებული და წინააღმდეგობას უწევდნენ მატრიცის გადაადგილებებს.

ინტერფეროგრამების გადაღება ხდებოდა ერთმოდინი ჰელიუმ-ნეონური ლაზერით (ტალღის სიგრძე 633 ნმ), 50 მვტ სიმძლავრით, ლეიტის სქემით ორმაგი ექსპოზიციის მეთოდით. ექსპონირების დრო 1 წუთი, ინტერვალი პირველ და მეორე ექსპონირებას შორის - 1 საათი. ინტერფეროგრამებზე მონაცვლეობის სიხშირე და ნათელი და ბნელი ზოლების სიგანე მიუთითებს გადაადგილების ინტენსიობაზე ნიმუშის სხვადასხვა უბნებზე - რაც უფრო ვიწროა ზოლები და მათი ხშირი

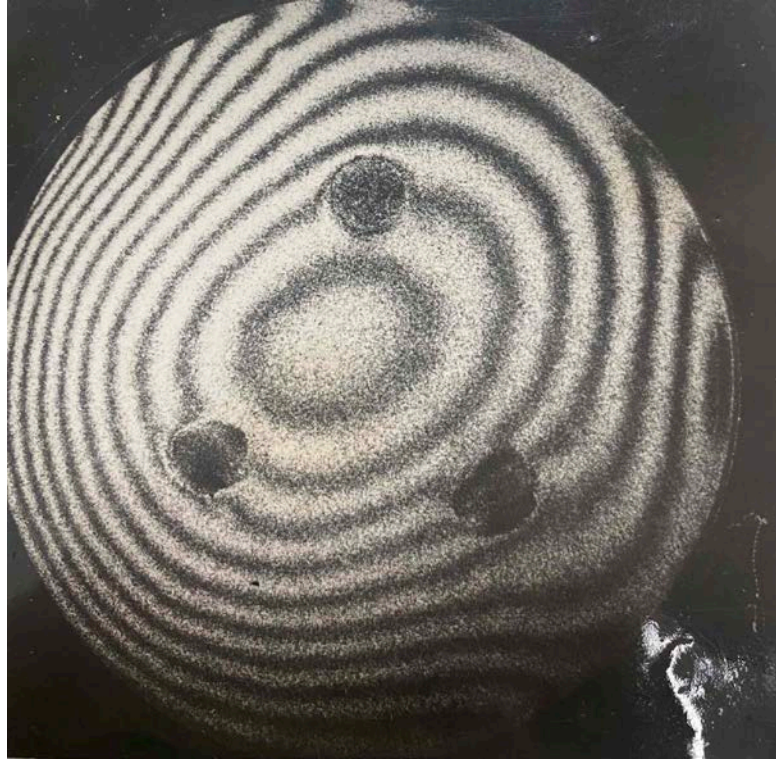
მონაცვლეობა ხდება, მით მეტია წერტილების გადაადგილების სიდიდე (დეფორმაციის ხარისხი).



სურ.14 ცემენტის ქვის ინტერფეროგრამები მარცვლების გადაადგილების შეზღუდვის არარსებობის დროს. ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 10 სთ.



სურ. 15. ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 16 სთ.



სურ. 16. ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 40 სთ.



ნახ. 17 ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 64 სთ.



სურ. 18 ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 89 სთ.



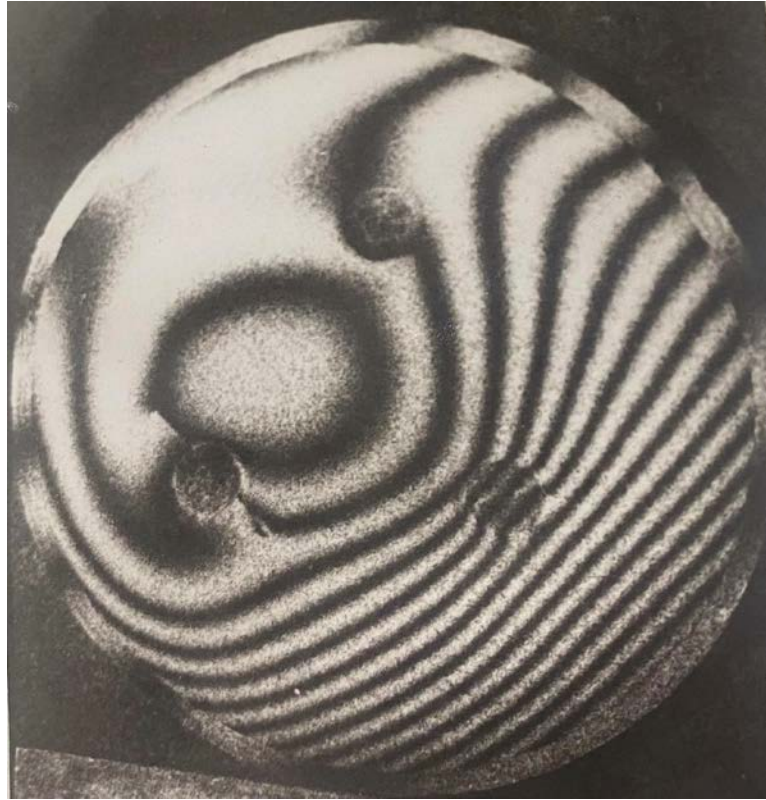
სურ. 19 ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 170 სთ.



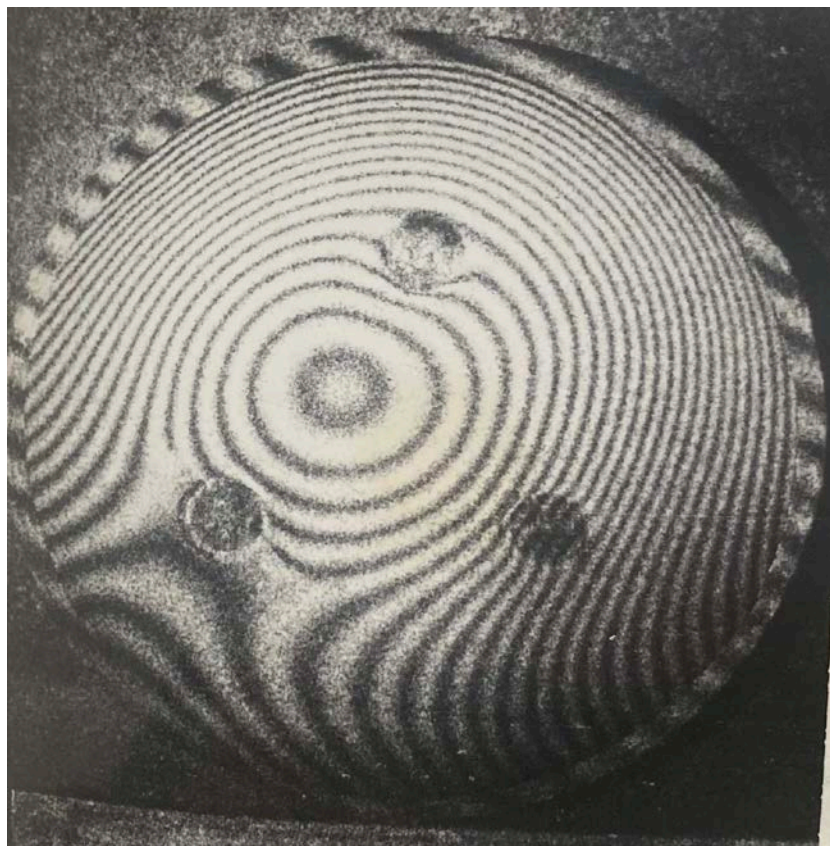
სურ. 20 ცემენტის ქვის ინტერფეროგრამები ხისტად ჩამაგრებული მსხვილი გრანიტის შემგსების დროს. ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 16 სთ.



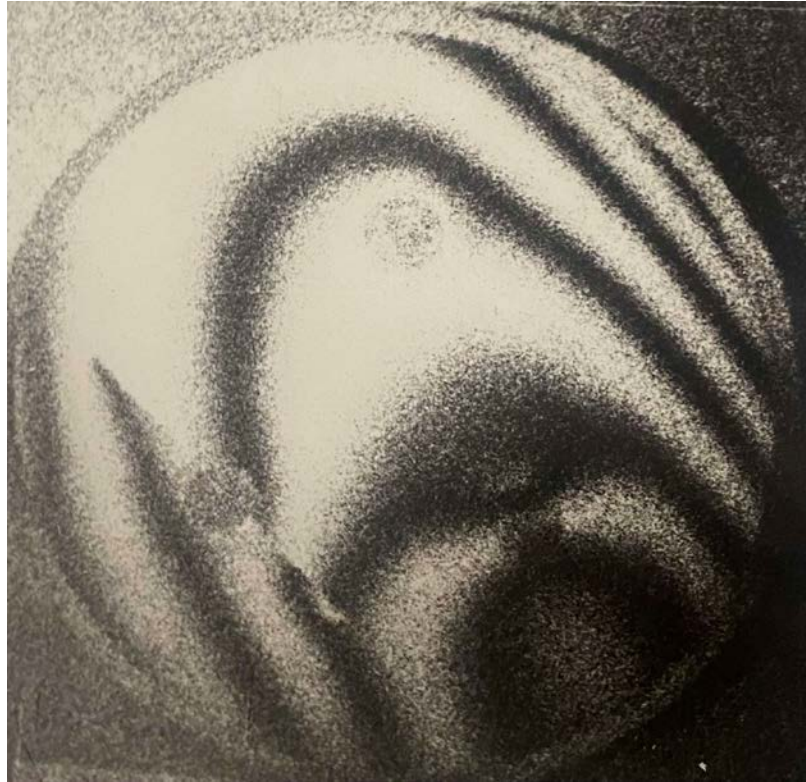
სურ. 21 ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 60 სთ.



სურ. 22 ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 62 სთ.



სურ. 23 ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 91 სთ.



სურ. 24 ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 120 სთ.



სურ. 25 ასაკი პირველი ექსპონირების მომენტში - 489 სთ.

ინტერფეროგრამების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ნიმუშის ცენტრული (როგორც გეომეტრიული, ისე ფიზიკური) სიმეტრიის პირობებშიც კი, დროში სხვადასხვა უბნებზე შეკლება მიმდინარეობს განსხვავებულად: ინტენსიური დეფორმირების პერიოდები შეიცვალა შეკლების ჩაქრობით. შედეგად შეიძლება ვამტკიცოთ, რომ ასევე არაერთგვაროვანი იყო საკუთარი ძაბვების განვითარება ცემენტის ქვაში. თუმცა, იმ შემთხვევაში, როცა შემვსების მარცვლების გადაადგილება არ იყო შეზღუდული და ისინი, „ცურავდნენ“ რა მატრიცაში, თავისუფლად შეეძლოთ მიჰყოლოდნენ ამ უკანასკნელის დეფორმაციებს და დაკვირვების პერიოდში (7 დღე-ღამეზე მეტი) ბზარები ნიმუშებში არ გამოჩენილა.

სხვა სურათი შეინიშნებოდა, როცა მარცვლების გადაადგილების შესაძლებლობა შეზღუდული იყო (ისინი ხისტად იყვნენ ჩამაგრებული სპეციალური ხელსაწყო დახმარებით). ნიმუშის დამზადებიდან მე-60 საათზე მასში შემვსების ერთ-ერთ მარცვალთან წარმოიშვა შეკლების ბზარი (სურ. 21). ვიზუალურად ნიმუშის 4-ჯერადი გამადიდებელი ლუპით დათვალიერებისას, ის ჯერ კიდევ არ იყო შესამჩნევი. მომდევნო ინტერფეროგრამებზე შეიძლება თვალი მივაღწევოთ ამ ბზარის განვითარებას, ასევე დეფორმირებული ველის ძლიერ შეშფოთებას შემავსებლის მეორე მარცვალთან. დაკვირვების (489 საათის) განმავლობაში იქ ბზარი არ წარმოშობილა, მაგრამ ეს ადგილი, ცხადია, აღიარებული უნდა იყოს ბზარის გაჩენის ყველაზე სავარაუდო ადგილად შეკლების დეფორმაციის შემდგომი ზრდის დროს ან გარე დატვირთვების მოდებისას.

წყალ-ცემენტის შეფარდების ცვლილებას ინტერფეროგრამის ხასიათზე (ხარისხობრივ სურათზე) პრაქტიკულად გავლენა არ მოუხდენია. რაც შეეხება შემვსების მარცვლების ფორიანობას, შეკლების დეფორმაციების განვითარების ინტენსივობა დროის სხვადასხვა შუალედებში პირდაპირ დამოკიდებულებაში იყო მათ მიერ წყლის შთანთქმის კინეტიკაზე.

ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამები, რომლებიც ბეტონის ნიმუშის დეფორმირებული ველის სრულ სურათს იძლეოდნენ, იმ მონაცემებზე

ინფორმაციული იყო, ვიდრე შეკლების დეფორმაციების სხვა მეთოდებით კვლევის შედეგად მიღებული მონაცემები. ეს საშუალებას გვაძლევს უკეთ შევისწავლოთ შეკლების ბუნება და ზოგიერთი განსაკუთრებულობა. ამრიგად, ინტერფეროგრამები გვიჩვენებს, რომ შეკლების დეფორმაციების განვითარება შესასწავლი ბეტონის ნიმუშის სხვადასხვა, გარეგნულად ერთნაირ ზედაპირებზე, მიმდინარეობს ცვალებადი სიჩქარით - ინტენსიური დეფორმირების პერიოდები (იზომება საათობით) იცვლება მათი ზრდის შენელების პერიოდებით. შესაბამისად იცვლება ბეტონში ჩანართების (შემვსების მარცვლების) შემოჭერის ძალა.

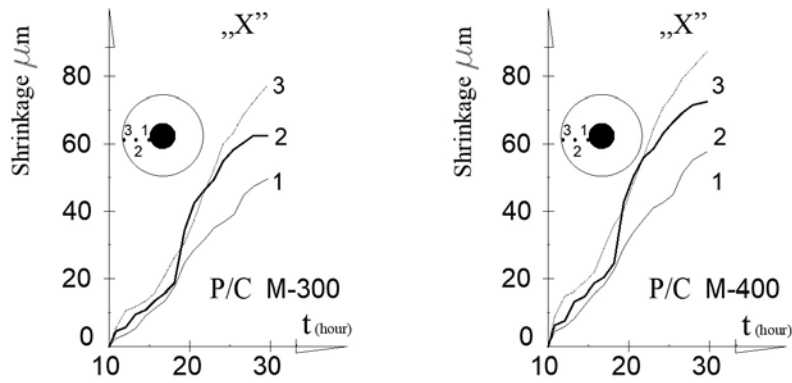
ცვლილებები განიცადეს ცემენტის ქვის გადაადგილების მიმართულებებმა ცალკეულ უბნებზე. ყოველივე შეიძლება გახდეს ბეტონში საკუთარი ძაბვების წარმოშობის მიზეზი.

ინტერფეროგრამების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მის მიხედვით შეიძლება ვივარაუდოთ ბზარების წარმოშობის ადგილები, ასევე თვალი მივადევნოთ მათ განვითარებას ადრეულ სტადიებზე, ვიდრე ამის საშუალებას ვიზუალური დაკვირვება მოგვცემს.

ბზარების წარმოშობა დიდ როლს თამაშობს შეკლების დეფორმაციების განსხვავებაში ზედაპირულ და სიღრმისეულ ფენებში, ასევე შემვსების მარცვლებით ცემენტის ქვის დეფორმირების შემჭიდროვების ხარისხზე.

2.6 ცემენტის ქვის შეკლება ასაკოვან ასაკში

აღწერილის ანალოგიური ნიმუშები, 28 დღიანი ფორმირების შემდეგ იმყოფებიან ტენიან ექსიკატორში, რის შემდეგაც მოხდა ინტერფეროგრამების გადაღება. გადაღების პროცედურა და ინტერფეროგრამების გადათვლა ისეთივე იყო, როგორც ადრეული ასაკის ცემენტის ქვის შემთხვევაში. შეკლების მრუდი მოცემულია ნახ. 8

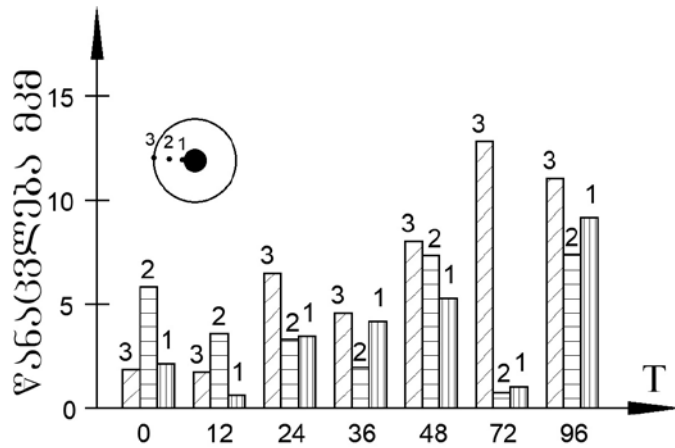


ნახ. 8 ცემენტის ქვის შეკლების მრუდი
 ასაკი - 10 სთ. მანძილი 1 და 3 წერტილებს შორის 6,5 სმ.
 1. - წ/ც=0,3 2. - წ/ც=0,5
 ასაკი - 28 დღე. ა) - ნიმუშის სქემა

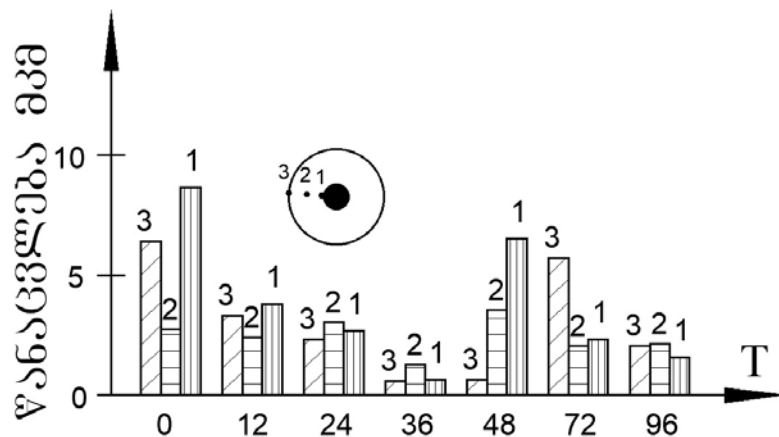
2.7 შემვსების გავლენა ცემენტის ქვის შეკლების დეფორმირებულობის ხასიათზე

ცნობილია, რომ შემვსების შედგენილობა ძლიერ გავლენას ახდენს ბეტონის შეკლების დეფორმაციებზე. ამასთან, შემვსების შედგენილობის გავლენის გამო ცემენტის ქვის შეკლების დეფორმაციების განვითარება შეიძლება განსხვავდებოდეს შემდეგ მონაცემებში: შემვსების მარცვლის დეფორმირებადობაში, მის ფორმასა და სორბციულ თვისებებში, მარცვლებსა და ცემენტის ქვას შორის შეჭიდულობის ძალაში. ყველაზე ხშირად ლიტერატურაში შეიძლება შევხვდეთ შემვსების დეფორმაციული თვისებების გავლენის შეფასებას შეკლების დეფორმაციულ სიდიდეზე და შედეგად, სტრუქტურული ძაბვების სიდიდეებზე, რომლებიც ბეტონში წარმოიშობა. აღინიშნება სხვა ფაქტორების გავლენაც, თუმცა მათი შეფასება, თუნდაც მიახლოებით, დიდ სირთულეებს აწყდება. ამიტომ, უმეტესად იფარგლებიან მათი როლის რაოდენობრივ - გონივრული შეფასებით. კერძოდ, ეს შეეხება შემვსების მარცვლების და ცემენტის ქვის მატრიცას შორის საკონტაქტო ურთიერთმოქმედების განსაკუთრებულობებს. ყველაზე ნაკლებ შესწავლადად შეიძლება ჩაითვალოს შემვსების მარცვლების სორბციული თვისებების გავლენა შეკლებაზე [20].

საკონტაქტო ურთიერთმოქმედების განსაკუთრებულობების გავლენის, ასევე შემვსების მარცვლების სორბციული განსხვავების შეფასების მიზნით, ჩვენს მიერ გრანიტის მარცვლებიანი ნიმუშების გარდა, გადაღებული იყო ინტერფეროგრამები, როცა ცემენტის ქვაში ჩართული იყო კერამზიტისა და ვულკანური წიდის მარცვლები. ძირითადად ნიმუშები იდენტური იყო.



ნახ. 9 ცემენტის ქვის ცალკეული წერტილების გადაადგილების დიაგრამა. შემვსებები - კერამზიტი. წ/ც=0,3. ასაკი - 10 სთ. მიმართულება - X ღერძის გასწვრივ.



ნახ. 10 ცემენტის ქვის ცალკეული წერტილების გადაადგილების დიაგრამა. შემვსებები - ვულკანური წიდა. წ/ც=0,3. ასაკი - 10 სთ. მიმართულება - X ღერძის გასწვრივ.

ინტერფეროგრამების გადაღების რეჟიმი იყო შემდეგი: ნიმუშზე დაკვირვების საერთო ხანგრძლივობა 96 საათს შეადგენდა. რადგან ლაზერული დანადგარი გათვლილი არ იყო 4 დღე-ღამის განმავლობაში

უწყვეტ მუშაობაზე, მოგვიწია უარის თქმა ინტერფეროგრამების უწყვეტ ჯაჭვზე და გადაღება ხდებოდა დროის ცალკეულ შუალედებში. ამრიგად, პირველ 48 საათში გადაღებული იყო 5 ინტერფეროგრამა 12 საათიანი შუალედით, ხოლო დარჩენილ 48 საათში - 2 ინტერფეროგრამა 24 საათიანი ინტერვალით. დრო პირველ და მეორე ექსპონირებას შორის 1 საათს შეადგენდა ექსპონირების ხანგრძლივობა 1 წუთს. დროის სხვადასხვა შუალედებში წერტილების გადაადგილება, მიღებული ინტერფეროგრამების გადათვლის მონაცემების შედეგად, მოყვანილია ნახ. 9 და 10.

2.8 ექსპერიმენტული მონაცემების შეფასება

ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდის გამოყენებამ ცემენტის ქვისა და ბეტონის შეკლების გამოსაკვლევად, როგორც ჩვენ მიგვაჩნია, საშუალება მოგვცა გამოვლენილიყო პროცესის მიმდინარეობის ზოგიერთი განსაკუთრებულობა, რომლებიც ადრე არ აღინიშნებოდა.

შემვსების მარცვლების სორბციული თვისებების განსხვავების როლზე მიუთითებს ჰოლოგრამების გაშიფვრის შედეგები, რომლებიც გადაღებულია კერამზიტის და ვულკანური წიდის შემვსებით დამზადებული ნიმუშებიდან. ორივე შემვსების მარცვლები ფორიანია. მაგრამ ფორიანობის ხასიათი განსხვავებულია და შესაბამისად განსხვავებულად უნდა ხდებოდეს წყლის ამოქაჩვა ცემენტის ცომიდან და ქვიდან. როგორც შემვსების მარცვლების მიერ წყლის შეწოვის დაკვირვებებმა გვიჩვენა მათ წყალთან უშუალო კონტაქტის დროს, კერამზიტი შედარებით ნელა ითვისებს წყალს საწყის ეტაპზე და შედარებით სწრაფად უფრო გვიან ვადებში. ვულკანური წიდის მარცვლები კი წყალს იწოვდნენ უფრო თანაბრად ან კიდევ უფრო ინტენსიურად საწყის ეტაპზე. ასეთი განსხვავება წყლის შთანთქმის კინეტიკაში მართალია, გაჩნდა უფრო გლუვი სახით, შეკლების დეფორმაციების განვითარების პროცესში (ნახ. 9, 10). როგორც აღმოჩნდა, ვულკანური წიდის პირობებში შეკლება ინტენსიურად

მიმდინარეობდა დაკვირვების პირველი საათის განმავლობაში, შემდეგ რამდენადმე შენედა და ისევ გააქტიურდა.

კერამზიტული შემსვების შემთხვევაში, პირველი 48 საათის განმავლობაში შეკლება მიმდინარეობდა მეტნაკლებად თანაბრად და მხოლოდ დაკვირვების ბოლოს მოხდა ინტენსიფიცირება.

აღნიშნული იყო, რომ ლიტერატურაში შეიძლება შეგვხვდეს სხვადასხვა მოსაზრება წყალ-ცემენტის შეფარდების როლზე ცემენტის ქვისა და ბეტონის შეკლებითი დეფორმაციის განვითარებაში. მაგრამ ავტორთა უმრავლესობა მაინც თვლის, რომ წ/ც ზრდასთან ერთად იზრდება შეკლების დეფორმაციები. ადრეული ასაკის ნიმუშების შეკლების დეფორმაციების ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით კვლევამ, რომლის შედეგებიც მოყვანილია ნახ. 8, გვიჩვენა შებრუნებული შედეგი, 0,3-ის ტოლი წ/ც შეფარდების დროს შეკლება იყო მეტი, ვიდრე 0,5-ის ტოლი წ/ც შეფარდების დროს.

ამ მონაცემების ინტერპრეტაციის დროს აუცილებელია მხედველობაში ვიქონიოთ, რომ ჩვენს ექსპერიმენტებში დაკვირვება (არსებითად უწყვეტად) 2-3 ათეული საათის განმავლობაში მიმდინარეობდა. ნიმუშები დაკვირვების დაწყების მომენტში დატენიანებული იყვნენ, რომ სითხის სრულ შემცველობას უახლოვდებოდა. ბუნებრივია, მათზე დაკვირვების დროს, როცა ისინი ტენს გარემოში გასცემდნენ, პირველ რიგში ორთქლდებოდა თავისუფალი წყალი მაკროფორებიდან და კაპილარებიდან რაც იწვევდა შეკლებას. წ/ც 0,5-ის ტოლ ნიმუშებში, რომლებიც შეიცავდნენ თავისუფალი წყლის მეტ რაოდენობას, ეს გრძელდებოდა უფრო დიდხანს, ვიდრე წ/ც=0,3 შემთხვევაში. ნიმუშებში სადაც წ/ც=0,3 იყო თავისუფალი წყალი ორთქლდებოდა დროის უფრო ნაკლებ შუალედში (ვინაიდან წყალი ნიმუშებში ნაკლები იყო) და კაპილარული ძალები, რომელთაც მივყავართ შეკლებამდე, ამათში უფრო ადრე ვითარდებოდნენ. სწორედ ამით შეიძლება აიხსნას, რომ შეკლება ამ ნიმუშებში შედარებით ხანმოკლე დაკვირვების

დროს, რომელიც განხორციელებულია ჩვენს ექსპერიმენტებში, იყო მეტი, ვიდრე ნიმუშებში რომელთათვისაც $\nabla/\epsilon=0,5$.

მიუხედავად იმისა, რომ შეკლების პროცესის კვლევისთვის, ისეთი ნიმუშები იყო არჩეული, რომ შესაძლებლობის ფარგლებში მიგველო დეფორმირების გამარტივებული სურათი (თუნდაც ნიმუშის სისქეში პროცესის მიმდინარეობის უთანაბრობის მოცილების ხარჯზე), ინტერფეროგრამებმა აჩვენა, რომ ეს პროცესი მიმდინარეობდა არათანაბრად როგორც დროში, ისე ნიმუშის სხვადასხვა უბანზე.

შეკლების განვითარების არაერთგვაროვნება დროის მიხედვით, ბუნებრივია, მოულოდნელი არაფერი არ არის. იმის გამო, თუ რომელი ფორებიდან და კაპილარებიდან ორთქლდებოდა ტენი დაკვირვების მომენტში, შეკლებითი დეფორმაციების განვითარების ინტენსივობა უნდა იყოს განსხვავებული. რაც შეეხება შეკლებითი დეფორმაციების განვითარების არაერთგვაროვნებას ნიმუშების ცალკეულ (სიმეტრიულ) უბნებზე, რომლებიც დამზადებულია ყურადღებით ლაბორატორიულ პირობებში. შეკლების პროცესის მიმდინარეობის ეს არაერთგვაროვნება შეიძლება განხილული იყოს როგორც ბეტონში შიგა ძაბვების წარმოშობის ერთ-ერთი მიზეზი.

საინტერესო იქნება მონაცემთა შედარება ნიმუშების დეფორმაციის ხასიათის მიხედვით რამდენიმე „მცურავი“ და ხისტად ჩამაგრებული ჩართვებით. „მცურავი“ მარცვლებით (როცა მარცვლები განცალკევებულია, უშუალოდ ერთმანეთთან კონტაქტი არა აქვთ) ცემენტის ქვის დეფორმირებადობა ნაკლებად ავლენდა შემჭიდროვებას, ვიდრე ხისტად ჩამაგრებული ჩართვებით, მაგრამ ამასთან ინტერფეროგრამების სახემ განიცადა მნიშვნელოვანი ცვლილება, მიუთითა რა შეკლების პროცესის არათანაბარ განვითარებაზე ნიმუშის სხვადასხვა უბნებზე. თვით შემდგომში ჩნდებოდა ინტერფერენციული ზოლები, რაც იმაზე მიუთითებდა, რომ ისინი განიცდიდნენ შეკუმშვას ცემენტის ქვის მხრიდან. მაგრამ ეს გარემოებაც (შეკუმშვა) ასევე არათანაბარი იყო. ინტერფეროგრამების

გადათვლისას (ნათელი და ბნელი ზოლების მონაცვლეობაზე დაკვირვების დროს) შეიძლებოდა შემჩნევა, რომ ცემენტის ქვა აქტიურად აწვებოდა შემვსებს ხან ერთი და ხან მეორე მხრიდან. მოპირდაპირე მხარეები ყოველ თითოეულ შემთხვევაში ავლენდნენ რეაქციულ წინააღმდეგობას. შედეგად შემვსების მარცვალი განიცდიდა კუმშვას.

მცურავი ჩართვების შემთხვევისგან განსხვავებით, მათი ხისტად ჩამაგრების დროს ინტერფერენციული ზოლები დაკვირვების საწყის სტადიებზე ემსგავსებოდნენ შემთხვევას, ერთი შემვსების ჩართვით ცენტრში. ეს აიხსნება იმით, რომ ნიმუშის ცენტრში ხისტად ჩამაგრებული ჩართვები ქმნიდნენ უძრავ ზონას, რომელიც აიძულებდა ცემენტის ქვის უბნებს დეფორმირებულიყვნენ რადიალური მიმართულებით.

ხისტად ჩამაგრებული ჩართვების შემთხვევებში აშკარად შეიმჩნეოდა დაძაბული მდგომარეობის გაძლიერება ნიმუშში, ასევე დაძაბული ველის არაერთგვაროვნების გაძლიერება ნიმუშის სიბრტყეში.

დაძაბული ველის ადგილობრივი შეშფოთებები ჩართვების მიმდებარე ზონაში უფრო შესამჩნევი იყო. დიდი იყო ჩართვის მარცვლებში განვითარებული ძაბვები მათი ცემენტის ქვით შემოჭვრით. ამასთან ეს ძაბვები იცვლებოდნენ დროში არა მხოლოდ ზრდის მხარეს.

მცურავი მარცვლების დროს, ინტერფეროგრამების გადაღების მთელი დროის განმავლობაში, მიმდინარეობდა ვიზუალური დაკვირვება ნიმუშის ზედაპირებზე შეკლების ბზარების წარმოშობის დაფიქსირების მიზნით. თუმცა ეს ბზარები არ იყო აღმოჩენილი. არ გაჩენილა ისინი ნიმუშების შემდგომი შენახვის დროსაც 28 დღის განმავლობაში. ხისტად ჩამაგრებული ჩართვების დროს შეკლების ბზარები ჩნდებოდა ინტერფეროგრამების გადაღების დაწყებიდან უკვე 60 საათის შემდეგ. ამასთან, თვალით მათ აღმოჩენამდე (4-ჯერადი გამაღიანებელი ლუპის დახმარებით) ისინი ინტერფეროგრამებზე შეიმჩნეოდა.

ბზარების გამოჩენასთან ერთად იცვლებოდა ინტერფერენციული ზოლების ხასიათი, რაც მიუთითებდა ნიმუშის დაძაბული მდგომარეობის

შესუსტებაზე. თუმცა, დროთა განმავლობაში ის ხელახლა ძლიერდებოდა (უკვე ბზარების არსებობის პირობებში), რაც იწვევდა ბზარების შემდგომ განვითარებას. უკანასკნელი თითქოს ნახტომისებურად ვითარდებოდა, რაც განაპირობებდა ნიმუშში დაძაბული მდგომარეობის შესუსტებას და გაძლიერებას. ასევე უნდა მივუთითოთ, რომ პერიოდულად იცვლებოდა ნიმუშის ცალკეული წერტილების გადაადგილებების მიმართულებებიც. ეს შეძლება განხილული იყოს როგორც სტრუქტურის რყევის ერთ-ერთი დამატებითი მექანიზმი, რომელიც ხელს უწყობს მიკრობზარების წარმოშობას და განვითარებას.

ნიმუშის სისქის გაზრდის დროს (ცილინდრული ნიმუშებისთვის) ბზარები შეინიშნებოდა იმ შემთხვევაშიც, როცა ნიმუშის დამზადების დროს არ მიიღებოდა რაიმე სპეციალური ზომები მათი გადაადგილებების შესაძლებლობების შესაზღუდად. თუმცა, იმის გამო, რომ ნიმუშის სიღრმისეული ფენები არ მისდევდა ზედაპირული ფენების დეფორმაციებს (ცემენტის ცომში ჩატენილი ჩართული მარცვლების სიმაღლე 20 მმ იყო), ისინი ზღუდავდა ჩართული მარცვლების გადაადგილების თავისუფლებას. ამით ცილინდრულ ნიმუშებში ზედაპირული ფენები დეფორმირების პირობის თანახმად ემსგავსებოდა ნიმუშებს, ხისტად ჩამაგრებული ჩართვებით, რაც გამოვლინდა ბზარების წარმოშობით. ცხადია, ასეთია შეკლების ბზარების ქსელის წარმოშობის მექანიზმი რეალური ბეტონისა და რკინაბეტონის ელემენტებში.

უნდა აღინიშნოს, რომ შეკლების პროცესის ანალიზური აღწერისთვის, ბეტონის სტრუქტურის მოდელის არჩევისას, აღნიშნულ გარემოებას არ ექცევა ყურადღება და მათ უგულველყოფენ ფიზიკური მოდელების შესწავლისას. თუმცა, როგორც ამას აჩვენებენ ზემოთ მოყვანილი ინტერფეროგრამები, დეფორმირების ხასიათი იცვლება ხარისხობრივად იმის მიხედვით, შემკვების მარცვლებს შეუძლიათ მიყვნენ (სურ. 14 – 19) ან არ მიჰყვნენ (სურ. 20 – 25) ცემენტის ქვის დეფორმაციებს.

2.9 ბეტონის ბზარმედეგობის შესწავლა

ბეტონების და რკინაბეტონების კონსტრუქციებში ბზარწარმოქმნის საკითხები დიდი ხანია ინჟინრების და მკვლევრების ყურადღება იპყრობს. ბზარები აქვეითებს კონსტრუქციების მზიდუნარიანობას და ხანგამძლეობას, აუარესებენ მათ საექსპლუატაციო თვისებებს, აფუჭებს გარეგნულ სახეს.

ბზარები სხვადასხვა მიზეზის გამო ჩნდება: გარე და მექანიკური დატვირთვების ან იძულებითი დეფორმაციების შედეგად, რომლებიც კონსტრუქციებში ვითარდება საყრდენების არათანაბარი დაჯდომის შედეგად, ბეტონის შეკლებისა და ტემპერატურული დეფორმაციების შედეგად და სხვ. თავის მხრივ ბეტონის და რკინაბეტონის წინაღობა ბზარწარმოქმნის მიმართ, ასევე დამოკიდებულია სხვადასხვა ფაქტორზე. მათ შორის, პირველ რიგში უნდა დასახელდეს ბეტონის მიდრეკილება შეკლების დეფორმაციის და ცოცვადობის ინტენსიური განვითარებისკენ და მისი ზღვრული გაჭიმვაობა.

იმ მიზეზთა სხვადასხვა ხასიათი, რომელთაც მივყავართ ბზარების წარმოქმნისკენ, ასევე ფაქტორთა განსხვავება, რომელიც მოქმედებს ბეტონის უნარზე წინააღმდეგობა გაუწიოს ბზარწარმოქმნას, ართულებს მისი საფრთხის ხარისხის პროგნოზირებას. ცხადია, ამით შეიძლება აიხსნას იმ მეთოდების მრავალსახეობა, რომლებიც შემოთავაზებულია ბეტონის ბზარმედეგობის შეფასების მიზნით. მათვე უნდა ახსნან სხვადასხვა გაგება მცნებისა „ბეტონის ბზარმედეგობა“.

გაკეთებულია ბეტონის ბზარმედეგობის შეფასების შემოთავაზებული მეთოდების სისტემატიზების მცდელობა. ისინი დაყოფილია სამ ჯგუფად: ბზარმედეგობის შეფასების ირიბი და უშუალო მეთოდები და მეთოდები, რომლებიც დამყარებულია ბეტონის სტრუქტურის მოდელირებაზე. ბზარმედეგობის შეფასების ირიბი მეთოდების არსი მდგომარეობს შეკლების და ცემენტის ქვის დეფორმაციის შემჭიდროვების ხარისხის გათვალისწინებას დაუპირისპიროთ მსხვილი შემვსები (არაარმირებული

ბეტონისთვის) და არმატურა (არმირებული ბეტონისთვის). ბზარმედევობა ფასდება გაანგარიშების გზით კოეფიციენტების მიხედვით. მათი გაანგარიშება ხდება ბეტონის მახასიათებლების მიხედვით - სიმტკიცის ზღვარი გაჭიმვისას და კუმშვისას, ზღვრული გაჭიმვალობა, დრეკადობის მოდული, შეკლების დეფორმაციის სიდიდეები, შიგა ხახუნის კოეფიციენტი, გარე მასათა გაცვლის და შიგა ტენის გადატანის ინტენსიობა და რიგი სხვ. ზოგიერთი ავტორის წინადადებით ბზარმედევობის შეფასება შეიძლება ჩატარდეს ცემენტის მინერალოგიური შემადგენლობის მიხედვით და სხვ.

უნდა აღინიშნოს, რომ ირიბი მეთოდებით წინადადებებით სარგებლობის დროს, აუცილებელია რიგი მახასიათებლების ცოდნა, რომლებიც არ განისაზღვრება ბეტონის ჩვეულებრივი სტანდარტული გამოცდის დროს. მაგალითად, ყოველთვის არ განისაზღვრება ბეტონის ზღვრული გაჭიმვალობა (ცნობისთვის, მისი განსაზღვრის მეთოდი უნიფიცირებული არ არის, ყოველი მკვლევარი მას განსაზღვრავს თავისი ექსპერიმენტალური შესაძლებლობების და წარმოდგენების მიხედვით და ლიტერატურაში ბეტონის ამ მაჩვენებლის მიხედვით შეინიშნება დიდი გაფანტვა). ყოველთვის არ მოიპოვება მონაცემები ბეტონის თავისუფალი და მით უმეტეს შემჭიდროვებული შეკლების შესახებ და სხვა [21].

ბზარმედევობის შეფასების მეთოდები, რომლებიც დამყარებულია ბეტონის სტრუქტურის მოდელირებაზე, უდავოდ საინტერესოა, მაგრამ ბევრი მათგანი უფრო უნდა მიეკუთვნებოდეს კვლევით აპარატს, რადგან ზედმეტად გამარტივებულია და იძლევა მხოლოდ საკმაოდ მიახლოებულ შედეგებს.

ბზარმედევობის უშუალო შეფასების შემოთავაზებული მეთოდები, განსაკუთრებით რგოლის მეთოდი, რომელმაც ფართო გავრცელება პოვა ლაბორატორიულ პრაქტიკაში, გამოირჩევა სიმარტივით, მაგრამ ბზარმედევობის შეფასების საშუალებას იძლევა მხოლოდ შეკლების მოქმედების შედეგად. ინტერესს კი წარმოადგენს ბზარმედევობის შეფასება შეკლების და

გარე მექანიკური დატვირთვის ერთობლივი მოქმედების შედეგად. ეს ცდის ლაბორატორიულ პირობებს მიუახლოებს ბუნებრივ პირობებს, რომლის დროსაც, როგორც წესი, შეკლებით გამოწვეულ ძაბვებთან ერთად კონსტრუქციულ ელემენტებში მოქმედებენ საკუთარი წონით და გარე მექანიკური დატვირთვებით გამოწვეული ძაბვები. შეკლებით და გარე მექანიკური დატვირთვების ერთობლივი მოქმედებით მიღებული ეფექტი არ წარმოადგენს ცალკეული მათგანის მოქმედებით მიღებულ ეფექტების უბრალო ჯამს [22].

გამოვიკვლიეთ რა ცემენტის მინერალური შემადგენლობა ცხრილი 3 და 4 ბეტონის ბზარმედგობაზე, ჩვენ მიერ გამოყენებული იყო სპეციალური ხელსაწყო, რომელიც საშუალებას იძლეოდა შეგვეფასებინა ბზარმედგობა შეკლებისა და გარე მექანიკური დატვირთვებით ერთობლივი მოქმედების დროს. ბზარების წარმოშობისა და განვითარების პროცესზე დაკვირვებისთვის გამოყენებული იყო ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის მეთოდი.

ცხრილი 3

ცემენტის სახეობები

ცემენტი	ცემენტის სახე	გამოუწვადი კომპონენტის სახე და რაოდენობა
1	დაბალთერმულიტუტოვანი პორტლანდცემენტი	დიატომიტი, 15%
2	პორტლანდ ცემენტი	_____
3	პორტლანდცემენტი	კაჟის თიხა, 15%
4	პორტლანდცემენტი	გრან. წიდა, 15%
5	წიდაპორტლანდცემენტი	გრან. წიდა, 50%
6	პუცოლანის პორტლანდცემენტი	პემზა, 35%

გამოკვლეულია 6 მინერალური შემადგენლობის ცემენტი

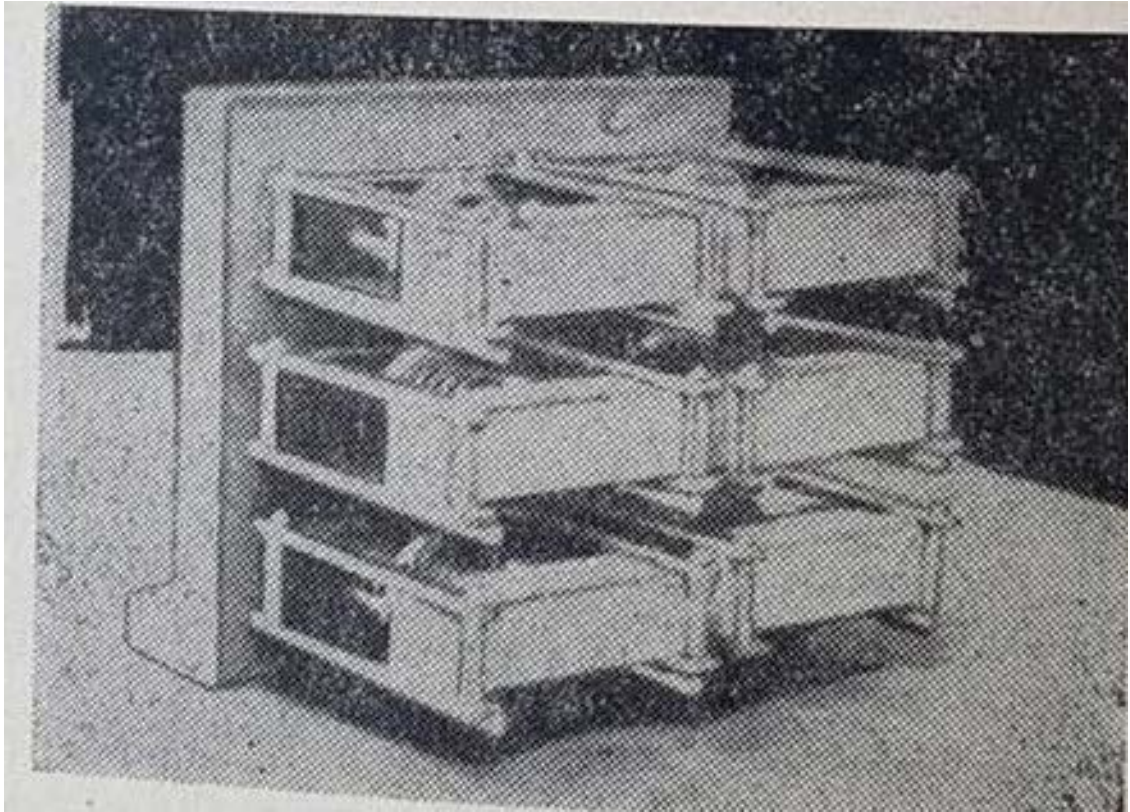
ცემენტი	მინერალური შემადგენლობა, %				ნორმალური სისქის ცომი, %	სიმტკიცე მპა
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF		
1	45,0	32,0	4,5	15,0	26,0	42,0
2	60,0	17,0	4,2	15,0	23,0	52,8
3	58,0	19,0	4,0	16,0	27,5	52,5
4	56,1	15,9	9,4	15,7	25,0	50,2
5	56,5	15,0	9,7	15,95	26,5	41,0
6	37,2	35,3	14,8	9,55	32,7	39,7

მზადდებოდა ნიმუშები ზომით 4 x 4 x 16 სმ ქვიშა-ცემენტის ნარევისგან (შემვსების მაქსიმალური სიდიდე 5 მმ), არმირება თითოეული წახნაგისთვის ორი ფოლადის ღერო დიამეტრით 3 მმ. ნიმუშების დამზადებისას შენარჩუნებული იყო ცემენტის მასასა და შემვსებს შორის შეფარდებისა და წყალ-ცემენტის შეფარდების მუდმივობა.

ბზარების წარმოშობის თავიდან ასაცილებლად თერმულ-ტენიან დამუშავების პროცესში, ნიმუშები წყალში იმყოფებოდა. ნიმუშების დატვირთვა სპეციალური ხელსაწყოს (მოწყობილობის) დახმარებით ხდებოდა პირველი, თვალისთვის შესამჩნევი ბზარის გამომწვევი მოდებული ძალის სიდიდე, დატვირთვის 0,7 შეადგენდა. ის განისაზღვრებოდა ტყუპი ნიმუშების გამოცდის გზით ხანმოკლე გამოცდის დროს.

ინტერფეროგრამების გადასაღებად ჩატვირთული ნიმუშები ლაგდებოდა სპეციალურ სტელაჟზე (სურ. 26). ჰოლოგრამების გადაღება

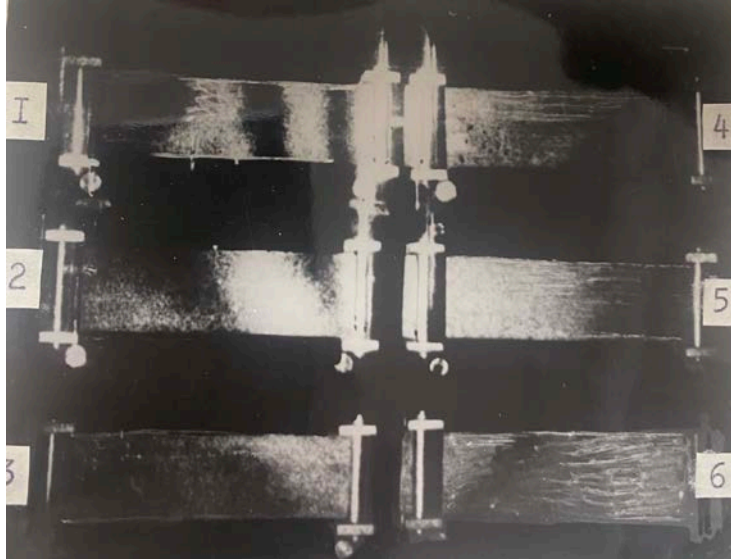
ხდებოდა ერთმოდინადი ჰელიო-ნეონის ლაზერით (ტალლის სიგრძე 633ნ.მ), სიმძლავრით 50 მვტ ლეიტის სქემით ორმაგი ექსპოზიციის მეთოდით. ექსპოზიციებს შორის ინტერვალი ერთ



სურ. 26 სტელაჟი ნიმუშებით

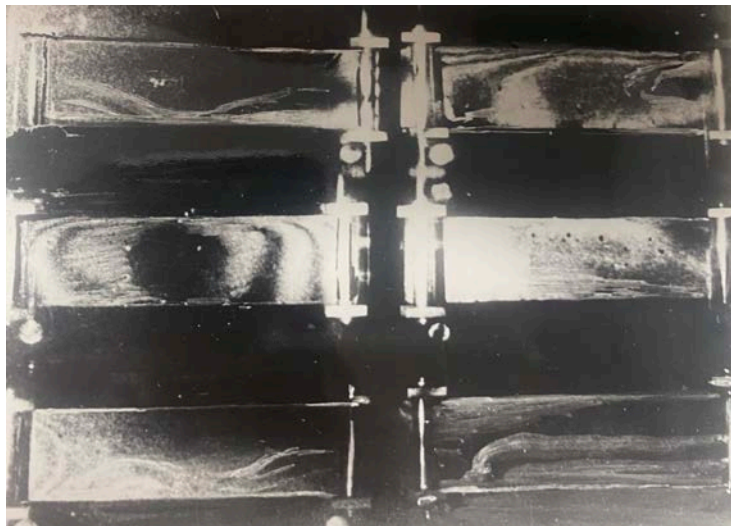
საათს შეადგენდა, ექსპონირების ხანგრძლივობა - 1 წთ. ჰოლოგრამების გადაღება ნიმუშების ჩატვირთვიდან 10 საათის შემდეგ იწყებოდა.

სურ. 27 მოცემულია გადაღებული ინტერფეროგრამების ნაწილი. ნიმუშების ნომრები შეესაბამება ცხრილი 3-ის ცემენტის ნომრებს. პირველ ინტერფეროგრამაზე (სურ. 27) არის იშვიათი და განიერი განივი ინტერფერენციული ზოლები, რომელიც მიუთითებს დეფორმაციის სუსტ განვითარებას ნიმუშების გრძივი ღერძის გასწვრივ. პირველ ნიმუშზე არის ზედაპირული ბზარი, რომელიც, როგორც შემდგომმა ინტერფეროგრამებმა აჩვენა, არ განვითარდა.



სურ. 27 ნიმუშების ინტერფეროგრამა დატვირთვიდან 2 საათის შემდეგ

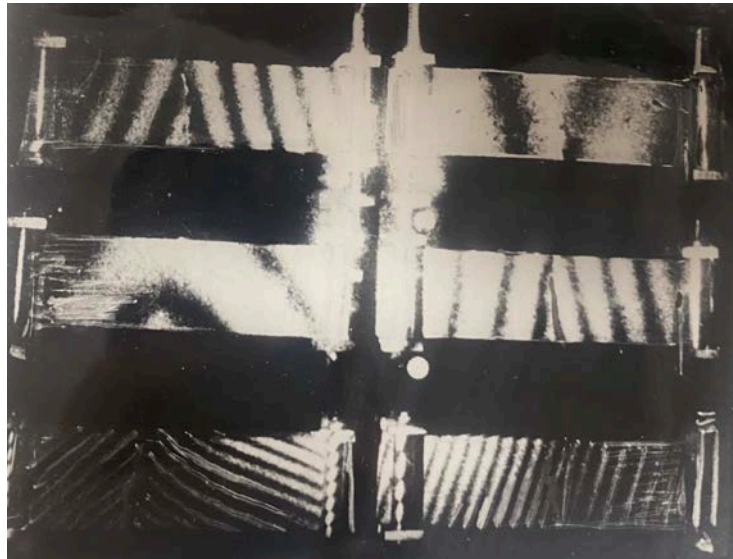
ნიმუშების ჩატვირთვის შემდეგ 14 საათის განმავლობაში ინტერფერენციული ზოლების თანდათანობითი თავმოყრა ხდებოდა (სურ. 28).



სურ. 28 ნიმუშების ინტერფეროგრამა დატვირთვიდან 14 საათის შემდეგ

ეს მიუთითებდა ნიმუშის გაჭიმული წახნაგის დეფორმირებულობის პროცესის გაძლიერებას, რომელიც შეკლების და გარე დატვირთვის ერთობლივი მოქმედების შედეგი იყო. ჩატვირთვიდან 16 საათის შემდეგ ბზარები წარმოიშვა ოთხ ნიმუშში შემდეგი თანამიმდევრობით: 6, 3, 2 და 4.

18 საათისთვის (სურ. 29) ბზარი გაჩნდა მე-5 ნიმუშზე, ხოლო ჩატვირთვის შემდეგ 20 საათისთვის (სურ 30) მე-1. ბზარების წარმოშობის შესახებ შეიძლება ვიმსჯელოთ ინტერფერენციული ზოლების გარდატეხის მიხედვით. მასალის უწყვეტობის დარღვევამდე ინტერფერენციულ ზოლებს არ ჰქონდა გარდატეხის წერტილები და არ იკვეთებოდა. როგორც კი ირღვეოდა უწყვეტობა, ზოლების ორიენტაცია იცვლებოდა და ისინი ან იკვეთებოდა, ან უჩნდებოდა გარდატეხა.

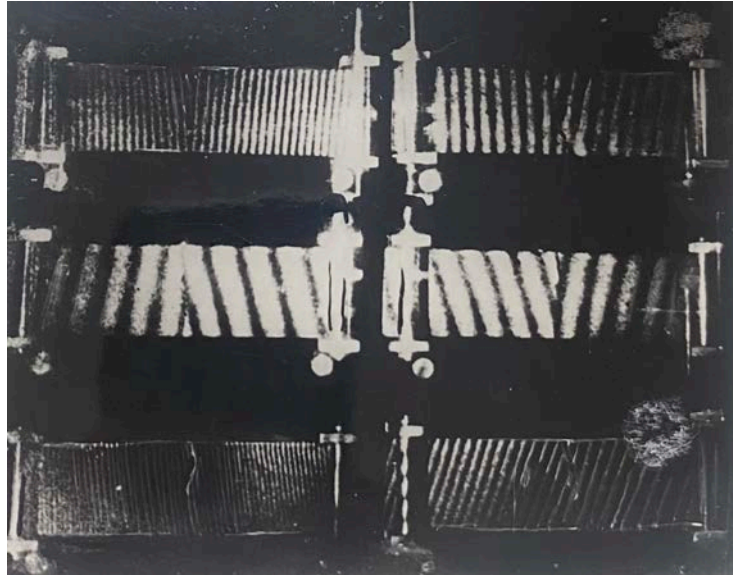


სურ. 29. ნიმუშების ინტერფეროგრამა დატვირთვიდან 18 საათის შემდეგ

თუ შეფასების არსებული პირდაპირი მეთოდების ანალოგიურად ავიღებთ დროს ნიმუშის ჩატვირთვიდან მასში ბზარის წარმოშობამდე (ინტერფეროგრამაზე ინტერფერენციული ზოლების დამახასიათებელი გარდატეხის აღმოჩენის დრო), ჩვენ მიერ შესწავლილ ცემენტებს შეიძლება მიეცეს ასეთი შეფასება. ყველაზე ბზარმედეგი აღმოჩნდა პორტლანდ-ცემენტი აქტიური მინერალური დანამატის გარეშე (ცემენტი #1). დანამატის უმნიშვნელო რაოდენობაც კი (ცემენტის წონის 15%) ბზარმედეგობის მნიშვნელოვან დაქვეითებას იწვევდა (ცემენტი #3). შედარებით მაღალი ბზარმედეგობა გამოავლინა წიდაპორტლანდცემენტმა (ცემენტი #5). ყველაზე დაბალი ბზარმედეგობა აღმოაჩნდა პუცოლანის პორტლანდ-ცემენტს (ცემენტი #6). შეიძლება ასევე აღვნიშნოთ, რომ ბზარმედეგობაზე,

ცემენტის აქტიური მინერალური დანამატების ფონზე, კლინკერის მინერალოგიური შემადგენლობის ცვლილებაზე გავლენა არ მოუხდენია.

ბოლოს აღვნიშნოთ, რომ ინტერფერენციული ზოლების ხასიათის ცვლილება გვატყობინებს ბზარების წარმოშობის შესახებ გაცილებით ადრე, ვიდრე ეს შეიძლება შევიტყოთ ნიმუშებზე ვიზუალური დაკვირვებით, თუნდაც 8-ჯერადი გამაძიდებელი ლუპით დათვალიერებამდე.



სურ. 30. ნიმუშების ინტერფეროგრამა დატვირთვიდან 20 საათის შემდეგ

რადგან ინტერფეროგრამა საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ შესასწავლი ობიექტის დეფორმაციის სიდიდე, მაშინ ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდი შეიძლება რეკომენდირებული იყოს ბეტონის ზღვრული გაჭიმვაობის დასადგენად, თუმცა აუცილებელია გასაჭიმი უბნის სიგრძის დადგენა, რომელიც მიღებული იქნება როგორც საბაზო, ზღვრული გაჭიმვის დეფორმაციის სიდიდის დასადგენად.

ამრიგად, ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდის გამოყენება საშუალებას იძლევა, გამოვავლინოთ ბზარი მისი წარმოშობის გაცილებით ადრეულ სტადიაზე, ვიდრე სხვა ცნობილი მეთოდებით (ნიმუშებზე ვიზუალური დაკვირვება, როგორცაა ტენზომეტრების დახმარებით დეფორმაციის გაზომვა და ულტრაბგერის გამოყენება).

აღნიშნული მეთოდი შესაძლებლობას იძლევა ზღვრული გაჭიმვის დეფორმაციის სიდიდის უფრო მკაცრად შესაფასებლად.

2.10 დანამატებიანი მსუბუქი ბეტონების ბზარმედეგობა

აღნიშნული სამუშაო ტარდებოდა მსუბუქი ბეტონის ბზარმედეგობაზე სხვადასხვა მაპლასტიფიცირებელი დანამატის გავლენის შეფასების მიზნით.

ნიმუშები დამზადებული იყო ბუნებრივი ფორიანი შემავსებლის საფუძველზე - ვულკანური წიდის საბადო ოკამი საქართველო, შემკვრელის სახით გამოიყენებოდა რუსთავის 400 მარკის წიდაპორტლანდცემენტი. მაპლასტიფიცირებელი დანამატების სახით გამოყენებულ იქნა ახალი ეფექტური დანამატები - მაპლასტიფიცირებელი დანამატი Nanocast 500 და Nanoment 1045.

დანამატების ოპტიმალურმა რაოდენობამ, დადგენილმა ბეტონის ნარევის უდიდესი ძვრადობის და ბეტონის მაქსიმალური სიმტკიცის მიხედვით, Nanocast 500 -თვის შეადგინა ცემენტის მასის 0,2%, ხოლო Nanoment 1045-თვის - 0,5%.

დამზადებულ იქნა ნიმუშები - პატარა კოჭები ზომებით 4X4X16 სმ. ბეტონის ნარევის სიხისტე შეადგენდა 20-30 წამს [23].

ბეტონის მყიფე მსხვრევადობის თავიდან ასაცილებლად და დაძაბულობის ფიქსაციის შესაძლებლობის დასადგენად, რომლის დროსაც ჩნდება პირველი ბზარი, პატარა კოჭების არმირება ხდებოდა გაჭიმულ ზონაში 3 მმ დიამეტრის მქონე ორი ფოლადის ღეროთი, შეერთებული ერთმანეთთან სამი ცალუდით.

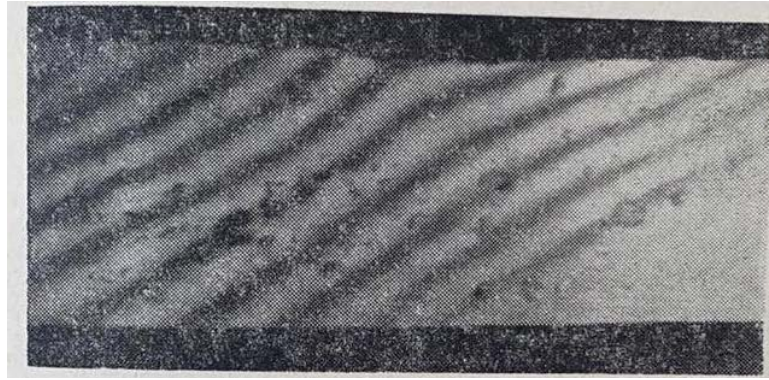
დანამატებიანი მსუბუქი ბეტონის ნიმუშების პარალელურად, შედარებისთვის დამზადებულ იქნა იმავე შემადგენლობის საკონტროლო ნიმუშები დანამატების გარეშე (ცხრ. 5). ბეტონის ყველა ნარევის ძვრადობა შენარჩუნებული იყო მუდმივად, გამაგრების წყლის ოდენობის შეცვლის გზით.

ბეტონის შედგენილობა

შემად.	ბეტონის სახე	მასალების ხარჯი 1მ ³ -ზე, კგ					დანამატის რაოდენობა, გ
		ცემენტი მ - 400	ქვიშა 0 - 5 მმ	ხრეში	ფრაქცია	წყალი	
				5 – 10	10 – 20		
1	ბეტონი Nanocast 500 დანამატით	237	626	228	349	265	0,5
2	ბეტონი Nanomen t 1045 დანამატით	237	626	228	349	244	1,2
3	ბეტონი საკონტროლო, დანამატის გარეშე	237	626	228	349	302	—

ჩამოსხმული ნიმუშები წინასწარი დაყოვნების გარეშე დატენიანებული იყო რეჟიმით (3 – 7 – 3) სთ.

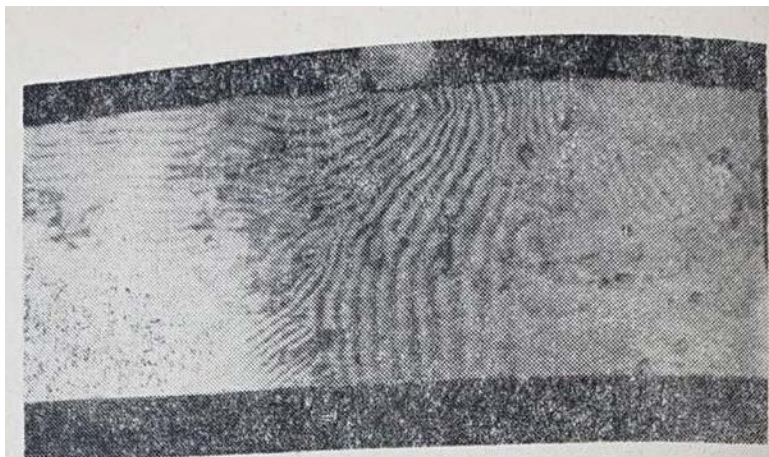
თითოეული სერიის სამ-სამი ნიმუში გამოცდილი იყო ღუნვაზე 10ტონიან ჰიდრაულიკურ პრესზე ერთი კონცენტრირებული დატვირთვით. დანარჩენი სამი ნიმუშის გამოცდა ხდებოდა ბზარმედეგობაზე. ნიმუშებიდან ჰოლოგრამების გადაღება ხდებოდა ღუნვაზე მათი გამოცდისას იმავე პრესზე ერთმოდრიანი ჰელიუმ-ნეონის ლაზერით ლგ-38 (ЛГ-38), ტალღის სიგრძით 633 ნ.მ. სიმძლავრით 50 მვტ, ი. მ. დენისიუკის მიხედვით ჰოლოგრაფიულ ფოტო ფირფიტებზე პე-2 (ПЭ-2) ზომებით 9x12. ამ ჰოლოგრამების უპირატესობას წარმოადგენს გამოსახულების აღდგენის შესაძლებლობა ჩვეულებრივი ვარვარების ნათურების მიმართული სინათლის მეშვეობით.



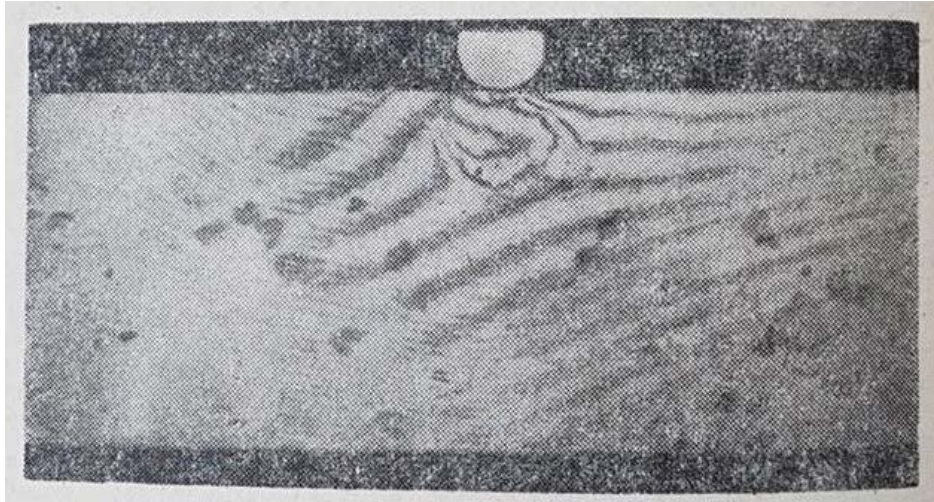
სურ. 31 ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამა. ბეტონი საკონტროლო, დანამატის გარეშე. $P = 1300$ H. პირველი ბზარის წარმოქმნა. ვიზუალურად ბზარი არ აღინიშნება.

ჰოლოგრაფირებას აწარმოებდნენ ორმაგი ექსპოზიციის მეთოდით 3-წუთიანი ინტერვალით ექსპოზიციებს შორის და ექსპონირების დროით 10 წმ.გამოცდების შედეგები (საშუალო) 3 ნიმუშიდან მოყვანილია ცხრილში 6. სურ. 31, 32, 33. აგრეთვე მოყვანილია რამდენიმე ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამა, რომელიც ასახავს პირველი ბზარის გაჩენის მომენტს და ბზარების განვითარების დინამიკას მთელ ზედაპირზე.

მოყვანილი მონაცემები აჩვენებენ, რომ მაპლასტიფიცირებელი დანამატები Nanocast 500 და Nanoment 1045 ამაღლებენ მსუბუქი ბეტონის ბზარმედეგობას სიმტკიცის ერთდროული მნიშვნელოვანი (15 - 28%-ით) ზრდით, რაც საშუალებას იძლევა პერსპექტიულად ჩაითვალოს აღნიშნული დანამატების გამოყენება მსუბუქი ბეტონის კონსტრუქციების ბზარმედეგობის ასამაღლებლად.



სურ. 32 ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამა. ბეტონი Nanocast 500 დანამატით. $P=1600$ H. ნიმუშის რღვევა.



სურ. 33 ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრაფია. ბეტონი Nanoment 1045 დანამატით.

$P = 1800$ H. ბზარის წარმოქმნა. ვიზუალურად ბზარი არ ჩანს.

ზემოთ მოყვანილი ჰოლოგრამები გადაღებული იყო ნიმუშების გვერდითი წახნაგებიდან. შემდგომში გადაღების გასაუმჯობესებლად ჩვენ მიერ შეიქმნა სამარჯვი, რომელიც ნიმუშის ორი მხრიდან მოხსნის და, ამგვარად, განვითარებად დეფორმაციებზე და ბზარების განვითარების დინამიკაზე ორი გვერდითა წახნაგიდან თვალყურის დევნების საშუალებას იძლევა.

ცხრილი 6

გამოცდების შედეგები

შემაღბ.	ბეტონის სახეობა	სიმტკიცის ზღვარი შეკუმშვაზე, კა	დამანგრეველი (დამრღვევი) დატვირთვა, H	პირველი ბზარის გაჩენის შესაბამისი დატვირთვა, H
1	ბეტონი Nanocast 500 დანამატით	11,2	2100	1600
2	ბეტონი Nanoment 1045 დანამატით	12,9	2300	1800
3	ბეტონი საკონტროლო, დანამატის გარეშე	9,5	1700	1300

2.11 ბეტონის დეფორმაციის ველის განსაზღვრა ტემპერატურული ზემოქმედებისგან შიგა დაძაბულობების განვითარებისას

გარემოს ფიზიკური ფაქტორების ზემოქმედება ბეტონში შიდა სტრუქტურული დაძაბულობების წარმოქმნას იწვევს. შიგა დაძაბულობებისა და ჯამური დაძაბულობების მაღალი მნიშვნელობა, რომელიც წარმოიქმნება გარემოს ფაქტორებისა და დატვირთვის ზემოქმედებისას, ბეტონში მისი საექსპლოატაციო მაჩვენებლების დამაქვეითებელი ზზარების გაჩენის, კონსტრუქციების მზიდუნარიანობის ნაადრევად ამოწურვის და მათი სამსახურის ვადის შემცირების მიზეზს წარმოადგენენ.

საყოველთაოდ აღიარებული აზრით შიდა დაძაბულობების წარმოქმნის მიზეზს წარმოადგენს, როგორც თვით ცემენტის ქვის, ისე მთლიანად ბეტონის არაერთგვაროვნება, ანუ შიგა დაძაბულობები ბეტონის სტრუქტურის მიკრო და მაკრო არაერთგვაროვნების შედეგებს წარმოადგენს[24].

ცემენტის ქვის არაერთგვაროვნების მიზეზად მიჩნეულია მასში სხვადასხვა ზომის ბოლომდე არაჰიდრატირებული კლინკერის ნაწილაკების (ცემენტის ფხვნილის პოლიდისპრესიულობის შესაბამისად), აგრეთვე დანამატების არსებობა; განსხვავება ჰიდრატული ახალწარმონაქმნების ზომებში და აგებულებაში, მათი კონტაქტის პირობებში; სხვადასხვა ზომისა და მოხაზულობის ფორების არსებობა და სხვ.

ბეტონის მაკროარაერთგვაროვნება განპირობებულია მსხვილი და წვრილი შემავსებლების არსებობით; სხვადასხვა ზომის, მოხაზულობის და მინერალოგიური შემადგენლობის მარცვლების არსებობით; მათი ფიზიკური და მექანიკური თვისებების განსხვავებით; მარცვლების განსხვავებული შეფუთვით და სხვა.

აღნიშნული არაერთგვაროვნებები ტემპერატურული გაფართოებების კოეფიციენტების სიდიდეებში, დრეკად მახასიათებლებში და ცალკეული სტრუქტურული ელემენტების სორბიციული თვისებებში განსხვავების არსებობისას იწვევენ იმას, რომ გარე მექანიკური ზემოქმედების ტემპერატურის ან ტენის შემცველობის ცვლილების ზეგავლენით, სტრუქ-

ტურული ელემენტები დეფორმირდება სხვადასხვანაირად. ცალკეული ელემენტების დეფორმაციის შეუთანხმებლობა მათი თავისუფალი დეფორმირების შეზღუდვის გამო შიგა ძალისხმევის წარმოქმნას იწვევს. სტრუქტურული დამაბულობების წარმოქმნის მიზეზია, აგრეთვე გამყარების პროცესში მყოფ ცემენტის ქვაში მიმდინარე ფიზიკურ-ქიმიური პროცესები, რომელთაც თან სდევს ახალწარმონაქმნების ფორმისა და ზომების ცვლილება, კრისტალიზაციური წნევის განვითარება და სხვა.

შიგა დამაბულობების შესწავლა, რომლებიც ბზარებისა და რღვევების წარმოქმნის მიზეზს წარმოადგენენ, სულ უფრო მზარდ ინტერესს იპყრობს. ამასთან ამ მიზნით მკვლევრები სხვადასხვა საშუალება მიმართავენ: მათემატიკური მოდელების ანდა სხვადასხვა სახის ფიზიკური მოდელის კვლევას.

გ. გორჩაკოვის ნაშრომში, ბეტონის გამყარებისა და გაყინვისას წარმოქმნილი მიკროსტრუქტურული დამაბულობების მათემატიკური ანალიზისას და თვისობრივი კავშირის დადგენისას ბეტონის შიგა დაბზარვასა და ცემენტის ქვის ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებს შორის, როგორცაა შეკლება, ზღვრული დეფორმაციულობა და სხვ. მოდელად გამოყენებულია მოდელი ქვის ორი ნაჭრის (შემავსებლის მარცვლების) და მათ შორის შემაკავშირებელი ცემენტის ფენის სახით.

აღნიშნული ნაშრომში მსჯელობის არსი დაჰყავდათ იქამდე, რომ შემაკავშირებელი ცემენტის ფენა არ დაიბზარება, თუ უდიდესი წაგრძელება რომელიც ჩნდება ფენის შუაში, არ გადააჭარბებს წაგრძელების ზღვრულ დეფორმაციას. ჰენკი, სმიტი და სხვები იყენებდნენ ბეტონის სტრუქტურული უჯრედის მოდელს მუდმივი სისქის გარსით დაფარული სფერული მარცვლის სახით. გაშრობისას გარსი და მარცვალი იკუმშება. ცემენტის ქვის და ბეტონის ხსნარული შემადგენლის დეფორმაცია მნიშვნელოვნად აჭარბებს შემვსების სახით გამოყენებული სამთო ქანების ფარდობით შეკუმშვას. მაშასადამე, ცემენტის გარსი უჭერს (კუმშვას) მარცვალს და მასში მკუმავ (რადიალურ) დამაბულობებს იწვევს, მაშინ

როდესაც თვით გარსში წამოიქმნება მარცვლისა და გარსის დეფორმაციული უნარების განსხვავებაზე დამოკიდებული გამჭიმავი დაძაბულობები. სფერულ გარსში ნორმალური დაძაბულობების განსაზღვრისთვის გამოიყენება ლიამოს გადაწყვეტა თანაბრად განაწილებული შიგა წნევის მოქმედების ქვეშ მყოფი ღრუ სფეროსთვის, როგორც აღნიშნულია ნაშრომში ასეთი მოდელის გამოყენებას ის ნაკლი გააჩნია, რომ შემვსები მასში განიხილება, როგორც ხსნარის სქელი გარსით გარშემორტყმული იზოლირებული ბირთვი. ამგვარი სქემისას ხსნარის შეკლება იწვევს ბირთვის მხოლოდ რადიალურ კუმშვას და დაძაბულობებს, რომლებიც ხსნარში ბზარების წარმოქმნას იწვევენ ამავე მიმართულებით. ხოლო ის მიმართულებები, რომლებიც იწვევენ ბზარებს შემვსების და ხსნართან კონტაქტის მიხედვით, მხედველობის არის მიღმა რჩება. ეს ეწინააღმდეგება ექსპერიმენტულ მონაცემებს.

რამდენამდე უფრო უახლოვდება ბეტონის რეალურ სტრუქტურას მოდელი, რომელიც განხილულია თომასის და სიუს ნაშრომში. ის შედგება ოთკუთხედის კუთხეებში განლაგებული და მატრიცით გარშემორტყმული შემვსების მრგვალი ხისტი დისკებისგან. ამოცანის გადაწყვეტისას მიღებულია, რომ უკანასკნელი იცვლება მოცულობაში (ცემენტის და წყლის ურთიერქმედების შედეგად) დატენიანების, შრობის, ტემპერატურის და ა. შ. ცვლილებისას. განიხილება ორი სახის ბზარები:

- 1) შემვსების გარშემომყოფ ხსნართან კონტაქტის ზონაში (შეჭიდულობის ბზარები);
- 2) თავად ხსნარში (ხსნარის ბზარები)

ნაშრომში განხილული მოდელი უფრო მეტად უახლოვდება ბეტონის რეალურ სტრუქტურას, ვიდრე წინა მოდელი, მაგრამ არ შეიძლება არ აღნიშნოთ, რომ ის შედგება ოთკუთხედის კუთხეებში განლაგებული და ხსნარით გარშემორტყმული შემვსების მრგვალი ხისტი დისკებისგან, ანუ განხილვას ექვემდებარება ძლიერ იდეალიზებული რეგულაური სქემა,

მაგრამ ის მაინც გვაძლევს საშუალებას, ვიქონიოთ თვისობრივი წარმოდგენა ბეტონში წარმოქმნილი დაძაბულობების ველის თაობაზე.

სტრუქტურის მიხედვით იმდენად რთულ მასალაში, როგორცაა ბეტონი, ჭეშმარიტი დაძაბულობების ველის ანალიზური გზით წარმოდგენა შესაძლებელი არ არის. ამასთან საქმე არამარტო სტრუქტურის სირთულეში მდგომარეობს. ცემენტი-ქვიშის მატრიცა, რომელშიც ჩართულია მსხვილი შემვსების მარცვლები, დეფორმაციას განიცდის ცემენტის მოჭიმვის და გამყარების ყველაზე ადრეულ სტადიაზე. ამასთან იცვლება ცემენტ-ქვიშის ნარევის დეფორმაციის მახასიათებლები. ბლანტი დენადი ნარევი თანდათან გადადის მყარის მაგვარ დრეკად-ბლანტ სხეულში და მასაშადად, ამ დროს განვითარებული დეფორმაციებსა და დაძაბულობებს შორის კავშირის ხასიათი მუდმივად იცვლება. ბუნებრივია, რომ იცვლება სხეულის დრეკად-ბლანტი მახასიათებლებიც. თუ ნათქვამს იმასაც დავამატებთ, რომ დეფორმირების პროცესის ნელა მიმდინარეობისას, როგორც ამას ადგილი აქვს შეკლებისას, დიდ როლს ასრულებენ რელაქსაცია და ცოცვადობა, ცხადი გახდება ის დაუძლეველი სიძნელეები, რომლებიც წარმოიქმნება ამოცანის ზუსტი ანალიზური განხილვისას, მაგრამ ნათქვამი მიუთითებს დაძაბული მდგომარეობის ექსპერიმენტალური გზით დადგენის ამოცანის სირთულეზეც. აქედან გასაგებია, არსებული ინტერესი დაძაბულობების უშუალო გაზომვის მეთოდების მოძიების მიმართ დიდია, რომელნიც ბეტონის გამყარების პროცესში დაძაბული მდგომარეობის ჩამოყალიბებაზე თვალყურის დევნების საშუალებას იძლევა. ამ მიზნით ტენზომეტრული ხელსაწყოების გამოყენება პრაქტიკულად გამორიცხულია, ვინაიდან როგორც უკვე ნათქვამი იყო, დაძაბულობის კავშირი დეფორმაციასთან ცემენტის ქვის ხელსაწყოების ჩაყენება პრაქტიკულად ძალიან რთულია [25].

აღნიშნული ამოცანის გადაწყვეტის მოძიების პროცესში შემოთავაზებული იქნა პოლარიზაციულ-ოპტიკური მეთოდები. ტეეპე, ვ. სახაროვი ბეტონის დაძაბული მდგომარეობის დასადგენად იყენებდნენ ოპტიკურად მგძნობიარე დაფარვას, რომელსაც ამრეკლი ფენით ქვემოთ

აწებებდნენ კონსტრუქციის იმ არეს, სადაც დეფორმაციები იზომებოდა. კონსტრუქციაში წარმოქმნილი დეფორმაციები გადაეცემოდა დაფარვას და იწვევდნენ ოპტიკურ ეფექტს, რომელიც არეკლილ სინათლეში იზომებოდა პოლარიზაციულ-ოპტიკური ხელსაწყოებით. ამ მეთოდით ავტორებმა მიიღეს გარე დატვირთვის გავლენის ქვეშ მყოფი მძიმე და მსუბუქი ბეტონების დეფორმირებული მდგომარეობის სურათები, მაგრამ ზემოაღნიშნული მიზეზით მათ არ შეუძლიათ საკუთარი დამაბულობების განსაზღვრა ბეტონში. ასევე უნდა აღინიშნოს, რომ ოპტიკურად მგძნობიარე დაფარვის დატანა შესაძლებელია მხოლოდ ბეტონის მშრალ ზედაპირზე, რაც შეკლებასთან დაკავშირებული მოვლენების კვლევისას სერიოზულ მინუსს წარმოადგენს, გარდა ამისა, ოპტიკურად მგძნობიარე დაფარვებს არ გააჩნია საკმარისი მგრძნობელობა შედარებით უმნიშვნელო შეკლების დეფორმაციების დასაფიქსირებლად. ამ ნაკლისგან თავისუფალია ოპტიკურად მგრძნობიარე გადამწოდი, რომელიც გამოიყენეს თავის ნაშრომში ა. დესოვმა და ვ. ჩერნიშევმა. ის ცემენტის მასალაში მისი დამზადების მომენტიდან განვითარებული ძალისხმევების განსაზღვრის საშუალებას იძლევა ა. დესოვის და ვ. ჩერნიშევის მიერ შესწავლილი მოდელი წარმოადგენდა ხსნარის რგოლს, მასში ჩაყალიბებული ოპტიკურად მგძნობიარე ფირფიტით $5 \times 7,3$ სმ² და სისქით 0,4 სმ, თუმცა უნდა აღინიშნოს, რომ ხსენებული გადამწოდი არ ახდენს შემვსების ქცევის იმიტაციას, ვინაიდან მის დრეკად მახასიათებლებს სათანადო ყურადღება არ ექცეოდა და მაშასადამე, მოდელის ქცევა მთლიანობაში უნდა განსხვავდებოდეს რეალური ბეტონის ფრაგმენტის ქცევისგან.

იგივე შეიძლება ითქვას ი. ახვერდოვის და ვ. სკოჩელიასის ნაშრომში შესახებაც გამოყენებული მოდელის თაობაზეც. მათ მიერ შესწავლილი მოდელი წარმოადგენს ოპტიკურად მგძნობიარე პლასტმასისგან (ეპოქსიდური წებოს საფუძველზე) დამზადებული მართკუთხა ფირფიტას, თითბრის ან ალუმინისაგან დამზადებული სიმეტრიულად განლაგებული დიკებით.

დისკვებით ხდებოდა შემვსების მარცვლების, ხოლო პლასტმასის ფირფიტით - ცემენტის ქვის მატრიცის მოდელირება, როგორც მოდელის დადებითი მხარის სახით უნდა აღნიშნოს, რომ ის გარკვეულწილად „შემვსები-მატრიცის“ ზედაპირის ქცევის, კერძოდ შემვსების ხსნართან შეჭიდულობის მოდელირების საშუალებას იძლეოდა, მაგრამ ავტორების მიერ აღნიშნული მოდელი გამოიყენებოდა გარე მექანიკური დატვირთვით გამოწვეული დამაბულობის შიგა ველის შესასწავლად.

აღსანიშნავია რომ ტემპერატურული ბზარწარმოქმნის პროცესი, ბეტონის ნაგებობებში, რთული მრავალფაქტორიანი პროცესია და მისი ინტენსივობა დამოკიდებულია, როგორც ბეტონის სტრუქტურის თვისებებზე, ისე გარემო პირობებზე. ჩვენი და მსოფლიო გამოცდილებით ცნობილია, რომ მიუხედავად მნიშვნელოვანი წარმატებისა, ბეტონის წყობის თერმორეგულირების მეთოდების სრულყოფაში, ჯერ კიდევ მრავალი მშენებარე თუ აშენებული მასიური ბეტონის ნაგებობებში კერძოდ ბეტონის კაშხლებში დაფიქსირებულია სხვადასხვა ტრაექტორიის, სიღრმისა თუ გახსნის სიგანის მქონე ბზარები და ტემპერატურული შეკლებითი ნაკერები (ორგანიზებული ბზარები) ამდენად, უაღრესად მნიშვნელოვანია თანამედროვე, ურღვევი სრულყოფილი მეთოდებით ტემპერატურული ბზარწარმოქმნის პროცესის სხვადასხვა სტადიაზე დაკვირვება როგორც მშენებარე, ისე ექსპლოატაციაში მყოფ ბეტონის ნაგებობებზე.

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებში გაჩენილი ბზარები, ერთი მხრივ ამყარებენ მათ დამაბუღ დეფორმირებულ მდგომარეობას, მეორეს მხრივ გვევლინებიან ფილტაციის შესაძლო წყაროებად, რაც თავის მხრივ იწვევს ბეტონისა და არმატურის კოროზიას და საბოლოო ჯამში უარყოფითად აისახება ნაგებობების ხანგამძლეობაზე, აღნიშნულიდან გამომდინარე პროექტანტებს დამატებით მოთხოვნებს უყენებს ნაგებობის კონსტრუქციული ელემენტების (სექციები, ბლოკები) პარამეტრების (მოცულობის) გაზრდის თვალსაზრისით და ართულებს ბეტონის მასვის თერმორეგულირების პროცესს და ზრდის ტემპერატურული ბზარწარმოქმნის რისკს.

გამოკვლევული ფიზიკური მოდელების, ბეტონების რეალური თვისებებისადმი მეტი სიზუსტით შესწავლის მიზნით ჩვენ მიერ განხორციელებული იყო მცდელობა ბეტონის დეფორმაციის შესასწავლად ტემპერატურული ზემოქმედების დროს ჩაგვეტარებინა ექსპერიმენტალური კვლევა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდის გამოყენებით.

2.12 კვლევის მეთოდика

ტემპერატურული ზემოქმედების დროს ბეტონის დეფორმაციის შესასწავლად, ჩამოსხმული იყო მოდელი ზომით 310X210X40 (მმ) სურ, ქვიშაქვის ბეტონისაგან დურალუმინის მსხვილი შემვსების ჩართვებით. წვრილი შემვსების (ქვიშის) მაქსიმალური ზომაა - 5მმ. შემკვრელის სახით გამოიყენეს 400 მარკის შლაკპორტლანდცემენტი, დურალის მსხვილი შემვსები დიამეტრით - 20 მმ, 80 ცალის რაოდენობით. შემვსები ჩაძირული იყო ცემენტის მატრიცაში გადიოდნენ მასში გამჭოლად. ჩაძირვამდე მსხვილი შემვსები წინასწარ გასუფთავებული და თერმულად დამუშავებული იქნა. შეკვებითი ბზარების წარმოქმნის თავიდან ასაცილებლად, დაყალიბების შემდეგ მოდელი 28 დღე-ღამის განმავლობაში ნორმალური შენახვის პირობებში იმყოფებოდა.



სურ. 34 ბეტონის მოდელი მსხვილი შემვსეებით

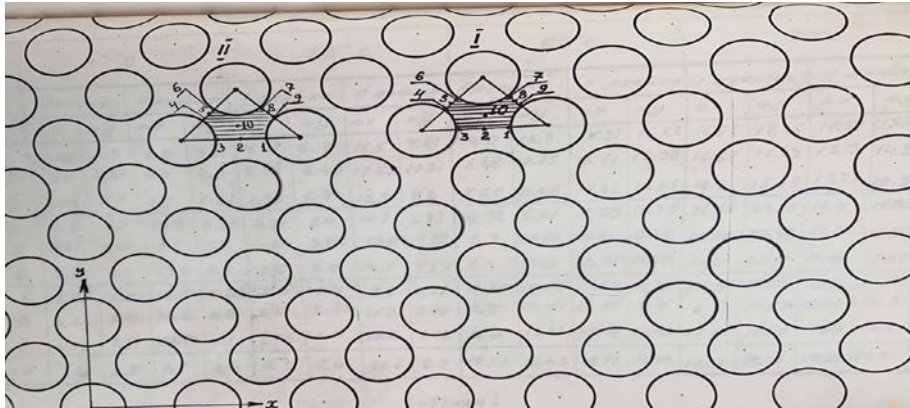
მოდელზე თანამდევო ტემპერატურული ზემოქმედების გამოსარიცხად, რომელიც ჰოლოგრაფიულ სტენდზე მაგრდებოდა რკინის სალტით, გამოყენებული იყო ასბესტის შუასადები, რომელიც მოთავსებული იყო ნიმუშსა და სალტეს შორის.

მოდელის გახურებას ვახორციელებდით, მრგვალი ბრტყელი დახურულ სპირალიანი გამახურებელი ელემენტით, რომელიც მოდელთან 30 სმ მანძილზე იყო განთავსებული. ტემპერატურის გაზომვა გადამწოდის საშუალებით ხდებოდა, რომელიც შეერთებული იყო ციფრულ ვოლტმეტრთან (VT-27)

ჰოლოგრაფირებას ვაწარმოებდით ლაზერით (ЛЛ-215), სიმძლავრით 50 მვტ, ორსხვიანი სქემით, ორმაგი ექსპოზიციის მეთოდი. ექსპოზიციის დრო - 45 წმ. გადაღება მიმდინარეობდა ჰოლოგრაფიული ფოტოფირფიტებზე (BP-11).

ექსპერიმენტის ჩატარების დროს, როცა ტემპერატურის ინტერვალი ექსპოზიციებს შორის აღემატებოდა 5⁰-ს, ინტერფეროგრამები არ რეგისტრირდებოდა, ამიტომ ჰოლოგრაფირებას აწარმოებდნენ საფეხურებრივი მეთოდით, ტემპერატურებზე 42-45, 52-55, 62-65, და 67-70 C⁰. პირველი ექსპოზიციის წინ ნიმუშს ვაცხელებდით 42 C⁰ ტემპერატურამდე, ხოლო 15 წუთის შემდეგ, რომელთა განმავლობაშიც ნიმუში ცხელდებოდა 45 C⁰ ტემპერატურამდე, მეორე ექსპოზიციას იმავე ჰოლოგრაფიულ ფოტოფირფიტაზე ვახდენდით, რის შემდეგაც ფოტოფირფიტას ვიღებდით კასეტიდან, გავამჟღავნეთ და განვსაზღვრეთ გადაადგილებები. ასეთივე მეთოდიკა გამოვიყენეთ 55,65,70 C⁰ ტემპერატურაზე ჰოლოგრაფირების დროს. ტემპერატურის ინტერვალი ექსპოზიციებს შორის შეადგენს 3 C⁰-ს რაოდენობრივი შეფასების მისაღებად გადაადგილებები განსაზღვრული იყო ორი საკვლევი უჯრედის 20 წერტილში. წერტილების დანომვრა მოყვანილია (სურ. 35-ზე) ცხრილში 7 მოცემულია გადაადგილებები (X და Y) მოდელის სიბრტყეში X და Y ღერძების გასწვრივ. ხოლო ნახ. 11- 20-ზე,

წერტილთა გადაადგილებების დიაგრამები მოდელის სიბრტყეში X და Y მიმართულებებით.



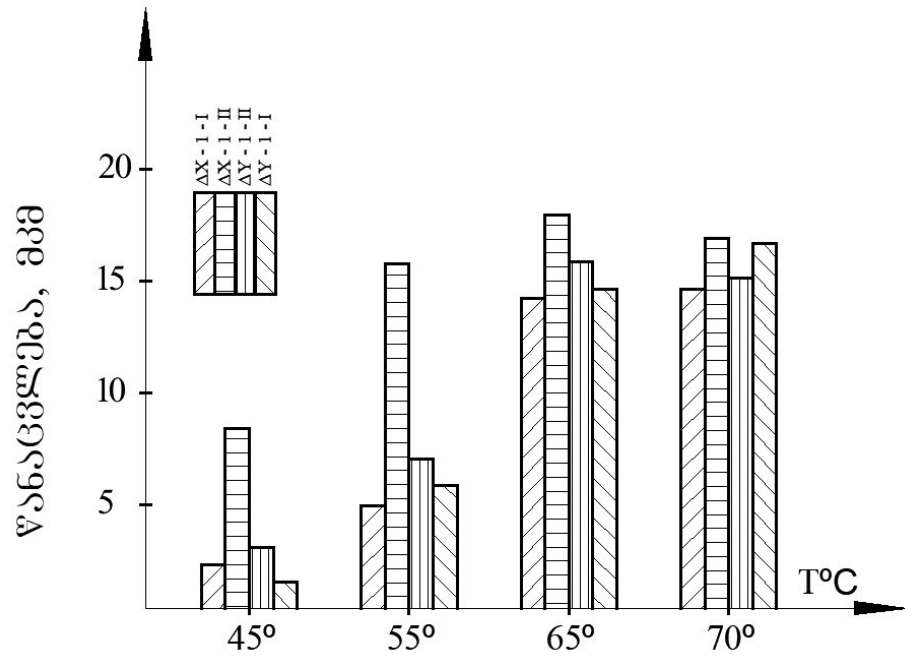
სურ.35 ცალკეული წერტილების გადაადგილებების სქემა X და Y ღერძების გასწვრივ

ცხრილი 7

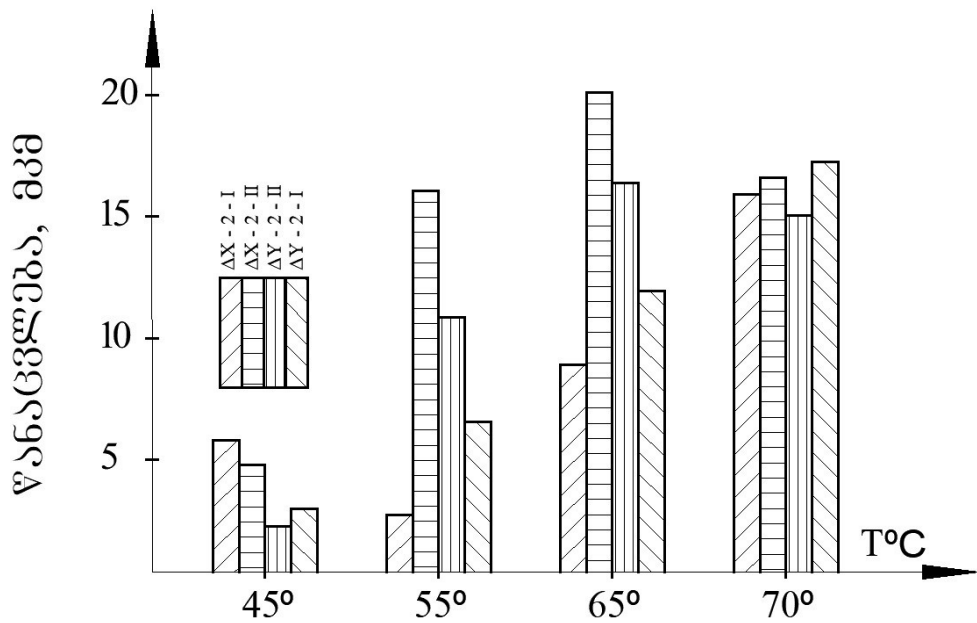
ცალკეული წერტილების გადაადგილებები X და Y ღერძების გასწვრივ მიკრომეტრებში

წერტილების №	45C°				55C°				65C°				70C°			
	I უჯრედი		II უჯრედი		I უჯრედი		II უჯრედი		I უჯრედი		II უჯრედი		I უჯრედი		II უჯრედი	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1	2,8 2	2,3	9, 2	3,0 1	4,3 7	5,7	16,5	7,81	14, 0	15,3	18,3 1	16,5 2	16,6 1	17,4 5	17,5 1	15,4 2
2	5,6 7	2,21	4, 4	2,0	2,3 6	6,4 3	17,55	10,3 2	8,4 8	10,2 5	18,1 1	15,3 8	16,6 1	16,3 3	15,3	14,3 2
3	5,4 3	2,7	7, 3	2,6 2	2,7 8	6,7	13,5	7,4	7,8 5	11,4 8	17,4 2	14,4 5	12,2 5	15,5 5	13,2 1	10,9
4	8,0	5,7	12, 0	3,3 1	4,6 1	9,4	10,7	6,92	4,9 2	6,41	12,5 9	10,3 9	22,6 4	23,3 5	11,4	11,8 3
5	3,6 1	2,0	9, 1	5,4	4,2 4	9,2 5	13,0	7,92	9,3	10,5 8	10,3 1	11,4 6	26,5 8	28,4 8	2,31	11,9 3
6	5,0	4,2	13, 4	2,5	2,5	8,7	14,5	7,37	6,3	7,36	13,8 1	14,5 8	18,0	20,3 1	13,6 2	12,6 7
7	2,2 5	5,0	12, 5	4,8 2	6,8 1	6,4	9,6	7,07	12, 87	12,6 3	10,5 3	19,3 9	15,5	17,8 8	16,7 3	10,5 2
8	4,7 1	5,4	13, 0	4,0	6,0	5,8 1	20,3	7,40	15, 4	15,4 6	21,3 7	18,7	5,6	10,3 9	17,5 2	14,3

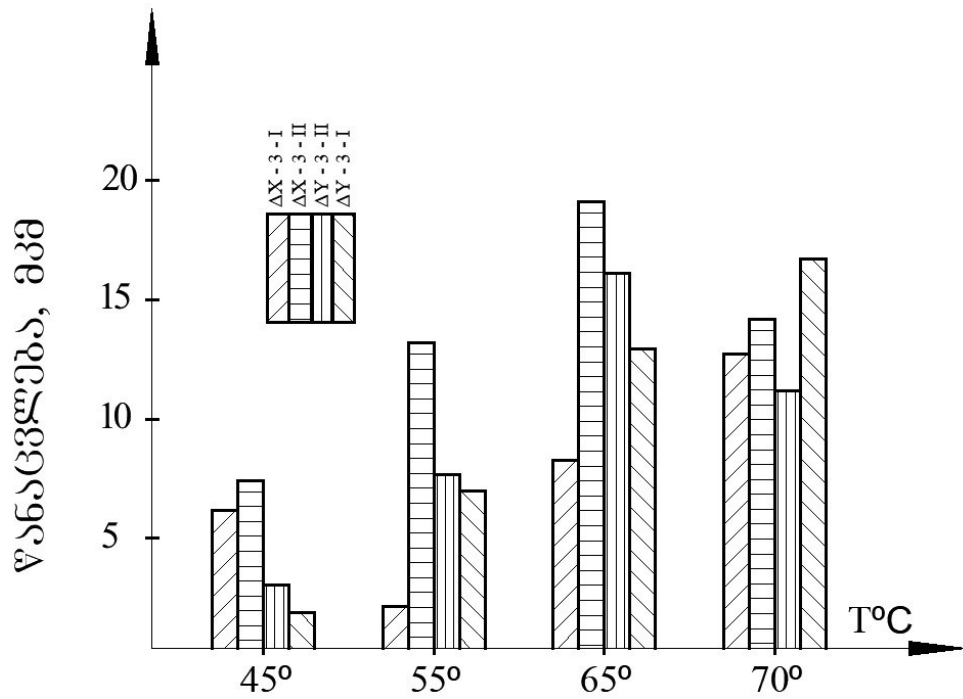
9	4,8 6	2,7	21 ,7	5,1	3,0 8	8,0	10,8	6,72	15, 8	13,3 1	15,5 8	13,4 3	11,0	10,4 9	17,9 3	16,2
10	7,2	2,9	8, 7	2,4	8,3	7,4	21,1	6,3	17, 51	15,4 3	19,7 7	18,8 3	18,6 2	19,4 1	19,2 4	17,4 1



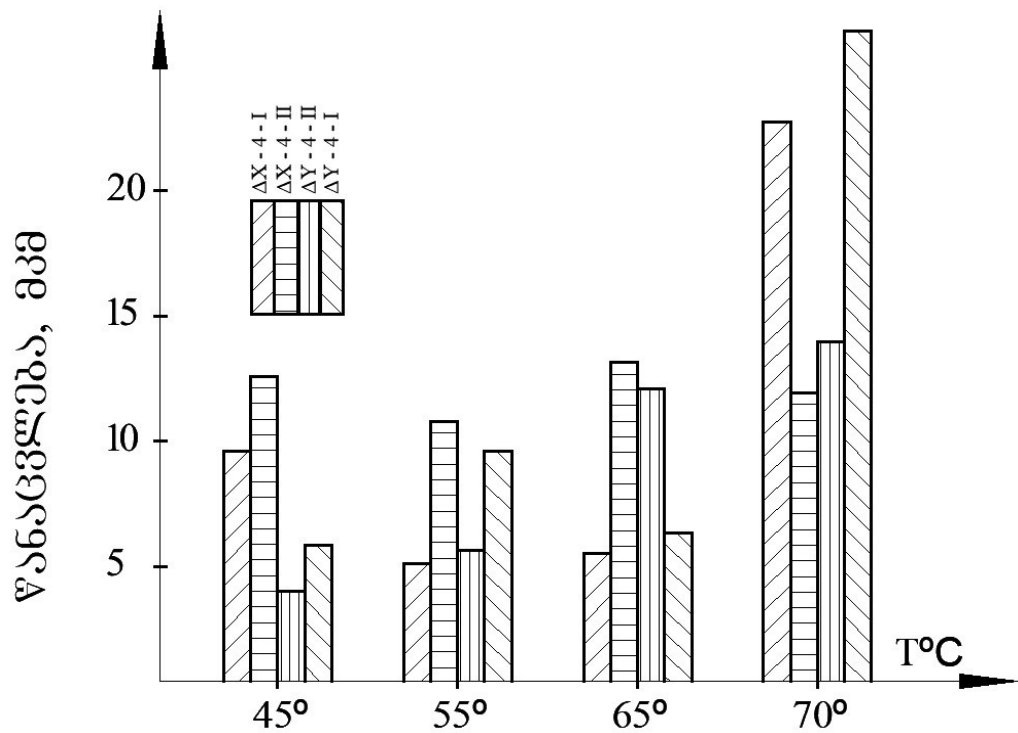
ნახ.11 წერტილების გადაადგილებები ნიმუშის სიბრტყეში X. მიმართულებით (Δx , Δy)



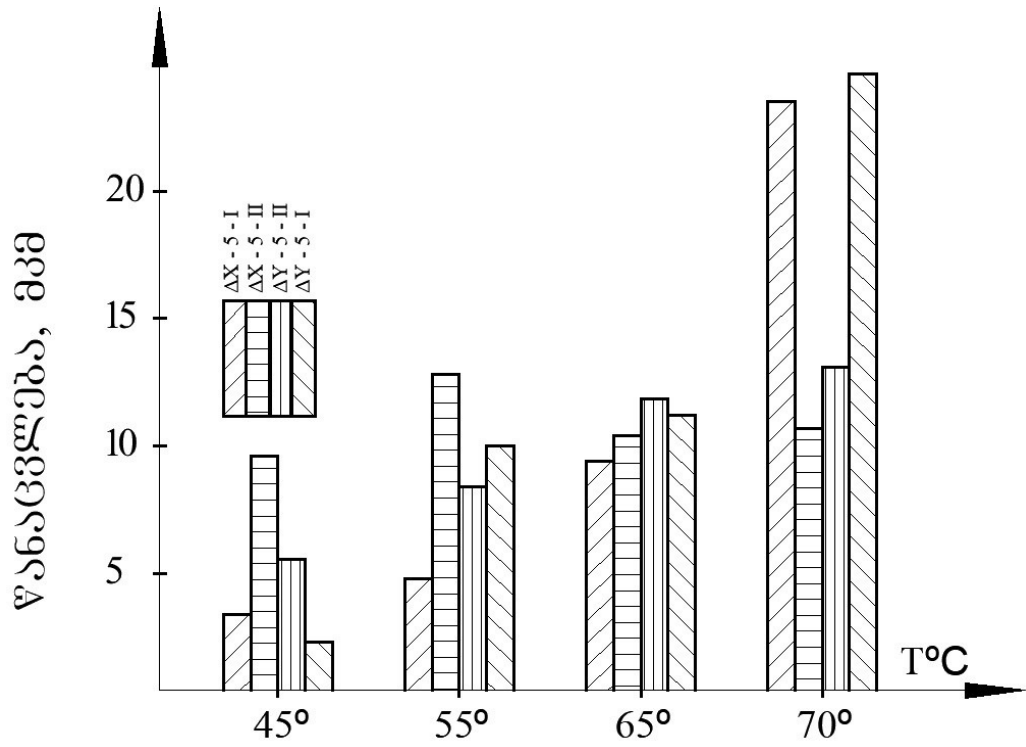
ნახ.12 წერტილების გადაადგილებები ნიმუშის სიბრტყეში X. მიმართულებით (Δx , Δy)



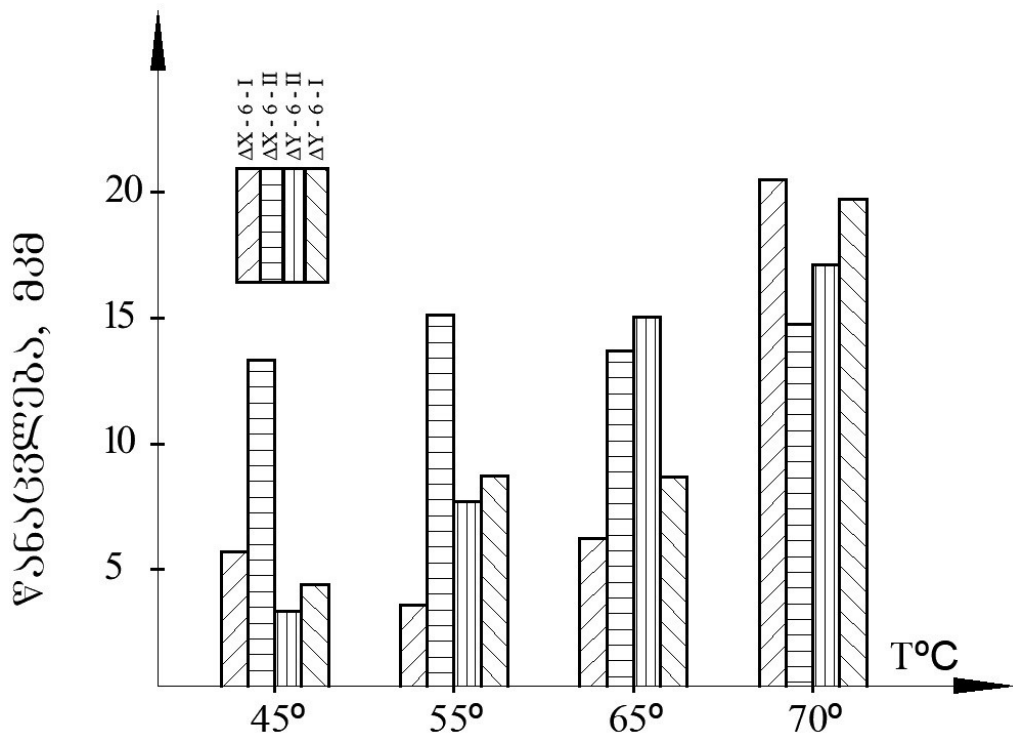
ნახ.13 წერტილების გადაადგილებები ნიმუშის სიბრტყეში X. მიმართულებით (Δx , Δy)



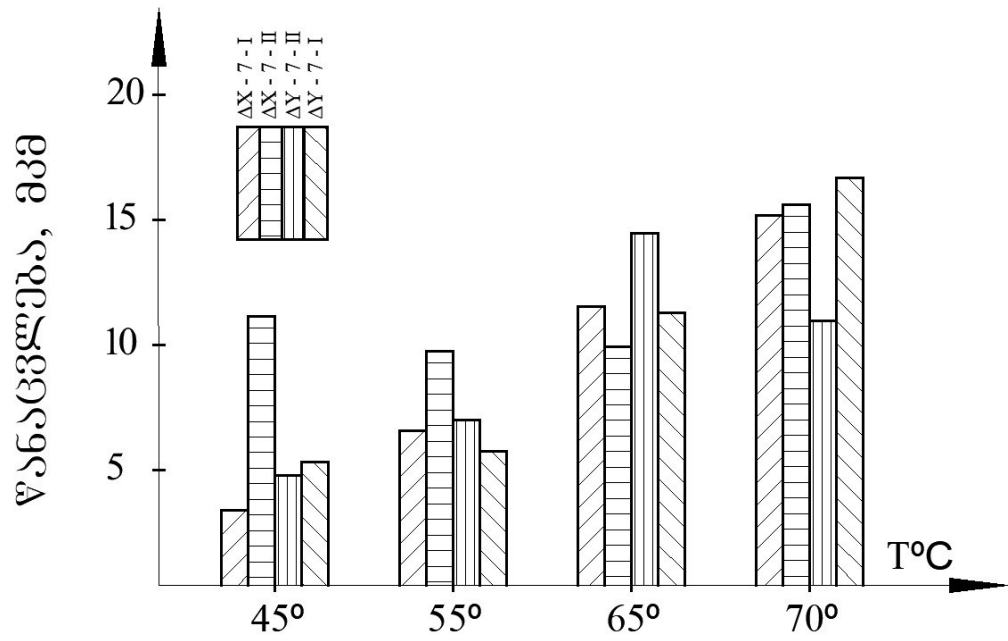
ნახ.14 წერტილების გადაადგილებები ნიმუშის სიბრტყეში X. მიმართულებით (Δx , Δy)



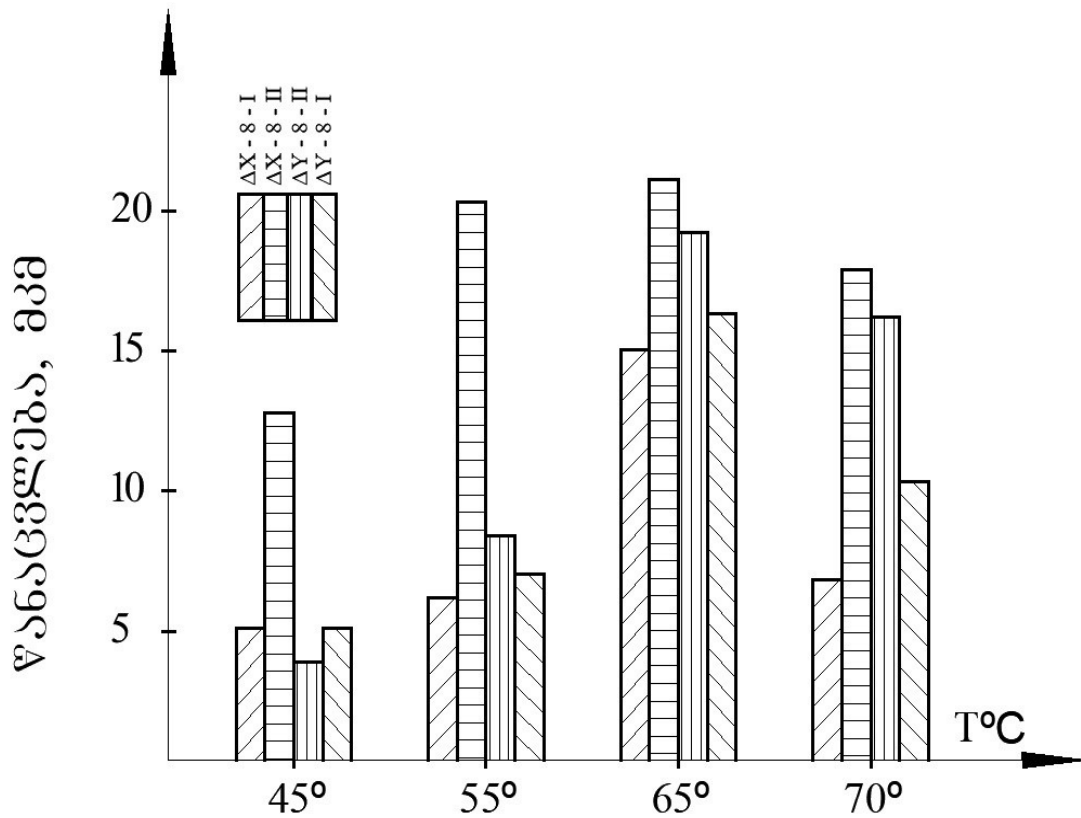
ნახ.15 წერტილების გადაადგილებები ნიმუშის სიბრტყეში X. მიმართულებით (Δx , Δy)



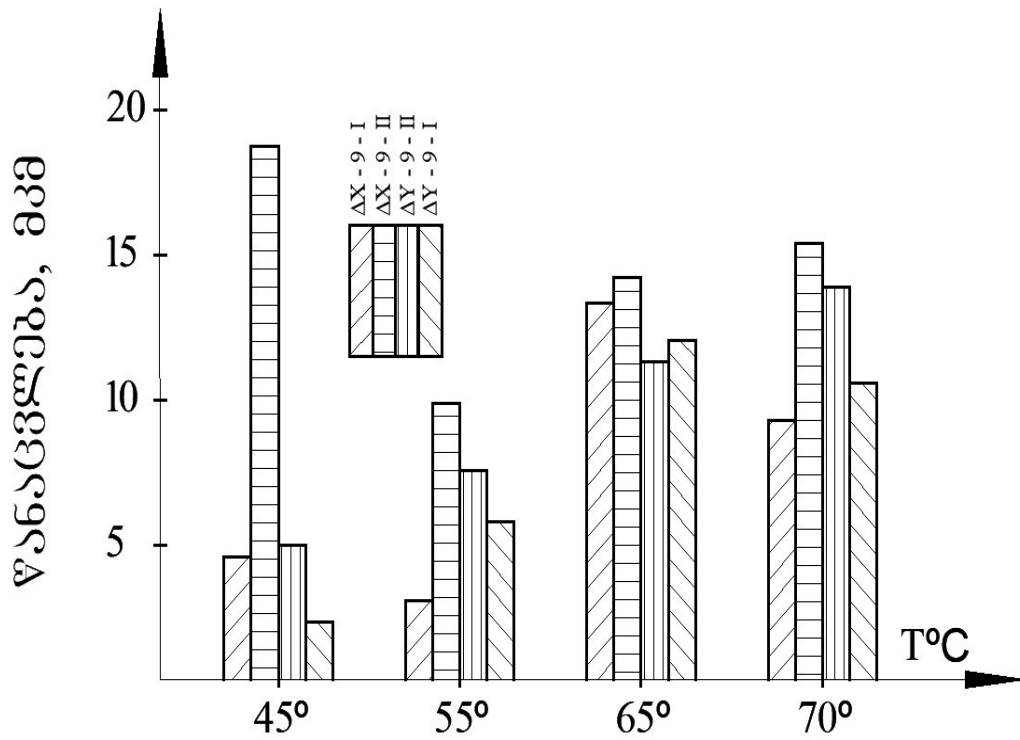
ნახ.16 წერტილების გადაადგილებები ნიმუშის სიბრტყეში X. მიმართულებით (Δx , Δy)



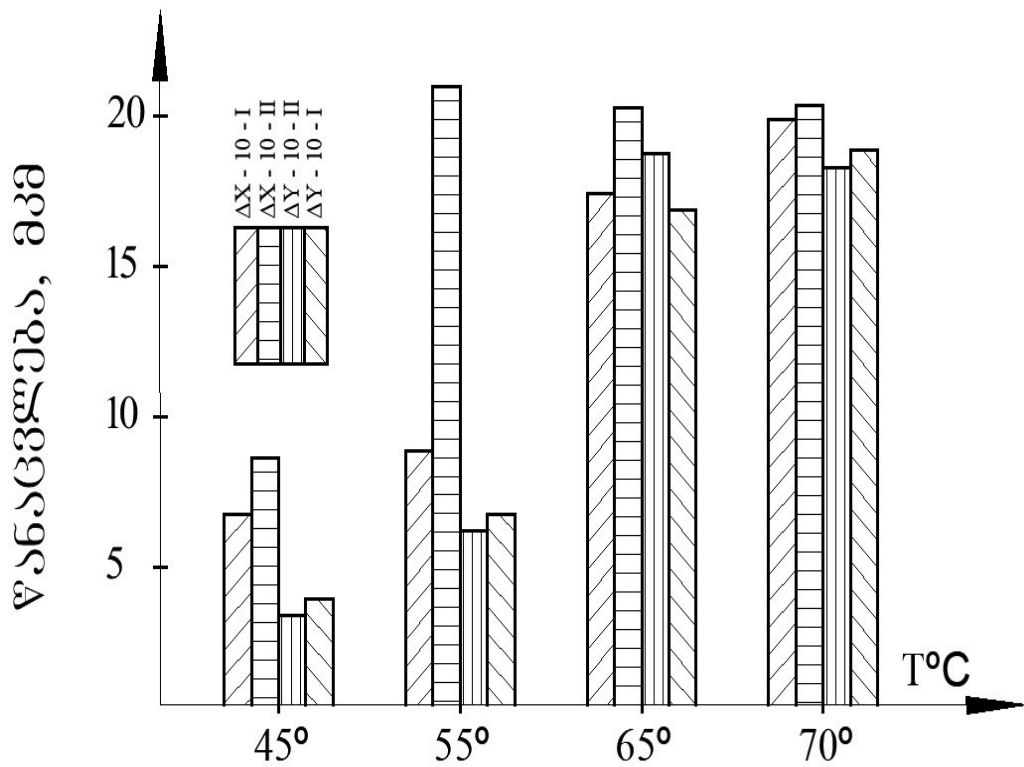
ნახ.17 წერტილების გადაადგილებები ნიმუშის სიბრტყეში X. მიმართულებით ($\Delta x, \Delta y$)



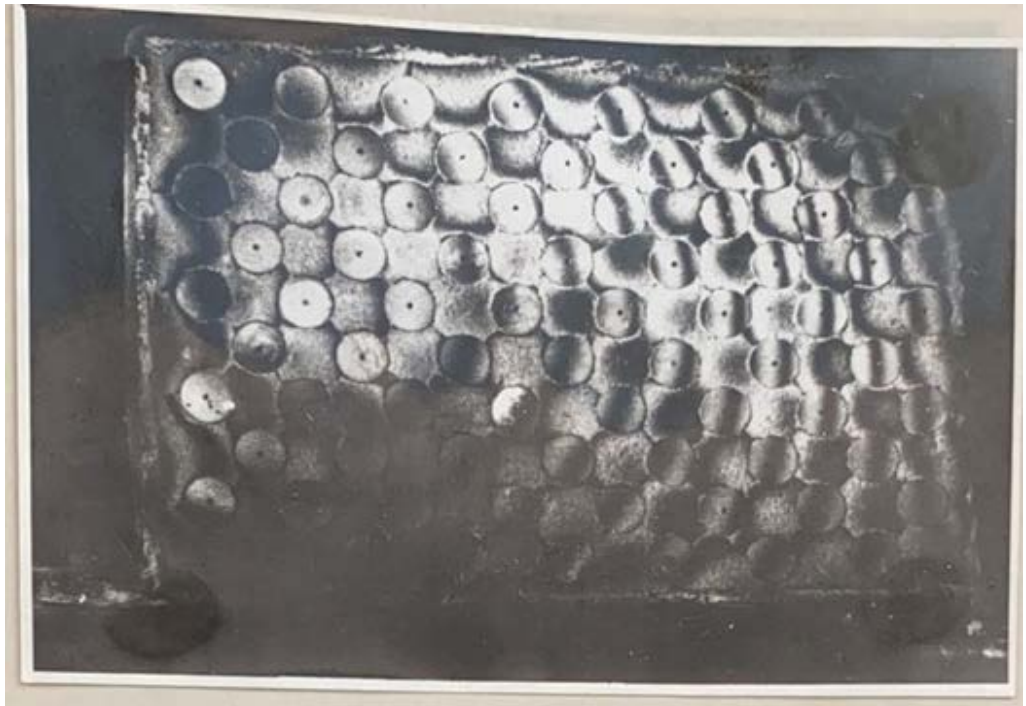
ნახ.18 წერტილების გადაადგილებები ნიმუშის სიბრტყეში X. მიმართულებით ($\Delta x, \Delta y$)



ნახ.19 წერტილების გადაადგილებები ნიშუმის სიბრტყეში X. მიმართულებით (Δx , Δy)



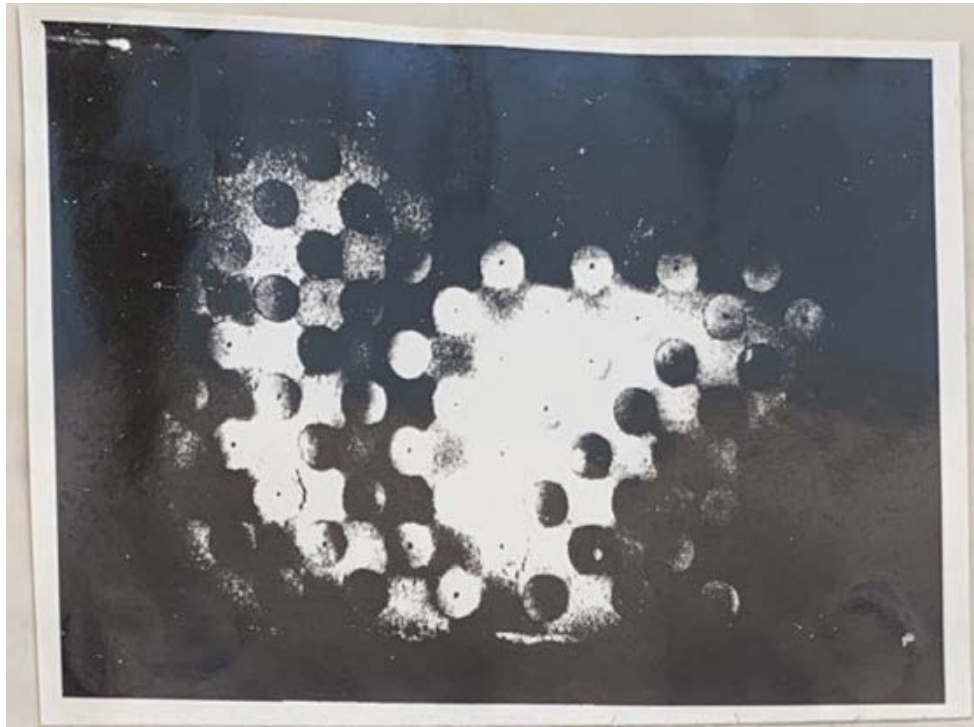
ნახ.20 წერტილების გადაადგილებები ნიშუმის სიბრტყეში X. მიმართულებით (Δx , Δy)



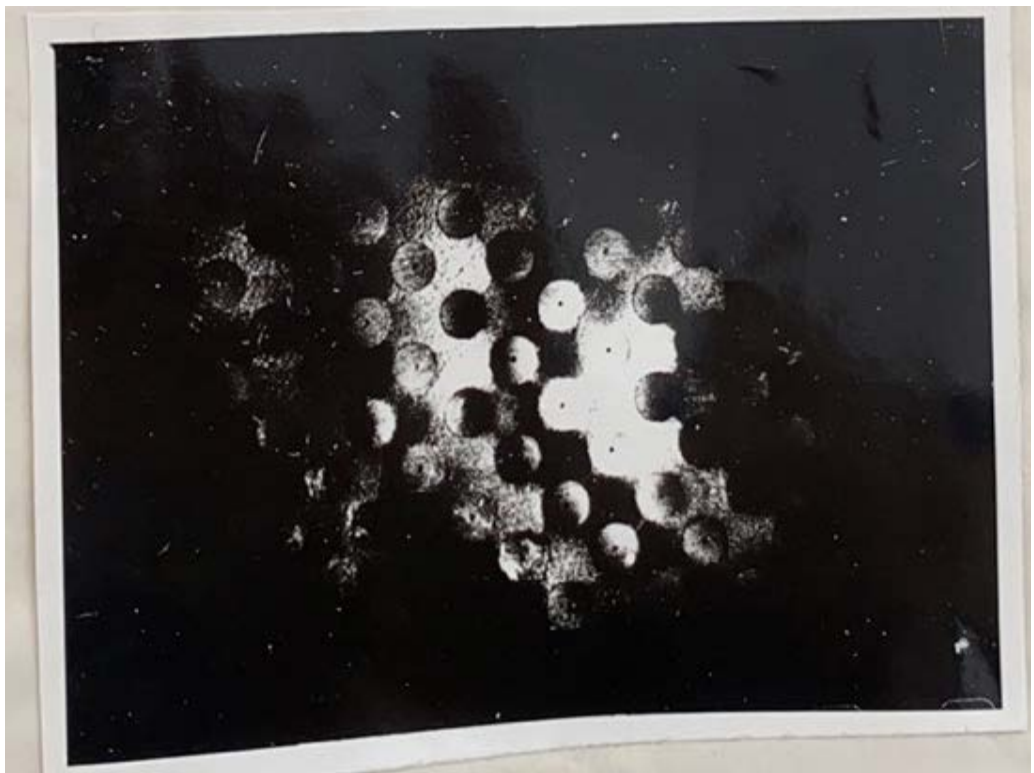
სურ. 36 ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამა მოდელის გაცხელებისას
ტ-45C°



სურ. 37 ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამა მოდელის გაცხელებისას
ტ-55C°



სურ. 38 ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამა მოდელის გაცხელებისას
ტ-65C⁰



სურ. 39 ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამა მოდელის გაცხელებისას
ტ-70C⁰

ინტერფეროგრამების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ჰოლოგრამის გადაღების დაწყებისთანავე ტემპერატურული ზემოქმედების დროს (43-45⁰) მოდელი არსებობდა ბზარები საკონტაქტო ზონებში მატრიცასა და შემდგომის მარცვლებს შორის. ეს გარემოება აისახა შიგა ძაბვების განვითარების ხასიათზე, რომლებიც ცალკეულ შემთხვევებში ტემპერატურის ზრდასთან ერთად მცირდებოდა. შემცირება შეინიშნებოდა, სახელდობრ იმ წერტილებში, სადაც ინტერფეროგრამაზე მონიშნული იყო ბზარები.

ბზარების არარსებობის დროს, ტემპერატურის ზრდასთან ერთად გადაადგილება იზრდებოდა, მაგრამ იქ, სადაც ჩნდებოდა ბზარი, შეინიშნებოდა გადაადგილების მონოტონური ცვლილების დარღვევა. ბზარების გავლენა შედარებით სუსტად აისახებოდა უჯრედების შუა ნაწილში განლაგებული წერტილების 10 გადაადგილებაზე.

1C⁰-ით ტემპერატურის ზრდის შესაბამისი გადაადგილებები ძლიერ იცვლებოდნენ. ჩვენ მიერ დაფიქსირებული მაქსიმალური მნიშვნელობები უდრიდა 9-10 მიკრომეტრს. 9-10 წერტილების დიდი გადაადგილება განპირობებულია იმით, რომ ის აღმოჩნდა საკონტაქტო ბზარის ზონაში. ანალოგიური ადგილებში (წერტილებში 1,3,4,7) გადაადგილებები ნაკლები იყო.

შედეგად გვიწევს იმის აღნიშვნა, რომ მოდელზე ტემპერატურული ზემოქმედების შედეგად წარმოქმნილი ბზარები, განაპირობებენ დიდ გაბნევას გადაადგილების სიდიდეებში. საცდელ მოდელში ტემპერატურული ბზარების წარმოშობის აცილება შეუძლებელია.

შემდგომში, შეკლებითი ბზარების წარმოშობის აღმოსაფხვრელად, საჭიროა საცდელი მოდელის ზედაპირის წყალგაუმტარი აპკებით დაფარვის შესაძლებლობის გამოკვლევა ან შევზღუდოთ მოქმედი ტემპერატურის სიდიდე 10-30 C⁰ ინტერვალით. ცხადია, რომ დასახული მიზნისთვის, უფრო მიზანშეწონილი იქნება ისეთი ცემენტის გამოყენება, რომელიც ნაკლებად იწვევს შეკლების პროცესს.

აღნიშნული ფუნდამენტურ-ექსპერიმენტალური კვლევების გაგრძელება უაღრესად მნიშვნელოვანია ჰიდროტექნიკურ მშენებლობაში, კაშხლის ტანში გამოსაყენებელი ბეტონის შედგენილობის დასადგენად, აგრეთვე როდესაც იცვლება ცემენტ-ქვიშის ნარევის დეფორმაციის მახასიათებლები და ბლანტი-დენადი ნარევი თანდათან გადადის მყარის მაგვარი დრეკად-ბლანტი სხეულში და მაშასადამე, გამყარების ადრეულ სტადიაზე დეფორმაციებსა და დამაბულობის შორის კავშირის ხასიათი მუდმივად იცვლება [26].

ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის გამოყენებით მოხდა მიმდინარე პროცესის როგორც რიცხობრივი ისე ვიზუალური ინფორმაციის დაფიქსირება არა გამოსაკვლევ მოდელებზე, არამედ უშუალოდ ბეტონის კონსტრუქციულ ელემენტზე დიდი სიზუსტით, უკონტაქტოდ, რაზეც შემდეგში დიდად არის დამოკიდებული ბეტონისა და რკინაბეტონის კონსტრუქციების მდგრადობა და ხანგამძლეობა.

2.13 ბეტონის რღვევის მექანიკა

რღვევის მექანიკა შეისწავლის ისეთი ხერხებისა და მეთოდების გამოყენებას რომელებიც უზრუნველყოფს დეფექტების შემცველი კონსტრუქციების უსაფრთხო ექსპლუატაციას.

როდესაც კონსტრუქციას რაიმე დეფექტი უჩნდება, მისი შრომისუნარიანობა ქვეითდება. კონსტრუქციაში დეფექტის აღმოჩენისას ცდილობენ რაიმე ხერხით მის აღმოფხვრას ან (უკანასკნელ შემთხვევაში) მთლიანად ცვლიან კონსტრუქციას. დეფექტოსკოპიის განვითარებამ აჩვენა, რომ ექსპლუატაციაში მყოფი კონსტრუქციების ელემენტების უმრავლესობა შეიცავს მიკროსკოპულ ბზარებს. ეკონომიური თვალსაზრისით კი ხშირად არახელსაყრელია ასეთი კონსტრუქციის ახლით შეცვლა. რღვევის მექანიკის მეთოდებისა და ხერხების გამოყენება გვამლევს საშუალებას, განვსაზღვროთ დროის რა პერიოდშია შესაძლებელი დეფექტიანი, ბზარიანი კონსტრუქციის შემდგომი ექსპლუატაცია [27,28].

ამრიგად რღვევის მექანიკის ამოცანაა რაოდენობრივი შეფასება მისცეს მოცემული ზომის დეფექტის შემცველი კონსტრუქციის წინააღმდეგობას კატასტროფული რღვევის მიმართ.

რღვევის ან ბზარების განვითარების მექანიკა წარმოადგენს მყარი დეფორმირებადი სხეულის მექანიკის ნაწილს, რომელიც გარე ძალების ზემოქმედებით ბზარშემცველი მყარი სხეულების ნაწილებად დაყოფის კანონებს შეისწავლის [29].

რღვევის მექანიკა მასალათა გამძლეობისაგან განსხვავებით ბზარების შემცველი ელემენტების სიმტკიცის პირობებს შეისწავლის.

სხეულის მთლიანი ან ნაწილობრივი რღვევის გარდა განასხვავებენ მყიფე, კვაზიმყიფე და ბლანტ (პლასტიკურ) რღვევებს.

მყიფე რღვევისას, რღვევა ბზარის სწრაფი განვითარებით და უმცირესი პლასტიკური დეფორმაციებით ან მის გარეშე ხდება. ამ დროს ბზარის გავრცელების სიჩქარე დაახლოებით ბგერის გავრცელების სიჩქარის 0.2-0.5 ნაწილს შეადგენს.

კვაზიმყიფე რღვევისას ბზარი წვერთან შეიმჩნევა პლასტიკური დეფორმაციებიც. ბზარის გავრცელების სიჩქარე ამ დროს დაახლოებით იგივეა, რაც მყიფე რღვევისას.

ბლანტი რღვევის დროს ადგილი აქვს მნიშვნელოვან პლასტიკურ დეფორმაციებს ბზარის წვერთან. ამ დროს ბზარის განვითარების სიჩქარე ბგერის გავრცელების სიჩქარის 0.05 ნაწილს შეადგენს.

განასხვავებენ რღვევის წრფივ და არაწრფივ მექანიკას რღვევის წრფივი მექანიკის კანონებით შეისწავლება მყიფე და კვაზიმყიფე რღვევები. ამ დროს ბზარის წვერთან განვითარებული პლასტიკური უბნები ბზარის სიგრძის 20%-ს არ უნდა აღემატებოდეს.

რღვევის არაწრფივი მექანიკა კი შეისწავლის ბლანტ და პლასტიკურ რღვევებს.

ძალოვანი ბზარების განვითარების კანონზომიერებათა კვლევა დაიწყო წინა საუკუნის 20-იან წლებში. ა. გრიფითსმა რღვევის კრიტერიუმის

განსაზღვრისათვის შემოიტანა ენერგეტიკული (განიხილება გრიფითს-ირვინის კრიტერიუმების ველის შეზღუდვის ზემოქმედება რღვევის მოქმედებისას) მიდგომა, შემდგომ გ. ირვინმა ძალური მიდგომა, სადაც მოგვიანებით დადგენილი იქნა დამოკიდებულება ა. გრიფითსისა და გ. ირვინის მიერ გამოყენებული ენერგეტიკულ და ძალური სიდიდეებს შორის, რაც ამტკიცებდა მათ იდენტურობას. ამ ახალი მეცნიერების განვითარება კარგად არის წარმოდგენილი რღვევის მექანიკისადმი მიძღვნილ ენციკლოპედიურ ნაშრომებში, რომელიც გამოიცა გ. ლიბოვიცის რედაქციით.

კომპოციზიური მასალების მიმართ რღვევის მექანიკის წარმატებული გამოყენებისათვის აუცილებელია ჩატარდეს გამოკვლევები ორი ძირითადი მიმართულებით. პირველი - აუცილებელია რღვევის პროცესის დეტალური შესწავლა, ბზარის განვითარების არსებულ-გამარტივებული მოდელები არასაკმარისად ზუსტად აღწერენ ამ პროცესს, მეორე - არსებითად მნიშვნელოვანია ექსპერიმენტული მეთოდების შერჩევის საკითხი.

ყველა ურღვევ მეთოდს აქვს როგორც დადებითი, ისე უარყოფითი მხარეები, სუფთა მეცნიერული, პრაქტიკული და ეკონომიური თვალსაზრისით. მეთოდის გამოყენება ძირითადად დამოკიდებულია ამოცანაზე, რომელიც დგას მკვლევრის წინაშე და იმ საშუალებებზე (ინტელექტუალური, ტექნიკური, მატერიალური) რომელიც მას აქვს.

ჰოლოგრაფიული ინტეფერომეტრიის მეთოდით მოხდა დაკვირვება ბეტონებში ბზარის ჩასახვაზე, მის განვითარებასა და დეფორმაციის ველზე მისი წვეროს მახლობლად. გაზომვის სიზუსტე ამ მეთოდით ხარისხით მეტია (633 ნ.მ.) ვიდრე სხვა მეთოდები, მოხდა მთლიანი პროცესის ვიზუალიზაცია.

ბეტონისადმი ხარისხის გაზრდილმა მოთხოვნამ, ხანგამძლეობამ, გამოყენების ფართო არემ და ექსპლუატაციის პირობებმა, ბოლო წლებში ბეტონის რღვევის მექანიზმმა მკვლევრების დიდი ყურადღება მიიქცია.

ერთ-ერთი პირველი მეცნიერი, რომელმაც რღვევის მექანიკაში გამოიყენა ჰოლოგრაფია და ჩაატარა შესაბამისი ექსპერიმენტები, იყო ტ. დიუდერალი.

სტრუქტურების ბუნებრივი დეფექტების დიდი რაოდენობა, რომლებიც იწვევს დაზიანების კონცენტრაციას, მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ბეტონის სიმტკიცესა და ბზარმდეგობაზე. მიკრო და მეზოდეფექტების წვერზე გარე დატვირთვისაგან წარმოიქმნება მაღალი ინტენსივობის დაზიანებები, რომლებიც ვრცელდება სიგრძესა და სიგანეში, აგრეთვე წარმოიქმნება მაგისტრალური ბზარები და ხდება ბეტონის სტრუქტურის ფრაგმენტაცია. ამასთან ეს პროცესი საგრძნობლად ხანგრძლივია დროში.

რკინაბეტონი არაერთგვაროვანი მასალაა: შიგა არაერთგვაროვნების გარდა, რომელიც მის სტრუქტურაზე დამოკიდებული გამყარებისა და დატვირთვისთვისას წარმოიქმნება და ვითარდება ბზარები. ბზარის მასშტაბების შკალა შედგება: ჩასახული ბზარები 0.1 ნმ - 10ნმ, მიკრობზარები 10² ნმ - 10² ნმმ, მაკრობზარები 1მმ - 10² მმ, მაგისტრალური ბზარები 1მ - 10. ბზარების პარამეტრებისას ყველაზე საიმედო და ფიზიკურად დასაბუთებულ შეფასებას იძლევა რღვევის მექანიკის მეთოდები, რადგან თვით ეს თეორია დაფუძნებულია ბზარის გავრცელების არსსა და ენერჯის ბალანსზე.

უძველესი დროიდან კაცობრიობა სიმტკიცისა და რღვევის პრობლემას აწყდებოდა. სიმტკიცეში იგულისხმება მასალის ან კონსტრუქციის თვისება ხანგრძლივი დროის განმავლობაში არ დაემორჩილოს რღვევას. განვსაზღვროთ რომელიმე მასალის სიმტკიცე, ამ ამოცანის ამოხსნის ორი გზა არსებობს: 1. თუ ვიცი ორ ატომს შორის შეჭიდულობის ძალა, შეგვიძლია გავიგოთ მასალის თეორიული სიმტკიცე; 2. დამზადებული ნიმუშის გამოცდით შეიძლება დადგინეს მისი ტექნიკური სიმტკიცე. ამ ორი გამოთვლის შეჯერება გვიჩვენებს, რომ თეორიული სიმტკიცე 100-200- ჯერ მეტია ტექნიკურ სიმტკიცეზე.

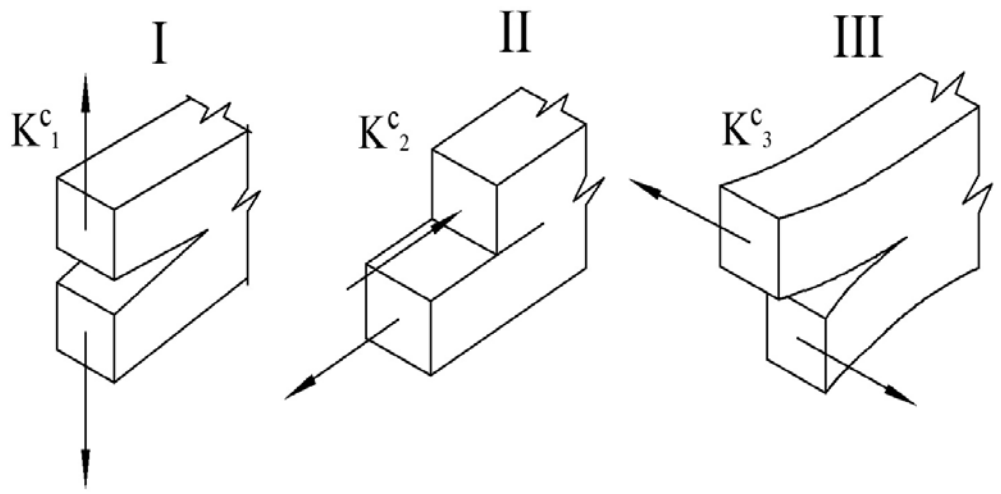
1948 წელს ინგლისელმა მეცნიერმა ირვინმა დაადგინა, რომ ცნობილი მეცნიერის გრიფიტის ნამუშევრები შესაძლოა გამოყენებული იქნეს უფრო პლასტიკური არაერთგვროვანი მასალებისათვის. ამისთვის საკმარისი აღმოჩნდა y კონსტანტა (რომელიც მასალის ზედაპირზე ენერჯის კუთხე სიმკვრივის ტოლია 0 შეცვლილიყო პლასტიკური დეფორმაციის კუთხის მუშაობით. იმის მაგივრად, რომ განეხილათ მთელი სხეულის საერთო ენერგეტიკული ბალანსი დ. ირვინმა განსაკუთრებული ყურადღება მიაქცია ბზარის წვერს, ყველაზე მეტი დაზიანების კონცენტრაციის წარმოქმნის ადგილს (მასალის შემდგომი რღვევის საწყის წერტილს), სადაც თავს იყრის განთავისუფლებული ენერგია.

დეფორმაციის და დაზიანების სიდიდე ბზარის წვერზე შეიძლება მივიღოთ სამი ძირითადი ტიპის დეფორმაცია ნახ. 21.

პირველი ტიპი დაკავშირებულია გახლეჩასთან, როდესაც ზედაპირული ბზარები ურთიერთსაპირისპირო მიმართულებით შორდება ერთმანეთს.

მეორე შეესაბამება განივ ძვრას, რომლის დროსაც ზედაპირული ბზარები მისრიალებს ერთმანეთზე.

მესამე დაკავშირებულია განივ ძვრასთან, როდესაც ბზარის ერთი ზედაპირი სრიალებს მეორეზე, ბზარის ფრონტის პარალელურად.



Activati

ნახ.21 ბზარის სამი ძირითადი ტიპი

ბეტონსა და სხვა ბევრ მასალაში გავრცელებულია გახლეჩის პირველი ტიპის ბზარები.

რღვევის მექანიკის პარამეტრებიდან მნიშვნელოვანია დამაბულობის ინტენსივობის კოეფიციენტი K , რომელიც ერთ-ერთი ძირითადი ადგილი დაიკავა დრეკადობის მოდულსა და პუასონის კოეფიციენტთან ერთად. იგი ითვლება მასალის მუდმივ სიდიდედ და ბზარმდეგობის ძირითად მახასიათებლად. K ერთადერთი პარამეტრია, რომლის მეშვეობითაც გამოითვლება დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა ბზარის არეში.

მიუხედავად მრავალრიცხოვანი გამოკვლევებისა, ბეტონის დეფორმირებისა და რღვევის ბუნების შესახებ ერთიანი დასრულებული თეორია არ არსებობს, რისი ძირითადი მიზეზიც ბეტონის რთული აღნაგობაა, არსებული თეორიებიდან შეიძლება გამოიყოს სამი მიმართულება: ფენომენოლოგიური, სტრუქტურული და კონტინუალური.

ფენომენოლოგიური თეორიების მიხედვით რღვევა იწყება მაშინ, როდესაც სხეულის რაღაც წერტილში შესაბამისი პარამეტრები ან მათი კომბინაცია მიაღწევს ექსტრემალურ მნიშვნელობას. შედარებით ერთგვაროვანი სხეულებისათვის, როგორცაა ლითონები, მინა და სხვ, ეს თეორიები დამაკმაყოფილებელ შედეგს იძლევა, მაგრამ ბეტონებისათვის სხვადასხვა მკვლევრის მიერ მიღებული ექსპერიმენტული შედეგები ხშირად ურთიერთსაპირისპიროა.

სტრუქტურულ თეორიებში წინა პლანზე გამოდის ბეტონის სტრუქტურის თავისებურება. ამ თეორიების საფუძველზე ბეტონის რღვევა განიხილება, როგორც ცალკეული ბზარების ჩასახვა სტრუქტურის არაერთგვაროვნების გამო, დეფექტების დამაბულობის გაზრდილი კონცენტრაციის მიზეზით.

კონტინუალურ თეორიებში სხეულის რღვევა წარმოდგენილია, როგორც დაზიანების დაგროვების პროცესი. ამ თეორიებში არ განიხილება მასალის რეალური სტრუქტურა და მასთან დაკავშირებული დამაბული მდგომარეობის გამოკვლევა. თუმცა, უნდა აღინიშნოს, რომ ამ თეორიების

საფუძველზე ბეტონის რღვევის პროცესის განხილვა, როგორც დაზიანებების დაგროვების შემთხვევითი პროცესი, სათანადო სტატისტიკური აპარატის გამოყენებით საკმაოდ პერსპექტიულია.

არსებული პრობლემების გადაწყვეტისათვის ჩამოყალიბდა მრავალი თეორია, რომელთაგან აღსანიშნავია სიმტკიცის თეორია, მაგრამ მისი გამოყენება ვერ გადაჭრა იმ პრობლემას, რომელიც წარმოიქმნებოდა ექსპერიმენტის მსვლელობის დროს. კონსტრუქციების რღვევა ისეთ პირობებში ხდებოდა, როდესაც დამაბულობის მნიშვნელობასთან შედარებით. ამ წინააღმდეგობის თავიდან ასაცილებლად წინა საუკუნეში ჩამოყალიბდა რღვევის მექანიკის თეორია, რომელიც ყველაზე საიმედო და ფიზიკურად დასაბუთებულ შეფასებას იძლევა ბზარის გავრცელების არსსა და ენერჯის ბალანსზე [30].

რღვევის მექანიკის პარამეტრებიდან მნიშვნელოვანია K - მაბვის ინტესიურობის კოეფიციენტი, რომელმაც საინჟინრო პრაქტიკაში ერთ-ერთი ძირითადი ადგილი დაიკავა დრეკადობის მოდულსა და პუასონის კოეფიციენტთან ერთად. იგი ითვლება მასალის მუდმივ სიდიდედ და ბზარმდეგობის ძირითად მახასიათებლად. K ერთადერთი პარამეტრია, რომლის მეშვეობითაც გამოითვლება დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა ბზარის არეში. ერთი შეხედვით, ცემენტის ქვისათვის, რომელიც გაცილებით ერთგვაროვანი მასალაა, ეს სიდიდე უნივერსალური მახასიათებელი უნდა იყოს. ამ ეტაპზე ჩვენ მიერ ჩატარებული კვლევის მიზანია, დავადგინოთ რამდენად გამოსადეგია K_{1c} (გამოსახავს ბზარების ურთიერთსაპირისპირო მიმართულებით დაშორებას) კრიტერიუმი ცემენტის ქვისათვის.

აღნიშნული პარამეტრის განსაზღვრისათვის შეირჩა სამწერტილოვანი ღუნვის სქემა. რღვევის მექანიკის კრიტერიუმების დასადგენად მნიშვნელოვანია, რომ ნიმუშების გამოცდა ხდებოდეს ბრტყელ დამაბულ მდგომარეობაში. იმის გათვალისწინებით, რომ ცემენტის ქვა შედარებით ერთგვაროვანი მასალაა და მასშტაბური ფაქტორები შეიძლება

უგულველყოფილ იქნეს, ნიმუშის ზომები 36X18160X მმ შეირჩა, რაც აშშ-ის სტანდარტს შეესაბამება. დრეკადობის პარამეტრების განსაზღვრისათვის M-400 მარკის პორტლანდცემენტისაგან დაამზადა პრიზმის ფორმის 40X40160X მმ ზომის ძელაკები, წყალ-ცემენტის ფარდობა, იყო 0,3 ტოლი იყო. ნიმუშების ცენტრალურ ნაწილში გაუკეთდა 1X18X18 მმ ზომის ჭდე. ნიმუშის გამყარება ხდებოდა ტენიან გარემოში 28 დღე-ღამის განმავლობაში, რის შემდეგაც წარმოებდა გამოცდა. დრეკადი პარამეტრები განისაზღვრა პრიზმის ფორმის ნიმუშების კუმშვაზე გამოცდით.

დაძაბულობის ინტენსიურობის კოეფიციენტის განსაზღვრისათვის გამოყენებულ იქნა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდი. ნაჭდევიანი ნიმუშების დატვირთვა სამწერტილოვანი ღუნვით წარმოებდა მექანიკურ გამოსაცდელ დანადგარზე. ნიმუში იტვირთებოდა საფეხურებრივად, 16,8 და 8,4 ნიუტონი სიდიდით, ნულოვანი დატვირთვიდან რღვევამდე. თითოეულ საფეხურზე ხდებოდა ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამების მიღება ორსხივიანი ლეიტის სქემით.

ექსპერიმენტისათვის გამოყენებული იქნა He-Ne ლაზერი, ექსპონირების დრო მოიცავდა 1 წუთს. ინტერფეროგრამაზე დაფიქსირდა როგორც ამ საფეხურის დატვირთვის შესაბამისი გადაადგილების ვექტორის ველი ნიმუშის ზედაპირზე, ასევე ბზარის სიგრძე, მისი კვაზისტატიკური ზრდის დროს. ბზარის კვაზისტატიკური ზრდის აღწერილ მექანიზმზე დაყრდნობით შესაძლებელია განვსაზღვროთ K_{Ic} მნიშვნელობა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდის გამოყენებით.

თუ მაგალითად i -ურ ინტერფეროგრამაზე დაფიქსირებულ იქნა ბზარის სიგრძის მომატება, მაშინ i -ს ინტერფეროგრამა შეესაბამება ზღვრულ მდგომარეობას, რომლის შედეგადაც დატვირთვის მცირე მომატებით იწყება განვითარება. მაშასადამე, თუ ბზარის მახლობელ რაიმე წერტილში, რომლის პოლარული კოორდინატებია r და θ გავზომავთ v გადაადგილების ვექტორის კომპონენტს თითოეულ საფეხურზე, მათი ჯამი მოგვცემს იმ vc ზღვრულ გადაადგილებას, რომლის შემდეგაც იწყება ბზარის განვითარება:

$$V_c = \sum_{k=0}^{i=1} V_k \quad (13)$$

თუ გამოსახულებაში ჩავსვათ r_1 და o_1 შერჩეული წერტილის კოორდინატებს, გადაადგილების ვექტორის ზღვრულ მნიშვნელობას და შესაბამის მოდულს, შესაძლებელია განვსაზღვროთ K_{1c} -ს მნიშვნელობა, როგორც ზემოთ აღნიშნეთ, ამ ეტაპზე ჩატარებული კვლევის მიზანი იყო, დაგვედინა რამდენად მნიშვნელოვანია K_{1c} კრიტერიუმი ცემენტის ქვისათვის. შესაბამისად გამოვცადეთ ნიმუში, როცა $\eta/c=0,3$ მივიღეთ K_{1c} -ს მნიშვნელობა, რომლითაც დადგინდა, რომ ამ ნიმუშისათვის ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტი შეადგენს $K_{1c}=0,41$ რომელიც წარმოადგენს ბზარმდეგობის კოეფიციენტს.

როგორც უკვე აღნიშნეთ, K_{1c} კრიტერიუმი მიღებულია წრფივი დრეკადი რღვევის მექანიკის კრიტერიუმად. ექსპერიმენტული შედეგებიდან გამომდინარე, ცემენტის ქვა მიეკუთვნება წრფივ დრეკად მასალას, მაგრამ როგორც K_{1c} -ს უშუალო გაზომვებმა ცხადყო, ჩვენ მიერ არჩეული წრფივი მოდელი მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული წყალ-ცემენტის ფარდობაზე. ამ ფაქტის ახსნა იმით შეიძლება, რომ წყალ-ცემენტის ფარდობის ზრდასთან ერთად იზრდება ცემენტის ქვის სტრუქტურის არაერთგვაროვნება და შესაბამისად მასალის თვისებები განსახვავებულია წრფივი დრეკადი მასალისაგან. ცნობილია, რომ ცემენტის ქვის სტრუქტურის ერთგვაროვნება დამოკიდებულია არა მარტო ტექნოლოგიურ ფაქტორებზე, როგორცაა წყალ-ცემენტის ფარდობა, არამედ იმ გარე პირობებზე, რომელშიც ხდება მისი ფორმირება (ტემპერატურა, ტენიანობა და სხვ.) არანაკლებ მნიშვნელოვანია გამყარების სტადია, შეკვრის პროცესი, რადგან სწორედ ამ სტადიაზე ხდება ცემენტის ქვის სტრუქტურის ხარისხობრივი ფორმირება, შემდგომში იცლება მხოლოდ მისი რაოდენობრივი მახასიათებლები.

ამდენად ის მიდგომა, რომელიც მოცემულ კვლევაშია წარმოდგენილი, კერძოდ მასალების თვისებების შესწავლა მისი გამყარების საწყისი სტადიიდან და შემდგომში რღვევის მექანიკის კრიტერიუმებზე დაყრდნობით მასალის მექანიკური პარამეტრების დადგენა, სტრუქტურის გათვალისწინებით და თანამედროვე ფიზიკური მეთოდების გამოყენებით პერსპექტიულია და ვიმედოვნებთ, რომ შემდგომში კვლევა საშუალებას მოგვცემს, უფრო ღრმად ჩავწვდეთ აღნიშნულ საკითხს. ზემოთ მოყვანილი გამოსახულება საშუალებას გვაძლევს განისაზღვროს K_{1c} მნიშვნელობა. ცნობილია, რომ ეს პარამეტრი დამოკიდებულია იმ წერტილის მდებარეობაზე ბზარის წვეროს მიმართ, რომელშიც ვზომავთ გადაადგილებას, რადგან ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდის გამოყენებით ეს პრობლემა არ განხილულა, ლიტერატურაში არ მოიძებნა იმის მკაცრი განმარტება, თუ ბზარიდან რა მანძილზე უნდა გაიზომოს აღნიშნული გადაადგილებები განვიხილოთ ეს საკითხი. წარმოვადგინეთ შემდეგი გამოსახულება:

$$K_1 \frac{V}{\sqrt{r}} B \tag{14}$$

სადაც

$$B = \frac{C\sqrt{2\pi}}{\sin \frac{a}{2} \left(2 - \frac{2\nu}{1+\nu} - \cos^2 \frac{a}{2} \right)} \tag{15}$$

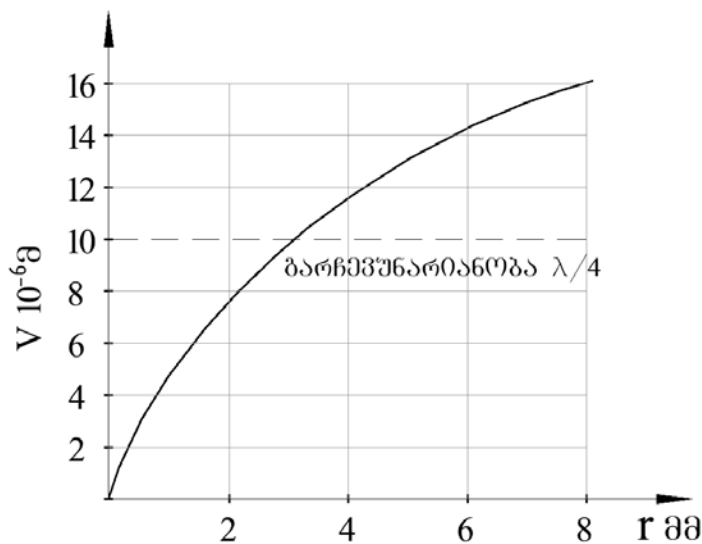
წრფივი რღვევის მექანიკის მიხედვით ν ნივთიერების მახასიათებელია და მუდმივი სიდიდეა. ასევე B მუდმივი სიდიდეა იმ შეთხვევაში, თუ ათვლა ხდება Y ღერძის გასწვრივ, რომლის სათავე მდებარეობს ბზარის წვერში და მართობულია ბზარის სიბრტყისა.

მაშინ(9) შეიძლება ჩავწეროთ შემდეგი სახით:

$$\frac{Vc}{\sqrt{r}} = \frac{K1c}{B} = const \quad (16)$$

როგორც ლიტერატურიდან არის ცნობილი, ცემენტის ქვისათვის $K1c$ მნიშვნელობა 0,5 ნ/მმ 1,5 რიგისაა. ჩვენს შემთხვევაში B -ს მნიშვნელობა $0.08 \cdot 10^6$ მგპა რიგისაა, მაშინ (4)-დან :

$$Vc \approx 6 \cdot 10^{-6} \sqrt{r} \quad (17)$$



ნახ. 22 გრაფიკი ბზარის წვეროს გარჩევისუნარიანობა

როგორც გრაფიკიდან ჩანს ნახ.10.2, იმისათვის რომ შესრულდეს (3) ტოლობა, ბზარის წვერთან მიახლოებასთან ერთად უნდა შემცირდეს გადაადგილების ვექტორის მნიშვნელობა. ამავე გრაფიკზე მოცემულია ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის გარჩევისუნარიანობის ქვედა ზღვარი, რომელიც დაახლოებით $\frac{\lambda}{4} \approx 0.1 \cdot 10^{-6}$ მკმ რიგისაა. მაშასადამე, ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდი, გარჩევისუნარიანობის შეზღუდვის გამო, საშუალებას გვაძლევს 4მმ-ზე უფრო ახლოს მივუახლოვდეთ ბზარის წვერს. იმ შემთხვევაშიც კი თუ ანათვლებს ავიღებთ 4-9 მმ ინტერვალში იმის გამო, რომ ახლო ვართ ქვედა ზღვართან, გვექნება ცდომილებები. თუ ბზარის წვერს დიდი მანძილით (რამდენიმე

სანტიმეტრით) დავშორდებით, როგორც თეორიიდან არის ცნობილი K_{Ic} განსაზღვრა არ იქნება კორექტული [31].

აქედან გამომდინარე, მოყვანილი რიცხვითი მნიშვნელობები ხარისხობრივად სწორად ასახავს ბზარის წვერში მიმდინარე პროცესებს. რიცხვითი მონაცემების სიზუსტის გარდა, ექსპერიმენტის უნიკალურობა მდგომარეობს შესაძლებლობაში, რომ დაკვირვებას ვაწარმოებთ შეუიარაღებელი თვალით ვიზუალურად უხილავ პროცესებზე, რომლებიც საკვლევი ნიმუშის სხეულში მიმდინარეობს.

3 დასკვნები

1. ნაშრომი შესრულებულია ს.ს.ი.პ. შოთა რუსთაველის ფონდის საგრანტო პროექტ FT- 18 – 11671- ის ფარგლებში, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტზე, ნაშრომის ავტორის ძალისხმევით ორგანიზებულ ლაბორატორიაში ჩატარებული ლიტერატურის მიმოხილვის საფუძველზე, პირველად ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის მეთოდით მოხერხდა ხანგრძლივად (ათობით საათის განმავლობაში) მიმდინარე კონტრაქციული შეკლების პროცესის - ცემენტის ქვის დეფორმაციის კვლევის ჩატარება. ბეტონის დეფორმაციული მდგომარეობის ყველა ადრე არსებული კვლევა, რომელიც ჩატარებული იქნა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის გამოყენებით იზღუდებოდა დროის მოკლე მონაკვეთში (რომელიც იზომებოდა წუთებით) მიმდინარე პროცესებით

2. განხილულია ბეტონის და რკინაბეტონის კვლევის თანამედროვე ურღვევი მეთოდები, მათი დადებითი და უარყოფითი მხარეები, ჩატარებულია ლიტერატურული მიმოხილვა, მოყვანილია ექსპერიმენტული მონაცემები.

3. ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრია იძლევა საშუალებას გამოკვლეული იქნას არა ბეტონისა და რკინაბეტონის მოდელები არამედ რეალური ბეტონი და კონსტრუქციული ელემენტები.

4. ნაშრომში ნაჩვენებია, რომ ინტერფეროგრამების საშუალებით შეიძლება პროგნოზირება, ბეტონის შეკლების შედეგად ბზარწარმოქმნის ადგილის და შემდგომში მათი კინეტიკური განვითარების თვალის დევნება უკონტაქტოდ დიდი სიზუსტით.

5. ნაშრომში განხილულია ექსპერიმენტული მონაცემები ბეტონის შეკლებისა და ბზარმდეგობის ხანგრძლივი პროცესის კვლევისა ლაზერული ტექნიკის, კერძოდ ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის გამოყენებით. აღნიშნული თანამედროვე სრულყოფილი მეთოდი უაღრესად მნიშვნელოვანია ბზარწარმოქმნის, შეკლების ადრეულ და სხვადასხვა

სტადიაზე დაკვირვებისათვის უკონტაქტოდ დიდი სიზუსტით (633 ნ.მ. ნანოტექნოლოგიური მეთოდი)

6. აღნიშნული მეთოდის საშუალებით შესაძლოა ხარისხობრივად და რაოდენობრივად შევადაროთ მყარი სხეულის დეფორმაციული მდგომარეობა და სხვადასხვა შედგენილობის ბეტონის შეკლების, ბზარწარმოქმნის და მისი განვითარების პროცესები. ექსპერიმენტის ხანგრძლივი დროით მიმდინარეობაში გამოიყენება ჰელიუმ-ნეონის უწყვეტი მოქმედების ლაზერი რომლის სიმძლავრეა (50 მვტ)

7. განხილულია მონაცემები ინტერფეროგრამების სახით, ცემენტის მატრიცასა და მასში ჩაწყობილი გრანიტის ქვის მსხვილი შემვსები თავისუფალ მდგომარეობაში (უწყვეტი დაკვირვება 170სთ განმავლობაში) მატრიცასა და მსხვილი შემვსების საკონტაქტო ზონაში ბზარები არ განვითარდა, შემვსები შეკვრის პროცესთან ერთად გადაადგილდებოდა.

8. განხილულია ანალოგიური ექსპერიმენტი ინტერფეროგრამების სახით (დაკვირვება 489 სთ) ცემენტის მატრიცასა და მასში ჩაწყობილი გრანიტის ქვის მსხვილი შემვსებები ხისტ მდგომარეობაში. დაკვირვების 60 სთ-ის შემდეგ რეალურ ბეტონის ნიმუშზე ვიზუალურად არ ჩანდა, ინტერფეროგრამაზე დაფიქსირებულია ბზარის შემდგომი განვითარება და ბეტონის სრული რღვევა.

9. შესწავლილია ექვსი დასახელების ცემენტის ნიმუშის გამოცდა შედარებით ბზარმედეგობაზე ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის გამოყენებით, სადაც დადგინდა, რომ ყველაზე ბზარმედეგი ცემენტ-დუღაბის ნიმუშია პორტლანდცემენტი.

ნაშრომში განხილულია რღვევის ანუ ბზარების განვითარების რღვევის მექანიკის საფუძველზე ჩატარებული ექსპერიმენტი, რომელიც მასალათა 10. გამძლეობისაგან განსხვავებით, ბზარების შემცველი ელემენტების სიმტკიცის პირობებს სწავლობს, მოცემულია ბზარების კლასიფიკაცია, ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის გამოყენებით

გამოთვლილია ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტი $k_{ic} = 0,41$ მმ რომელიც წარმოადგენს ბზარმედეგობის კოეფიციენტს.

11. ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდის საშუალებით შესაძლებელია ხარისხობრივად და რაოდენობრივად შევაფასოთ მყარი სხეულის მდგომარეობა და სხვადასხვა შედგენილობის ბეტონის შეკლების, ბზარწარმოქმნის და მისი განვითარების პროცესი. ეს თითქმის უნიკალური საშუალებაა ერთდროულად დავაკვირდეთ დეფორმირების ერთიან სურათს გამოსაკვლევი ობიექტის მთელ რეგისტრირებულ ზედაპირზე და იმავე დროს სურვილისამებრ, ნებისმიერ არჩეულ წერტილში გავზომოთ გადაადგილების ვექტორის სამივე კომპონენტი.

12. ლაბორატორიული სამუშაოების შესასრულებლად შეიქმნა მეთოდური მითიბები „ბეტონისა და რკინაბეტონის დეფორმაციის და ბზარმედეგობის პროცესების შესწავლა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით “რომელიც გამოიყენება როგორც ბაკალავრებისთვის მაგისტრანტებისთვის და ყველა დაინტერესებული პირისთვის.

გამოყენებული ლიტერატურატურის ნუსხა

1. საყვარელიძე ა. თვითმემჭიდროებადი ბეტონის შეკლების უნივერსალური მოდელი. ჰიდროინჟინერია. 2018, N1-2 (25-26), გვ 99-106.
2. საყვარელიძე ა., ლუდუშაური ნ. დეფორმაციის სიჩქარის გავლენა სხვადასხვა ტენზომცველობის ბეტონის მექანიკურ მახასიათებლებზე გაჭიმვისას. ჰიდროინჟინერია. 2018, N 1-2 (25-26), გვ 107-110.
3. Dalakishvili G. monitoring and diagnosis of the process of shrinkage and crack formation on concrete dams using a holographic interferometry. Energyonline. 2017, N1, [11], p 57-62.
4. საყვარელიძე ა., ლუდუშაური ნ. დეფორმაციის სიჩქარის გავლენა სხვადასხვა ტენზომცველობის ბეტონის მექანიკურ მახასიათებლებზე გაჭიმვისას. ჰიდროინჟინერია. 2017, N 1-2 (23-24), გვ 44-46.
5. დალაქიშვილი გ., ხაზალია კ., თურმანიძე გ., საჯაია ო. Monitoring and diagnosis of the shrinkage and crack formartion process in concrete using Holographic Interferometry. საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემიის ჟურნალი მოამბე. 2021, 15, [4], გვ 45-49.
6. Xiao J., Xie Q., Xie W. Study on high-performance concrete at high temperatures. Fire safety journal. 2018, N95, p 11-24.
7. დალაქიშვილი გ., ხაზალია კ., ივანოვი გ. Определение полей деформации бетона при развитии от температурного воздействия методом голографический интерферометрии. Вестник национального политехнического университета Армении Еревена. 2016, N4, [13], с 55-59.
8. დალაქიშვილი გ., ხაზალია კ., გიორგაძე ც., საჯაია ო. ბეტონის დეფორმაციის გამოკვლევა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის მეთოდით. ჰიდროინჟინერია. 2019, N 1-2 (27-28), გვ 112-118.
9. Ramesh K., Sasikumar S. Digital photoelasticity recent developments and diverse applications. Optics and lasers in Engineering. 2020, N25, p 135-139.
10. Kilasonidze B., Kakauridze G. Polarization state sensor based on polarization-holographic diffraction element. Sensors and Transducers Journal. 2022, vol 255, p 1-9.
11. Ju Y., Wang L., Xie H., Zheng Z. Visualization of three-dimensional structure and stress field of aggregated concrete materials through 3D printing and frozen stress techniques. Construction and Building Materials. 2017, N143, p 121-137.
12. Toal V., Naydenova I. Shrinkage during holographic recording in photopolymer determined by holographic interferometry. Lodon: Pubmed. 2013, p 230.
13. Кесаринский А.Г., Кондрашенко В.Ю. Исследование методами голографической интерферометрии усадки цементного раствора. УДК. 2018, N3, [15], с 28-33.

14. Баженов М. Технология бетона. Ассоциации строительных вузов. 2013, N36, с 463-466.
15. გვიშიანი ზ., დალაქიშვილი გ., ხაზალია კ., გიორგაძე ც., საჯაია ო., თურმანიძე გ. ჰოლოგრაფიული ექსპერიმენტის ტექნიკა. სამეცნიერო-ტექნიკური რეფერირებადი ჟურნალი ენერჯია. 2020, 4,[96], გვ 33-41.
16. დალაქიშვილი გ., ხაზალია კ., თურმანიძე გ., საჯაია ო. მეთოდური მითითებები ლაბორატორიული სამუშაოების შესასრულებლად. ბეტონისა და რკინაბეტონის დეფორმაციისა და ბზარმედეგობის პროცესების შესწავლა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით. თბილისი: საგამომცემლო სახლი ტექნიკური უნივერსიტეტი, 2021, გვ 26.
17. Dalakishvili G. The effect of cement composition on the cracking resistance. electronic journal EOL. 2012, N6, p 47-52.
18. დალაქიშვილი გ., მოსიაშვილი გ. სილიკატური მჭიდა მასალების სტრუქტურის ჩამოყალიბების შესწავლა საწყის სტადიაში ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი ენერჯია. 2013, 2[66], გვ 103-105.
19. დალაქიშვილი გ., დანელია ა., სანიკიძე მ., ყალიჩავა კ. ბეტონის კაშხლებში შეკლებისა და ბზარწარმოქმნის პროცესის მონიტორინგი და დიაგნოსტიკა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის გამოყენებით. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი ენერჯია. 2015,4, [76], გვ 51-59.
20. Makul N. Modern sustainable cement and concrete composites: review of current status, challenges and guidelines. Sustainable materials and technologies. 2020, N25, p 42-46.
21. დალაქიშვილი გ., ხაზალია კ. თვითზაბვადი ცემენტის ქვის გაფართოებისა და თვითდაძაბულობის კინეტიკის შესწავლა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით. ჰიდროინჟინერია. 2017, N1-2 (23-24), გვ78-81.
22. Кесаринский А.Г., Кондрашенко В.Ю., Семак А.В. Исследования особенностей деформирования бетона с щебневидным заполнителем методами голографической интерферометрии. TOV. 2013, N39, с 324-336.
23. დალაქიშვილი გ., ხაზალია კ. Определение полей деформаций бетона при развитии внутреннихнапряжения от температурного воздействия. სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალი ენერჯია. 2016, N1, [77], გვ 82-87.
24. Toker G. Holographic interferometry. USA: CRC press. 2017, p 212.
25. Dogan G., Arslan M., Ceylan M. Concrete compressive strength detection using image processing based new test methods. Measurment. 2017, 109, p 137-148.

26. Bangaru S., Wang C., Hassan M., Jeon H. Estimation of the degree of hydration of concrete through automated machine learning based microstructure analysis. *Advanced Engineering informatics*. 2019, N42, p 89-93.
27. თურმანიძე გ. ოპტიკური ჰოლოგრაფიის გამოყენება ბეტონის რღვევის მექანიკაში. *სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალი ენერჯია*. 2022, N1, [101], გვ. 64-71.
28. დალაქიშვილი გ., ხაზალია კ., სანიკიძე მ., ხიმშიაშვილი დ. ბეტონისა და რკინა ბეტონის კონსტრუქციებში რღვევის პროცესის გამოკვლევა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით. *ჰიდროინჟინერია*. 2016, 1-2, [21-22], გვ 76-83.
29. Frankovsky P., Brodniaska Z., Bocko J., Trebunova M., Kostka J., Kicko M. Application of holographic interferometry in the analysis of stress states in a crack root area. *Optics*. 2020, 59 (12), p 170-178.
30. Deng J., Lu Y., Imaging-based crack detection on concrete surfaces using only look once network. *Structural Monitoring*. 2021, 20 (2), p 484-499.
31. Makul N. advanced smart concrete review of current progress, benefits and challenges. *Journal of cleaner production*. 2020, 56, p 55-61.