

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტი

როსნაძე გურგენი

**მაღალი სიმტკიცის წვრილმარცვლოვანი ბეტონები ორგანულ-
მინერალურ მოდიფიკატორებზე, მათი ცოცვადობის და ფიზიკურ-
მექანიკური თვისებების კვლევა**

ინჟინერიის დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარმოდგენილი

დ ი ს ე რ ტ ა ც ი ა

07.19. სამრეწველო ინჟინერია და ტექნოლოგია

სამეცნიერო ხელმძღვანელი:
ტ.მ.დ, პროფესორ-ემერიტუსი,
ბადრი ბანძელაძე

ქუთაისი, 2022 წელი

სარჩევი

შესავალი _____	5
I განყოფილება.	
1. ბეტონების ექსპერიმენტული კვლევები და ბეტონის წინასწარი შეფასების კრიტერიუმი _____	8
1.1. ტრადიციული ბეტონების ექსპერიმენტული კვლევების ანალიზი და ბეტონის წინასწარი შეფასების კრიტერიუმი _____	9
1.1.1. სიტნიკის კვლევა _____	9
1.1.2. რ.ა. მელნიკის, ვ.ი. ფედორჩუკის და ი.ი. ლუბენეცის გამოკვლევები _____	12
1.1.3. ტრადიციული ბეტონების ცოცვადობის დეფორმაციის კვლევების განზოგადება _____	14
1.2. არატრადიციული ბეტონების ექსპერიმენტული კვლევები და ბეტონის წინასწარი შეფასების კრიტერიუმი _____	18
1.2.1. ს.ს. კაპრიელოვის, მ.გ. ბულგაკოვის, ი.ლ. ვიხმანის, ნ.ვ. სმირნოვის გამოკვლევები _____	18
1.2.2. ფ.ა. ისერსის, ნ.ი. ვერმინინის გამოკვლევები _____	20
1.2.3. ლ.ჟ. პეროს გამოკვლევები _____	21
1.2.4. ო.ი. ბერგის კვლევები _____	23
I განყოფილების დასკვნები _____	25
II განყოფილება.	
2. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაცია და ექსპერიმენტის ჩატარების მეთოდика _____	27
2.1. ცოცვადობის თეორიის მიმოხილვა _____	27
2.1.1. ბეტონებში ცოცვადობის და ჯდომის დეფორმაციების ბუნება _____	27
2.1.2. ბეტონში ცოცვადობის თეორიები _____	29
2.1.3. ცოცვადობის თეორიის წრფივი ვარიანტი _____	33
2.1.4. ცოცვადობის თეორიის არაწრფივი ვარიანტი _____	35
2.2. ცოცვადობის დეფორმაციის პროგნოზირება _____	38

2.2.1. ი.ე. პროკოპოვიჩის, მ.მ. ზასტავას გამოკვლევები _____	38
2.2.2. ა.ე. შეიკინის გამოკვლევები _____	41
2.2.3. რ.გ. ლიტვინოვის კვლევები _____	42
2.3. ექსპერიმენტის ჩატარების მეთოდიკა _____	43
II განყოფილების დასკვნები _____	48

III განყოფილება

3. მაღალი სიმტკიცის ორგანულ-მინერალური მოდიფიკატორზე ბეტონების

შემადგენლობები და მათი ცოცვადობის დეფორმაციაზე კვლევა _____	51
3.1. საკვლევი ბეტონების შემადგენლობები და თვისებები _____	51
3.1.1. მოდიფიკატორებით მოდიფიცირებულ ბეტონებში ცემენტის ქვის მიკროსტრუქტურა _____	51
3.1.2. ბეტონის შედგენილობები _____	52
3.2. ახალი მოდიფიცირებული ბეტონების ცოცვადობის დეფორმაციაზე კვლევა _____	56
3.2.1. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაცია 1კ სერიისათვის _____	59
3.2.2. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაცია 2კ სერიისათვის _____	60
3.2.3. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაცია 3კ სერიისათვის _____	61
3.2.4. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაცია 4კ სერიისათვის _____	64
3.2.5. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაცია 5კ სერიისათვის _____	65
III განყოფილების დასკვნები _____	67

IV განყოფილება

4. ახალი შემადგენლობის ბეტონების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების

კვლევა _____	69
4.1. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის ცვლილება მოდიფიკატორის ცვლილების შესაბამისად _____	69
4.2. პრიზმული სიმტკიცის ცვლილება დროში _____	71
4.3. ჯდომის დეფორმაციის გაზომვის შედეგები _____	73
4.4. ბეტონის სიმტკიცე ღერძულ გაჭიმვაზე და კუმშვაზე _____	78

4.5. დრეკადობის საწყისი მოდული და პუასონის კოეფიციენტი _____	84
4.6. ღერძულ გაჭიმვაზე და გაჭიმვაზე ღუნვისას ბეტონის სიმტკიცის ცვლილება მოკლევადიანი დატვირთვისას _____	87
4.7. ღერძულ გაჭიმვაზე და გაჭიმვაზე ღუნვისას ცოცვადობის დეფორმაციის ექსპერიმენტული განსაზღვრა _____	89
IV განყოფილების დასკვნები _____	91
ზოგადი დასკვნები _____	94
ლიტერატურა _____	96
დანართი _____	100

შესავალი

თანამედროვე მაღლივი შენობების, ხიდების, მიწისქვეშა ნაგებობების და სხვა განსაკუთრებული საპასუხისმგებლო ნაგებობების მშენებლობაზე, ძირითადად გამოყენებულია მაღალი სიმტკიცის ბეტონები [1, 2, 3].

თანამედროვე მშენებლობაში გამოყენებული მაღალი სიმტკიცის ბეტონების მიღება შესაძლებელია ხისტი ბეტონის ნარევისაგან, სადაც ერთ-ერთი მთავარი კომპონენტია სხვადასხვა სახისა და ფრაქციის ღორღი, რის გამოც გართულებულია ბეტონის ჩაწობა-გამკვრივების პროცესი, რაც მნიშვნელოვნად მოქმედებს წარმოებული ბეტონის თვითღირებულებაზე.

ბეტონის თვითღირებულების შემცირების მიზნით, გასული საუკუნის 90-იანი წლებიდან, ნ. მუსხელიშვილის სახელობის ქუთაისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის „სამრეწველო და სამოქალაქო მშენებლობის“ კათედრაზე, დაიწყო კვლევები მაღალი სიმტკიცის ბეტონის წარმოების ახალი ორიგინალური მეთოდის შემუშავებისათვის. უკვე დღეისათვის, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის „სამრეწველო და სამოქალაქო მშენებლობის“ კათედრაზე, შემუშავებული იქნა მაღალი სიმტკიცის ბეტონის წარმოების ახალი ორიგინალური მეთოდი. ამ მეთოდით შესაძლებელია მაღალი სიმტკიცის წვრილმარცვლოვანი მოდიფიცირებული ბეტონის წარმოება, სადაც მოდიფიკატორის სახით შემოთავაზებულია ზესტაფონის ფეროშენადნობთა ქარხნის მეტალურგიული ღუმელებიდან წანატაცი ნაცრები და ღუმელების ნარჩენი წიდა, ე.წ. ბმქ-კ მოდიფიკატორი (ბეტონის მოდიფიკატორი ქვიშის დანამატით და კომპონენტ ღორღის გარეშე).

წინასწარმა კვლევებმა აჩვენა, რომ შემოთავაზებული მოდიფიკატორის გამოყენებით პრინციპულად შესაძლებელია მაღალი სიმტკიცის წვრილმარცვლოვანი, შემსუბუქებული წონის მქონე ბეტონის მიღება შემავსებელ ქვიშაზე, ღორღის გარეშე. შემოთავაზებული ბმქ-კ მოდიფიკატორის გამოყენებით მიღებული წვრილმარცვლოვანი ბეტონი აუმჯობესებს მშენებლობაში მთელ რიგ ეკონომიკურ მაჩვენებლებს:

– ამცირებს შენობა-ნაგებობების მასას, რადგანაც მცირდება ბეტონის საშუალო მოცულობითი მასა ≈ 2200 კგ/მ³-მდე;

– ამარტივებს ბეტონის მიღების ტექნოლოგიურ პროცესს და ამის საფუძველზე ამცირებს შენობა-ნაგებობების თვითღირებულებას.

მაღალი სიმტკიცის წვრილმარცვლოვანი ბეტონის მიღების შემოთავაზებული მეთოდის პრაქტიკული რეალიზაცია საჭიროებს ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური და საექსპლუატაციო თვისებების კვლევას, რაც რთული და ხანგრძლივი პროცესია.

შემოთავაზებული მაღალი სიმტკიცის ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კვლევას ეძღვნება წარმოდგენილი სადისერტაციო ნაშრომი.

შემოთავაზებული მეთოდით მიღებული მაღალი სიმტკიცის ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების კვლევისას საჭიროა გადაწყვეტილი იქნას მთელი რიგი ამოცანები:

- ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური კვლევის სფეროში, მეცნიერების მიერ შესრულებული კვლევების ანალიზი და მის საფუძველზე ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კვლევისათვის შემოთავაზებული ბეტონის საკვლევი ნიმუშების შემადგენლობის შერჩევა;
- შერჩეული შემადგენლობიდან საუკეთესოს გამოვლენა, ამისათვის კი ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების წინასწარი შეფასების კრიტერიუმის შემუშავება;
- შემოთავაზებული ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების კვლევა და სხვა არსებული მოდიფიცირებული ბეტონების მახასიათებლებთან საკვლევი ბეტონის გამოვლენილი მახასიათებლების შედარება.

სადისერტაციო ნაშრომის მეცნიერული სიახლე:

1. ტრადიციული და მოდიფიცირებული ბეტონების წინასწარი შეფასების მიზნით შემოთავაზებული კრიტერიუმები;
2. შემოთავაზებული მაღალი სიმტკიცის წვრილმარცვლოვანი ბეტონების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების ახალი ექსპერიმენტული მონაცემები;
3. ცოცვადობის დეფორმაციების დიაგრამების მიღებული დამოკიდებულების შედარების შედეგები, ტრადიციულ და მძიმე ბეტონების ანალოგიურ დიაგრამებთან;
4. შემოთავაზებული ახალი მოდიფიკატორების შემცველი ბეტონების დრეკადობის საწყისი მოდულების მძიმე და ტრადიციული ბეტონების დრეკადობის საწყისი

მოდულების შედარების შედეგები.

პრაქტიკული ღირებულება:

მიღებული ექსპერიმენტული მონაცემები საშუალებას იძლევა არსებითად შევსებულ იქნას ტრადიციული და მაღალი სიმტკიცის ბეტონების ფიზიკურ-მექანიკური და რეოლოგიური მონაცემების ბაზა ანალოგიური ხასიათის მონაცემებით, რომლებიც ახასიათებს ახალი თაობის მაღალი სიმტკიცის წვრილმარცვლოვან ბეტონებს, დამზადებულს ბმქ-კ სერიის მოდიფიკატორების ბაზაზე, რომელშიც შედის ფეროშენადნობი ქარხნის ღუმელებიდან წანატაცი ნაცრები და ტექნოლოგიური პროცესების ნარჩენი წიდა.

მიღებული შედეგები საშუალებას მოგვცემს ავამაღლოთ ახალი თაობის მაღალი სიმტკიცის ბეტონისაგან დამზადებული რკინაბეტონის კონსტრუქციების პროექტირების საიმედოობა, როგორც ახალი მშენებლობისათვის, განსაკუთრებით მონოლითური რკინაბეტონისათვის, ასევე შენობა-ნაგებობების გაძლიერება-რეკონსტრუქციისათვის.

ახალი მაღალი სიმტკიცის წვრილმარცვლოვანი ბეტონების გამოყენება საშუალებას მოგვცემს შევამციროთ არმატურის და ბეტონის ხარჯი მზიდი კონსტრუქციების კვეთის ზომების შემცირების ხარჯზე.

დისერტაციაში შესულია საკმაო წილი ჩემი სამაგისტრო დისერტაციიდან, რომლის სამეცნიერო ხელმძღვანელი იყო პროფესორი ვახტანგ კანკავა; მისი ხელმძღვანელობით პირველად მივიღე საკვლევ სამუშაოებში მონაწილეობა, როგორც მაგისტრანტმა. მისგან შევიძინე პირველად ექსპერიმენტის მომზადების, შესრულების და შედეგების ანალიზის უნარ-ჩვევები. დიდი მადლობა მას ამისათვის.

დისერტაციის მე-4 განყოფილებაში შესული კვლევების მნიშვნელოვანი ნაწილი შესრულებულია ყოფილი კათედრის გამგის, პროფესორ თემურ ღულამის უშუალო მონაწილეობით და დახმარებით, რისთვისაც დიდი მადლობა მინდა გადავუხადო მას.

I განყოფილება.

1. ბეტონების ექსპერიმენტული კვლევები და ბეტონის წინასწარი შეფასების კრიტერიუმი

ახალი შემადგენლობის ბეტონის პრაქტიკულ გამოყენებამდე რეკომენდაციის გაცემამდე, აუცილებელია მისი ფიზიკურ-მექანიკური და საექსპლუატაციო მახასიათებლების შესწავლა, რაც აუცილებელს ხდის ჩატარებული იქნას მრავალი და ხანგრძლივი ექსპერიმენტული კვლევები. ახალი ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების შესწავლისათვის ექსპერიმენტების რიცხვის შემცირების ორი გზა არსებობს:

- ექსპერიმენტის დაგეგმვის მეთოდის გამოყენება, რაც ექსპერიმენტების რიცხვის შემცირებასთან ერთად საშუალებას იძლევა ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკურ და ტექნოლოგიურ ფაქტორებს შორის დამყარებული იქნას ექსპერიმენტულ-სტატისტიკური კავშირი, რის შედეგადაც შესაძლებელია ბეტონის, მაგალითად სიმტკიცეზე, როგორც ბეტონის წარმოების პროცესის გამომავალ პარამეტრზე, მოქმედი ფაქტორების გამოვლენა. კოეფიციენტების არსებითობის დადგენის შემდეგ შემცირებული იქნას მათი რიცხვი ე.წ. ექსპერიმენტულ-სტატისტიკურ მათემატიკურ მოდელში. ამის შემდეგ დარჩენილ არსებით შეზღუდული რაოდენობის ფაქტორებზე გაგრძელდეს ექსპერიმენტული კვლევები.
- მეორე გზა ითვალისწინებს ბეტონების მახასიათებლების წინასწარი შეფასების კრიტერიუმის დადგენას და მისი საშუალებით შესაძლებელია შეზღუდული ექსპერიმენტების რიცხვით კონკრეტული საუკეთესო შემადგენლობის ბეტონის ნარევების შერჩევა და მათზე ექსპერიმენტების ჩატარება, მისი ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების გამოვლენის მიზნით.

სიმტკიცისა და ნარევის შემადგენლობის მიხედვით ბეტონებს ყოფენ ორ ჯგუფად: ტრადიციული ბეტონები და მაღალი სიმტკიცის ბეტონები. ჩვენი კვლევის ობიექტს წარმოადგენს მაღალი სიმტკიცის ბეტონები, თუმცა შედარების მიზნით, გამოკვლეული უნდა იყოს ტრადიციული ბეტონებიც, ამიტომ საჭიროა შემუშავებული იქნას ტრადიციული და მაღალი სიმტკიცის ბეტონების (ე.წ. მოდიფიცირებული ბეტონების) წინასწარი შეფასების კრიტერიუმები.

1.1. ტრადიციული ბეტონების ექსპერიმენტული კვლევების ანალიზი და ბეტონის წინასწარი შედარების კრიტერიუმი

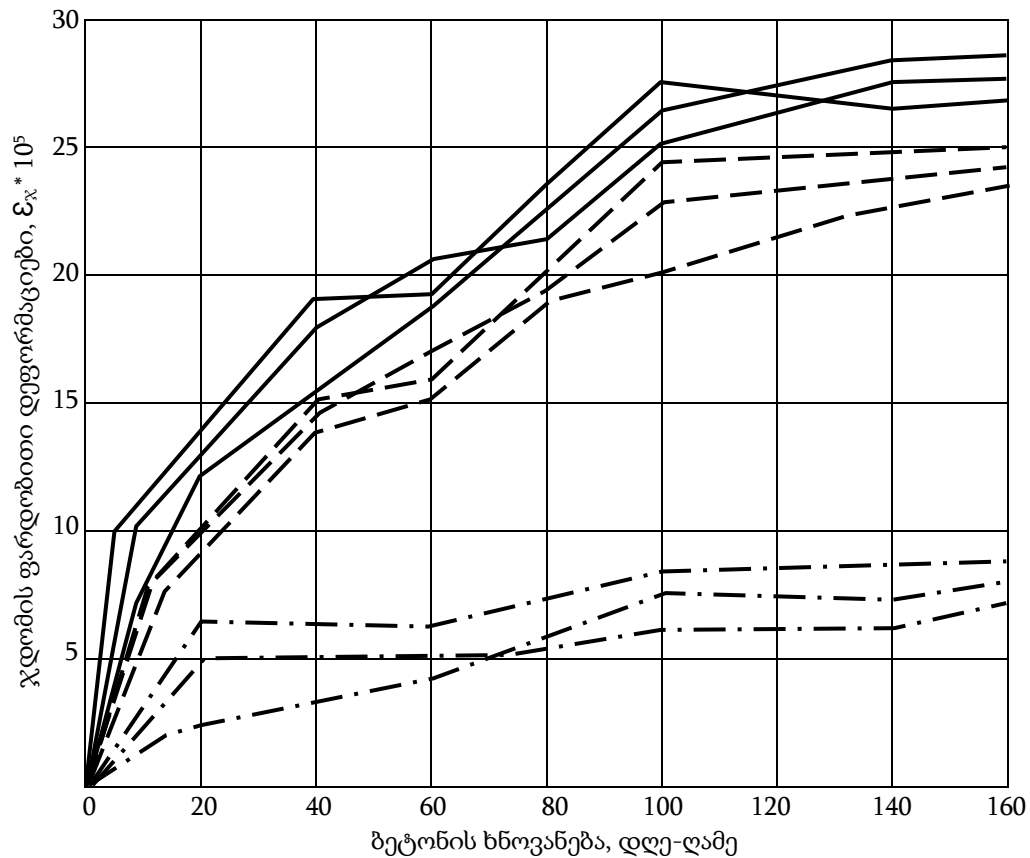
ტრადიციულს წარმოადგენს ბეტონი, რომელიც არ შეიცავს სპეციალურ დანამატებს (მოდიფიკატორებს) გაზრდილი სიმტკიცის მისაღებად. გაზრდილი სიმტკიცის მისაღწევად მიმართავენ 1 მ³ ბეტონში ცემენტის შემცველობის გაზრდას. ამის ილუსტრაციას წარმოადგენს, მაგალითად, სიტნიკის კვლევები, სადაც ცემენტის ხარჯი ბეტონებისათვის მარკით 600, 800 და 1000 შესაბამისად შეადგინა 400, 500 და 526 კგ ბეტონის 1 მ³ ნარევი.

1.1.1. სიტნიკის კვლევა

წარსულში სიტნიკის მიერ, შემდეგ კი ჩვენს მიერ ჩატარებული იქნა ექსპერიმენტები მაღალი სიმტკიცის ბეტონებზე მარკით 600, 800 და 1000. შესწავლილი იქნა ბეტონის ზოგიერთი თვისებები, მათ შორის ბეტონის ცოცვადობის და ჯდომის დეფორმაციები. ამ მიზნით გამოყენებული იყო M500 მარკის ცემენტი (აქტიურობით 537 კგ/სმ²). ბეტონი დამზადებული იყო M_{სიმს}=2,4 ზომის ჩვეულებრივი ქვიშის, 170 მკა სიმტკიცის ზღვრის მქონე გრანიტის ღორღის (რომლის მარცვლის მაქსიმალური სიმსხო შეადგენდა 25 მმ-ს) ფუძეზე. ცემენტის ხარჯი ბეტონისათვის 600, 800, 1000 მარკის შესაბამისად შეადგენდა 400, 500 და 526 კგ-ს. საცდელ ნიმუშებში ბეტონის წყალცემენტის შემცველობა შეადგენდა შესაბამისად ბეტონის მარკისა 0,4-ს, 0,3 და 0,27-ს. გამყარებული ბეტონის ნიმუშები, ყალიბიდან განთავისუფლების შემდეგ, 28 დღის განმავლობაში ინახებოდა ტენიან ნახერხში. პლასტიფიკატორები, გამაგრების დამაჩქარებლები და კატალიზატორები გამოყენებული არ ყოფილა. ბეტონის მაღალი სიმტკიცე უზრუნველყოფილი იყო ბეტონის ოპტიმალური შემადგენლობის შერჩევით, სუფთა შემავსებლების გამოყენებით და დაბალი წყალცემენტის ფარდობით.

დაკვირვებები ჯდომის დეფორმაციებზე ხორციელდებოდა 10×10×40სმ და 20×20×60სმ ზომის პრიზმულ ნიმუშებზე. ნიმუშების ნაწილი იყო

ჰიდროლიზირებული. ჯდომის დეფორმაციებზე გაზომვის საშუალო შედეგები სერიების მიხედვით სამი ნიმუშისათვის მოცემულია ნახ.1.1-ზე.



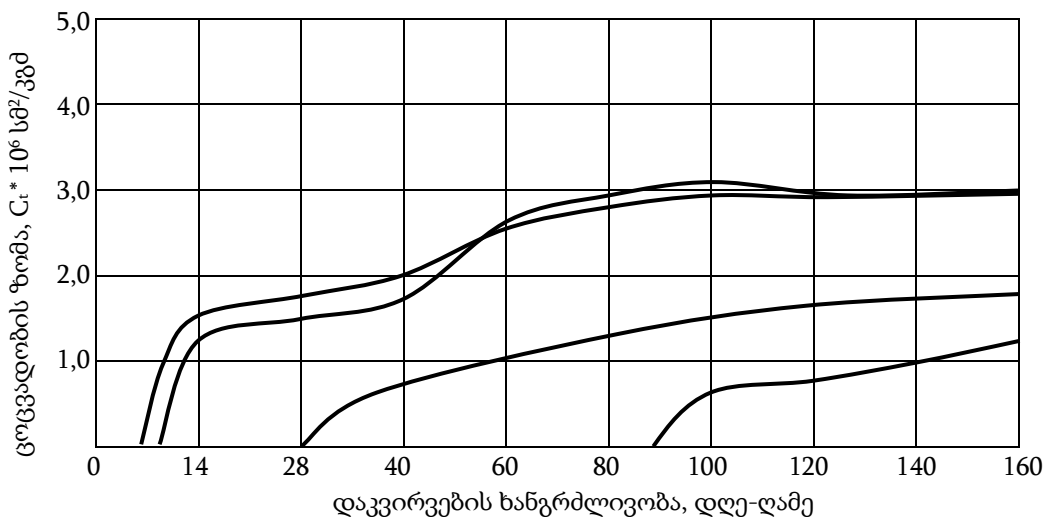
ნახ.1.1. M600, M800 M1000 მარკის ბეტონების ჯდომა
 ————— 100×100×400 ნიმუშები. ბეტონი მარკით 1000, 800, 600.
 - - - - - 200×200×200 ნიმუშები. ბეტონი მარკით 1000, 800, 600.
 - · - · - · იზოლირებული ნიმუშები. ბეტონი მარკით 1000, 800, 600.

ვ.ი. სიტნიკის ნახ.1.1-ზე მოყვანილი მონაცემების შედარება ჩვეულებრივი ბეტონის ანალოგიურ კვლევებთან გვიჩვენებს, რომ მაღალი და ჩვეულებრივი სიმტკიცის ბეტონების ჯდომის სიდიდეების ცვლილებები პრაქტიკულად ერთიდაიგივე ზღვრებშია.

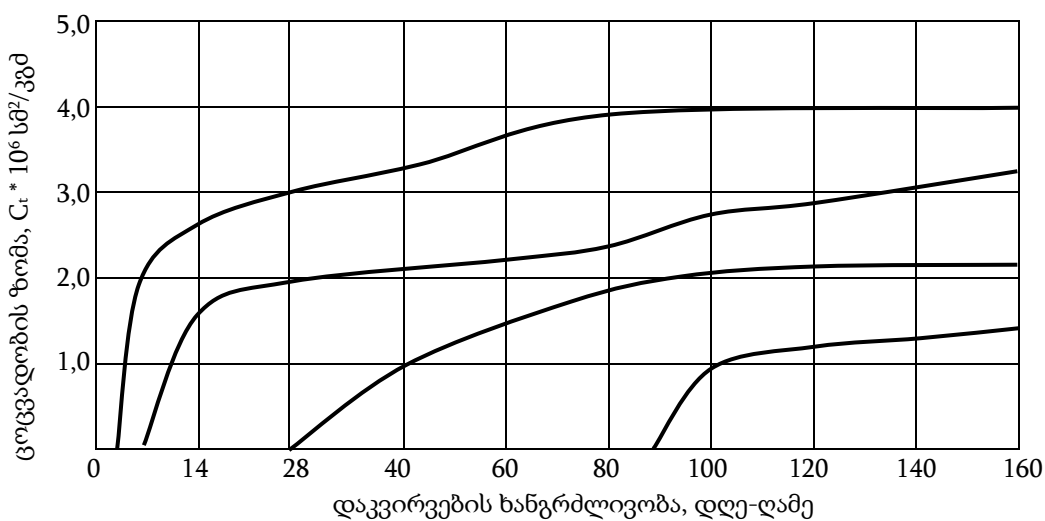
შემდეგი კვლევებისათვის მომზადებულ ბეტონში დაბალი იყო წყალცემენტის შემცველობა და მაღალი იყო ღორღის შემცველობა. კერძოდ, 1 მ³ გამკვრივებულ ბეტონში მაღალი 0,9 მ³ ღორღის შემცველობა იყო.

ზემოთ აღწერილი გზით მიღებული ნიმუშები გამოცდილი იყო ცოცვადობაზე, ზამბარებიან დანადგარზე. ცოცვადობის დეფორმაციაზე გამოცდა ხდებოდა 0,5 R_{bm} ტოლი დაძაბულობის პირობებში. გამოცდის შედეგები წარმოდგენილია ნახ.1.2.ა, 1.2.ბ, 1.2.გ-ზე. გამოცდები ცოცვადობაზე ტარდებოდა 3, 7, 28 და 80 დღე-ღამის

დაყოვნების ნიმუშებზე. თითოეული მრუდი მიღებულია სამ-სამი პარალელური ცდების საშუალო მნიშვნელობების მიხედვით, რომლებიც წარმოდგენილია ნახაზზე 1.2.ა,ბ,გ.

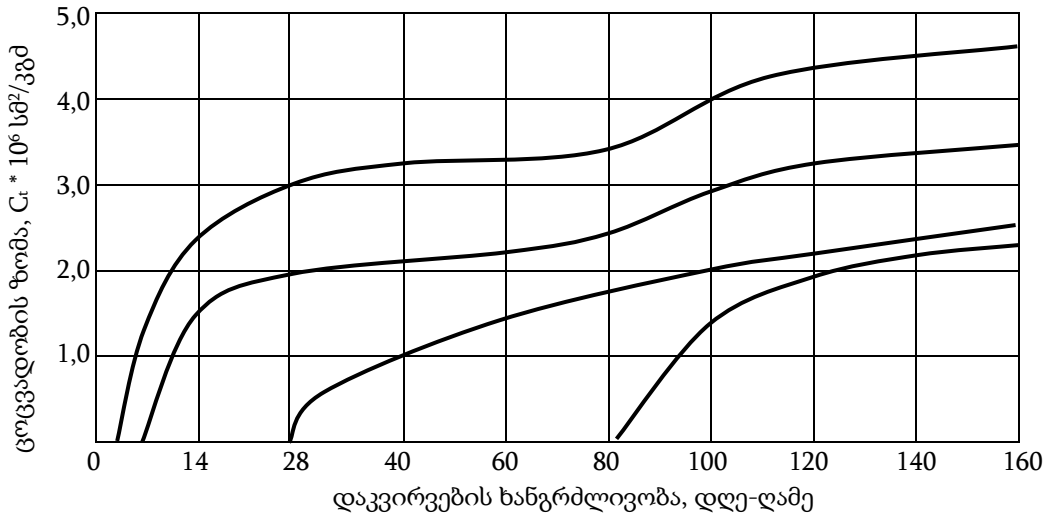


ნახ.1.2.ა. ცოცვადობის ზომა ბეტონისათვის მარკით, M1000



ნახ.1.2.ბ. ცოცვადობის ზომა ბეტონისათვის მარკით, M800

ბოლოს ვ.ი. სიტნიკი აღნიშნავს, რომ მაღალი სიმტკიცის ბეტონებისათვის ცდის შედეგად მიღებული ჯდომის და ცოცვადობის დეფორმაციები მდებარეობს იმავე საზღვრებში და ზოგჯერ უფრო მცირეცაა, რაც ჩვეულებრივი ბეტონების იმავე მახასიათებლების საშუალო მნიშვნელობები [4, 5].



ნახ.1.2.გ. კონკრეტის სილამაქე ბეტონისათვის მარკით, M600

1.1.2. რ.ა. მელნიკის, ვ.ი. ფედორჩუკის და ი.ი. ლუბენეცის გამოკვლევები

რ.ა. მელნიკი, ვ.ი. ფედორჩუკი და ი.ი. ლუბენეცი ახდენდნენ 900 და 1000 მარკის ბეტონების კონკრეტის შესწავლას. ბეტონის დასამზადებლად იყენებდნენ ცემენტს მარკით 600, კვარცის ქვიშას $M_{\text{სიბს}}=2$ მმ, გრანიტის ღორღის მარცვლის მაქსიმალურ ზომით 20-25 მმ. ცემენტის ხარჯი 900 და 1000 მარკის ბეტონებისათვის შესაბამისად იყო 500 და 600 მ³. ბეტონის შედგენილობაში წყალცემენტის შემცველობა $B/H=0,3$. გამოყენებული იყო პლასტიფიკატორი CCB-0,25%-ის რაოდენობით ცემენტის მასიდან [6, 7, 8].

ექვსი დღე-ღამის განმავლობაში ნიმუშები ინახებოდა დატენიანებულ ნახერხში. ყველა ნიმუში გათავისუფლებული იქნა ყალიბიდან გამყარების შემდეგ. კონკრეტობაზე გამოიცადა პრიზმები ზომით 10×10×30 სმ. გამოცდები ჩატარდა ზამბარებიან დანადგარზე. პრიზმის ნაწილი იყო ჰიდროლიზირებული. გამოსაცდელ დანადგარზე ზამბარები დატვირთული იყო ძაბვის სხვადასხვა დონეზე: 0,1 R_{bm} ; 0,2 R_{bm} ; 0,4 R_{bm} ; 0,6 R_{bm} ; 0,8 R_{bm} .

დატვირთვის 28 დღე-ღამის ხნოვანების ყველა საცდელ ნიმუშზე განისაზღვრა ფარდობითი დეფორმაციები $0,2 \cdot 10^5$ კგ/სმ², $0,4 \cdot 10^5$ კგ/სმ², $0,6 \cdot 10^5$ კგ/სმ² ძაბვების შესაბამის დონეზე. გამოცდის შედეგები M900 და M1000 მარკის ბეტონისათვის

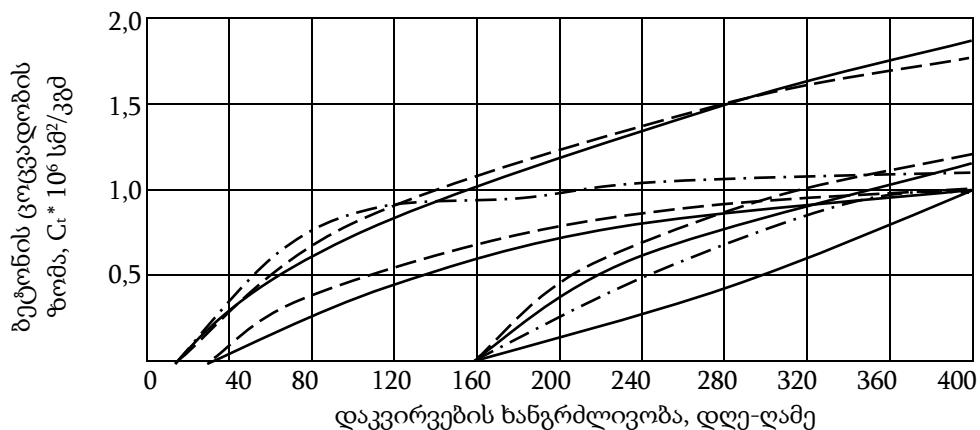
მოცემულია ცხრილში 1.1. გამოიყენება როგორც ჰიდროლიზებული, ასევე არაჰიდროლიზებული ნიმუშები. ცხრ.1.1-ში მოყვანილია არაჰიდროლიზირებული ნიმუშების გამოცდის შედეგები მრიცხველში, ხოლო ჰიდროლიზირებული ნიმუშების გამოცდის შედეგები მოყვანილია მნიშვნელში.

ცხრილი 1.1.

ცოცვადობის დეფორმაციის ხვედრითი მნიშვნელობები

ბეტონის მარკა	ცოცვადობა, დატვირთვის დონეები (არაჰიდროლიზებული/ჰიდროლიზებული)			
	0,2	0,4	0,6	0,8
900	$\frac{1,64}{1,16}$	$\frac{1,78}{1,4}$	$\frac{2,16}{1,82}$	$\frac{2,91}{2,55}$
	$\frac{1,84}{1,42}$	$\frac{2,06}{1,78}$	$\frac{2,54}{2,21}$	$\frac{3,38}{3,34}$

ცხრილი 1.1-დან ჩანს, რომ ნიმუშების დატვირთვის ძაბვის დონეებზე მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ცოცვადობის დეფორმაციის ხვედრითი მნიშვნელობები, ხოლო ეს უკანასკნელი მნიშვნელოვნად შემცირებულია ჰიდროლიზირებულ ნიმუშებში. როგორც M900 მარკის ბეტონის, ასევე M1000 მარკის ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის ხვედრითი მნიშვნელობები არსებითად დაბალია ჩვეულებრივი სიმტკიცის ბეტონების ცოცვადობის დეფორმაციის ხვედრით მნიშვნელობებთან შედარებით.



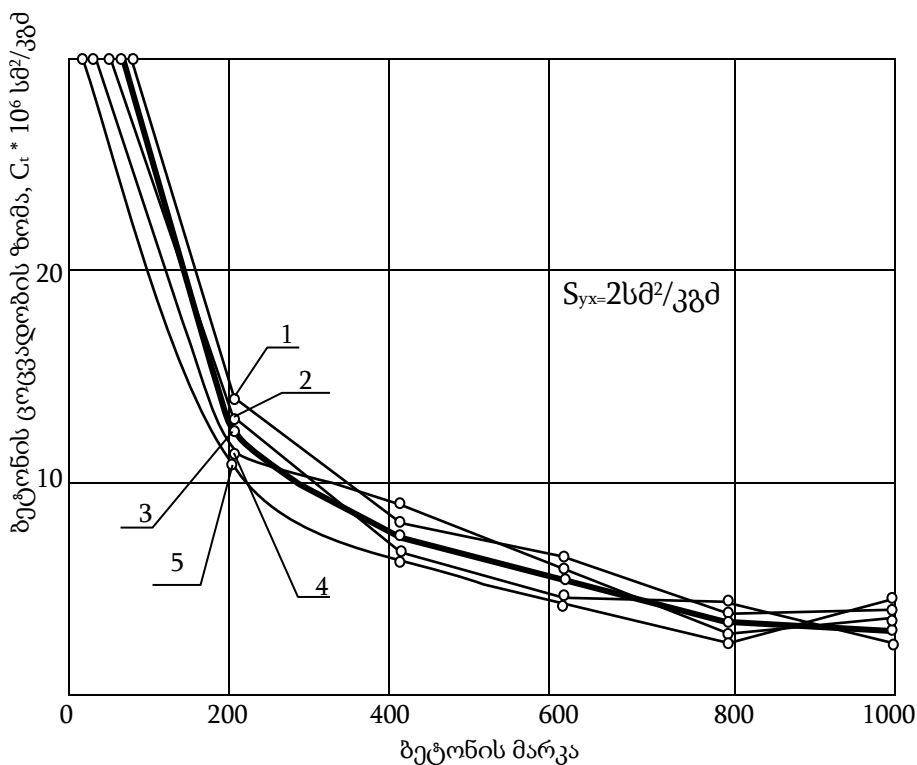
ნახ.1.3. M1000 მარკის ბეტონის ხვედრითი ფარდობითი დეფორმაციის ექსპერიმენტული და თეორიული მრუდები
 - - - - - ჰიდროლიზაციით, - - - - - ჰიდროლიზაციის გარეშე

ნახ.1.3-ზე წარმოდგენილია M1000 მარკის ბეტონის ცოცვადობის ფარდობითი დეფორმაციის ცალკეული მაჩვენებლები. ამ სურათიდან ჩანს, რომ მაღალი სიმტკიცის ბეტონი ფლობს ხვედრითი ცოცვადობას, რომელიც დამახასიათებელია საშუალო სიმტკიცის ბეტონებისათვის. დაბალი დამაბულობის მნიშვნელობებზე გამოცდილი ნიმუშების ცოცვადობის დეფორმაციის ცვლილება არაწრფივი ხასიათისაა. ნიმუშების დატვირთვის დამაბულობის გაზრდისას ცოცვადობა ასევე არაწრფივი ხასიათისაა. ნიმუშის დატვირთვის დამაბულობის გაზრდისას ცოცვადობის დეფორმაციის ხვედრითი მნიშვნელობები იცვლება წრფივის სახით.

1.1.3. ტრადიციული ბეტონების ცოცვადობის დეფორმაციის კვლევების განზოგადება

ტრადიციული ბეტონების ცოცვადობის დეფორმაციის ვრცელი ექსპერიმენტული მონაცემები განაზოგადა ე.წ. შერბაკოვმა [9, 10, 11]. კერძოდ, მის მიერ გაანალიზებულ იყო კაროლსტიკნის (1), სიტნიკის (2), ვიოლას (3), გუმელის (4), როსსის (5) ექსპერიმენტალური კვლევის შედეგები ცოცვადობის დეფორმაციის შესახებ. აღნიშნულის საფუძველზე მან ააგო განმაზოგადებელი დამოკიდებულება ტრადიციული ბეტონებისათვის, ცოცვადობის დეფორმაციის სიდიდეებსა და ბეტონის სიმტკიცეს (მარკას) შორის (ნახ.1.4), რისთვისაც ექსპერიმენტში გამოყენებული თითოეული მარკის ბეტონისათვის, თითოეული მკვლევარის მონაცემების მიხედვით განსაზღვრული იყო მათი საშუალო მნიშვნელობა. ნახ.1.4-დან ჩანს, რომ თითოეული მარკის ბეტონისათვის ცალკეული მკვლევარების მონაცემები განსხვავებულია, მაგრამ მათი ცვლილების ხასიათი ბეტონის მარკის ცვლილების შესაბამისად, ემორჩილება გარკვეულ კანონზომიერებებს, კერძოდ წარმოდაგენს ექსპონენტას. იგი ბეტონის მარკის ზრდასთან ერთად ასიმპტოტურად უახლოვდება აბსცისთა ღერძს. აღსანიშნავია ისიც, რომ ბეტონის სიმტკიცის (მარკის) გაზრდის მიუხედავად ცოცვადობის დეფორმაციის მნიშვნელობების გადახრა ექსპონენტიდან (დისპერსია) პრაქტიკულად ერთიდაიგივეა. M200-ზე დაბალი მარკის ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაცია არაწრფივია. უფრო მტკიცე ბეტონების

შემთხვევაში დამოკიდებულება შეიძლება ჩავთვალოთ პრაქტიკულად წრფივის სახით.



ნახ.1.4. სხვადასხვა ავტორების კვლევების მიხედვით მიღებული დამოკიდებულება ბეტონის მარკასა და ცოცვადობის ზომას შორის

ამის საჩვენებლად ჩამოთვლილი ავტორების მონაცემების საფუძველზე ჩატარებული იქნა გამოკვლევები. კერძოდ, გამოკვეული იქნა ბეტონის მარკასა და ცოცვადობის ზომას შორის კორელაციური კავშირის დონე. ცხრილში 1.2 მოყვანილია კაროლსტნიკის, სიტნიკის, ვიოლას, გუმელის და როსის კვლევების შედეგების მიხედვით ბეტონის მარკასა და ცოცვადობის დეფორმაციის ზომებს შორის დამოკიდებულების მონაცემები. ამავე ცხრილში მოყვანილია აღნიშნული მონაცემების მიხედვით გაანგარიშებული სიდიდეების, რომლებიც საჭიროა შესაძლო კორელაციური კავშირის გამოსავლენად.

კვლევის დასაწყისში დაშვებული იქნა, რომ დამოკიდებულებას აქვს შემდეგი სახე:

$$y = \alpha + \beta x, \quad (1.1)$$

სადაც x - ბეტონის მარკაა;

y - ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის სიდიდე.

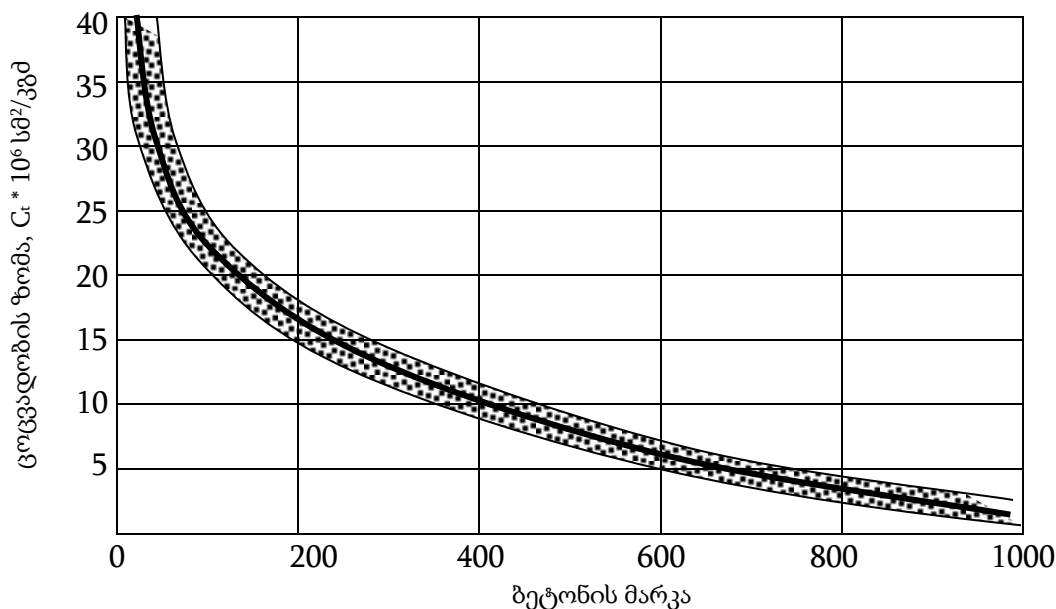
მონაცემები ბეტონის სიმტკიცესა და ცოცვადობის დეფორმაციას შორის არსებული კავშირის დასადგენად

№	$x_i \times 10^{-2}$	y	xy	x^2	y^2
1	2	12,4	24,8	4	153,76
2	4	7,6	30,4	16	57,76
3	6	6,2	37,2	36	38,44
4	8	3,3	26,4	64	10,89
5	10	2,24	22,4	100	5,0176
Σ	30	31,74	141,2	220	265,86776

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2)}} \quad (1.2)$$

ცხრ.1.2-ის მონაცემების გათვალისწინებით კორელაციური კავშირის კოეფიციენტები მაღალია ($M \approx 0,98$).

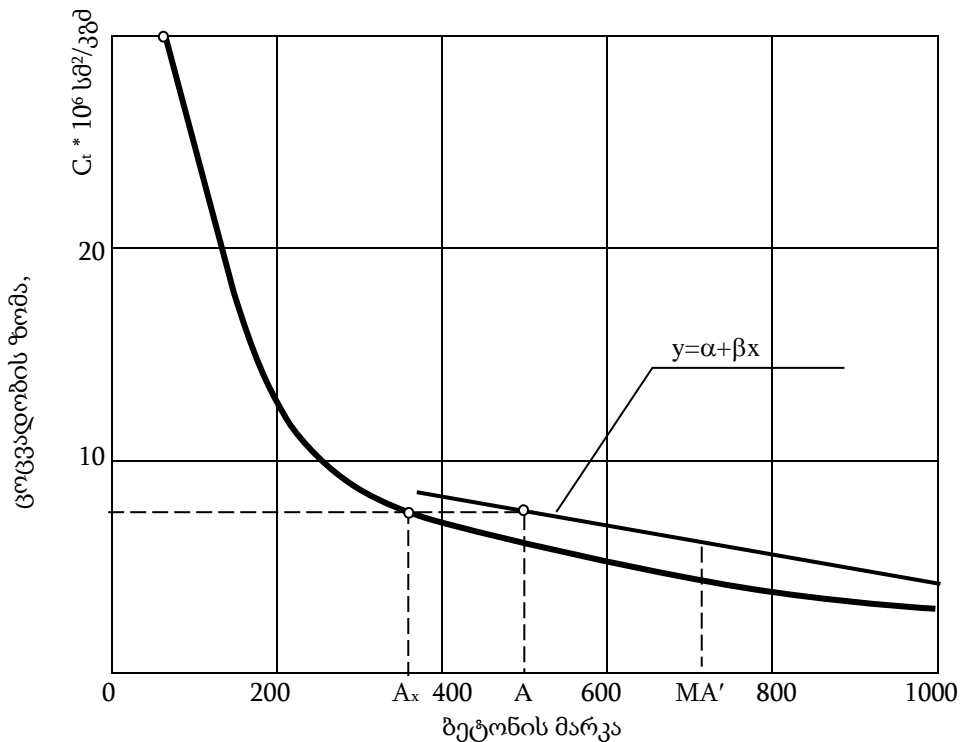
x და y სიდიდეების გაზნევის ველი ნაჩვენებია ნახ.1.5-ზე.



კორელაციური კავშირის გათვლის შედეგად მიღებულია, რომ იგი ტოლია $r=0,98$.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{(30-6)(31,74-6,348)}{\sqrt{(30-6)^2 (31,74-6,348)^2}} = 0,98$$

ტრადიციული ბეტონის სიმტკიცესა და ცოცვადობის დეფორმაციას შორის დამოკიდებულების გამოვლენილი კანონზომიერება შეიძლება გამოყენებულ იქნას ბეტონის კვლევის დროს, მისი ვარგისიანობის წინასწარი შეფასების კრიტერიუმად. იგულისხმება, რომ ბეტონის სიმტკიცის გაუმჯობესების მიზნით გამოყენებულია ახალი დამუშავებული საკვლევი ცემენტი. ფაქტიურად ბეტონის შეფასების აღნიშნული კრიტერიუმი გამოდგება, აგრეთვე ბეტონში ცემენტის უკეთესი შემცველობის დასადგენად.



ნახ.1.5.ა. ბეტონის ვარგისიანობის კრიტერიუმის მიხედვით წინასწარი შეფასება.

ამრიგად, თუ საკვლევი ბეტონი მისი წინასწარი ვარგისიანობის შესადარებლად, მისი საშუალებით აიგება A წერტილი (ნახაზი 1.5.ა). მასზე გაივლება (1.1) გამოსახულება ექსპონენტას ასიმპტოტს პარალელურად. თუ A წერტილი და მასზე გავლებული პარალელური წრფე ემთხვევა ასიმპტოტს ან იმყოფება მონაცემების გაბნევის არეში (ნახ.1.5.ა), მაშინ ცოცვადობის დეფორმაცია და ცემენტის შემცველობის მიხედვით საკვლევი ბეტონი დამაკმაყოფილებელია. წინააღმდეგ

შემთხვევაში კორექტირდება ცემენტის შემცველობა ბეტონში, როგორც ეს ნახ.1.5.ა-ზეა ნაჩვენები.

1.2. არატრადიციული ბეტონების ექსპერიმენტული კვლევები და ბეტონის წინასწარი შეფასების კრიტერიუმი

მაღალი სიმტკიცის არატრადიციული ბეტონების მიღების მიზნით ბეტონის ნარევის ცემენტთან ერთად უმატებენ სხვადასხვა მოდიფიკატორებს.

1.2.1. ს.ს. კაპრიელოვის, მ.გ. ბულგაკოვის, ი.ლ. ვიხმანის, ნ.ვ. სმირნოვის გამოკვლევები

ს.ს. კაპრიელოვა, მ.გ. ბულგაკოვა, ი.ლ. ვიხმანმა გამოიკვლიეს ბეტონის სამი შემადგენლობა [12, 13, 14, 15, 16]. მათ შორის პირველი იყო ტრადიციული, მეორე იყო დანამატებიანი შემკვრელის ჩვეულებრივი შემცველობით და მესამე იყო დანამატებიანი ბეტონი შემკვრელის გაზრდილი შემცველობით. დანამატის სახით გამოყენებული იყო ღუმელების აირგამწმენდი სისტემის ფილტრების მიერ დაგროვილი მტვერი. ბეტონის ნარევის შემადგენლობაში შედიოდა M400 მარკის ცემენტი, ქვიშა სიმსხვილის მოდულით $M_k=2$, გრანიტის ღორღი ფრაქციით 5-20 მმ.

ჩატარებული ექსპერიმენტის შედეგად მიღებული იქნა, რომ დრეკადობის მოდული აღმოჩნდა 14-36%-ით ნაკლები ნორმატივზე; კუმშვის და გაჭიმვის ზღვრული დეფორმაციები აღმოჩნდა უფრო მაღალი, ვიდრე ტრადიციული ბეტონის. ბზარწარმოქმნის ზედა საზღვარი იყო $0,9 R_{bm}$ დონეზე.

ბეტონის ცოცვადობა გამოკვლეული იქნა არაიზოლირებული ნიმუშების გამოცდით $0,3 R_{bm}$ სიდიდის ძაბვაზე.

ექსპერიმენტის შედეგები მოყვანილია ცხრილში 1.3.

ცოცვადობის ექსპერიმენტული მონაცემები

№	ბეტონის სახეობა	ცოცვადობის დეფორმაციის ზომა, $C(t,\tau) \times 10^5 \text{ მპა}^{-1}$
1	ტრადიციული	2,63
2	დანამატით	2,1
3	გაზრდილი დანამატით	3,88

ექსპერიმენტმა უჩვენა, რომ დანამატის გაზრდით ცოცვადობის დეფორმაციის სიდიდე იზრდება. დანამატით შემკვრელის ჩვეულებრივი შემადგენლობის შემთხვევაში, ცოცვადობის დეფორმაციის ზომა უფრო ნაკლები იყო, ვიდრე ტრადიციული ბეტონის შემთხვევაში.

ნ.ვ. სმირნოვის მიერ გამოკვლეული იყო ახალი თაობის მაღალი სიმტკიცის მძიმე ბეტონის ორი შემადგენლობა:

1. მოდიფიკატორის 10%-იანი დანამატით;
2. იმავე მოდიფიკატორის 15%-იანი დანამატით.

სხვა კვლევებთან ერთად პრიზმული ნიმუშები ზომით $7 \times 7 \times 28$ სმ, ცოცვადობის ზომაზე შედეგები მოყვანილია ცხრილში 1.4.

ნ.ვ. სმირნოვის მიერ ბეტონის ცოცვადობაზე გამოცდის შედეგები

№	შემადგენლობა	ცოცვადობის დეფორმაციის სიდიდე $C(t,\tau) \times 10^5 \text{ მპა}$
1	ბეტონი 10% MB მოდიფიკატორის დანამატით	2,57
2	ბეტონი 15% MB მოდიფიკატორის დანამატით	2,54

როგორც მოყვანილი ცხრილიდან ჩანს, ნ.ვ. სმირნოვის გამოკვლევაში ცოცვადობის ზომა აღმოჩნდა უფრო დაბალი, ტრადიციულ ბეტონებთან შედარებით (ცხრ. 1.4).

1.2.2. ფ.ა. ისერსის, ნ.ი. ვერშინინის გამოკვლევები

ფ.ა. ისერსის და ნ.ი. ვერშინინის მიერ ჩატარდა ექსპერიმენტები მოდიფიკატორ MB10-01-ის ბეტონის მექანიკურ თვისებებზე გავლენის შესწავლის მიზნით. მოდიფიკატორი შეიცავდა მიკროკაჟმიწას და სუპერპლასტიფიკატორს. აღებული იყო ბეტონის ოთხი შემადგენლობა [17].

1. MB10-01-ის მოდიფიკატორის 10%-იანი შემადგენლობით;
2. MB10-01-ის მოდიფიკატორის 15%-იანი შემადგენლობით;
3. MB10-01-ის მოდიფიკატორის 10%-იანი შემადგენლობით და ჰაერის ჩამბმელის დანამატით;
4. MB10-01-ის მოდიფიკატორის 10%-იანი შემადგენლობით და ბეტონის ნარევი წყლის შემცირებული შემცველობით.

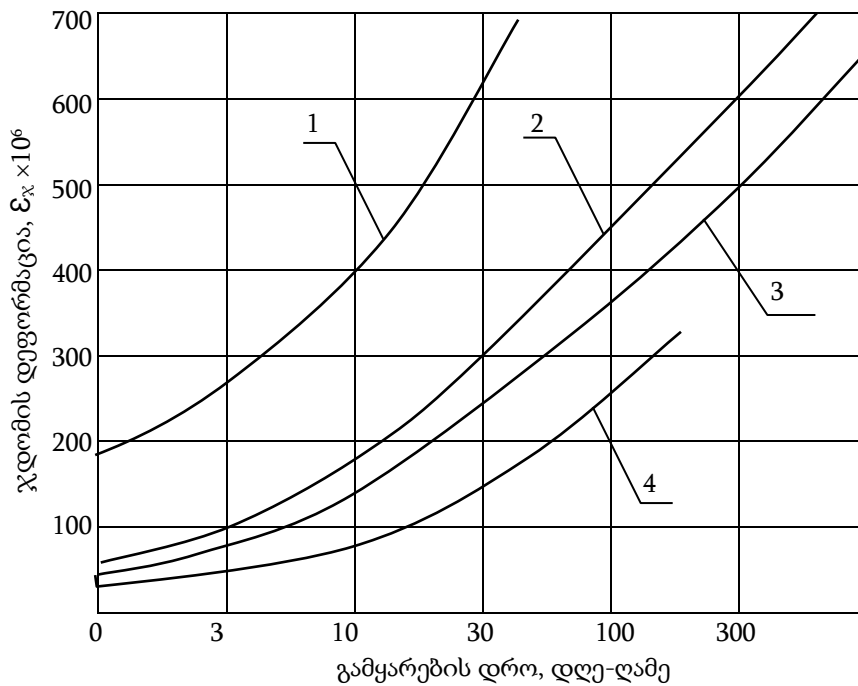
ბეტონის ნარევის დასამზადებლად გამოყენებული იყო M500 მარკის ცემენტი, გრანიტის ღორღი ფრაქციით (5-200 მმ) და კვარცის ქვიშა. ცოცვადობის დეფორმაციები გაზომილ იქნა პრიზმულ ნიმუშებზე ზომით 10×10×40 სმ, ჯდომის დეფორმაცია 28 დღე-ღამემდე ასაკში იზომებოდა ნორმალურ პირობებში, 60-65%-მდე ტენიანობისას და 20°C ტემპერატურის დროს. ცოცვადობის დეფორმაცია იზომებოდა 7 და 28 დღე-ღამის ასაკის ბეტონისათვის, 60-65%-მდე ტენიანობისას და 20°C ტემპერატურის პირობებში.

გამოცდის შედეგები მოცემულია ცხრილში 1.5.

ცხრილი 1.5

ბეტონის ნიმუშების გამოცდის შედეგები ფ.ა. ისერსის და ნ.ი. ვერშინინის ექსპერიმენტებში

№	ბეტონის შემადგენლობა დანამატებზე	ჯდომის ზღვრული დეფორმაციები $\times 10^5$	ცოცვადობის ზომა $C(t,\tau) \times 10^5$ მპა ⁻¹
1	10% MB10-01	22,5	2,65
2	15% MB10-01	13,5	
3	10% MB10-01 + ჰაერჩამბმელი	15,6	
4	10% MB10-01 + წყლის მცირე შემცველობით	16,5	2,08



ნახ.1.6. ჰაერზე გამყარებული ბეტონის ჯდომის დეფორმაცია
 1-ტრადიციული ბეტონი (65% ტენიანობის), 2-მაღალი სიმტკიცის ბეტონი (65% ტენიანობა), 3-ტრადიციული ბეტონი (95% ტენიანობით), 4-მაღალი სიმტკიცის ბეტონი (95% ტენიანობით).

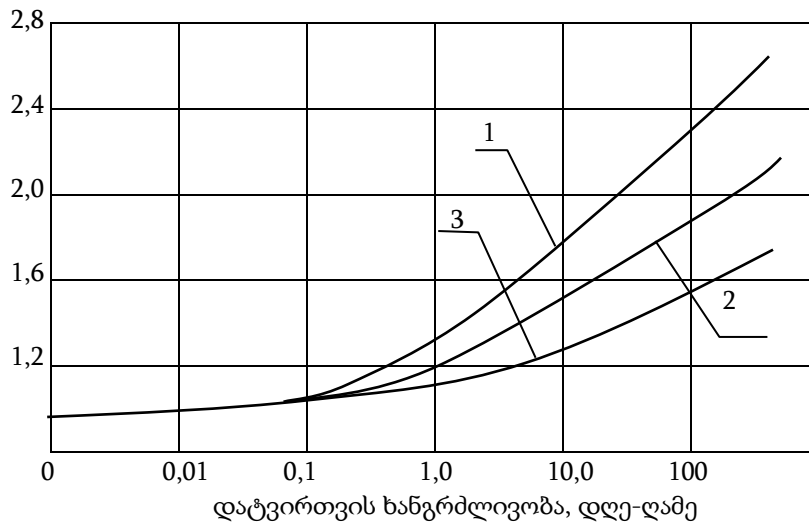
ცოცვადობის ხვედრითი დეფორმაციის ცვლილება დროში მოცემულია ნახ.1.6-ზე.

ცოცვადობის დეფორმაცია 10-15%-მდე შემცველობის ბეტონის 2, 3 ნიმუშებისათვის მოდიფიკატორსა და პლასტიკატის დანამატით ისეთივე სიდიდისაა, როგორც ტრადიციულ ბეტონებში. იგი კიდევ უფრო შემცირებულია დაბალი წყალშემცველობის ბეტონის შემთხვევაში (ცხრ. 1.5).

1.2.3. ლ.ჟ. პეროს გამოკვლევები

იგი განიხილავს 890-1020 კგ/სმ² სიმტკიცის ბეტონს [18]. ასეთი სიმტკიცის ბეტონი მის მიერ მიღებული იქნა ნარევში სპეციალური სახის შემავსებლის გამოყენებით. შემავსებელს წარმოადგენს მსხვილი ზომის, მთის ჯიშის მაღალი სიმტკიცის ხაოიანი ზედაპირის მქონე ქვიშა. წყალცემენტის შემცველობა ბეტონში შეადგენდა 0,28-ს. შემავსებლის შეფარდება ცემენტთან იყო 2:1. შემავსებლის მაქსიმალური სიდიდე შეადგენდა 20 მმ-ს.

დეფორმაცია იზომებოდა 75×75×250 სმ ზომის პრიზმების ნიმუშებზე. ნიმუშები ინახებოდა 65% ტენიანობის მქონე ნახერხში. კვლევის შედეგები მოცემულია ნახ.1.7-ზე.



ნახ.1.7. ხანგრძლივი დატვირთვისას ბეტონის დეფორმაცია
1-ტრადიციული ბეტონი (65% ტენიანობით), 2-მაღალი სიმტკიცის ბეტონი (65% ტენიანობით), 3-ტრადიციული ბეტონი (95% ტენიანობით).

ბეტონის ცოცვადობა გაზომილი იყო 60×95×500 მმ ზომის პრიზმებში ჩამოსხმულ ნიმუშებზე. გაზომვას ახდენდნენ ზამბარულ დანადგარზე.

ცოცვადობის დეფორმაციის მნიშვნელობების მიხედვით აგებულია ნახ.1.7. აღსანიშნავია, რომ დეფორმაციებს აქვს უფრო დიდი მნიშვნელობები, ვიდრე ჩვეულებრივი სიმტკიცის ბეტონებს. ჰაერზე გამაგრებულ ნიმუშებს აქვთ უფრო მაღალი ცოცვადობის დეფორმაცია, ვიდრე 95%-მდე ტენიანობის ნახერხში გამყარებულ ნიმუშებს.

განსაკუთრებით მაღალი სიმტკიცის (120-150 მპა) ბეტონის კვლევები ჩაატარა ნ.ვ. სვირიდოვა [54, 55, 56]. ამ კვლევებში ნ.ვ. სვირიდოვი იყენებდა მაღალი სიმტკიცის მსხვილ შემავსებლებს: ბაზალტის (სიმტკიცით 410 მპა) და გრანიტის (სიმტკიცით 165 მპა) ნამსხვრევებს. ეს ბეტონები ხასიათდება მაღალი მოცულობითი წონით 2670-2720 კგ/მ³. გამოყენებული იყო მაღალი აქტივობის ცემენტი 53, 56 და 64 მპა, რაოდენობით 510-600 კგ/მ³. ცოცვადობის დეფორმაცია, როგორც კვლევებმა აჩვენა, პრაქტიკულად ნულის ტოლია. ამიტომ მონაცემები ამ ბეტონების ცოცვადობის დეფორმაციაზე ვერ იქნა განსაზღვრული.

1.2.4. ო.ი. ბერგის კვლევები

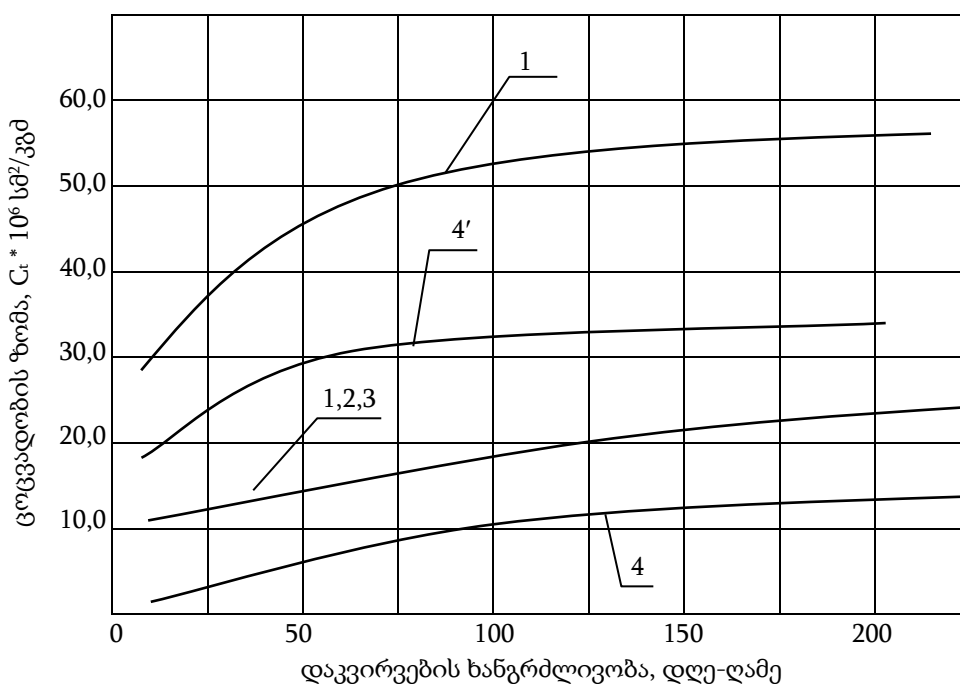
ო.ი ბერგმა განაზოგადა სხვადასხვა მკვლევარების მიერ მიღებული შედეგები [12]. შაიდლერის, როსის, როლის, ვაილის, გუმელის, სიტნიკის, ხონსონის, ივანოვის, როჟკოვის და შერბაკოვის კვლევების შედეგები მოცემულია ცხრილში 1.6.

ცხრილი 1.6

კვლევების მონაცემები ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის განზოგადებისათვის

	ექსპერიმენტული მონაცემების ავტორები	სერიაში პარალელური ცდები	ბეტონის ნარევის შემადგენლობა			მოქმედი მძაბვა, R კგ/სმ ²	ნიმუშების კვეთის ფართი სმ ²	ტენიანობა, %	გამოცდის ხანგრძლივობა, დღე-ღამე	ცოცვადობის ზომის გაზომილი მნიშვნელობები, ×10 ⁶	ცოცვადობის ზომის ექსტრაპოლირებული მნიშვნელობა, ×10 ⁶
			1:m	წყალცემენტის შემცველობა	წ/ც ფარდობა, ლ/მ ³						
1	შაიდლერი	2	6,03	0,53	191	625	Φ15	50	365	5	5,5
2		2	3,05	0,35	210	874	Φ15	50	365	4,2	4,6
3	როსსი	3	4,4	0,38	152	675	Φ12	91	170	1,7	1,9
4	როლლი	2	2,5	0,44	259	505	Φ10	60	168	7,1	9,5
5		2	1	0,31	306	715	Φ7,6	60	168	5,9	7,8
6		2	1	0,31	306	684	Φ10	60	168	6	8,2
7	გუმელი	2	5,4	0,38	136	579	Φ20	65	1100	5	5
8		2	5,4	0,55	186	504	Φ20	65	1100	8,2	8
9	ვაილი	2	5,03	0,52	186	564	Φ10	65	767	5,9	5,9
10	სიტნიკი	3	4,7	0,4	160	661	Φ10	70	336	2,5	2,8
11		3	3,6	0,31	155	812	Φ10	70	319	2,5	2,8
12		3	3,44	0,27	148	1012	Φ10	70	329	1,9	2,1
13		3	3,44	0,27	142	985	Φ10	70	330	1,9	2,1
14	ჰანსონი	3	5,13	0,42	214	512	Φ15	50	1000	10,3	10,1
15	ივანოვი	3	4,24	0,42	267	560	Φ10	55	374	11,8	12,1
16		3	6,5	0,42	135	711	Φ10	55	400	2,9	3,3
17		3	3,86	0,42	192	624	Φ10	55	412	4,5	5,7
18		3	1,52	0,27	231	867	Φ10	55	394	3,2	4
19		3	3,4	0,27	145	972	Φ10	55	412	3,1	3,6
20		3	0,75	0,27	305	1065	Φ10	55	418	4,8	5,9
21		3	0	0,27	451	1186	Φ10	55	393	6,2	7,5
22	ბერგი	2	5,25	0,4	150	550	Φ15	55	160	3,4	4,3
23		1	5,25	0,4	150	550	Φ15	55	160	3,6	4,5
24		1	5,25	0,4	150	596	Φ15	55	160	3,1	4,1
25		1	5,25	0,4	150	596	Φ15	55	160	3,5	4,2
26		1	4	0,3	142	884	Φ15	55	250	2,3	2,7
27		1	4	0,3	142	846	Φ15	55	250	2,6	2,9
28		1	4	0,5	142	882	Φ15	55	250	2,2	2,4
29	შერბაკოვი	4	1,61	0,24	204	800	Φ15	72	197	2,6	3,2
30		1	5,34	0,43	156	575	Φ15	72	158	3,6	4,0

გამოკვლევებში ცოცვადობის დეფორმაციის განსაზღვრისას საცდელი ნიმუშები იმყოფებოდა დატვირთვის ქვეშ სხვადასხვა დროის განმავლობაში, რომელიც მოქმედებს ექსპერიმენტის შედეგზე. ამ გავლენის მინიმუმამდე დაყვანის მიზნით, ბერგი ახდენდა გაზომვით მიღებული ცოცვადობის დეფორმაციის ექსტრაპოლაციას და განიხილავდა დეფორმაციის ზღვრულ მნიშვნელობას. შემდეგ ეს მნიშვნელობა დაყავდა ნიმუშების კვეთის საწყის მდგომარეობასთან. აღნიშნული სახით ექსპერიმენტული მონაცემების დამუშავების შემდეგ მოცემულია ცხრილი 1.6-ის ბოლო სვეტში. ამ უკანასკნელი მონაცემების შედარება გაზომვის შედეგების მონაცემებთან აჩვენებს, რომ ცალკეული პარალელური ექსპერიმენტების მიხედვით ექსპერიმენტების განსხვავებული მონაცემები შედარებით გათანაბრებულია, რაც ზრდის ექსპერიმენტის მონაცემების სანდოობას და ადვილი ხდება სხვა საკვლევი ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციასთან შედარება (ნახ.1.8).



ნახ.1.8. ცოცვადობის კუთრი დეფორმაციის ცვლილება დროში
 1,2,3- გასაშუალებული მრუდები ბეტონის შედგენილობისათვის;
 4-მრუდი ბეტონის შედგენილობისათვის 4;
 1'-4' მრუდები შესაბამისად ბეტონის შედგენილობისათვის 1 და 4, დატვირთული 7 დღე-ღამის ასაკში

I განყოფილების დასკვნები

1. მრავალი ავტორის, ასევე ჩვენს მიერ ჩატარებული ტრადიციული ბეტონების კვლევების შედეგების ანალიზმა აჩვენა, რომ ცოცვადობის დეფორმაცია მჭიდროდაა დაკავშირებული ბეტონების სიმტკიცესთან და მის სხვა ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებთან, რომლებიც საბოლოოდ განსაზღვრულია ბეტონებში ბზარების წარმოქმნაზე და აქედან გამომდინარე, მათი საექსპლუატაციო პარამეტრების შენარჩუნების ხანმედეგობის.
2. გამოკვლევებმა აჩვენა აგრეთვე, რომ ტრადიციული ბეტონების ცოცვადობის დეფორმაციის სიდიდე და ცვალების ხასიათი, მიუხედავად მათი დამზადების ტექნოლოგიის პარამეტრების სხვადასხვაობისა, დამოკიდებულება ბეტონის შემადგენლობაში ცემენტის პროცენტულ შემცველობაზე, კერძოდ, ბეტონში ცემენტის პროცენტული შემადგენლობის ზრდასთან ერთად მცირდება ცოცვადობის დეფორმაციის სიდიდე, ხოლო ცვლილების ხასიათი შეიძლება გამოსახოს ესქპონენტას საშუალებით.
3. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციასა და ბეტონში ცემენტის პროცენტულ შემცველობას შორის განმაზოგადებელი ესპონენტას აბსცისთა ღერძთან მიახლოებისას, ასიმპტოტა ცემენტის შემცველობიდან 20% პრაქტიკულად შეიძლება ჩავთვალოთ მიახლოებული წრფესთან. ამ წრფის მდებარეობის განსაზღვრა კოორდინატთა სისტემაში შეიძლება საკვლევი ბეტონისათვის ესპერიმენტალურად განსაზღვრული ერთ-ერთი წერტილის მიხედვით.
4. ტრადიციული ბეტონის ახალი შემადგენლობის დამუშავებისას, კონკრეტული დაბალი ცოცვადობის დეფორმაციის უზრუნველყოფისათვის, ცემენტის საჭირო პროცენტული შემცველობა შეიძლება განსაზღვრულ იქნას ე.წ. ტრადიციული ბეტონების ცოცვადობის დეფორმაციის განმაზოგადებელი ესპონენტას მიხედვით. ამ მიზნით აგებენ კონკრეტული ბეტონისათვის ესპონენტას წრფივ უბანს, ესპერიმენტულად განსაზღვრული ერთ-ერთი წერტილის მიხედვით. ამ წერტილის ცოცვადობას შეესაბამება მისი უზრუნველყოფისათვის საჭირო ცემენტის პროცენტული შემცველობა განზოგადებულ ესპონენტაზე (ნახ.1,4; 1,5).
5. ცოცვადობის დეფორმაციასა და ცემენტის პროცენტულ შემცველობას შორის დამოკიდებულების განმაზოგადებელი ესპონენტა, მიღებული მრავალი

ექსპერიმენტის შედეგების ანალიზის საფუძველზე, შეიძლება გამოყენებულ იქნას ახალი შემადგენლობის ბეტონების მახასიათებლების წინასწარი შეფასების კრიტერიუმად.

6. მოდიფიცირებული ბეტონების ცოცვადობის დეფორმაციისადმი მიძღვნილი კვლევების განმაზოგადებელი ცხრილი 1.5 შეიძლება გამოყენებულ იქნას ახალი შემადგენლობის მოდიფიცირებული ბეტონების წინასწარი შეფასების კრიტერიუმად. ამისათვის საჭიროა, ცხრილის შემავალი ერთ-ერთი ავტორის კვლევების პირობების გათვალისწინებით დამზადებული ახალი შემადგენლობის მოდიფიცირებული ბეტონის ნიმუშებისაგან განსაზღვრული იქნას ცოცვადობის დეფორმაციები და ამ მონაცემების ექსტრაპოლაციით მიღებული შედეგები შედარებულ იქნას ცხრილის მონაცემებთან. წინასწარ შეფასებაში იგულისხმება მხოლოდ საუკეთესო მაჩვენებლების მქონე ნიმუშების შემადგენელ ბეტონზე კვლევის გაგრძელება, ძირითადი ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების მქონე, საუკეთესო შემადგენლობის მოდიფიცირებული ბეტონის საბოლოოდ გამოვლენის მიზნით.

II განყოფილება

2. ბეტონებში ცოცვადობა და ექსპერიმენტის ჩატარების მეთოდика

2.1. ცოცვადობის თეორიის მიმოხილვა

2.1.1. ბეტონებში ცოცვადობის და ჯდომის დეფორმაციების ბუნება

ცოცვადობის თანამედროვე თეორიით განასხვავებენ ბეტონების დეფორმაციის ორ სახეობას [19, 20, 21, 22, 23].

1. უეცარ (წამიერ, მყისიერ, ერთბაშად) დეფორმაციებს - დეფორმაციები (არასავალდებულო, ხანმოკლე), რომლებიც თან სდევს ძაბვის ცვლილებას. მისი განვითარება წყდება ერთდროულად ძაბვის მოქმედების დამთავრებისთანავე [13].

2. დაგვიანებული დეფორმაციები - დეფორმაციები, რომლებიც გრძელდება ძაბვის ცვლილების შეწყვეტის შემდეგაც, ე.ი. ცოცვადობის დეფორმაციები.

ბეტონის ცოცვადობის ფიზიკური ბუნება დღემდე ჯერ კიდევ ბოლომდე არ არის ცნობილი. როგორც ცნობილია ცემენტის ქვა (მატრიცა) შედგება კრისტალური შენაზარდისა (კარკასი) და ბლანტი გელისაგან. გარდა ამისა, ცემენტის ქვა ასხმულია სხვადასხვა ბუნების და სიდიდის ფორებით. ნაშრომში გამოყენებულია ვ.ბ. რატინოვის და ტ.ი. როზენბერგის შრომებში მოყვანილი ფორების კლასიფიკაციის მეთოდი. მოცემულ მომენტში შეიქმნა აზრი იმაზე, რომ ცოცვადობა ითვლება სხვადასხვა მიზეზების ქმედების პროცესად კერძოდ.

1. მცირე დონის ძაბვებისას ($\approx 0,5R_{bm}$ -მდე ჩვეულებრივი ბეტონებისათვის) ცოცვადობა ითვლება, როგორც გელის ბლანტი დინების და კაპილარული წნევის შედეგი.

2. შედარებით მაღალი დონის ძაბვებისას - ამას კიდევ ემატება სტრუქტურული ცვლილებები: მიკროზარების წარმოქმნა და განვითარება, ასევე (ზოგიერთი მეცნიერების აზრით) კრისტალური წამონაზარდების ცალკეული ნაწილაკების ზედაპირებს შორის ძვრადობა: გარდა ამისა, ცოცვადობაზე გავლენას ახდენს გელის ტენიანობის ცვლილება - შედეგად მისი გამოშრობა და ხანგრძლივი დატვირთვით გამოწვეული მექანიკური ზემოქმედება [24,25].

სხვა ფაქტორები როგორცაა ცემენტის ქვის სტრუქტურიდან თხევადი ტენის ბლანტი მექანიკური გამოწეხვა - გამოწვეული ბზარების ჯდომის შედეგად წყლის ფილტრაციის გამარტივებით, ასევე კრისტალური წამონაზარდის პლასტიკური დეფორმაცია - მრავალი მეცნიერის ვარაუდით ატარებენ თანხმლებ ხასიათს და არსებითად არ მოქმედებენ ცოცვადობის დეფორმაციაზე.

ზემთ ჩამოთვლილი მოვლენების რაოდენობრივ თანაფარდობაზე გავლენას ახდენს ბეტონის დამზადების ტექნოლოგია და ბეტონის გამოცდის პირობები. დამზადების ტექნოლოგიის ძირითადი ფაქტორები და გამოცდის პირობები, რომელზედაც დამოკიდებულია ცოცვადობის და ჯდომის დეფორმაციები, შეიძლება დავეყთ სამ ჯგუფად [50].

1. საწყისი მასალებით განპირობებული ფაქტორები: ცემენტის სახეობა, აქტიურობა და დაფქვის სიწმინდე; ქვიშის სახეობა და გრანულომეტრიული შედგენილობა; სიმტკიცე და მსხვილი შემვსების დრეკადი თვისებები; წყალცემენტის ფაქტორი და ბეტონის შედგენილობა.

2. ბეტონის სამუშაოების განმსაზღვრელი ტექნოლოგიური ფაქტორები: შემადგენელი კომპონენტების არევის ხანგრძლივობა; ვიბრირების არსებობა; ხანგრძლივობა და ინტენსივობა; კონსტრუქციის განივი კვეთის ზომები; წინასწარი შენახვის გარემოს ტემპერატურა და ტენიანობა; გამოცდის დაწყებამდე შენახვის ხანგრძლივობა.

3. დატვირთვამდე ბეტონის შენახვის პირობების განმსაზღვრელი ფაქტორები: გარემოს ტენიანობა და ტემპერატურა; ზედაპირის დამუშავების ხარისხი; ელემენტის განივი კვეთის ზომები; დატვირთვის მომენტში ბეტონის ასაკი; ძაბვის დონე; ძალვის მიმართულება ბეტონის ფენების ჩაწვდომის გათვალისწინებით; დატვირთვის მოქმედების ხანგრძლივობა.

რომელიმე ზემოთ ჩამოთვლილი ფაქტორების ცვლილებით, იცვლება ბეტონში მიმდინარე სხვადასხვა ფიზიკურ-ქიმიური თვისებების რაოდენობრივი თანაფარდობა, რაც მოქმედებს ცოცვადობის და ჯდომის დეფორმაციაზე.

ბეტონში ტენშემცველობის ცვლილება მოქმედებს შიგა დამაბულობის მეორადი ველით წარმოქმნილი ცოცვადობის დეფორმაციაზე. ეს გამოწვეულია ტენიანობის გრადიენტით. დამაბულობის მეორადი ველით აიხსნება ბეტონის ცოცვადობის და

ჯდომის არა იდენტურობა ცოცვადობის და ჯდომის დეფორმაციების ჯამი უფრო დაბალია, ვიდრე ცოცვადობის და ჯდომის ერთდროული მოქმედებისას.

ჯდომის დეფორმაციებში გამოყოფენ ტენიანობის, კონსტრუქციულ (ქიმიურ) კარბონიზაციულ შემადგენლობებს. გარდა ამისა დატვირთვის მოქმედებისას გამოყოფენ დამაბულ ჯდომას, რომელიც დაკავშირებულია პიკეტის ეფექტთან.

დრეკად-მყისიერი დეფორმაციები განისაზღვრება ჰუკის წრფივი კანონით.

$$\sigma = E_B \cdot \varepsilon, \quad (2.1)$$

სადაც E_B -დრეკადობის წრფივი მოდულია (დრეკად-მყისიერი დეფორმაციის) მოდული.

თანახმად სტანდარტებისა [18], E_B - მოდული განისაზღვრება ბეტონის პრიზმების საფეხურებრივი დატვირთვისას $0,3 R_{bm}$ დონემდე.

E_B -მოდული არ ითვლება ბეტონის კონსტანტად და დამოკიდებულია მის ასაკზე τ . არსებობს $E_B(\tau)$ სიდიდის განსაზღვრის სხვადასხვა მკვლევარების ფორმულები. მაგალითად ნ.ხ. არუთინიანის [3] თანახმად.

$$E_B(\tau) = E_0(1 - \beta e^{-\alpha\tau}), \quad (2.2)$$

სადაც E_0 ; β ; e - ემპირიული მახასიათებლებია.

2.1.2. ბეტონში ცოცვადობის თეორიები

თანახედროვე შეხედულების თანახმად ცოცვადობის დეფორმაციას შეიძლება ჰქონდეს წრფივი და არაწრფივი ხასიათი. შრომებს შორის ასევე პოსტულირდება მყისიერი დეფორმაციის არაწრფივობა დამაბულობის მაღალ დონეზე [13]. ცოცვადობის დეფორმაციის არაწრფივობა გაგებული უნდა იქნეს შემდეგნაირად. ტყუპ ნიმუშებში სხვადასხვა დონის ძაბვის შექმნით წარმოქმნილი ცოცვადობის დეფორმაციები, რომელიც დააგროვა ამ ნიმუშებმა დროის თანაბარ შუალედში, არ იქნება ამ ძაბვების პროპორციული [26].

რაც შეეხება ცოცვადობის არაწრფივობის ექსპერიმენტალურ დასაბუთებას ის ს.ვ. ალექსანდროვსკა, ნ.ი. კატინის, რ.ა. მელნიკის, ო.მ. პოპოვის, ნ.ა. კოლესნიკოვის და სხვა კვლევებით დადგენილია, რომ ცოცვადობის დეფორმაციები ერთდროულად

კუმშვისას არაწრფივია ჯერ კიდევ ძაბვის ყველაზე მცირე დონიდან. მაგრამ როგორც აღინიშნა მცირე დონის ძაბვებისას (მაგალითად 0,5 R_{bm} -მდე) ეს არაწრფივობა, არაა არსებითი.

ზოგიერთ სხვა გამოკვლევებში, მაგალითად კ.ს. კარაპეტიანი, ე.ა. იცენკო, ი.ი. ულიცკი ძაბვის მაღალ დონეზე მიუთითებენ წრფივ ცოცვადობაზე. [71] შრომაში ლაპარაკია იმაზე, რომ მცირე ძაბვებისას არაწრფივობა ატარებს დროებით ხასიათს. გამოვლინდება დატვირთვის ადრეულ ასაკში და სრულად ქრება დატვირთვის ქვეშ ნახევარწლიანი დაყოვნების შემდეგ.

მიუხედავად საწინააღმდეგო მოსაზრებისა, მიღებულია ცოცვადობის დეფორმაციები დავყოთ წრფივ (ან პირობით წრფივ) და არაწრფივ დეფორმაციებად.

ნ.ი. კატინის, პ.ი. ვასილიევის, ა.ე. შეიკინისა და ვ.ლ. ნიკოლაევის ცდების საფუძველზე გაჭიმვისას კავშირი დამაბულობასა და ცოცვადობის დეფორმაციას შორის ახლოსაა წრფივობასთან და შენარჩუნებულია მასში მის დაშლამდე. ამასთან ს.ვ. ალექსანდროვსკის და ო.ი. ბერგის მონაცემებით კუმშვისას ცოცვადობის დეფორმაციები 1.5-ჯერ უფრო მცირეა, ვიდრე გაჭიმვის დროს [26].

ექსპერიმენტალურად დადგენილია, რომ ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციები საერთო შემთხვევაში დამოკიდებულია კონსტრუქციის დამაბულობაზე. დატვირთვის მოდების დროზე - τ და თვით ბეტონის კონსტრუქციის ხნოვანებაზე - t .

ძირითადში ბეტონის ცოცვადობის თანაბდროვე წრფივ თეორიაში დევს მთელი რიგი დაშვებები [11].

- ბეტონი განიხილება როგორც იზოტროპიული და ერთგვაროვანი მასა;
- დრეკად-მყისიერი დეფორმაციები და ცოცვადობის დეფორმაციები წრფივად დამოკიდებულია დამაბულობაზე;
- ბეტონი ფლობს ერთნაირ დეფორმაციულ თვისებებს გაჭიმვისას და შეკუმშვისას;
- ცოცვადობის დეფორმაციისათვის ვიყენებთ ზედდების ზემოქმედების (ზზპ) პრინციპს ან სხვანაირად სუპერპოზიციის პრინციპს. ბეტონის ცოცვადობის შემთხვევაში ძირითადი „ზზპ“ ფორმულირდება შემდეგნაირად.

ცოცვადობის სრული დეფორმაცია საფეხურებრივად ცვლადი დამაბულობის დროს, შეიძლება ნაპოვნი იქნეს როგორც ცალკეული დეფორმაციების ნამატთა ჯამი, რომელიც გამოწვეულია ძაბვის შესაბამისი წანამატებით, ამასთან ითვლება რომ

მოცემული ცოცვადობის დეფორმაცია არ არის დამოკიდებული წინამორბედ ძაბვაზე (დატვირთვის ისტორიაზე);

ნიმუშების შედარებითი ცოცვადობის დეფორმაციები დატვირთული ერთ ასაკში ერთი და იგივე ტვირთზე, შემდგომ კი დამატებით დატვირთული და განტვირთული ერთი და იგივე დატვირთვის მოდულით უნდა იყოს თანატოლი;

დამატებით დატვირთული (ან განტვირთული) ნიმუშების ცოცვადობის დეფორმაციის ნაზრდი ტოლი უნდა იყოს საფეხურებრივად დატვირთული (ან განტვირთული) ნიმუშების ცოცვადობის დეფორმაციის ნაზრდისა.

უნდა აღინიშნოს [4] მიმოხილვის მონაცემებით;

- პირველი მდგომარეობა ზზპ ექსპერიმენტალურად კარგად დასტურდება 0,5 R_{bm} ძაბვის დონემდე;
- მეორე მდგომარეობა ნაკლები ხარისხით თანაბარია ექსპერიმენტალურ მონაცემებიდან (დამატებით დატვირთვისას დეფორმაცია მეტია, ვინემ განტვირთვისას).
- მესამე მდგომარეობა ირღვევა ექსპერიმენტებში ცოცვადობის დეფორმაციის არაწრფივობის გამო; პირველად დატვირთულ ნიმუშებს აქვთ დაბალი დეფორმაციები;

ცოცვადობის თეორიის შემდგომი სრულყოფა მოხდა ორი უკანასკნელი წინაპირობის დაზუსტების კვალდაკვალ.

შეიძლება მიუთითოთ ცოცვადობის სამ ძირითად თეორიაზე, რომლებმაც ჰპოვეს გამოყენება გაანგარიშებებში:

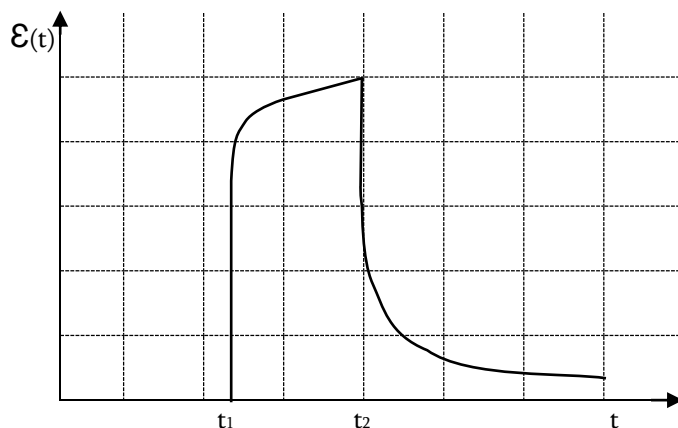
- დრეკად მემკვიდრეობის თეორია.
- დამველების თეორია.
- დრეკად-ცოცვადობის თეორია, უფრო ზუსტად დამველების მემკვიდრეობის თეორია.

დრეკად მემკვიდრეობის თეორიით, ცოცვადობის ხვედრითი დეფორმაცია მოცემულია ფორმით [4].

$$C(t,\tau)=C(t-\tau), \quad (2.3)$$

ცოცვადობის ხვედრითი დეფორმაციის ფუნქციის (2.3) ფორმით ჩაწერიდან გამომდინარეობს, რომ ცოცვადობის ახალი სიდიდეები (ზომა) მიიღება სხვა

სიდიდეების პარალელური გადატანით, რითაც პოსტულირდება განტვირთვისას დეფორმაციის სრული შექცევადობა ნახ.2.1 და ბეტონის დრეკადობის მოდულის მუდმივობა.

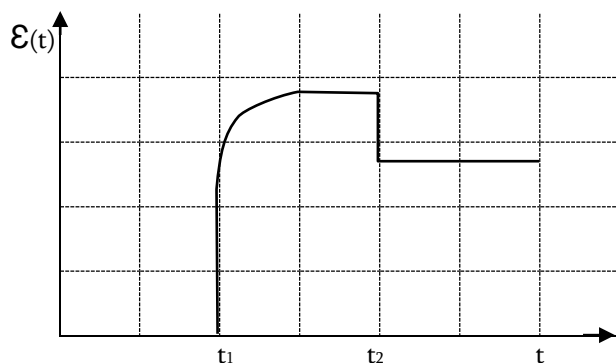


ნახ.2.1. დრეკად-მემკვიდრეობის თეორიაში დრეკადობის დეფორმაციის თანმიმდევრობა

დაძველების თეორიაში ცოცვადობის ხვედრით დეფორმაციას აქვს შემდეგი სახე [4].

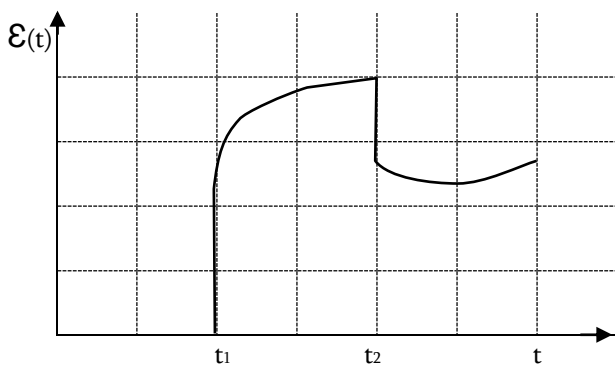
$$C(t, \tau, \tau_1) = C(t, \tau_1) - C(\tau, \tau_1), \quad (2.4)$$

ცოცვადობის სიდიდის (ზომა) ასეთი ფორმით ჩაწერა აღიარებს ცოცვადობის მრუდების პარალელურობას. ამას მივყავართ იქამდე, რომ განტვირთვისას ცოცვადობის მრუდების გაგრძელებით $t > t_2$ -ისათვის გამოისახება ზუსტად ისეთივე მრუდით და ცოცვადობის დეფორმაციები ხდება მთლიანად შეუქცევადი (ნახ.2.2).



ნახ.2.2. დაძველების თეორიაში მემკვიდრეობის დეფორმაციის სახეობა

სხეულის დრეკად-ცოცვადობის თეორიაში გ.ნ. მასლოვმა და ნ.გ. არუთინიანმა ცოცვადობის მრუდების მოხაზულობაში განსხვავების გამო და ბეტონის დაძველების გათვალისწინებით $[\mathcal{E}(t_2) > \mathcal{E}(t_1)]$, განტვირთვისას გვაქვს დეფორმაციის ნაწილობრივი შექცევადობა (ნახ.2.3).



ნახ.2.3. სხეულის დრეკად-ცოცვადობის თეორიაში მემკვიდრეობის დეფორმაციის სახე

ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციას მეტნაკლებად ზუსტად ასახავს გ.ნ. მასლოვის და ნ.გ. არუთინიანის სხეულის დრეკად-ცოცვადობის თეორია. ამ თეორიაში ცოცვადობის დეფორმაციები, როცა $\sigma = \text{const}$ გამოითვლება ფორმულით

$$\mathcal{E}_n = \sigma \cdot C(t, \tau) \quad (2.5)$$

სადაც $C(t, \tau)$ - დროის t მომენტში ნიმუშის დეფორმაციაა დრეკად-მყისიერი დეფორმაციის გამოკლებით $\tau(1/\mathcal{E}(\tau))$ დროში, დატვირთული ხანგრძლივი ერთეული ძაბვით ($\sigma=1$) τ ასაკში (ამასთან $t \geq \tau$), ანუ ცოცვადობის (ცალკეული) ხვედრითი დეფორმაცია (ცოცვადობის სიდიდე) ნ.ხ. არუთინიანის მიხედვით [3].

2.1.3. ცოცვადობის თეორიის წრფივი ვარიანტი

სრული დეფორმაცია (დრეკად-მყისიერი + ცოცვადობა) გამოითვლება ფორმულით:

$$\mathcal{E} = \sigma \cdot \sigma(t, \tau), \quad (2.6)$$

სადაც $\sigma(t, \tau)$ - დეფორმაციაა ერთეულოვანი დატვირთვისაგან და ტოლია:

$$\sigma(t, \tau) = \frac{1}{\varepsilon(\tau)} + C(t, \tau), \quad (2.7)$$

სრული დეფორმაციის გამოთვლა დროის t მომენტში - ცვალებადობა (როცა ცვალებადი დამაბული მდგომარეობა იცვლება დროში t_1 -დან t -მდე) ერთდერმა დამაბულ მდგომარეობაში, გამოითვლება ტოლობით, რომელიც შემოთავაზებულია ნ.ხ. არუთინიანის მიერ [3].

$$\varepsilon(t) = \varepsilon^0(t) + \frac{\sigma(t)}{E(t)} + \int_{t_1}^t \frac{\sigma(t)}{E(\tau)} L(t, \tau) d\tau, \quad (2.8)$$

სადაც, პირველი წევრი წარმოადგენს შესაძლო იძულებით დეფორმაციას, მეორე წევრი ახასიათებს დრეკად-ცოცვად დეფორმაციას, ხოლო მესამე წევრი ცოცვადობის დეფორმაციას. ამასთან ცოცვადობის პირველი სახის მემკვიდრეობითი ფუნქციის გავლენა იქნება:

$$L(t, \tau) = -\varepsilon(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \delta(t, \tau), \quad (2.9)$$

როგორც აღინიშნება კვლევებში და სხვა მეტნაკლებად ზუსტი ხაზოვანი ცოცვადობის საზომი $C(t, \tau)$ აპროქსიმირდება ფორმულით, რომელიც შემოთავაზებულია ს.ვ. ალექსანდროვსკის მიერ:

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) - F(t)(e^H - A_2) - \Delta(\tau)e^{-\alpha(1-\tau)}, \quad (2.10)$$

აქ:

$$\varphi(\tau) = \psi(\tau) = \Delta(\tau), \quad (2.11)$$

$$F(t) = \frac{\psi(t)}{e^H - A_2}, \quad (2.12)$$

რისთვისაც $\alpha \gg \gamma > 0; 0 \leq A_2 \leq 1$.

არსებობს ბეტონის წრფივი ცოცვადობის თეორიის კიდევ სხვა ვარიანტები, ცოცვადობის ბირთვის კონსტრუირების და ძირითადი ინტეგრალური განტოლებების ჩაწერით განსხვავებული მიდგომით. ის ნაკლებად ზუსტია ან მათი ძირითადი განტოლებები ძნელად ამოსახსნელია.

2.1.4. ცოცვადობის თეორიის არაწრფივი ვარიანტი

ცოცვადობის წრფივი თეორიის საფუძველზე ამოხსნილია რკინაბეტონის თეორიის უმეტესი ამოცანები, მაგრამ დაძაბულობის მაღალ დონეზე წრფივ თეორიას მივყავართ ცდომილებამდე, რამაც აიძულა მეცნიერები და მკვლევარები, განევითარებინათ დაძველების მემკვიდრეობის თეორიის არაწრფივი ვარიანტები. ცოცვადობის თეორიის არაწრფივი ვარიანტები განვითარებულა: ნ.ხ. არუთინიანის, ს.ვ. ალექსანდროვსკის, ვ.მ. ბონდარენკოს, პ.ი. ვასილიევის, ა.ა. გვოზდევის, ი.ე. პროკოპოვიჩის, ა.რ. რჟანიცინის და სხვათა შრომებში.

ვარიანტების უმეტესობა გამოყენებულია განსხვავებულ სხვადასხვა ჰიპოთეზებთან შეხამებით [1].

- ცოცვადობის დეფორმაციის დაყოფა წრფივ (როგორც წესი შექცევადი) და არაწრფივ (როგორც წესი შეუქცევადი) შემადგენლებად;
- დრეკად-მყისი დეფორმაციის წრფივობა (მიუხედავად იმისა მთელ რიგ შრომებში გათვალისწინებულია დრეკად-მყისიერი დეფორმაციის არაწრფივობა);
- ცოცვადობის დეფორმაცია მკაცრად ექვემდებარება ზედაპირული ზედდების პრინციპს;
- ცოცვადობის დეფორმაციის მრუდებს შეუძლიათ მსგავსების ფლობა.

არაწრფივი ცოცვადობის დეფორმაციის მემკვიდრეობით დაძველების თეორიის მეტნაკლებად საერთო სახეობა (დრეკად-ცოცვადი სხეული) ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$\epsilon_n = F[\sigma(\tau), t, \tau] \quad , \quad (2.13)$$

(2.12)-ის გათვალისწინებით ცოცვადობის არაწრფივი თეორიის ძირითადი განტოლება იქნება:

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} = \int_{\tau_1}^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} \right] d\tau + \int_{\tau_1}^t \sigma(\tau) F[\sigma(\tau), t, \tau] d\tau \quad , \quad (2.14)$$

გლიკლინმა შემოიტანა ცოცვადობის დეფორმაციის კლასიფიკაცია, დაჰყო ის შექცევა განტვირთვისას (დაკავშირებული ბეტონის დაძველებასთან) და შეუქცევად (არაა დაკავშირებული დაძველებასთან) დეფორმაციებად. შემდგომში მრავალი მეცნიერი სარგებლობდა ამ კლასიფიკაციით ცოცვადობის თავისი განტოლების გამოყვანისას.

ა.რ. რუხანიცინმა [53] განაზოგადა ზოგიერთი ამ განტოლებებიდან და გამოიყვანა საერთო ფორმულა, რომელშიც ინტეგრალქვეშა ჯამის ცალკეული წევრები ფლობს ათენიუმის თვისებას, მაგრამ ათენიუმის კანონებში ცალკეული მრუდების განსხვავების გამო მთლიანი ჯამი ერთიანობაში არა ათენოსადარია:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} + \int_{\tau_1}^t \frac{1}{E(t)} \left(\sum_{i=1}^n f_i[\sigma(\tau)] K_i(t, \tau) \right), \quad (2.15)$$

ს.ვ. ალექსანდროვსკიმ ექსპერიმენტულად შეამოწმა (2.15) განტოლება, რომელიც ჩაწერილი იყო შემდეგი სახით:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} - \int_{\tau_1}^t \frac{\sigma(\tau)}{E(\tau)} K(t, \tau) d\tau + \int_{\tau_1}^t \frac{\sigma(\tau)}{E(\tau)} f[\sigma(\tau)] K_H(t, \tau) d\tau, \quad (2.16)$$

სადაც $f[\sigma(\tau)]$ - დამაბულობის არაწრფივი ფუნქციაა შემდეგი სახით:

$$f[\sigma(\tau)] = \left[\frac{\sigma(\tau)}{\sigma_0} \right], \quad (2.17)$$

ამასთან მოხერხებულობისათვის მიღებული იქნა $\sigma_0=1$, გამოიყენებოდა ბირთვის შემდეგი კონსტრუქციები:

- ორივე ბირთვის დრეკად-ცოცვადობის სხეულის თეორიის ფორმაში;
- ორივე ბირთვი - დამველების თეორიის ფორმაში;
- ერთი ბირთვი - დრეკად-მცოცავი სხეულის თეორიის ფორმაში - მეორე დამველების თეორიის ფორმაში;
- ერთი ბირთვი - დრეკად-მცოცავი სხეულის თეორიის ფორმაში - მეორე ბირთვის პირველი ნახევარი - დამველების თეორიის ფორმაში, მეორე ნახევარი კი დრეკად-მცოცავი სხეულის თეორიის ფორმაში.

ექსპერიმენტული შემოწმების შედეგებმა გვიჩვენა [4], რომ უმცირესი გადახრები (მაქსიმალურმა გადახრამ შეადგინა დაახლოებით 10%) შეიმჩნეოდა მეოთხე ვარიანტში.

იმისათვის, რომ კიდევ უფრო მეტად შევამციროთ ცდომილებები ს.ვ. ალექსანდროვსკიმ და ნ.ა. კოლესნიკოვმა უარი თქვეს ზზპ-ს პარამეტრების მკაცრ დაცვაზე და მათ მიერ მიღებულ განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} - \int_{\tau_1}^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} + C(t, \tau) \right] d\tau + \varepsilon_H(\tau), \quad (2.18)$$

სადაც $\varepsilon_H(\tau)$ - სრული დეფორმაციის $\varepsilon(\tau)$ არაშექცევადი ნაწილია, რომელიც

თავის მხრივ წარმოადგენს არაწრფივი ცოცვადობის დეფორმაციას. ფუნქცია $\epsilon_H(\tau)$ შეირჩევა და გამოითვლება განსაკუთრებული წესებით. [4] აღნიშნება (2.18) ფორმულის კარგი შესაბამისობა ექსპერიმენტალურ მონაცემებთან, მაგრამ იმავე დროს აღნიშნება მისი ძირითადი ნაკლოვანებაც - $\epsilon_H(\tau)$ ფუნქციის ჩაწერის ერთიანი ინტეგრალური ფორმის არ არსებობა.

ფ.ი. ვასილიევმა (2.13) დამოკიდებულება ჩაწერა შემდეგი სახით:

$$\epsilon_n = f[\sigma(\tau)k(t, \tau)] , \quad (2.19)$$

და მიიღო შემდეგი განტოლება [15].

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} - \int_{\tau_1}^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} \right] d\tau + \int_{\tau_1}^t \sigma(\tau) F([\sigma(\tau)]k(t, \tau)) d\tau , \quad (2.20)$$

რომელიც შეიცავს ცოცვადობის ათენოსის მრუდებს პტრობებს. ამასთან τ -ანათვლის დაწყების მომენტისათვის შერჩეული დროა, რომელიც მიღებულის ნულის ტოლად, ხოლო $K(t, \tau)$ ფუნქცია ტოლია:

$$K(t, \tau) = - \frac{\partial}{\partial \tau} C(t, \tau) , \quad (2.21)$$

ცოცვადობის არაწრფივი შემადგენლის განსაზღვრა დაფუძნებულია არაწრფივი $F[\sigma(\tau)]$ ფუნქციის გამოყენებაზე.

პ.ი. ვასილიევმა შემოგვთავაზა $F[\sigma(\tau)]$ ფუნქცია ტოლი იყოს [15].

$$F[\sigma(\tau)] = K(\tau) + A(\tau)[\sigma(\tau)]^m , \quad (2.22)$$

ხოლო ვ.მ. ბონდარენკოს [12] წინადადებით ეს ფუნქცია ტოლი იყოს:

$$F[\sigma(\tau)] = a + b \left[\frac{\sigma(\tau)}{R(\tau)} \right]^m , \quad (2.23)$$

ამრიგად ვ.მ. ბონდარენკო აღნიშნავს [20], რომ ცოცვადობის დეფორმაციის ათვლის აღრიცხვის არა წრფივობის მიუხედავად, აღნიშნულ თეორიებს მაინც გააჩნია ნაკლოვანებები, რომელიც დაკავშირებულია დრეკად-მყისიერი დეფორმაციის არაწრფივობის გაუთვალისწინებლობასთან. მან შემოგვთავაზა საერთო ფორმულა [12]:

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} F_m[\sigma(\tau)] - \int_{\tau_1}^t \sigma(\tau) F_n[\sigma(\tau)] \frac{\partial}{\partial \tau} C^*(t, \tau) d\tau , \quad (2.24)$$

სადაც $F_m[\sigma(\tau)]$ და $F_n[\sigma(\tau)]$ დამაბულობის არაწრფივი ფუნქციებია, შესაბამისად დრეკად-მყისიერი დეფორმაციის და ცოცვადობის დეფორმაციის. ამასთან $C^*(t, \tau)$ - ეს

ცოცვადობის დეფორმაციის ზომას იმ ფორმით, რომელიც შემოთავაზებული იყო ს.ვ. ალექსანდროვსკის მიერ, რომელიც ითვალისწინებს ბეტონის დრეკადობის მოდულის ცვლილებას დროში [1].

$$C^*(t, \tau) = C(t, \tau) + \frac{1}{\varepsilon(\tau)} - \frac{1}{\varepsilon(t)}. \quad (2.25)$$

(2.24) ფორმულაში ვ.მ. ბონდარენკო ითვალისწინებს დრეკად-მყისიერი დეფორმაციის არა წრფივობას, რის გამოც ის აკეთებს დასკვნას, რომ ის მნიშვნელოვნად უკეთაა უზრუნველყოფილი ზღვრული გადასვლისაგან ხანგრძლივი დატვირთვიდან მოკლე დროებითზე, ძალის გადანაწილების პროგნოზირებისას სტატიკურად ურკვევ კონსტრუქციებში. მოკლე დროებითი დატვირთვით რკინაბეტონის კოლონების გარეცენტრული კუმშვის მდგრადობაზე გაანგარიშებისას ასევე მთლიანად უკუაგებს ვიბროცოცვადობას.

2.2. ცოცვადობის დეფორმაციის პროგნოზირება

არსებობს ცოცვადობის დეფორმაციის პროგნოზირების სხვადასხვა მიდგომა:

პირველი მიდგომა - რომლის ერთ-ერთ წარმომადგენლად ითვლება ი.ე. პროკოპოვიჩი და მ.ნ. ზასტავა - მოცემულია ემპირიული ფორმულები, რომლებიც არ არის დაფუძნებული ბეტონის მიკროსტრუქტურაზე.

მეორე მიდგომა (იწინასწარმეტყველება დანამატების გარეშე ტრადიციული ბეტონის ცოცვადობა) ეფუძნება ცემენტის სტრუქტურას, შემსვების შემცველობას და სხვა. ამ ამოცანის ამოხსნას ცდილობდნენ რ.გ. ლიტვინოვი, ა.ე. შეიკინი და სხვა.

2.2.1. ი.ე. პროკოპოვიჩის, მ.მ. ზასტავას გამოკვლევები [28]

ი.ე. პროკოპოვიჩი და მ.მ. ზასტავა გვთავაზობენ ცოცვადობის პროგნოზირებისათვის გამოვიყენოთ ფორმულები, რომლებიც ადრე იყო შემოთავაზებული მკვლევარების მიერ, მაგრამ უკვე სათანადო სტატისტიკური

დასაბუთებით [50].

$$C(\infty) = c^{CP}(\infty) \prod_{i,j=1}^{m,n} K_{i,j} , \quad (2.26)$$

გამოყოფილია 11 ფაქტორი, რომელიც დაყოფილია სამ ჯგუფად, რომელიც მოქმედებს ცოცვადობაზე (ცხრილი 2.1).

ცხრილი 2.1

ცოცვადობაზე მოქმედი ფაქტორების სამი ჯგუფი

ჯგუფი	ფაქტორები	ცოცვადობა
I	ცემენტის სახეობა	K11
	ცემენტის მარკა	K12
	მსხვილი შემცვების ჯიში	K13
	წყალცემენტის ფარდობა	K14
II	გამკვრივების სახე	K21
	თბური დამუშავების სახეობა	K22
	ბეტონის ხნოვანება დატვირთვის მომენტში τ	K23
III	ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა	K31
	კონსტრუქციის განიკვეთის ზომა	K32
	ფარდობითი დამაბულობის სიდიდე S/ R_{bm}	K33

ექსპერიმენტის შედეგების დამუშავება ხდებოდა მათემატიკური სტატისტიკის მეთოდით. საიმედოობის ხარისხი შეადგენდა 0,95-ს.

სრული დეფორმაციის საანგარიშო მახასიათებლების სიდიდეებში შესაძლო გადახრები შემოთავაზებულია გამოითვალოს ფორმულით.

$$\Delta C(\infty) = \pm I C(\infty) , \quad (2.27)$$

$$I = 0,165 \cdot 1,96 = 0,32$$

სადაც 1,96 - სტანდარტის სიდიდეა, რომელიც შეესაბამება 0,95 საიმედოობის ხარისხს, ხოლო 0,165 - საშუალო კვადრატული გადახრის სიდიდეა გათვლილი შესაძლო გადახრების ფაქტორების გათვალისწინების გარეშე. ე.ი. პროკოპიევიჩის და მ.მ. ზასტავის მიერ გამოყენებული (2.26) ფორმულის შემოწმებამ გვიჩვენა, რომ ცოცვადობის დეფორმაციის გამოთვლილი საშუალო სიდიდეები ტოლი აღმოჩნდა 14,3-15,1%.

C(∞) ზღვრული მნიშვნელობები ბეტონის მარკის გათვალისწინებით

ბეტონის მარკა	$C^p(\infty) \cdot 10^4$
100	8,84±3,34
200	8,28±3,16
300	8,04±1,24
400	7,4±1,24
500	6,44±105
600-900	6,03±0,98
1000	6,03±0,98

მოგვიანებით ი.ე. პროკოპიევიჩმა და მ.მ. ზასტავამ, რომლებიც ეფუძნებოდნენ მთელ რიგ ექსპერიმენტებს, შემოგვთავაზეს ბეტონის ცოცვადობის ხაზოვანი სიდიდის აღსაწერი ფორმულა [10, 44, 52] დროის t მომენტში, რომელიც დატვირთულია დროის t_0 მომენტში.

$$C(t, t_0) = C(\infty; 28) \cdot \Omega(t_0) \cdot f(t, t_0), \quad (2.28)$$

სადაც ცოცვადობის სიდიდის ზღვრული მნიშვნელობა

$$C(\infty; 28) = C^N(\infty; 28) \xi_1 \xi_2, \quad (2.29)$$

აქ $C^N(\infty; 28)$ - ბეტონის ცოცვადობის ზომის ზღვრული ნორმატიული მნიშვნელობაა, დატვირთული $t=28$ დღე-ღამის ასაკში, გამაგრებული ბუნებრივ პირობებში გარემოს ტენიანობით $w=60\%$, ღებულობენ მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტის შედეგების მიხედვით ბეტონის სახეობის და კლასის შესაბამისად. ξ_1 და ξ_2 კოეფიციენტები დამოკიდებულია ნიმუშების განივი კვეთის ზომებზე და გარემოს ტენიანობაზე, სადაც ტარდებოდა გამოცდა [29].

$\Omega(t_0)$ სიდიდეს პოულობენ ფორმულით:

$$\Omega(t_0) = 0,5 + d \cdot \ell^{-2,5} \cdot j_0 \quad (2.30)$$

ფუნქცია, რომელიც ითვალისწინებს ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარებას დროში $f(t, t_0)$ და შესაძლებელია აღებული იქნეს სხვადასხვა მეცნიერების ექსპერიმენტალური მონაცემებიდან.

2.2.2. ა.ე. შეიკინის გამოკვლევები

ა.ე. შეიკინმა შემოიტანა ცემენტის ქვის მოდელი, რომელიც შედგება გელისებური (გელისებური კრისტალოჰიდრატები) და კრისტალური ნაწილებისაგან. გამომდინარე ამ მოდელიდან ცოცვადობის ზომის ზღვრული მნიშვნელობა შემოგვთავაზა განსაზღვრულიყო შემდეგი განტოლებით:

$$C_{K\delta} = \frac{B \cdot \varepsilon_2 \cdot \rho_c (1 + \rho_y \cdot B / \Pi)^2 \cdot \Pi}{K \cdot \alpha \cdot \rho_y^2 (A \cdot E_c + B \cdot \varepsilon_2) \cdot A \varepsilon_c} \cdot 10^{-3} \quad (2.31)$$

სადაც E_c - ცემენტის ქვის კრისტალური წამონაზარდის დრეკადობის მოდულია, რომელიც დამოკიდებულია ნაწილაკებს შორის (რომლისგანაც ის არის აგებული) მოქმედი ქიმიური კავშირის ენერგიაზე; K - პარამეტრი ახასიათებს ბეტონის ნარევის გამკვრივების ხარისხს მისი ჩაწყობის დროს:

$$K = \frac{\Pi / \rho_{\Pi} + \Pi \cdot \rho_{o,\Pi} + \Pi / \rho_{o,\Pi} + B}{1000} \quad (2.32)$$

აქ Π , ρ_{Π} , $\rho_{o,\Pi}$ და B მასის მიხედვით ცემენტის, ქვიშის, ღორღის და წყლის ხარჯია 1მ^3 ბეტონში; ρ_0 - ცემენტის სიმკვრივეა, ρ_{ow} - მსხვილი შემცვლების (ღორღის ან ხრეშის) მოცულობითი მასაა, B და A - პარამეტრები დამოკიდებულია მხოლოდ ცემენტის მინერალოგიურ შედგენილობაზე (ერთი და იგივე ცემენტებზე დამზადებული ბეტონებისათვის სიდიდეები მუდმივია):

$$A = 0,32C_3S + 1,4C_3A + 1,3C_4AF + 1,66\Gamma \quad (2.33)$$

$$B = 1,3C_3S + 1,7C_2S \quad (2.34)$$

სადაც C , S , C_3A , C_4AF და C_2S კლინკერში მინერალების პროცენტული შედგენილობა; Γ - ცემენტში ბუნებრივი (ორწყლიანი) თაბაშირის შემცველობა %-ში; ρ_c - კრისტალოჰიდრატების საშუალო სიმკვრივეა, რომელიც შედის ცემენტის ქვის კრისტალური წამონაზარდის შედგენილობაში; B/Π - წყალცემენტის ფარდობა; α დ ცემენტის ჰიდრატაციის ხარისხია:

$$\alpha = \alpha_{\text{KOH}} \left(1 - e^{-\frac{1}{\pi}} \right) \quad (2.35)$$

კალციუმის ჰიდროსილიკატების ველის დრეკადობის მყისიერი მოდელია, რომელიც დამოკიდებულია ცემენტის ქვის საწყის ტენზიმცველობაზე (გარკვეულ პირობებში ის მუდმივი სიდიდეა). ამასთან მიღებულია, რომ ცემენტის ქვის

კრისტალური წამონაზარდის კრისტალოჰიდრატების საშუალო სიმკვრივე ტოლია კალციუმის ჰიდროსილიკატების გელის მკვრივი ფაზის სიმკვრივისა. ვარაუდობენ, აგრეთვე, რომ შემავსებლები ამცირებენ ცოცვადობის სიდიდეს, რომელიც ბეტონის მოცულობაში პროპორციულად იკავებს თავის მოცულობას. ამასთან თვით შემვსების ცოცვადობა, უგულვებელყოფენ მისი სიმცირის გამო, ცემენტის ქვის ცოცვადობასთან შედარებით.

2.2.3. რ.გ. ლიტვინოვის კვლევები

რ.გ. ლიტვინოვმა შემოგვთავაზა მსუბუქი ბეტონის ცოცვადობის ზომის განსაზღვრის ფორმულა, ხაზოვანი ცოცვადობის ფარგლებში დამოკიდებულ მის სტრუქტურულ პარამეტრებზე:

$$C(t, \pi) = \frac{L \cdot \Pi \left(\frac{1}{y_{II}} + \frac{B}{\Pi} \right)}{A \sqrt{t + m}} \cdot 10^{-7}, \text{ სმ/კგმ}, \quad (2.36)$$

სადაც y_{II} - ცემენტის ხვედრითი წონაა, კგ/ლ;

Π - ცემენტის ხარჯი, კგ/მ³;

M - პროპორციულობის კოეფიციენტი, რომელიც ახასიათებს დროში ცემენტის ქვის სტრუქტურული სიბლანტის ზრდადობას, კგმ/სმ².

$$L = \frac{(1 - 1,35V_3)(1 - 1,35V_n)}{(1 - V_3)(1 - V_n)}, \quad (2.37)$$

ამასთან A და m კოეფიციენტები ტოლია:

$$A = aR_0 \left(\frac{1}{D_{OK}} - B \right), \quad (2.38)$$

სადაც Π_{IIK} - ცემენტის ქვის ფარდობითი ფორიანობაა, რომელიც ტოლია

$$\Pi_{IIK} = \frac{\frac{B}{\Pi} - 0,21a}{\frac{B}{\Pi} + 0,32}, \quad (2.39)$$

სადაც a - ცემენტის ჰიდრატაციის ხარისხია და ტოლია $a=0,5$;

P_{II} - ცემენტის აქტიურობაა, კგმ/სმ²;

a და b - აპროქსიმაციის კოეფიციენტი, რომელიც განპირობებულია ცემენტის ცომის სტრუქტურით.

$$\text{როცა } 0,3 < \frac{B}{\Pi} < 0,45, \quad a = 3,5 \left(\frac{B}{\Pi} - 0,3 \right)^2 + 0,04; \quad b=1,8; \quad m=2.$$

$$\text{როცა } 0,45 < \frac{B}{\Pi} < 0,65, \quad a = (0,32 - 0,45) \frac{B}{\Pi}; \quad b=1,6; \quad m=1.$$

A და m-ის ამ მნიშვნელობებით განისაზღვრება C(t,τ)-ის მნიშვნელობა შემდეგი პარამეტრებით: ბეტონის ხნოვანება დატვირთული 28 დღე-ღამის ასაკში, არაორთქლიზირებული ნიმუშების მკვეთი 10×10 სმ, ფარდობითი ტენიანობა 70%.

2.3. ექსპერიმენტის ჩატარების მეთოდიკა

ცოცვადობის დეფორმაციის ექსპერიმენტალური გამოკვლევისას აუცილებელი იყო ექსპერიმენტის სისუფთავე, სამუშაოს შესრულების მეთოდიკით მას ექცეოდა განსაკუთრებული ყურადღება. ამ დროს გამოიყოფოდა შემდეგი ამოცანები:

- შეძლებისდაგვარად, მეტნაკლებად სწრაფად უნდა გამოგვერიცხა იმ გარე ფაქტორების ზემოქმედება, რომელიც იწვევდა გამოსაცდელი ნიმუშების ტემპერატურის ცვლილებას და ტენიანობის ცვლილებას [30, 31, 32];
- დრეკადი დეფორმაციების გულმოდგინე გამოყოფა ცოცვადობის დეფორმაციისაგან ნიმუშების დატვირთვის ქვეშ დაყენების მომენტში. ამისათვის საჭიროა შედარებით სწრაფად განვახორციელოთ დატვირთვის საფეხურები და ავიღოთ ანათვალა ხელსაწყოებზე;
- პრიზმის საპირისპირო წახნაგებზე დეფორმაციის გაზომვის სიდიდებს შორის, რაც შეიძლება მცირე ცდომილებების მიღწევა;
- ნიმუშებში ძაბვის მუდმივობის შენარჩუნება ექსპერიმენტის მიმდინარეობის დროს, ექსპერიმენტის ნებისმიერი გამოუვალი შემთხვევის გაგრძელებისას;
- ბეტონის ნიმუშების სიმტკიცის და დეფორმაციის მაჩვენებლების შესაძლო მეტი ერთგვაროვნების უზრუნველყოფა ცდის ცალკეული სერიის საზღვრებში;
- რამოდენიმე ტყუპი ნიმუშებისათვის და ერთნაირი ტიპის რამოდენიმე სერიის ცდისათვის გამოვლენილი კანონზომიერებებისათვის უტყუარობის

დადასტურება, მიღებული შედეგების დუბლირებისას;

- ექსპერიმენტის უსაფრთხოების ტექნიკის მოთხოვნების გათვალისწინება. ბეტონის ცოცვადობისა და ჯდომის შეფასებისათვის ექსპერიმენტში გამოყენებული პრიზმები ზომით 10×10×40 სმ; გარდა ამისა მზადდებოდა პრიზმები და კუბები ზომით 10×10×10 სმ, 15×15×15 სმ და 15×15×60 სმ. მსხვილი შემვსებების მარცვლის უდიდესი (გრანიტის ღორღი) ზომ არ აღემატებოდა 20 მმ-ს; წვრილი შემვსების (კვარცოვანი ქვიშა) კი 5 მმ.

ნიმუშების დამზადება და შენახვა განხორციელებული იქნა სახსტანდარტ 10180-90-ის მოთხოვნების შესაბამისად. ბეტონირება განხორციელდა ჰორიზონტალურ მდგომარეობაში. ნიმუშების ცალკეული სერიები მზადდებოდა ერთი არევის ბეტონის ნარევისაგან - იძულებითი არევის ბეტონშემრევში მოცულობით 325 ლ (ამასთან ბეტონის მაქსიმალური მოცულობა ერთი სერიის ნიმუშებისათვის შეადგენდა 270 ლ).

ნარევი იყოფოდა ორ ჯგუფად (ბეტონშემრევის შეზღუდული მოცულობის გამო):

- თავდაპირველად ბეტონირდებოდა კუმშვაზე გამოსაცდელი ყველა ხუთი სერიის ნიმუშები;
- მეორე რიგში ბეტონირდებოდა გაჭიმვაზე გამოსაცდელი ოთხი განმეორებადი სერიის ნიმუშები.

ვიბრირებისათვის გამოყენებული იყო ლაბორატორიული ვიბრობაქანი. განყალიბებამდე ნიმუშების შენახვა ხდებოდა ყალიბებში, რომელიც დაფარული იყო ცელოფნის აპკით, სათავსოში სადაც ჰაერის ტემპერატურა იყო $17\pm 6^{\circ}\text{C}$.

პრიზმებზე, რომლებიც უნდა გამოცდილიყო მარტო ჯდომაზე, განყალიბებისთანავე, ე.ი. ფორმიდან ერთი დღე-ღამის შემდეგ არაუმეტეს სამი და არაუგვიანეს ორ საათში, სახსტანდარტ 24544-81-ის მოთხოვნის შესაბამისად გრძივი დეფორმაციების გასაზომად ჩამოეცმებოდა ჩარჩო, რომელშიც სტაციონალურად იყო დაყენებული საათური ტიპის ინდიკატორი, რის შემდეგაც ეს ნიმუში გადატანილი იქნა კლიმატურ კამერაში, ტემპერატურით $14,4\pm 3^{\circ}\text{C}$ და ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა $78\pm 10\%$.

დარჩენილი ნიმუშები, სამი დღე-ღამის ასაკში განყალიბების შემდეგ ინახებოდა

კამერაში, რომელიც უზრუნველყოფდა ნიმუშების ზედაპირზე ნორმალურ პირობებს, ე.ი. ტემპერატურას $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ და ჰაერის ფარდობით ტენიანობას $95\pm 5\%$.

ნორმალურ პირობებში 28 დღე-ღამის ასაკმადე ნიმუშების შენახვის შემდეგ ყველა კუბები და პრიზმების ნაწილი, რომელიც გათვალისწინებული იყო მოკლევადიანი მახასიათებლებისათვის გამოიცდებოდა სახსტანდარტის მოთხოვნების შესაბამისად. დანარჩენი ნიმუშები განაგრძობდნენ გამაგრებას ნორმალურ პირობებში, ნაწილი კი გადაგვექონდა ჩვეულებრივი ტენიანობის კამერაში (ამ უკანასკნელის ბეტონის თვისებების ცვლილების განმსაზღვრავად დამკველების პროცესში).

ნიმუშების მეორე ნაწილი (გათვალისწინებული ცოცვადობის დანადგარში დასაყენებლად) 15-20 დღე-ღამის შემდეგ გამოგვექონდა ნორმალური პირობების კამერიდან. ამის შემდეგ ნიმუშები მზადდებოდა გამოცდებისათვის [31, 32].

მომზადება იწყებოდა გარეგანი დათვალიერებით და ხაზოვანი ზომების დადგენით. ამის შემდეგ ნიმუშების ერთგვაროვნების განსაზღვრისათვის ხდებოდა ნიმუშების ზედაპირებს შორის ულტრაბგერების გატარება. ამასთან ნიმუშების ხანგრძლივი დატვირთვის ქვეშ დასაყენებლად და ტემპერატურულ-ჰდომის კომპენსაციისათვის ამორჩეული იქნა ნიმუშები, რომლებშიც ულტრაბგერები გადიან სხვადასხვა სიჩქარით. ამის შემდეგ ნიმუშები იწონებოდა და განისაზღვრებოდა მათი მოცულობითი მასა. გაზომვის ყველა შედეგები შეგვექონდა ჟურნალში. ამის შემდეგ ეწებებოდა სათავისები სისქით 30-60 მმ და განივი ქანქარები საათური ინდიკატორების დასამაგრებლად. მომზადების ეტაპებს შორის შუალედში, თითოეული ნიმუში ინახებოდა ტენიან ნახერხში.

25-30 დღე-ღამის ხნოვანების ნიმუშები, რომლებიც წინასწარ განკუთვნილი იყო ცოცვადობაზე დასაყენებლად, ჰიდროლიზირებული იქნა ერთი-ორი ფენა პარაფინის აკვით. ეს იყო აუცილებელი იმისათვის, რომ რაც შეიძლება მეტად და სრულად გამოგვერიცხა ჰდომის არაადიტიურობის გავლენა ცოცვაზე.

ამის შემდეგ ნიმუშებს ჩამოეცმებოდა ჩარჩო, ხელსაწყოები და პრიზმებს ერთი დღე-ღამის განმავლობაში ვაყენებდით დანადგარში, რა დროსაც ხდებოდა მისი სრული მორგება ხელსაწყოზე და მაჩვენებელი ფიქსირდებოდა შედარებით ზუსტად.

პრიზმების ხანგრძლივ მოქმედ დატვირთვაზე გამოცდა განხორციელდა 35

დღე-ღამის განმავლობაში. ყოველი სერიისათვის სპეციალურად გათვალისწინებული იყო ორ-ორი პრიზმა ტემპერატურული ჯდომის დეფორმაციის მოქმედების კომპენსაციისათვის.

ცხრილში 2.3 ნაჩვენებია ნიმუშებზე ხანგრძლივად მოქმედი ძაბვა და მისი სიდიდეები. ასევე ნიმუშების საშუალო სიმკვრივის მნიშვნელობები და მათში ულტრაბგერების გავლის სიჩქარეები, ფარდობითი ტენიანობის და გარემოს ტემპერატურის საშუალო მნიშვნელობებისათვის, რომელიც შესაბამისად ტოლია 83% და 22°C.

ცხრილი 2.3

ნიმუშებზე ხანგრძლივი მოქმედი დამაბულობა

სერიის №	საშუალო სიმკვრივე ტ/მ ³	ულტრაბგერების გავლის სიჩქარე მ/წმ (V3K)	კუმშვა			გაჭიმვა კუმშვისას			დერძული გაჭიმვა		
			R _{bm} , მპა	σ _b , მპა	σ _b /R _{bm}	R _{btfm} , მპა	σ _{btf} , მპა	σ _{btf} /R _{bm}	R _{btm} , მპა	σ _{bt} , მპა	σ _{bt} /R _{bm}
1კ	2,34	4676	79,3	19,1	0,24	-	-	-	-	-	-
2კ	2,34	4776	81,0	19,5	0,24	4,7	2,8	0,6	2,86	1,72	0,6
3კ	2,29	4772	71,3	17,9 44,8	0,25 0,63	4,4	-	-	2,78	-	-
4კ	2,34	4684	63,7	15,2	0,24	-	-	-	-	-	-
5კ	2,19	4588	68,2	21,1 42,1	0,31 0,62	4,0	-	-	2,43	-	-

ძალვის უფრო თანაბარზომიერად გადაცემისათვის პრიზმებზე მაგრდებოდა სათავსოები. დერძულა გაჭიმვისას დამატებითი გამაგრებისათვის გამოყენებული იყო ოთხი ანკერი დიამეტრით 8 მმ, რომელიც ჩაღრმავებული იყო პრიზმაში. კუმშვის ძალები სათავისებზე გადაიცემოდა ფოლადის ბურთულის საშუალებით, უბრალო გაჭიმვისას კი სპეციალური მოწყობილობებით, რომელიც უზრუნველყოფდა დატვირთვის უმომენტო გადაცემას.

ხანგრძლივ დატვირთვაზე გამოცდისათვის გამოყენებული იყო პნევმოჰიდრავლიკური გამოსაცდელი დანადგარები. გამოცდა ხდებოდა აწსუ-ს ბაზაზე. ამასთან მაქსიმალური ძაბვა, რომელსაც იძლევა ეს დანადგარი კუმშვისას, შეადგენდა 24 და 12 ტონას.

ცოცვადობის შესწავლისას გრძივი დეფორმაციების გაზომვისათვის გამოიყენებოდა სტაციონალურად დაყენებული საათური ტიპის ინდიკატორები დანაყოფის ფასით 0,01 მმ, ხოლო ჯდომისას გრძივი დეფორმაციების გაზომვა ხდებოდა 0,002 მმ დანაყოფის ფასით.

განივი დეფორმაციები იზომებოდა ინდიკატორებით დანაყოფის ფასით 0,001 მმ ბაზა ცოცვადობის შესწავლისათვის შეადგენდა 200 მმ-ს, ჯდომის შესწავლისათვის 267 მმ. 2/3-ზე სახსტანდარტი 24544-ზე. ღერძულ გაჭიმვაზე გამოცდისას განივი დეფორმაციები არ იზომებოდა. გაჭიმვა ღუნვაზე გამოცდისას იზომებოდა უკიდურესი გაჭიმული ბოჭკოს დეფორმაციები.

სათავსო, რომელშიდაც იმყოფებოდა ნიმუშები გამოირჩეოდა საკმაოდ სტაბილური ტემპერატურით, რომელშიც წლის განმავლობაში მდოვრედ იცვლებოდა ტემპერატურა ($t_{\text{შებ}}=11,4\pm 25^{\circ}\text{C}$). ამასთან ფარდობითი ტენიანობა იყო დაახლოებით $73\pm 10\%$, ხოლო კლიმატურ კამერაში $78\pm 10\%$. ამ პარამეტრების გასაზომად გამოიყენებოდა ასპირაციული ფსიხომეტრი MB-4M დანაყოფის ფასით $0,2^{\circ}\text{C}$.

მარტო ჯდომის დეფორმაციის გაზომვის დაწყება განხორციელდა განყალიბებიდან არაუგვიანეს 2-3 საათის შემდეგ. შემდგომ კი ერთი, სამი და შვიდი დღე-ღამის, შემდეგ კი ორ კვირაში ერთხელ.

ჯდომის დეფორმაციის გაზომვასთან ერთდროულად ვზომავდით ნიმუშების მასას აწონვის საშუალებით. ამასთან ანათვლის ალება გვიწევდა აწონვამდე და აწონის შემდეგ, ასე რომ საათის ტიპის ინდიკატორის ჩვენება დანაყოფის ფასით 0,002 მმ აწონის პროცესში ვარდებოდა (ძალიან ხშირად ერთი ერთეულით). დროის ხანგრძლივობა აწონვამდე მაჩვენებლის ალებიდან და აწონვის შემდეგ მაჩვენებლის ალებამდე შეადგენდა არაუმეტეს 30 წუთს.

ცოცვადობის დეფორმაციის განსაზღვრისას ანათვლების ალების ინტერვალი გადაწყვეტილი იყო შეგვეცვალა. სახსტანდარტის მეთოდიკა რამდენადმე იყო შეცვლილი. ანათვლების ალების თანმიმდევრობა იყო ასეთი: დატვირთვის მომენტში, 20, 40, 60 და 120 წთ ინტერვალში; შემდეგ დღე-ღამის განმავლობაში რამოდენიმე საათის შემდეგ (დეფორმაციის ზრდის სიჩქარის შესაბამისად); შემდგომ დატვირთვის შემდეგ 3 და 7 დღე-ღამის შემდგომ თვენახევარში - 1-ჯერ კვირაში, შემდგომ განტვირთვის მომენტამდე - 2-ჯერ კვირაში. ეს იყო გადაწყვეტილი იმისათვის, რომ დაგვეფიქსირებინა სწრაფადდამდგომი ცოცვადობა 1-2 დღე-ღამის განმავლობაში.

ორივე ეტაპზე დატვირთვა ხორციელდებოდა საფეხურებრივად 0,05 და 0,1 R_{bm} -ის მიხედვით. ამასთან თავიდან ნიმუშები იტვირთებოდა დონემდე არაუმეტეს 0,15

R_{bm} - მისი ფიზიკური ცენტრის განსაზღვრამდე. საფეხურებზე დატვირთვა ეწყობოდა 10-20 წთ-ის განმავლობაში საფეხურებზე დაყოვნების ხანგრძლივობა იყო მუდმივი და შეადგენდა 4 წთ. ამასთან დეფორმაციები, რომლებიც გამოვლინდებოდა დატვირთვის მიღების მომენტში მიეკუთვნებოდა დრეკადს, ხოლო საფეხურებზე დაყოვნების დროს წარმოქმნილი დეფორმაციები - ხანმოკლე ცოცვადობას.

მოკლევადიანი გამოცდები ტარდებოდა სახსტანდარტ [14,15] მოთხოვნების გათვალისწინებით ყოველი სერიის პრიზმები და კუბები გამოიცდებოდა ერთ პრესზე. ამისათვის გამოიყენებოდა ხისტი პრესი II-250, გამოშვებული არმავირის გამზომი მოწყობილობების ქარხნის მიერ.

II განყოფილების დასკვნები

1. ცოცვადობის შესახებ სხვადასხვა თეორიების მიმოხილვა აჩვენებს ერთსულოვნებას იმის შესახებ, რომ ბეტონზე მცირე ძაბვების $0,5 R_{bm}$ დონემდე მოქმედების დროს დეფორმაციები და შესაბამისად ცოცვადობა დაკავშირებულია გელის ბლანტ დინებასთან, რომელიც გამოწვეულია კაპილარული წნევით. ცოცვადობის ეს სახეობა დამოკიდებულია გელის ტენიანობის ცვლილებასთან, რაც ცვლის გელის გამოშრობის ხარისხს. შესაბამისად, თუ ცემენტის სახეობა, აგრეთვე შემავსებლის და მოდიფიკატორის სახეობა ხელს უწყობს გელის ტენიანობის შენარჩუნებას. ასეთი ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები უფრო ხანგრძლივად იქნება შენარჩუნებული და მით უფრო გვიან დაიწყება ბეტონის სტრუქტურული ცვლილება, კერძოდ მიკრობზარების წარმოქმნა.
2. ყველა მკვლევარი მიუთითებს იმაზე, რომ ბეტონის ცოცვადობაზე და დეფორმაციის სიდიდეზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ბეტონის დამზადების საწყისი მასალები: ცემენტის სახეობა, აქტიურობა და დაფქვის სიწმინდე; ქვიშის სახეობა და გრანულომეტრიული შედგენილობა; სიმტკიცე და მსხვილი შემავსების დრეკადი თვისებები; ბეტონის შედგენილობა.
3. ბეტონის ცოცვადობის და დეფორმაციის განმსაზღვრელია ტექნოლოგიური ფაქტორები: ბეტონის ნარევის კომპონენტების არევის ხანგრძლივობა; არევის

სახეობა (არევა ვიბრაციით, მისი ხანგრძლივობა და ინტენსივობა); კონსტრუქციის განივი კვეთის ზომები, გამოცდის დაწყებამდე დატვირთვის მოქმედების ხანგრძლივობა.

4. წრფივი ცოცვადობის სრული დეფორმაცია საფეხურებრივად ცვლადი დამაბულობის დროს ტოლია ცალკეული დეფორმაციების ნამატთა ჯამის; ამასთან ითვლება, რომ მოცემული ცოცვადობის დეფორმაცია არ არის დამოკიდებული წინამდებარე ძაბვაზე.

ნიმუშების შედარებითი ცოცვადობის დეფორმაციები, დატვირთული ერთ ასაკში ერთი და იგივე ტვირთზე, შემდგომ კი დამატებით დატვირთული და განტვირთული ერთი და იგივე დატვირთვის მოდულით უნდა იყოს თანატოლი.

არაწრფივი ცოცვადობის დეფორმაციის შემთხვევაში აღნიშნული კანონზომიერება დარღვეულია.

5. გამოკვლევების თანახმად, რომელიც ზემოთაა აღწერილი, ცოცვადობის ჯდომის ზღვრული დეფორმაციები შეადგენს:

- ტრადიციული ბეტონებისათვის

$$\epsilon_b=20 \cdot 10^{-5} \text{ -დან } \epsilon_b=54 \cdot 10^{-5} \text{ -მდე ;}$$

- მაღალი სიმტკიცის ბეტონებისათვის

$$\epsilon_b=13 \cdot 10^{-5} \text{ -დან } \epsilon_b=55 \cdot 10^{-5} \text{ -მდე .}$$

6. კვლევების მიმოხილვიდან ჩანს, რომ ცოცვადობის ზღვრული ზომა შეადგენს ტრადიციული ბეტონებისათვის

$$C(t,\tau)=1,8 \cdot 10^{-5} \text{ მპა}^{-1} \text{ -დან } C(t,\tau)=6,2 \cdot 10^{-5} \text{ მპა}^{-1} \text{ -მდე .}$$

7. ბეტონების ცოცვადობის დეფორმაციის შესახებ არსებული კვლევების ანალიზი აჩვენებს:

- ცოცვადობის დეფორმაციის გამოკვლევა ახალი შემადგენლობის ბეტონისათვის, მათზე მოქმედი ტექნოლოგიური ფაქტორების, ცალკეული ტექნოლოგიური ოპერაციის თავისებურებების გათვალისწინებით, მითუმეტეს ცოცვადობის თეორიით ცოცვადობის დეფორმაციის წრფივობის და არაწრფივობის გათვალისწინებით მეტისმეტად რთულია. მითუმეტეს, მრავალი შესაძლო შემადგენლობის ნიმუშების სერიისათვის;

- შერჩეული უნდა იქნას ახალი შემადგენლობის ბეტონის ნიმუშების სერიის

შეზღუდული რაოდენობა და იგი შედარებული იქნას ერთ ტრადიციული და ერთ მძიმე ბეტონის ნიმუშების სერიის ექსპერიმენტულ მონაცემებს, თანაც გათვალისწინებული იქნას ცოცვადობის დეფორმაციის ტრადიციული და მაღალი სიმტკიცის ბეტონებისათვის დამახასიათებელი ცოცვადობის ჯდომის დეფორმაციის ზღვრული მნიშვნელობები.

8. ცოცვადობის დეფორმაციის განსაზღვრისათვის საცდელი ნიმუშების სერიებიდან გამოყენებული იქნა ღერძული გაჭიმვის და კუმშვაზე გამოცდის სტანდარტული მექანიზმები.
9. შემუშავებულია საცდელი ნიმუშების სერიის გამოცდის, შენახვის, მოქმედების და ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების ცალკეული მახასიათებლების მონაცემების აღებისა და მისი შემდგომი დამუშავების მეთოდები.
10. ბეტონში ცოცვადობის თეორიის, აგრეთვე მსუბუქი მოდიფიცირებული ბეტონების ცოცვადობისადმი მიძღვნილი კვლევების ანალიზის საფუძველზე გამოვლენილია მსუბუქი ბეტონის ცოცვადობის ზომის განსაზღვრის მათემატიკური გამოსახულება

$$V(t, \tau) = \frac{L \cdot \Pi \left(\frac{1}{y_{II}} + \frac{B}{\Pi} \right)}{\frac{A}{\sqrt{t + m}}} \cdot 10^{-7}, \text{ სმ}^2/\text{კგმ} .$$

ცოცვადობის წინასწარმა კვლევებმა აჩვენა, რომ ეს ფორმულა შეიძლება გამოყენებული იქნას ჩვენს მიერ შემოთავაზებული ბმქ-კ მოდიფიკატორის შემცველი ბეტონების ცოცვადობის დეფორმაციის სიდიდის განსაზღვრისათვის. იგი უზრუნველყოფს საკმარის სიზუსტეს ცოცვადობის დეფორმაციის წრფივი უბნის შესაბამისი სისიდიდის განსაზღვრისათვის, რაც აჩვენა მოდიფიცირებული ბეტონების ცოცვადობის დეფორმაციის ჩვენს მიერ შემუშავებული კრიტერიუმებთან შედარებამ.

III განყოფილება

3. მაღალი სიმტკიცის ორგანულ-მინერალური მოდიფიკატორზე ბეტონების შემადგენლობები და მათი ცოცვადობის დეფორმაციაზე კვლევა

3.1. საკვლევი ბეტონების შემადგენლობები და თვისებები

3.1.1. მოდიფიკატორებით მოდიფიცირებულ ბეტონებში ცემენტის ქვის მიკროსტრუქტურა

როგორც უკვე ითქვა, ჩვენს ქვეყანაში და საზღვარგარეთაც ბეტონის სიმტკიცის გაზრდის პრობლემებს მიეძღვნა მრავალი შრომა [33]. მაგრამ დღესდღეობით ახალი მოდიფიკატორების გამოჩენამ შესაძლებელი გახადა შეგვეცვალა ცემენტის პარამეტრები და ზემოქმედება მოგვეხდინა ბეტონის თვისებებზე. აქედან გამომდინარე ცემენტის ქვის პარამეტრების ვარირებით შესაძლებლობა გვეძლევა ვმართოთ ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები. ცემენტში ქვის პარამეტრების ცვლილება შესაძლებელია მის შემადგენლობაში ორგანულ მინერალური მოდიფიკატორების შეყვანით.

ორგანულ მინერალურ მოდიფიკატორიანი ბეტონების მიკროსტრუქტურა, რომელშიც ორგანული ნაწილი წარმოდგენილია სუპერპლასტიფიკატორით და გამკვრივების რეგულატორით, ხოლო მინერალური ნაწილი მიკროკაჟმიწით და წანატაცი ნაცრით, შესწავლილი იქნა ს.ს. კაპრიელოვის, ა.ვ. შეინფელდის, ქ.მ. ივანოვის, ვ.გ. ბატრაკოვის და სხვა მეცნიერების მიერ [1, 22, 34, 35, 36]. ამ შრომების საფუძველზე შეგვიძლია გავაკეთოთ დასკვნა, რომ ბეტონების სტრუქტურის ასეთნაირი მოდიფიცირება იწვევს ცემენტის ქვის სტრუქტურის მნიშვნელოვან ცვლილებას: ვცვლით ხარისხოვან შედგენილობებს და სტრუქტურის გემოეტრიას [21].

ხარისხობრივი ცვლილება გამოიხატება პორტლანდიტის Ca(OH)_2 ფარდობითი კონცენტრაციის მნიშვნელოვანი დაწევით და ამავე დროს დაბალფუმიანი კალციუმის ჰიდროსილიკატების CaSH (I) შემცველობის მნიშვნელოვანი გაზრდით,

რომლის დისპერსიულობის ხარისხი და სიმტკიცე მნიშვნელოვნად მაღალია, ვიდრე ტრადიციულ ბეტონებში ჩვეულებრივ წარმოქმნილი მაღალფუძიანი კალციუმის ჰიდროსილიკატები CaSH (II). ამასთან მცირეკაჟმიწიან და სუპერპლასტიფიკატორიან ბეტონებში დაბალფუძიანი სილიკატების შემცველობა მცირდება. აქედან გამომდინარე მკვლევარები აკეთებენ დასკვნას, რომ გელი (მრავალი მეცნიერის აზრით), რომელიც ძირითადად შედგება კალციუმის ჰიდროსილიკატისაგან, იცვლის თავის თვისებას; ის ხდება უფრო მტკიცე და უფრო დისპერსიული ამ უკანასკნელის საკონტაქტო წერტილების რაოდენობის ზრდის ხარჯზე. ეს კი იწვევს მისი დეფორმაციულობის შემცირებას. გარდა ამისა, იცვლება შეჭიდულობა მატრიცასა და შემავსებელს შორის. ტრადიციული ბეტონებისათვის გარდამავალი ფენა შედგება პორტლანდიტის ფხვიერი კრისტალების - ეტრინგიტისაგან, რომელიც ხასიათდება გაზრდილი საერთო ფორიანობით სხვა დანარჩენ ცემენტის ქვებთან შედარებით. მიკროკაჟმიწის და სუპერპლასტიფიკატორის შემცველ ბეტონების საკონტაქტო ფენაში იზრდება მკვრივი და მტკიცე კრისტალოჰიდრატების CaSH (I) შემცველობა და მკვეთრად მცირდება შედარებით სუსტი პორტლანდიტის შემცველობა. ამიტომ ის ითვლება მეტად მტკიცე და ნაკლებად დეფორმირებად ფენად, შედარებით ტრადიციულ ბეტონებთან.

ცემენტის ქვის სტრუქტურის გეომეტრიაზე მიკროკაჟმიწის მკ. და სპ. მოქმედება იწვევს გელისებური მასის გაზრდას და კაპილარული ფორიანობის შემცირებას საერთო ფორიანობის გაზრდის გარეშე. ეს უკანასკნელი კი იწვევს ცემენტის ქვის სიმტკიცის გაზრდას.

3.1.2. ბეტონის შედგენილობები

მონაცემები ბეტონის ნარევის შედგენილობაზე და თვისებებზე მოცემულია შესაბამისად ცხრილებში 3.1 და 3.2. ნარევის დასამზადებლად გამოყენებული იყო: M500 მარკის ცემენტი; ქვიშა კვარცოვანი - კარიერის სიმსხვილის მოდულით 2,6; ღორღი გრანიტის ფრაქციით 5-20 მმ; შემავსებლები არ ექვემდებარებოდნენ სპეციალურ დამუშავებას (გარეცხვას, გაცრას, ფრაქციებად დაშლას და ა.შ.); წყალი

წყალსადენის.

ცხრილი 3.1

ბეტონის ნარევის შემადგენლობა, კგ/მ³

სერიის №	შემადგენლობის მახასიათებელი	ცემენტი	ბმქ-კ	ქვიშა	ღორღი	წყალი
1კ	ც+0% (ბმქ-კ)	762	-	1356	-	179
2კ	ც+10% (ბმქ-კ)	706	75	1296	-	183
3კ	ც+20% (ბმქ-კ)	691	133	1310	-	178
4კ	ც+30% (ბმქ-კ)	487	255	1220	-	168
5კ	ც+20% (ბმქ-კ)	545	115	575	995	155

ცხრილი 3.2.

მოდულიზატორის შემცველი ბეტონების ნიმუშების სერიის ნარევის

შემცველობა და თვისებები

ნიმუშის სერია №	მოდულიზატორის შემადგენლობის მახასიათებელი	მოცულობითი წონა კგ/მ ³	კვ/სმ განთხევადება	წ/ც	წ/ც+ბმქ-კ	ქ/ც+ბმქ-კ	V წმ/მ	V _{ნარ}
1კ	ც+0% (ბმქ-კ)	2320	5	0,235	0,235	1,78	7,0	0,936
2კ	ც+10% (ბმქ-კ)	2260	21	0,260	0,235	1,67	7,5	0,934
3კ	ც+20% (ბმქ-კ)	2254	22	0,282	0,233	1,71	9,0	0,937
4კ	ც+30% (ბმქ-კ)	2130	23	0,345	0,231	1,67	9,5	0,901
5კ	ც+20% (ბმქ-კ)	2385	22	0,235	0,235	-	3,6	0,975

მაღალი სიმტკიცის ბეტონების მიღების ორიგინალური მეთოდი შემუშავებული იქნა აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის „სამრეწველო და სამოქალაქო მშენებლობის“ (დღეისათვის „მშენებლობის და ტრანსპორტის“) დეპარტამენტში. კერძოდ, შემუშავებული იქნა მაღალი სიმტკიცის ბეტონების (მათ ხშირად მაღალი ხარისხის ბეტონებს უწოდებენ) მიღება პოლიფუნქციონალური მოდიფიკატორების სერიით ბმქ-კ (ბეტონების მოდიფიკატორი ქვიშის დანამატით კომპონენტ ღორღის გარეშე).

ამ მოდიფიკატორების შემდაგენელი კომპონენტებია: ზესტაფონის ფეროშენადნობთა ქარხნის ლუმელების წანატაცი ნაცრები და წიდა, გამაგრების რეგულატორი.

მოდულიკატორ ბმქ-კ-ს გამოყენებით ვარაუდობენ, რომ მიიღება მაღალი ძვრადობის ($\kappa\kappa=20-25$ სმ) მაღალი სიმტკიცის ბეტონის ნარევი, მაშინ როდესაც ტრადიციული ტექნოლოგიით ანალოგიური სიმტკიცის ბეტონების მიღება ხდება ხისტი ბეტონის ნარევისაგან, რითაც გართულებულია ბეტონის ჩაწყობა-გამკვრივების ტექნოლოგიური პროცესი [38, 39, 40].

შემოთავაზებული მეთოდის მაღალი სიმტკიცის ბეტონის მიღება შესაძლებელია აგრეთვე შემავსებელ ქვიშაზე, ღორღის გარეშე, რაც საფუძველია მივიღოთ ე.წ. შემსუბუქებული მაღალი სიმტკიცის ბეტონი.

მაღალი სიმტკიცის ბეტონის მიღების შემოთავაზებული მეთოდი აუმჯობესებს მის მთელ რიგ ეკონომიკურ მაჩვენებლებს:

- შენობა-ნაგებობის მასის შემცირებას (შემსუბუქდება ბეტონის საშუალო მოცულობითი მასა ≈ 2200 კგ/მ³-მდე);
- თვითღირებულების შემცირებას, რაც გამოწვეულია შემვსებლის ღორღის შეცვლით (ქვიშით);
- ბეტონის ჩაწყობის პროცესების გამარტივებით;
- ბეტონტუმბოების გამოყენების ნაცვლად შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას დულაბტუმბოები და სხვა.

შემოთავაზებული მაღალი სიმტკიცის ბეტონის მიღების ახალი მეთოდი, ბმქ-კ სერიის მოდიფიკატორებით, ხარისხობრივად ცვლის წვრილმარცვლოვანი ბეტონის მახასიათებლებს, მოდიფიცირებული ცემენტის ქვის როლი მაღალმტკიცე ბეტონის ფორმირებაში არსებითად ამალეებულია. ყოველივე აღნიშნულის გამო შესაძლებელია მნიშვნელოვნად შემცირებული იქნას ცოცვადობის დეფორმაცია.

კვლევისათვის შემოთავაზებულია მოდიფიკატორების შემცველობის მიხედვით საკვლევი ბეტონის სხვადასხვა ნარევი, რომელიც მოცემულია ცხრ.3.1-ში.

ცხრ.3.2-ში მოცემულია დამზადებული ნარევების თვისებები. მაღალი სიმტკიცის ბეტონის დამზადებული საკვლევი ნარევებია: 1კ, 2კ, 3კ, 4კ, 5კ.



ფოტო 3.1. ექსპერიმენტისათვის მომზადებული ბეტონის კუბების ნიმუშები.

1) 1კ ბეტონის ნარევის შემადგენლობა:

- M500 მარკის ცემენტი (ც);
- 0% ბმქ-კ მოდიფიკატორი, რომელიც წარმოადგენს წესტაფონის ფერონედნობთა ქარხნის ღუმელების ფილტრებში დაგროვილი ე.წ. ნაცარი;
- ქვიშა (ქ);
- ბეტონის გამყარების რეგულატორი (C-3).

2) 2კ ბეტონის ნარევის შემადგენლობაში შედის:

- M500 მარკის ცემენტი (ც);
- 10% ბმქ-კ მოდიფიკატორი;
- ქვიშა (ქ).

3) 3კ ბეტონის ნარევის შემადგენლობაში შედის:

- M500 მარკის ცემენტი (ც);
- 20% ბმქ-კ მოდიფიკატორი;
- ქვიშა (ქ).

4) 4კ ბეტონის ნარევის შემადგენლობაში შედის:

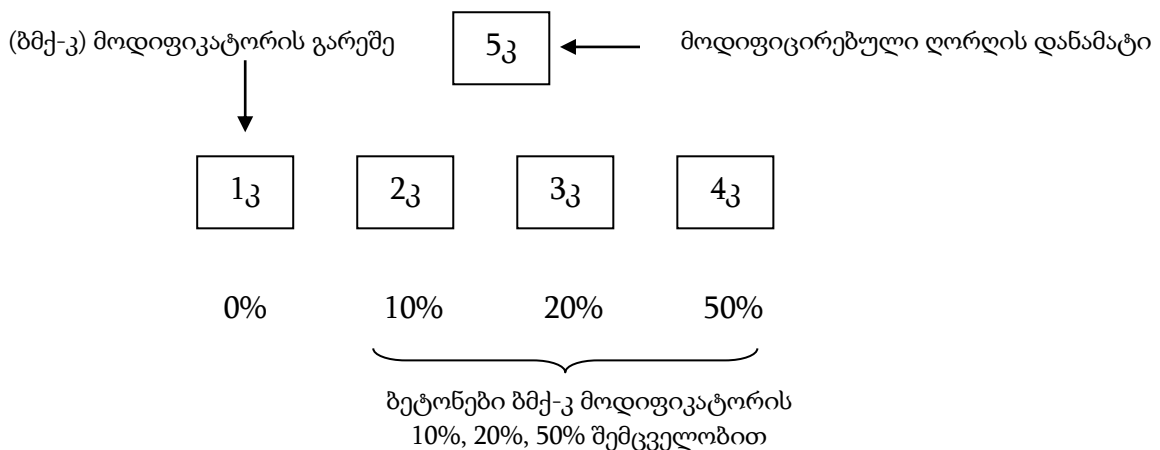
- M500 მარკის ცემენტი (ც);
- 50% ბმქ-კ მოდიფიკატორი;
- ქვიშა (ქ).

5) 5კ ბეტონის ნარევის შემადგენლობაში შედის:

- M500 მარკის ცემენტი (ც);
 - 20% ბმქ-კ მოდიფიკატორი;
 - ქვიშა (ქ);
 - ღორღი (ღ).
- } მძიმე ბეტონი

3.2. ახალი მოდიფიცირებული ბეტონების ცოცვადობის დეფორმაციაზე კვლევა

ექსპერიმენტის არსი მდგომარეობდა იმაში, რომ შეგვედარებინა ერთმანეთს ბეტონის სხვადასხვა ნარევეზე დამზადებული ბეტონები, მასში მოდიფიკატორების სხვადასხვა შემცველობის შეთხვევაში, მოდიფიკატორის და ღორღის გარეშე და ღორღის შემცველობით. შედარებისათვის გამოყენებული იქნება ჩვენს მიერ შემუშავებული კრიტერიუმები (I განყოფილება).



ნახ.3.1. ცოცვადობის დეფორმაციაზე ხანგრძლივ დატვირთვაზე გამოსაცდელი ნიმუშების სქემა

ამ მიზნით, წარმოდგენილ ნარევეებზე (ნახ.3.1) დამზადებული ბეტონებიდან, შემოთავაზებული კრიტერიუმის მიხედვით (I განყოფილება), გამოცდილი სერიის 1კ,

2კ, 3კ, 4კ, 5კ ნიმუშებიდან, ყველაზე დაბალი ცოცვადობის დეფორმაციის მქონე ბეტონებიდან შეირჩეოდა (წინასწარი შეფასებით) ერთ-ერთი, როგორც საუკეთესო. საცდელი ნიმუშების სახეობა და შემადგენლობა თვალსაჩინოდ წარმოდგენილია ნახაზზე 3.1.

გამოვლენილ საუკეთესო ბეტონს ვანიჭებდით უპირატესობას და რეკომენდირებული იქნება მისი ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების დაწვრილებითი გამოკვლევა შემდგომში წარმოებაში დანერგვის მიზნით.

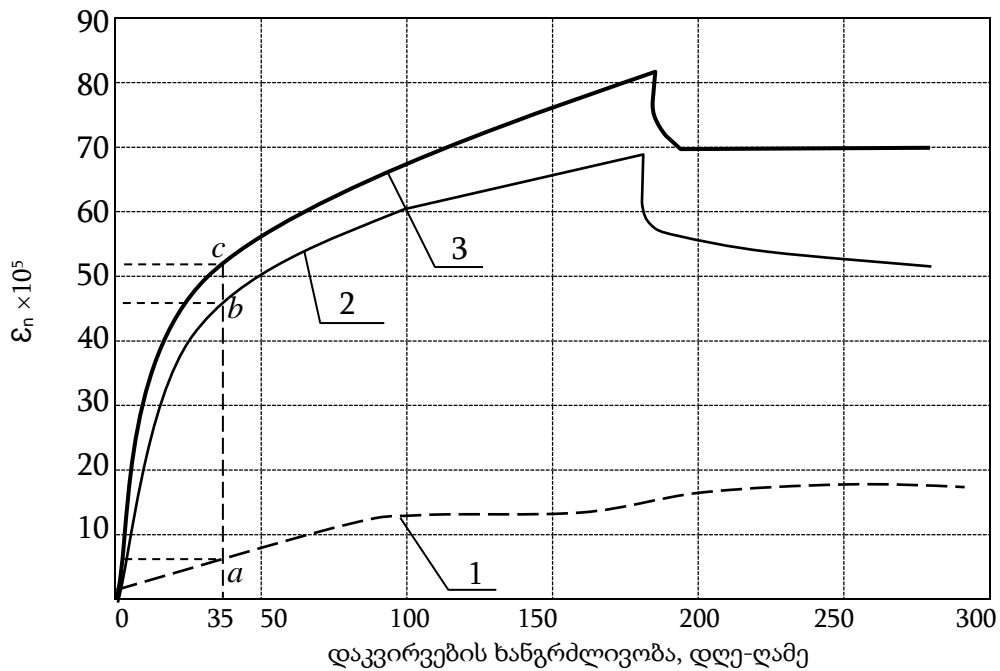
ამრიგად, ექსპერიმენტების არსი მდგომარეობდა შემდეგში:

1. შევადაროთ ერთმანეთს თანაბარი მოცულობის, მაგრამ განსხვავებული ხარისხის ცემენტის ჭკვიანი წვრილმარცვლოვანი ბეტონები;
2. შევადაროთ ერთმანეთს მაღალი სიმტკიცის ბეტონები, რომლებიც შედგება განსხვავებული მოცულობის ერთნაირი ხარისხის ცემენტის ქვისაგან.

პირველი ამოცანის გადასაწყვეტად გამოკვლეული იქნა წვრილმარცვლოვანი მაღალი სიმტკიცის ბეტონის სერიის ნიმუშები, შემკვრელის ერთიან რაოდენობაზე - ცემენტი + მოდიფიკატორი და წყალშემკვრელის ფარდობა ერთნაირ მნიშვნელობაზე (რომელიც შეადგენდა 0,23-ს). ცემენტის ქვის ხარისხს ვცვლიდით მოდიფიკატორის დოზირების ცვლით, შემკვრელის მუდმივი მოცულობის შემთხვევაში. ამასთან შესაძლებლობის ფარგლებში, ვცდილობდით ექსპერიმენტის შედეგად გამოგვერიცხა ისეთი ფაქტორების ზემოქმედება, როგორცაა შემავსებლის სახეობა, მოცულობა, წყალშემკვრელის ფარდობის ცვლილება, საერთო ფორიანობა და სხვა ფაქტორები. ისინი გამოსაკვლევია სერიისათვის არ იცვლება. 1კ სერია დამზადებული იყო ტრადიციული ტექნოლოგიით მოდიფიკატორის გარეშე; 2კ სერია მოდიფიკატორის 10%-იანი ხარჯით; 3კ მოდიფიკატორის 20%-იანი ხარჯით და 4კ მოდიფიკატორის 50%-იანი ხარჯით. ამრიგად, წვრილმარცვლოვანი ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებებების ცვლილებას ვახდენდით ცემენტის ქვის ხარისხის ცვლილებით.

მეორე შემთხვევაში, ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების ცვლილებას ვახდენდით შემავსებლის სახეობის და ბეტონის საერთო ფორიანობის, ასევე ცემენტის ქვის მოცულობის ცვლილებით, ქვის ხარისხის შეუცვლელად. ე.ი. მოდიფიკატორის დოზირების და წყალშემკვრელის ფარდობის (0,23) ერთი და იმავე მნიშვნელობის შენარჩუნებით.

ქვემოთ მოცემულია ნიმუშების გამოცდის შედეგები 1კ, 2კ, 3კ, 4კ, 5კ ექსპერიმენტებისათვის.



ნახ.3.2. ცოცვადობის ნარჩენი დეფორმაციები 1 კ სერიისათვის

ნახ.3.2-ზე მოცემულია ცოცვადობის დეფორმაციები 1კ სერიის ნიმუშების ექსპერიმენტის შედეგი. ექსპერიმენტისათვის განკუთვნილ 1კ ნიმუშებში მოთავსებული ბეტონის ნარევი დამზადებული იყო M500 მარკის ცემენტისაგან, ქვიშისაგან და ბეტონის გამყარების რეგულატორისაგან (C-3). ე.ი. ამ სერიის ექსპერიმენტებში ბეტონის ნარევის შემადგენლობაში არ შედიოდა მოდიფიკატორი. იგი წარმოადგენს ტრადიციულ ბეტონისაგან დამზადებულ საცდელი ნიმუშის სერიას. ცხრილში 3.1 მოცემულია ბეტონის ნარევის და მიმზადებისათვის ტექნოლოგიით გათვალისწინებული კომპონენტები: წყალი და ღორღი. აღსანიშნავია, რომ ნიმუშების საცდელი სერია არ შეიცავს დანამატის სახით ღორღს, რომელიც ხშირად განმსაზღვრელია ბეტონის სიმტკიცის. ღორღის გარეშე აგრეთვე დამზადებული დანარჩენი 2კ, 3კ, 4კ სერიის ნიმუშები იმ განსხვავებით, რომ ეს უკანასკნელები დამატებით სხვადასხვა პროცენტული შემადგენლობით შეიცავენ მოდიფიკატორს (ბმქ-კ). ეს იმიტომ, რომ ნიმუშების სერიების გამოცდის შემდეგ შესაძლებელი გახდეს, გამოვლენილი იქნას, მოდიფიკატორის გავლენა ბეტონის ხარისხზე.

3.2.1. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაცია 1კ სერიისათვის

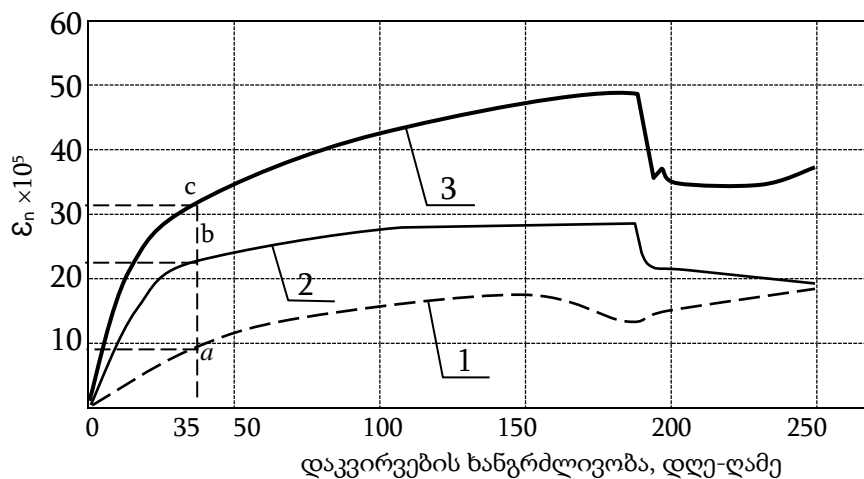
1კ სერიის ნიმუშები გამოცდილი იქნა ნიმუშების 0,24 R_{bm} ძაბვის დონეზე დატვირთვისას ზამბარებიან დანადგარზე. ნახ.3.2-ზე 1-მრუდი წარმოადგენს გამოცდილი ნიმუშის ბეტონის ჯდომის დეფორმაციას. მისი სიდიდე 35 დღე-ღამის განმავლობაში დაკვირვებისას არ აღემატება $0,8 \cdot 10^6$ სმ²/კგმ სიდიდეს. ნახაზ 3.2-ზე ჯდომის დეფორმაციას შეესაბამება a წერტილი. ექსპერიმენტის მიხედვით ცოცვადობის სიდიდე 1კ სერიისათვის $\approx 5 \cdot 10^6$ სმ²/კგმ, რაც შეესაბამება ნახ.3.2-ზე ექსპერიმენტული (2) მრუდის b წერტილს. ტრადიციული ბეტონებისათვის, სადაც ბეტონის ნარევის მოსამზადებლად გამოყენებულია M500 მარკის ცემენტი, შეესაბამება ცოცვადობის სიდიდის შესადარებელ მრუდზე (ნახ.1.4 და ნახ.1.5, I განყოფილება) $\approx 4,7 \cdot 10^6$ სმ²/კგმ სიდიდეს, რაც დამახასიათებელია ტრადიციული ბეტონებისათვის.

ამრიგად, 1კ სერიის ბეტონი, ცოცვადობაზე ზომის სიდიდის მიხედვით, შეესაბამება სტანდარტული ბეტონისათვის დამახასიათებელ ბეტონს.

ნახ.3.2-ზე მოცემულია აგრეთვე ჯდომის დეფორმაციის (მრუდი 1) და ცოცვადობის ზომის (მრუდის) შესაბამისი მრუდებით განსაზღვრული ჯამური დეფორმაციის ცვლილების დამოკიდებულება 300 დღე-ღამის ხანგრძლივობით დაკვირვებისათვის. 35 დღე-ღამის ხანგრძლივობით დაკვირვების შემთხვევაში 1კ სერიისათვის ჯამური დეფორმაციის სიდიდე შეადგენს $5,0 \cdot 10^6$ სმ²/კგმ-ს. მისი დამყარებული მნიშვნელობა ≈ 170 დღე-ღამის ხანგრძლივობის დატვირთვისათვის შეადგენს $7,0 \cdot 10^5$ სმ²/კგმ-ს. 2კ, 3კ, 4კ, 5კ სერიების ბეტონის ხარისხის ექსპერიმენტული მონაცემების შეფასება შესაძლებელია ტრადიციული ბეტონების ცოცვადობის ზომის მრუდთან შედარებით (ნახ. 1.4, ნახ.1.5, I განყოფილება), ხოლო ბეტონში მოდიფიკატორის შემცველობის სერიისათვის ცხრილი 1.5-ის მონაცემებთან, აგრეთვე ნახ.3.2-ის მრუდების (1, 2, 3) მიხედვით.

3.2.2. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაცია 2კ სერიისათვის

ნახ.3.3-ზე მოცემულია 2კ სერიის ნიმუშების ბეტონის დეფორმაციის მრუდები. მათ შორის (1) მრუდი შეესაბამება ბეტონის გამოცდის ჯდომის დეფორმაციის ცვლილებას დაკვირვების ხანგრძლივობის მიხედვით. (2) მრუდით მოცემულია დაკვირვების ხანგრძლივობის შესაბამისად, ბეტონის ცოცვადობის დონის ცვლილება. (3) მრუდით მოცემულია დაკვირვების ხანგრძლივობის შესაბამისად ნიმუშების ბეტონის ჯამური დეფორმაციის ცვლილება. როგორც ცნობილია 2კ სერიის ნიმუშების ბეტონის შემადგენლობაში შედის 10%-მდე მოდიფიკატორი (ცხრ.3.2). ნარჩენი დეფორმაციის ექსპერიმენტული (1) მრუდიდან (ნახ.3.3) ჩანს, რომ 35 დღე-ღამის დაკვირვების შესაბამისი ნარჩენი დეფორმაცია (a წერტილი) შეადგენს $0,9 \cdot 10^6$ სმ²/კგმ-ს; პრაქტიკულად იგი იმავე სიდიდისაა, რაც ტრადიციული ბეტონისათვის (ნახ.3.2., a წერტილი). 250 დღე-ღამის დაკვირვების ხანგრძლივობის შემთხვევაშიც 1 კ სერიისათვის ჯდომის დეფორმაცია ანალოგიურია, აგრეთვე ტრადიციული ბეტონების ჯდომის დეფორმაციის (მრუდი 1, ნახ.3.3).



ნახ.3.3. ცოცვადობის ნარჩენი დეფორმაციები 2 კ სერიისათვის

2კ სერიის ნიმუშების გამოცდის შედეგად ბეტონის ცოცვადობის სიდიდე 35 დღე-ღამის ხანგრძლივობის ბოლოს (წერტილი b) შეადგენს $2,2 \cdot 10^6$ სმ²/კგმ, რაც გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე ტრადიციული ბეტონების შემთხვევაში (ნახ.3.2, მრუდი 2). ნიმუშების დატვირთვის 250 დღე-ღამის ხანგრძლივობისთვისაც ცოცვადობის სიდიდე უცვლელი რჩება. ამის შემდეგ კი, იგი ჯდომის დეფორმაციის

სიდიდემდე მცირდება. უნდა აღინიშნოს, რომ ჯამური დეფორმაციის სიდიდეც ნაკლებია, ვიდრე ტრადიციული ბეტონისათვის. კერძოდ, დატვირთვის ხანგრძლივობისათვის 250 დღე-ღამე, მაქსიმალური სიდიდე შეადგენს $4,8 \cdot 10^6$ სმ²/კგმ მაშინ, როცა 1კ სერიისათვის ბეტონის ჯამური დეფორმაციის სიდიდემ (ნახ.3.3, მრუდი 3) შეადგინა $8,5 \cdot 10^6$ სმ²/კგმ.

ამრიგად, ზესტაფონის ფეროშენადნობთა ქარხნის ღუმელების ნარჩენი წიდის და მტვერის დამჭერ ფილტრებში დაგროვილი ე.წ. ნაცრის 10%-მდე შემცველობის მოდიფიკტორით ბმქ-კ, მოდიფიცირებული ბეტონის 2კ სერიის ნიმუშის ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციაზე გამოცდამ აჩვენა, რომ ცოცვადობის დეფორმაციის სიდიდე ნაკლებია ტრადიციული მეთოდით დამზადებული ბეტონის ცოცვადობის სიდიდეზე. რაც იმაზე მიუთითებს, რომ შემცირებულია ბეტონის დატვირთვისას ბზარების წარმოქმნის ალბათობა. ამ უკანასკნელი დასკვნის გაკეთების შესაძლებლობას იძლევა I განყოფილებაში სხვადასხვა ავტორების მიერ შესრულებული კვლევების ანალიზი და მათ საფუძველზე მოცემული ნახ.1.5 და ცხრილი 1.5. ამასთან ერთად დასტურდება ჩვენს მიერ გაკეთებული დასკვნა იმის შესახებ, რომ ნახ.1.5. და ცხრილი 1.5 შეიძლება ჩაითვალოს ბეტონების კვლევების საწყის ეტაპზე, მათი ვარგისიანობის წინასწარი შეფასების კრიტერიუმად.

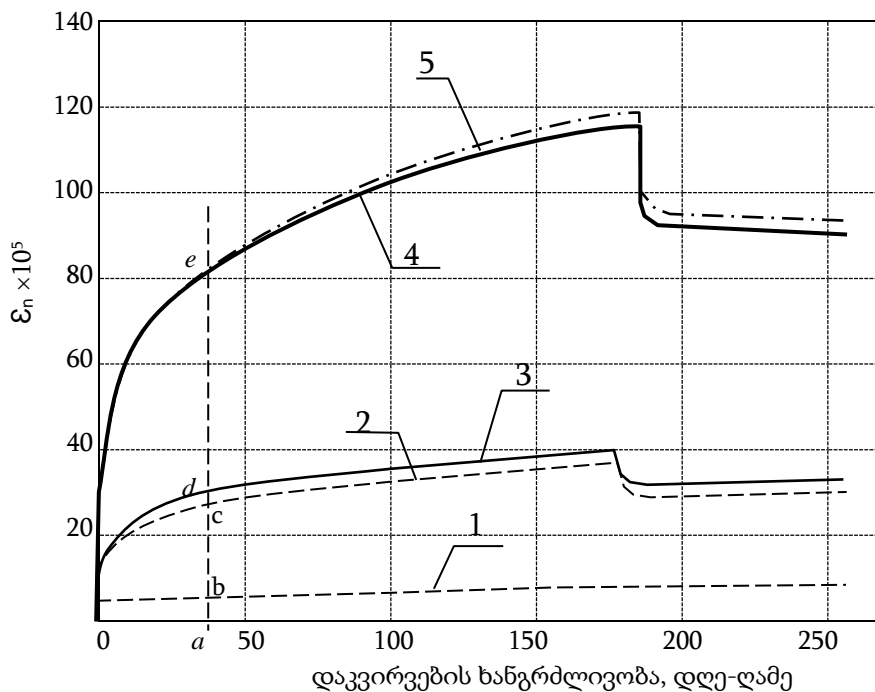
ვარგისიანობაში იგულისხმებოდა საკვლევი ბეტონის ცოცვადობის დონის გამოვლენის შემდეგ, მისი დანარჩენი მახასიათებლების კვლევა გაგრძელდეს თუ არა. ასეთი დასკვნა კეთდება საუკეთესო მაჩვენებლების მქონე ბეტონის გამოვლენისათვის დანარჩენი სერიების ცოცვადობის დეფორმაციის გაანალიზების შემდეგ.

ამ მიზნით ზემოთ გაანალიზებულია ნახ.3.4-ზე წარმოდგენილი, 3კ სერიის ნიმუშების გამოცდის შედეგი, ცოცვადობის დეფორმაციის სიდიდის მიხედვით. ნიმუშების 3კ სერია გამოცდილი იყო მისი დატვირთვისას $0,25 R_{bm}$ და $0,63 R_{bm}$ ძაბვის მოქმედებისას.

3.2.3. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაცია 3კ სერიისათვის

ნახ.3.4-ზე ჯდომის დეფორმაციას შეესაბამება (1) გრაფიკული გამოსახულება.

0,25 R_{bm} დატვირთვაზე სერიის ნიმუშების გამოცდილას ჯდომის დეფორმაციამ შეადგინა $0,2 \cdot 10^6$ მპა 35 დღე-ღამის ხანგრძლივობაზე დაკვირვებისას. დატვირთვის ხანგრძლივობის 250 დღე-ღამის განმავლობაში გაზრდისას ჯდომის დეფორმაციის ცვლილება წრფივია და მისი სიდიდე პრაქტიკულად უცვლელია.



ნახ.3.4. ცოცვადობის ნარჩენი დეფორმაციები 3 კ სერიისათვის

ჯდომის დეფორმაციასთან (მრუდი 1) შედარებით, გაზრდილია ცოცვადობის დეფორმაცია (მრუდი 2) და შეადგენს 35 დღე-ღამის ხანგრძლივობით დატვირთვისას $2,6 \cdot 10^6$ სმ²/კგძ-ს. 250 დღე-ღამის განმავლობაში დატვირთვისას კი ცოცვადობის ზომის სიდიდე უმნიშვნელოდ იზრდება $3,6 \cdot 10^6$ სმ²/კგძ-მდე. მაქსიმალური ჯამური დეფორმაცია (მრუდი 3) შეადგენს $4 \cdot 10^6$ სმ²/კგძ-ს. ჯდომისა და ცოცვადობის დეფორმაციის მნიშვნელობები 2 კ სერიის ანალოგიურად 3 კ სერიის ნიმუშებისათვის მიღებული იყო ნიმუშების დატვირთვის ერთი და იგივე მნიშვნელობებისათვის $0,24 R_{bm}$. ამიტომ დეფორმაციის დონების შედარება 2 კ და 3 კ სერიის ნიმუშებისათვის მიუთითებს იმაზე, რომ 3 კ სერიის ბეტონი უკეთესი უნდა იყოს 2 კ სერიის ბეტონის მახასიათებლებზე. რაც იმაზე მიუთითებს, რომ მოდიფიკატორის (ბმქ-კ) 10%-დან 20%-მდე გაზრდამ ბეტონის ნარევაში, უნდა უზრუნველყოს უფრო მაღალი სიმტკიცის და სხვა მაღალი მექანიკურ-ფიზიკური მახასიათებლების მქონე ბეტონის მიღება.

საცდელი ნიმუშების 3 კ სერიისათვის შეცვლილი იქნა გამოცდის პირობები,



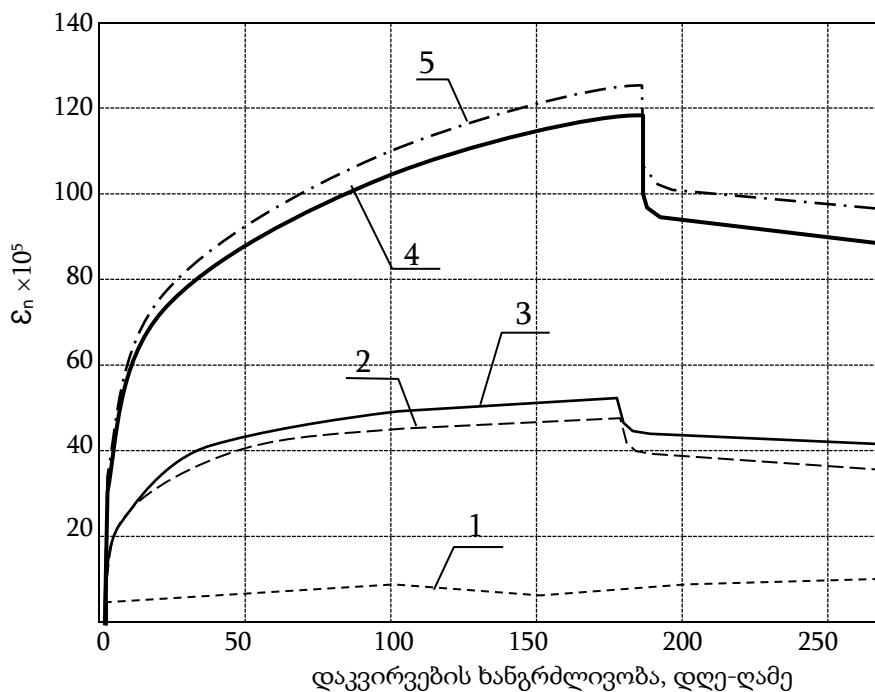
ფოტო 3.2. 3კ სერიის ნიმუში დაშლილი 0,63 დონეზე ძაბვით დატვირთვისას კერძოდ გაზრდილი იქნა ნიმუშების დატვირთვის დონე 0,24-დან 0,63-მდე.

ნიმუშების დატვირთვის გაზრდილმა დონემ გამოიწვია ცოცვადობის დეფორმაციის (მრუდი 4) და აქედან გამომდინარე, ჯამური დეფორმაციის გაზრდა. ცოცვადობის ზომის მაქსიმალურმა მნიშვნელობამ მიაღწია $12 \cdot 10^6$ სმ²/კგმ მნიშვნელობას. ჯამური დეფორმაციის მაქსიმალური მნიშვნელობის $4 \cdot 10^6$ სმ²/კგმ-დან $12 \cdot 10^6$ სმ²/კგმ-მდე გაზრდამ გამოიწვია ნიმუშებში ბზარების წარმოქმნა და მისი ერთიანი მსხვრევა (იხ. ფოტო 3.2).

3.2.4. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაცია 4 კ სერიისათვის

ამ სერიის ნიმუშები გამოცდილი იყო 1კ, 2კ, 3კ სერიების ანალოგიურად, ნიმუშების დატვირთვის ორ დონეზე: 0,24 R_{bm} და 0,63 R_{bm} . გამოცდა სწარმოებდა ზამბარიანი დანადგარის გამოყენებით. ციფრები 0,24 და 0,63 გვიჩვენებს სრული შესაძლო დატვირთვის რა ნაწილი მოდიოდა საცდელ ნიმუშებზე ძაბვის შესაქმნელად.

4 კ სერიის ნიმუშების გამოცდისას ნარჩენი დეფორმაცია მცირე სიდიდისაა 3კ სერიის ნიმუშების ბეტონის გამოცდის ნარჩენი დეფორმაციის მსგავსად. მისი სიდიდე არ აღემატება $0,2 \cdot 10^6$ $სმ^2/კგძ-ს$. ნარჩენი დეფორმაციის აღნიშნული სიდიდე პრაქტიკულად არ იცვლება (ნახ.3.5, მრუდი 1), ნიმუშების ხანგრძლივი დატვირთვის შემთხვევამდე.



ნახ.3.5. ცოცვადობის ნარჩენი დეფორმაციები 4 კ სერიისათვის

- ჯამური დეფორმაციები 0,31 დონეზე
- - - - - ჯამური დეფორმაციები 0,62 დონეზე
- ცოცვადობის დეფორმაციები 0,31 დონეზე
- ცოცვადობის დეფორმაციები 0,62 დონეზე
- ჯდომა

0,24 R_{bm} დონეზე ნიმუშების დატვირთვისას ცოცვადობის დეფორმაციის მაქსიმალური მნიშვნელობა (ნახ.3.5, მრუდი 2) $\approx 5 \cdot 10^6$ $სმ^2/კგძ-ს$ შეადგენს, მისგან

უმნიშვნელოდ განსხვავდება ცოცვადობის დეფორმაციის ჯამური მნიშვნელობა (ნახ.3.5, მრუდი 3).

4კ სერიის ნიმუშების 0,63 R_{bm} დონეზე მიღებული დატვირთვის შემთხვევაში, ისევე როგორც 3კ სერიის ანალოგიურ პირობებში, მკვეთრად იზრდება ცოცვადობის დეფორმაციის (ნახ.3.5, მრუდი 4) და ჯამური დეფორმაციის (ნახ.3.5, მრუდი 5) სიდიდეები თითქმის ერთი და იმავე მნიშვნელობამდე.

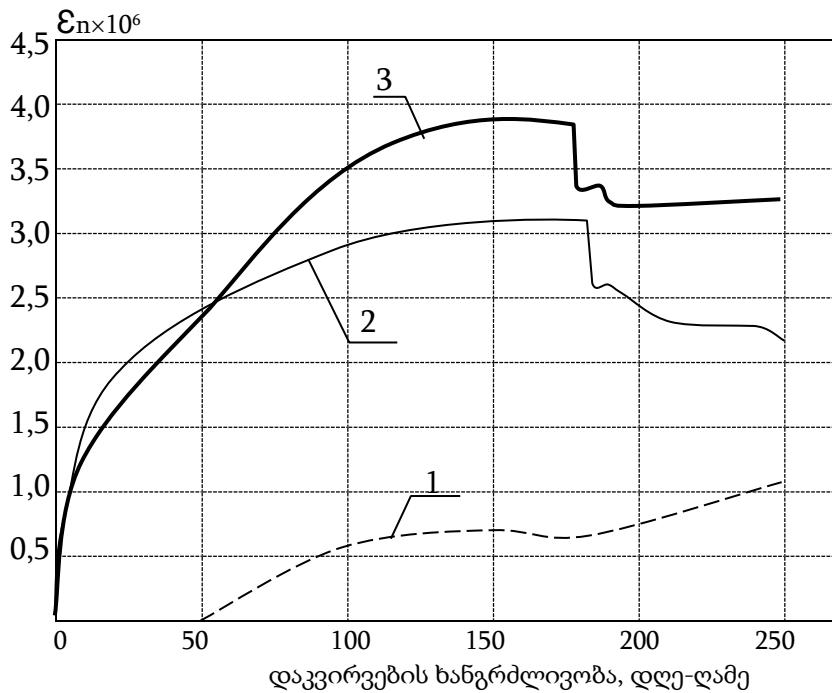
3კ და 4კ სერიის ნიმუშების ექსპერიმენტული მონაცემების შედარებიდან ჩანს, რომ ცოცვადობის დეფორმაციის სიდიდის მიხედვით სერიებით წარმოდგენილი ბეტონებიდან, რომელსათვისაც უპირატესობის მინიჭება შეუძლებელია. მოდიფიკატორების შემცველობის მიხედვით, წინასწარი შეფასებით, უპირატესობა შეიძლება მიენიჭოს 3კ სერიის ნიმუშების ბეტონს; 50%-მდე მოდიფიკატორს შეიცავს 4კ სერია, ხოლო 20%-მდე მოდიფიკატორების შემცველობისაა 3კ სერიის ბეტონი, უპირატესობა წინასწარი შეფასებით შეიძლება მიენიჭოს 3კ სერიის ნიმუშების ბეტონს. თუმცა მათი საბოლოო შეფასება მიზანშეწონილია მოხდეს ბეტონის დანარჩენი მხარეების გამოკვლევის შედეგების მიხედვით.

3.2.5. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაცია 5კ სერიისათვის

5კ სერიის ნიმუშები განსხვავდება 3კ ნიმუშებისაგან ბეტონის ნარევის შემადგენლობით. კერძოდ, ორივე ნარევი შეიცავს 20%-მდე მოდიფიკატორს (ბმქ-კ), რომელიც წარმოადგენს ზესტაფონის ფეროშენადნობთა ქარხნის ლუმელების ჰაერდამჭერი ფილტრებით დაგროვილ ე.წ. მტვერს ან ლუმელებში დნობის პროცესის დასრულების შემდეგ მიღებული წიდის ნარჩენებს. 5კ ნიმუშების სერიის ბეტონის ნარევის შემადგენლობა დამატებით შეიცავს ქვიშის გარდა, აგრეთვე ღორღის (წილობრივი შემადგენლობა ბეტონის ნარევის იხ. ცხრ.3.1-ში).

5კ სერიის ნიმუშები ცოცვადობის დეფორმაციაზე გამოცდილი იქნა იმავე პირობებში, როგორშიც 3კ სერიის ნიმუშები. კერძოდ, ორივე შემთხვევაში ნიმუშებზე მოქმედი დატვირთვისას დაძაბულობა შეადგენდა 0,24 R_{bm} დონეს (მპა). დაძაბულობის ქვეშ მყოფ ნიმუშებზე დაკვირვებას ვაწარმოებდით 200 დღე-ღამის

განმავლობაში.



ნახ.3.6. ცოცვადობის ნარჩენი დეფორმაციები 5 კ სერიისათვის

5კ სერიის ნიმუშებზე ჯდომის დეფორმაცია სიმცირის გამო 50 დღე-ღამის განმავლობაში პრაქტიკულად არ იზომებოდა. 200 დღე-ღამის განმავლობაში დატვირთვის შემდეგ ჯდომის დეფორმაციის მაქსიმალურმა მნიშვნელობამ შეადგინა 0,6. 1კ, 2კ, 3კ და 4კ სერიის ნიმუშების გამოცდის თუ ჯდომის დეფორმაცია დროში იცვლებოდა წრფივი სახით, 5კ სერიის ნიმუშებში ჯდომის დეფორმაციის ცვლილების ხასიათი დროში წრფივია (ნახ.3.6., მრუდი 1).

ნახ.3.6-ის 2 მრუდზე მოცემული 5კ სერიის ნიმუშების გამოცდისას ცოცვადობის დეფორმაციის ცვლილება დროში (200 დღე-ღამის განმავლობაში). მისი მნიშვნელობების ცვლილება დროში (50-150 დღე-ღამის განმავლობაში) შეადგენს მცირე შუალედს 2,5-დან 3-მდე. შესაბამისად ცოცვადობის ჯამური დეფორმაციის მაქსიმალური მნიშვნელობა 4,0-ზე ნაკლებია.

ჩატარებული 1კ, 2კ, 3კ, 4კ საცდელი ნიმუშების გამოკვლევის საფუძველზე შეიძლება წინასწარ დავასკვნათ, რომ მოდიფიცირებული ბეტონებიდან ცოცვადობის დეფორმაციის მიხედვით საუკეთესო უნდა იყოს 20%-მდე მოდიფიკატორის შემცველი 3კ სერიის ბეტონი (იხ. ცხრ.3.1-ში ამ ბეტონის ნაწილობრივი შემადგენლობა). წინასწარი შეფასებით, ცოცვადობის დეფორმაციის მიხედვით

ხუთივე სერიის ნიმუშებიდან საუკეთესო შემცველობის ბეტონს წარმოადგენს 5კ სერიის ბეტონი. მისი ნარევის შემადგენლობაში მოდიფიკატორების იგივე წილობრივი შემადგენლობაც, რაც 3კ სერიაში და დამატებული აქვს ღორღი (იხ. ცხრ.3.1). 3კ და 5კ სერიების ბეტონის უპირატესობა სხვა დანარჩენ სერიების ბეტონებთან შედარებით შემდგომი დადასტურების მიზნით საჭიროა კვლევების გაგრძელება.

III განყოფილების დასკვნები

1. ტრადიციული და მოდიფიცირებული ბეტონების ცოცვადობის დეფორმაციაზე კვლევების (I განყოფილება), ბეტონში ცოცვადობის დეფორმაციაზე მოქმედი ტექნოლოგიური ფაქტორების და ბეტონის დამზადებისათვის გამოყენებული საწყისი მასალების თვისებების (განყოფილება II) ანალიზის საფუძველზე დადგენილ იქნა ექსპერიმენტის მიზანი და ამოცანები:

- ცოცვადობის დეფორმაციაზე გამოვცადოთ ტრადიციული წვრილმარცვლოვანი ბეტონი;
- ცოცვადობის დეფორმაციაზე გამოცდილ იქნას ახალი შემოთავაზებული მოდიფიკატორის სხვადასხვა პროცენტული შემცველობის წვრილმარცვლოვანი ბეტონი;
- ცოცვადობის დეფორმაციაზე გამოცდილ იქნას ახალი მოდიფიკატორის შემცველი ბეტონი (დამატებითი კომპონენტი - ღორღის შემცველი).

აღნიშნული ამოცანები დასახული უნდა იქნას იმ მიზნით, რომ შეფასებული ყოფილიყო მოდიფიცირების პროცენტული შემცველობის გავლენა წვრილმარცვლოვან ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციაზე, საუკეთესო პროცენტული შემცველობის ბეტონის გამოვლენისათვის და შემდეგში იგი შედარებული ყოფილიყო, ცოცვადობის დეფორმაციის სიდიდის მიხედვით, ტრადიციულ წვრილმარცვლოვან და მძიმე ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის სიდიდესთან.

2. დასახული ექსპერიმენტის მიზნებიდან და ამოცანებიდან გამომდინარე

შემუშავებული იქნა საკვლევი ნიმუშების სერიის შემადგენლობა:

– 1კ, 0% ბმქ-კ; 2კ, 10% ბმქ-კ; 3კ, 20% ბმქ-კ; 4კ, 50% ბმქ-კ; 5კ, 20% ბმქ (ღორღის დამატებით) (ბმქ-კ ბეტონი (ბ), ახალი მოდიფიკატორი (მ), ქვიშა (ქ) შემცველობით, კომპონენტი (კ) ღორღის გარეშე).

3. ექსპერიმენტისათვის შერჩეული ნიმუშის სერიის ცოცვადობის დეფორმაციაზე გამოცდისას, ნარჩენი დეფორმაციების ექსპერიმენტული მონაცემების ანალიზის საფუძველზე მიღებული იქნა, რომ ნიმუშების ცოცვადობის დეფორმაციაზე საუკეთესო სერიის გამოვლენის მიზნით გამოცდილი ყოფილიყო ბეტონი ღერძულ გაჭიმვაზე და გაჭიმვაზე ღუნვისას.
4. გამოვლენილი იქნა, რომ ცოცვადობის დეფორმაციების მიხედვით საუკეთესო ექსპერიმენტული შედეგი მიღებულია 2კ, 3კ სერიის ნიმუშების შესაბამისად 10%-მდე და 20%-მდე შემცველობის მოდიფიკატორით. მოდიფიცირებული ბეტონებისათვის მათი ცოცვადობის დეფორმაციის ზღვრული მნიშვნელობა არ აღემატება $\epsilon_b=2 \cdot 10^{-5}$ მპა⁻¹-ს, მაშინ როცა ტრადიციული წვრილმარცვლოვანი ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის სიდიდე შეადგენს $\epsilon_b=3,5 \cdot 10^{-5}$ მპა⁻¹-ს.

IV განყოფილება

4. ახალი შემადგენლობის ბეტონების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კვლევა

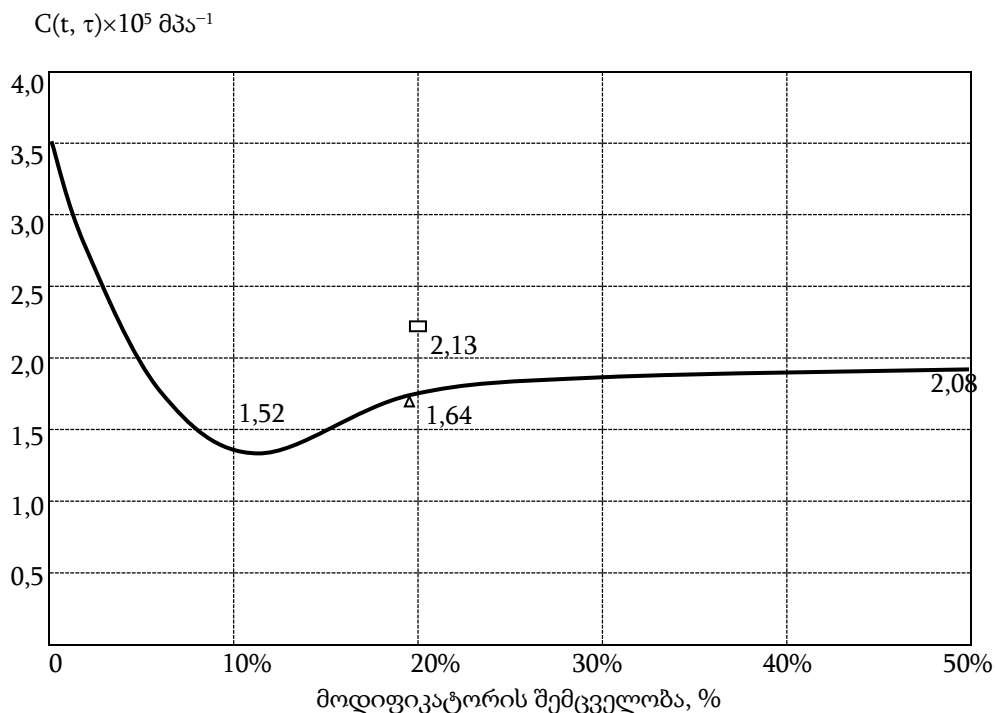
III განყოფილებაში მოცემულია თითოეული სერიის 1კ, 2კ, 3კ, 4კ, 5კ ნიმუშების ბეტონის ცოცვადობის სიდიდის კვლევისათვის ექსპერიმენტული მონაცემები, რის შედეგადაც გამოვლენილია განსახილველი სერიებიდან შედარებით შესაძლო საუკეთესო მაჩვენებლების მქონე 3კ და 5კ სერიები. IV განყოფილებაში გამოკვლეულია აღნიშნული შედარებით უკეთესი შემადგენლობის 3კ და 5კ-ს, აგრეთვე შედარებისათვის დანარჩენი სერიების ბეტონის დეფორმაციის და ფიზიკურ-მექანიკური მაჩვენებლები.

4.1. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის ცვლილება მოდიფიკატორის ცვლილების შესაბამისად

ბეტონის კვლევის სერიებში (1კ, 2კ, 3კ, 4კ) მოდიფიკატორი შესაბამისად შედის შემდეგი პროცენტული თანაფარდობით: 0%, 10%, 20%, 50%. ამ სერიებში ცოცვადობის ცვლილება მოცემულია III განყოფილებაში. უფრო დაწვრილებით მოდიფიკატორის შემცველობის გავლენა ბეტონის ცოცვადობის ზომაზე (ექსპერიმენტის შედეგები) მოცემულია ნახ.4.1-ზე.

მე-3 განყოფილებაში ექსპერიმენტული მონაცემები ანალიზის საფუძველზე უპირატესობა მიენიჭა ცოცვადობის დეფორმაციის მიხედვით 3კ ნიმუშების სერიის ბეტონს (სადაც მოდიფიკატორის შემცველობა ბეტონში შეადგენდა 20%-ს), 4კ ნიმუშის სერიაში შემავალ ბეტონთან შედარებით. ამ უკანასკნელში მოდიფიკატორის შემცველობა შეადგენდა 50%-ს. თუმცა, ცოცვადობის დეფორმაციის სიდიდე ორივე შემთხვევაში პრაქტიკულად ერთნაირი იყო, რაც დასტურდება ნახ.4.1-ზე წარმოდგენილი დამოკიდებულებით, სადაც პრაქტიკულად უცვლელი რჩება ცოცვადობის დეფორმაცია მოდიფიკატორის ბეტონში 30%, 40%-მდე გაზრდისას. ე.ი. 4კ სერიის ნიმუშების ბეტონში მოდიფიკატორის გაზრდა 30%-დან 50%-მდე

პრაქტიკულად არ მოქმედებს ცოცვადობის სიდიდეზე.



ნახ.4.1. ცოცვადობის ზომის ცვლილება 180 დღე-ღამის ასაკში მოდიფიკატორის დოზირების ცვლილებასთან დაკავშირებით

ნახ.4.1-დან ჩანს აგრეთვე, რომ ბეტონის ნარევი 20%-მდე, ჩვენს მიერ შემოთავაზებული მოდიფიკატორის (ზესტაფონის ფეროშენადნობთა ქარხნის ღუმელების აირდამჭერ ფილტრებში დაგროვილი ნაცრის ან ღუმელის წიდის ფხვნილისებური ფრაქცია) შემცველობა მოქმედებს ცოცვადობის დეფორმაციაზე, კერძოდ ამცირებს მას 3,5-დან 1,8 მპა⁻¹-მდე. რაც იძლევა იმის ვარაუდის საშუალებას, რომ მიღებული იქნას ტრადიციულ ბეტონზე უფრო მაღალი სიმტკიცის ბეტონი (ე.წ. მაღალი ხარისხის ბეტონი). იგულისხმება, რომ ტრადიციული ბეტონები არ შეიცავენ მოდიფიკატორებს, ამის გამო გააჩნიათ უფრო მაღალი ცოცვადობის დეფორმაცია.

ბმქ-კ მოდიფიკატორის პროცენტულ შემცველობაზე ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის დაწვრილებითი კვლევებით დაზუსტდა, რომ მოდიფიკატორის ოპტიმალური შემცველობა ბეტონში შეადგენს 12%-ს, რომელსაც შეესაბამება ცოცვადობის ზომის მინიმალური მნიშვნელობა 1,2·10⁵ მპა⁻¹. ამ სიდიდემდე იგი მცირდება მოდიფიკატორის 0%-დან გაზრდით 3,52·10⁵ მპა⁻¹-მდე (ნახ.4.1), რაც შეესაბამება ტრადიციული ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის მნიშვნელობას. მოდიფიკატორის 12%-ს ზემოთ გაზრდით 50%-მდე ცოცვადობის ზომის სიდიდე

იზრდება $3,52 \cdot 10^5$ მპა⁻¹-მდე.

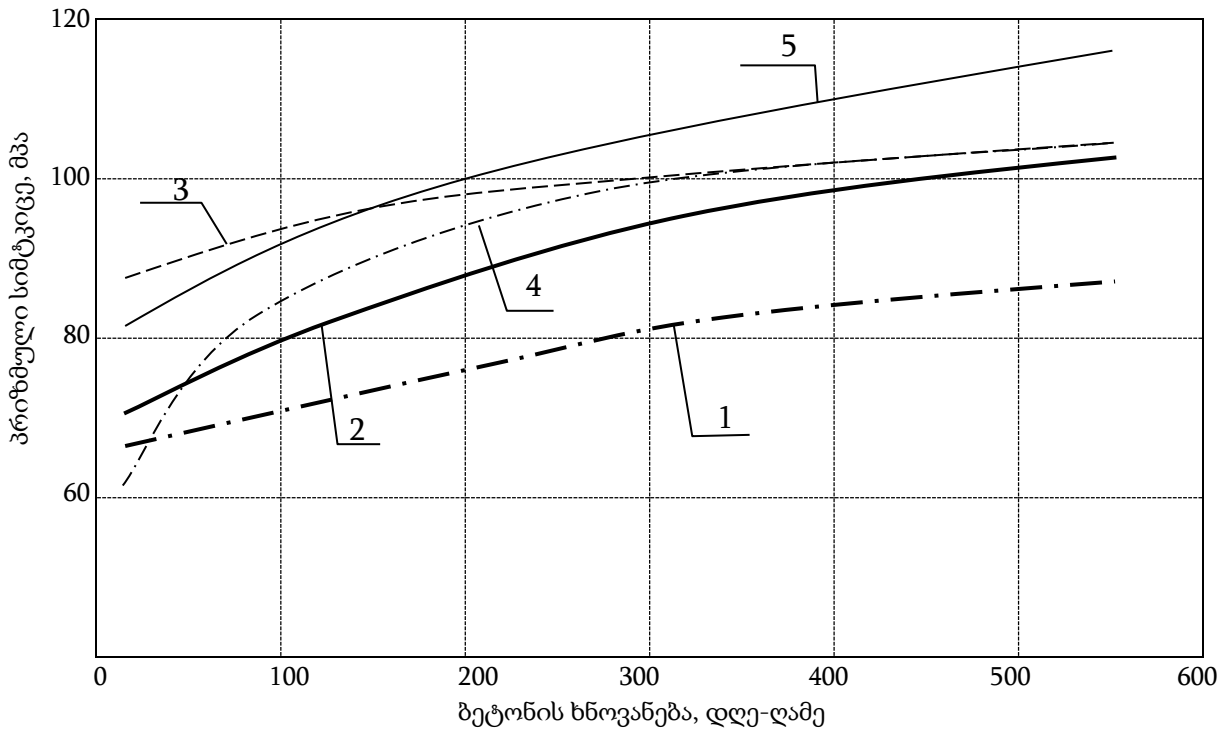
4.2. პრიზმული სიმტკიცის ცვლილება დროში

4.1-ში გამოთქმული ვარაუდი იმის შესახებ, რომ ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაცია დაკავშირებულია ბეტონის სიმტკიცესთან, დასტურდება ბეტონის თვისებების კვლევებისადმი მიძღვნილ მრავალ შრომაში [40, 41], რომლის საფუძველზეც ტრადიციული ბეტონებისათვის მიღებულია ნახ.1.4-ზე წარმოდგენილი დამოკიდებულება. ამ დამოკიდებულებიდან ჩანს, რომ ბეტონის მარკის ზრდასთან ერთად მცირდება მისი ცოცვადობის დეფორმაციის სიდიდე. ბეტონის მარკის ზრდა თავისთავად ნიშნავს ბეტონის სიმტკიცის ზრდას.

ჩვენს მიერ შემოთავაზებული ახალი მოდიფიკატორის გავლენით, ბეტონის ცოცვადობა მცირდება, ხოლო იგი როგორ მოქმედებს სიმტკიცეზე, ამის გამოსავლენად ჩატარებული იქნა ექსპერიმენტი. ხუთივე სერიის ნიმუშების ბეტონის სიმტკიცეს ვზომავდით მისი დაყოვნების სხვადასხვა ხნოვანებისათვის, ე.ი. 1კ, 2კ, 3კ, 4კ, 5კ სერიის ნიმუშებისათვის ვსაზღვრავდით ე.წ. პრიზმულ სიმტკიცეს.

ექსპერიმენტის მიხედვით პრიზმული სიმტკიცე 1კ სერიის ნიმუშების ბეტონისათვის, ყველა დანარჩენი სერიის ნიმუშების ბეტონის სიმტკიცესთან შედარებით, დაბალია, საშუალო მნიშვნელობა 80 მპა-ის ფარგლებშია. თანაც 50 დღე-ღამის ხნოვანებიდან დაწყებული იცვლება პრაქტიკულად წრფივად (ნახ.4.2, 1). ბეტონის პლაზმური სიმტკიცის ასეთი სიდიდე დამახასიათებელია ტრადიციული ბეტონებისათვის (განყოფილება I, ცხრ.5), ე.ი. ბეტონებისათვის მოდიფიკატორების გარეშე.

შედარებით მაღალია 10% შემცველობის ჩვენს მიერ შემოთავაზებული მოდიფიკატორის დამატებით მიღებული 2კ სერიის ნიმუშის, ბეტონის სიმტკიცე (ნახ.4.2., 2). მისი ცვლილებაც 50 დღე-ღამის ხნოვანებიდან, ასევე წრფივი ხასიათისაა. სიმტკიცის საშუალო მნიშვნელობა შეადგენს ≈ 92 მპა-ს. ე.ი. მოდიფიკატორის 10%-მდე შეყვანით 2კ სერიის ნიმუშების ბეტონის შემადგენლობაში, იწვევს სიმტკიცის ≈ 10 მპა-ით გაზრდას.



ნახ.4.2. პრიზმული სიმტკიცის ცვლილება დროში

2კ სერიის ნიმუშების ბეტონის სიმტკიცეზე უფრო მაღალია 3კ სერიის ნიმუშების ბეტონის პრიზმული სიმტკიცე (ნახ.4.2., 3). მისი საშუალო მნიშვნელობა ≈ 100 მპა-ს შეადგენს. როგორც ცნობილია, 3კ სერიის ნიმუშების ბეტონში მოდიფიკატორის შემცველობა 20%-ია.

ბეტონში მოდიფიკატორის შემცველობის გაზრდა 20%-ის ზემოთ, მაგალითად 50%-მდე არ იწვევს ბეტონის პრიზმული სიმტკიცის ზრდას (ნახ.4.2.,4), პრაქტიკულად მისი მნიშვნელობა ≈ 100 მპა-ია.

ბეტონის პრიზმული სიმტკიცე, ყველა დანარჩენი სერიის ნიმუშების ბეტონის სიმტკიცეზე მაღალია.

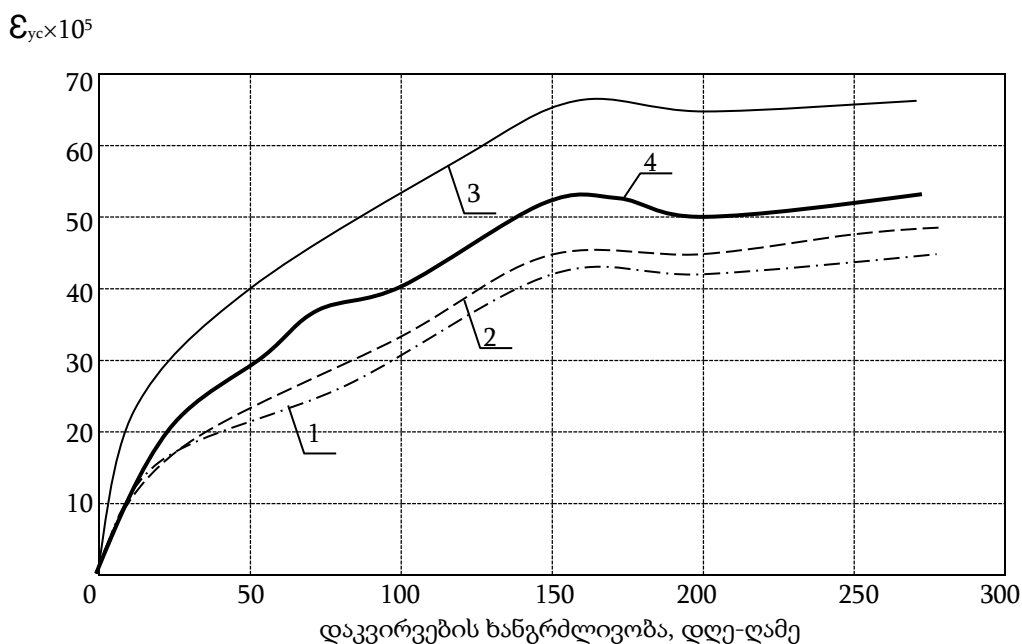
აღსანიშნავია, რომ 5კ სერიის ნიმუშების ბეტონი შეიცავს 20%-მდე მოდიფიკატორს და მასში შემავსებლების სახით, ქვიშასთან ერთად გამოყენებულია ღორღი (III განყოფილება, ცხრ.3.1).

ამრიგად, ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის სიდიდეების შესაბამისად 3კ და 5კ სერიის ნიმუშების ბეტონის პრიზმული სიმტკიცეები მაღალია, ე.ი. 3კ სერიის ნიმუშების მაგალითზე, მოდიფიკატორის დამატება ბეტონში 20%-მდე უფრო ოპტიმალურია, სიმტკიცის მიღწეული დონის თვალსაზრისით, ხოლო

მოდულიზატორის იმავე შემცველობის ბეტონში ღორღის დამატება სიმტკიცეს მნიშვნელოვნად ზრდის.

4.3. ჯდომის დეფორმაციის გაზომვის შედეგები

ბეტონის ჯდომის დეფორმაციის ექსპერიმენტულად მიღებული მნიშვნელობების მიხედვით აგებული დამოკიდებულებები მოცემულია გრაფიკულად ნახ.4.3–4.6-ზე. საკვლევი სერიების (1კ, 2კ, 3კ, 4კ, 5კ) ნიმუშებს წარმოადგენდა 10×10×40 სმ ზომის კუბებში შემავალი ბეტონი. მათ შორის 1კ სერიის საკვლევ ნიმუშებში გვაქვს ტრადიციული ბეტონი, ე.ი ამ სერიის ნიმუშების ბეტონი არ შეიცავს ჩვენს მიერ შეთავაზებულ მოდიფიკატორს (ბმქ-კ). 2კ, 3კ, 4კ სერიის საცდელ ნიმუშებში არსებულ ბეტონებში მოდიფიკატორები შედის შესაბამისად შემდეგი შემცველობით: 10%, 20%, 50% (არ განიხილება 5კ სერიის ნიმუშების ბეტონი, რომელშიც შედის 20%-მდე მოდიფიკატორი და აგრეთვე დამატებით მასში შედის ღორღი). ყველა სერიის ნიმუშების ბეტონის დატვირთვა შეადგენდა 0,24 R_{ბმ}. დაკვირვებას ვაწარმოებდით 250 დღე-ღამის განმავლობაში.

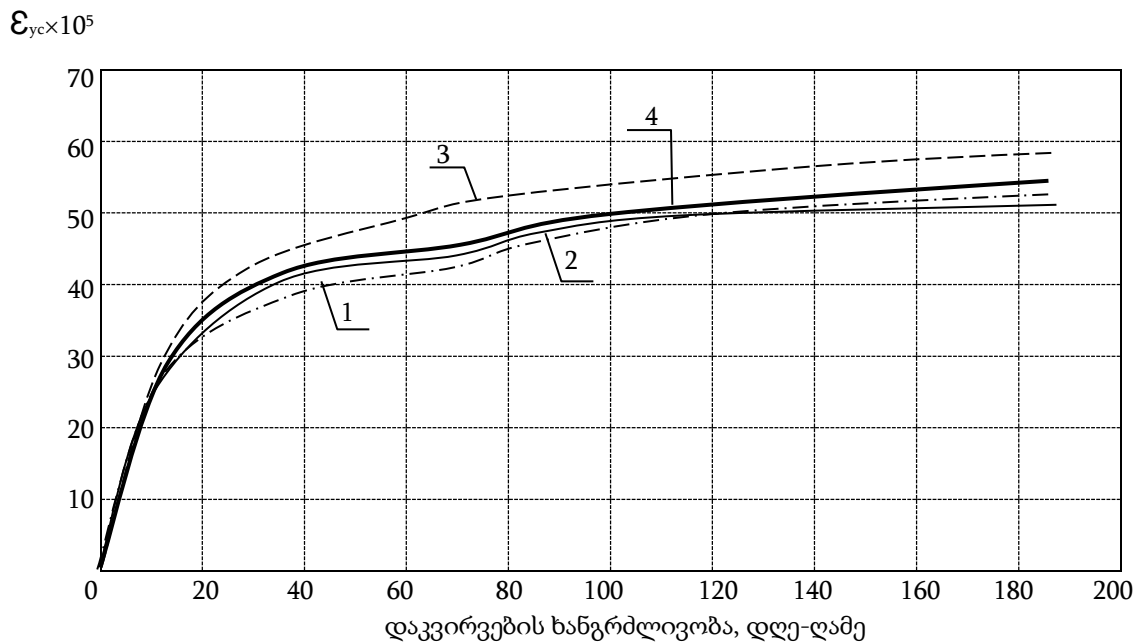


ნახ.4.3. ჯდომის დეფორმაციის ცვლილების ექსპერიმენტალური მრუდები 1კ სერიისათვის

ნახ.4.3-ზე წარმოდგენილია 1კ სერიის ნიმუშების ბეტონში ჯდომის

დეფორმაციის ცვლილების ექსპერიმენტული მრუდები. ნახაზიდან ჩანს, რომ დატვირთვის 150 დღე-ღამის ხანგრძლივობამდე მრუდებს აქვს აღმავალი ხასიათი, ხოლო ამის შემდეგ პრაქტიკულად ჯდომის დეფორმაციის სიდიდე უცვლელი რჩება. ამ სერიის ნიმუშების ბეტონის ჯდომის დეფორმაციის საშუალო მნიშვნელობიდან გადახრა დიდია და შეადგენს $\epsilon_{yc}=(40-65)\cdot 10^{-5}$. შესაბამისად დიდი იქნება დისპერსია.

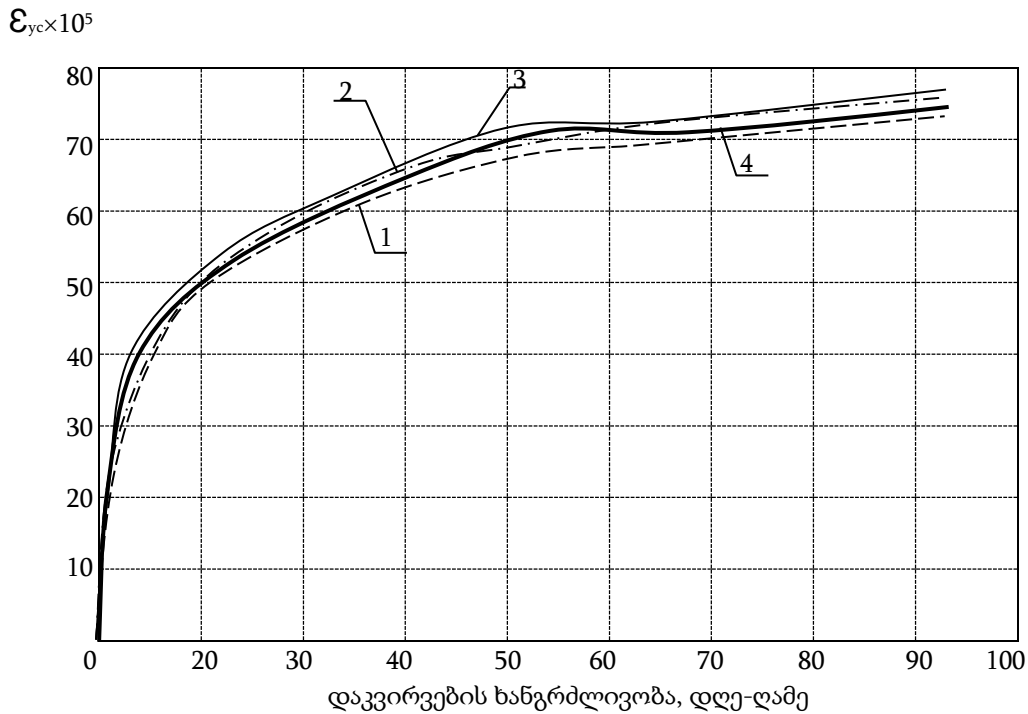
აღსანიშნავია, რომ თითოეული სერიისათვის გამოცდილი იქნა სამ-სამი ნიმუში. ნახ.4.3-ზე 1, 2 და 3 მრუდები შესაბამისად არის 1, 2 და 3 ნიმუშების ჯდომის დეფორმაციისათვის დამახასიათებელი, ხოლო ნახ.4.3-ზე მრუდი 4 წარმოადგენს საშუალო მნიშვნელობის მრუდს.



ნახ.4.4. ჯდომისას დეფორმაციის ცვლილების ექსპერიმენტალური მრუდები 2კ სერიისათვის

ნახ.4.4-ზე წარმოდგენილია 2კ სერიის ნიმუშების ბეტონში ჯდომის დეფორმაციის ცვლილების ექსპერიმენტული მრუდები. ამ ნახაზიდან ჩანს, რომ 40 დღე-ღამის დატვირთვის ხანგრძლივობამდე მრუდებს 1, 2, 3 და 4 აქვთ აღმავალი ხასიათი, ხოლო ამის შემდეგ პრაქტიკულად ჯდომის დეფორმაციის სიდიდეები იცვლებიან წრფივად. ამ სერიის ნიმუშების ბეტონის ჯდომის დეფორმაციის საშუალო მნიშვნელობიდან გადახრა, 1კ სერიის მნიშვნელობების საშუალო მნიშვნელობებიდან (4 მრუდი) გადახრასთან შედარებით მცირეა და შეადგენს $\epsilon_{yc}=(42-48)\cdot 10^{-5}$ -ს. ეს იმაზე მიუთითებს, რომ ჯდომის დეფორმაციასა და დაკვირვების ხანგრძლივობის დამოკიდებულებას შორის კორელაციური კავშირი უფრო მაღალია.

მრუდები 1, 2, 3 წარმოადგენს 2კ სერიის სამივე ნიმუშიდან, თითოეულის გამოცდის მრუდს, ხოლო მრუდი 4 წარმოადგენს საშუალო მნიშვნელობის დამოკიდებულებას.

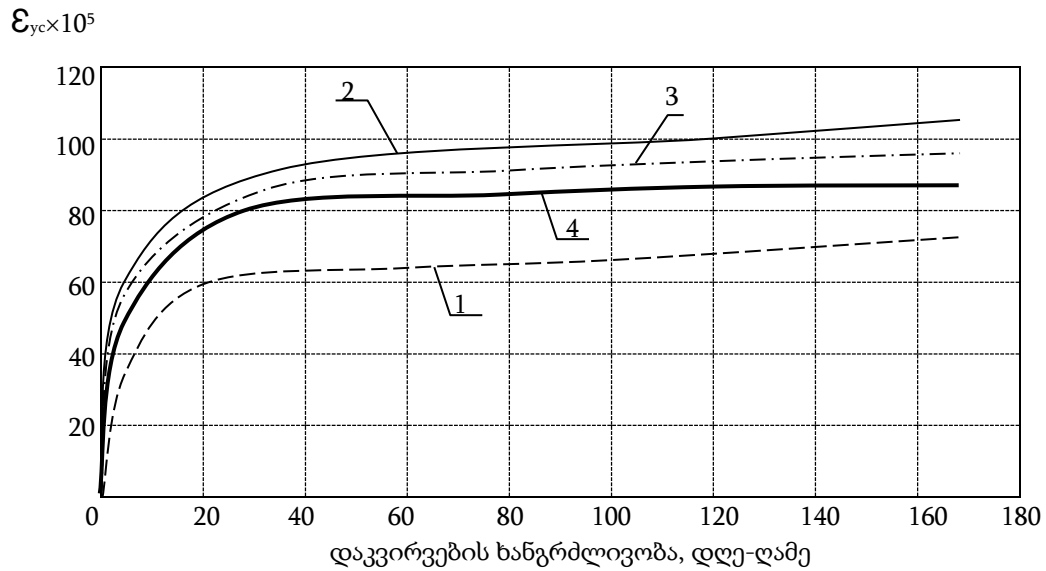


ნახ.4.5. ჯდომისას დეფორმაციის ცვლილების ექსპერიმენტალური მრუდები 3კ სერიისათვის

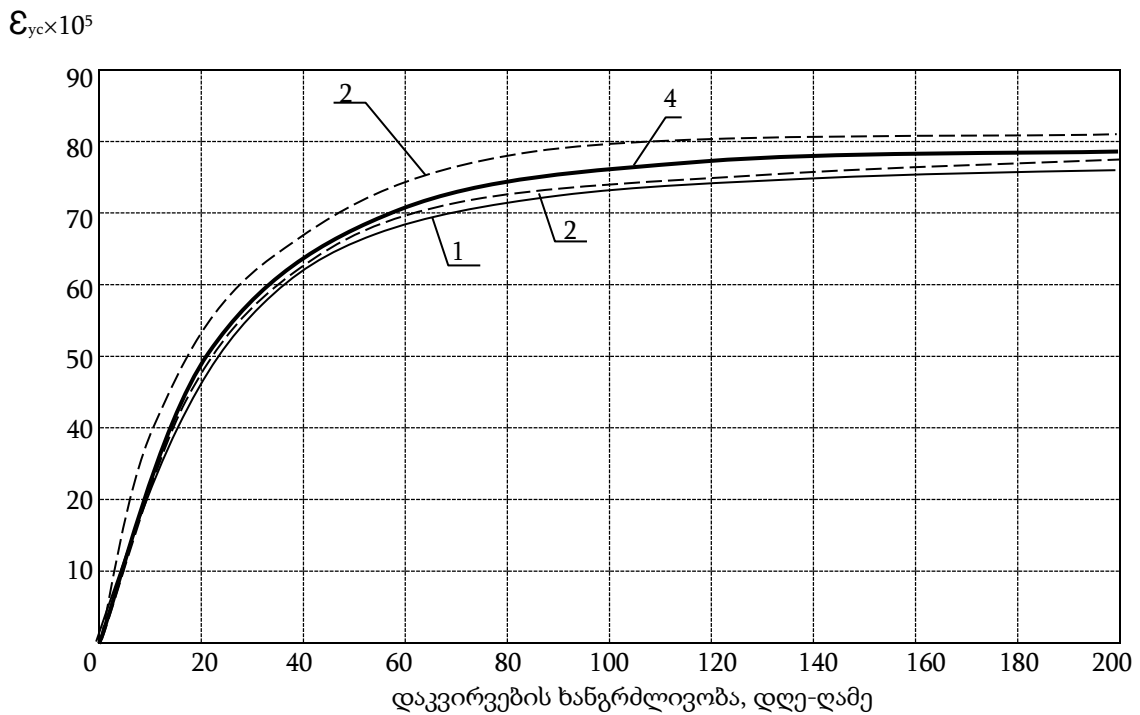
ნახ.4.5-ზე მოცემულია 3კ სერიის 3 ნიმუშის ჯდომის დეფორმაციის ცვლილების ექსპერიმენტული მრუდები (1, 2, 3) და მათი საშუალო მნიშვნელობის მრუდი 4. ნახაზიდან ჩანს, რომ 2- დღე-ღამის ხანგრძლივობის დაკვირვებამდე 1, 2, 3, 4 მრუდებს აქვთ აღმავალი ხასიათი, ხოლო ამის შემდეგ იგი პრაქტიკულად წრფივია. ამ სერიის ნიმუშების ბეტონის ჯდომის დეფორმაციის საშუალო მნიშვნელობიდან გადახრა კიდევ უფრო მცირეა, ვიდრე 2კ სერიის ნიმუშებისათვის.

ნახ.4.6-ზე მოცემულია 4კ სერიის ნიმუშების ექსპერიმენტული მრუდები, ჯდომის დეფორმაციის ცვლილებასა და დაკვირვების ხანგრძლივობის დამოკიდებულებას შორის.

ამ სერიის ნიმუშების ბეტონისათვის აღნიშნული დამოკიდებულების სიდიდეების გაზნევის დისპერსია გაზრდილია 3კ სერიის ნიმუშებთან შედარებით [43].



ნახ.4.6. ჯდომისას დეფორმაციის ცვლილების ექსპერიმენტალური მრუდები 4კ სერიისათვის

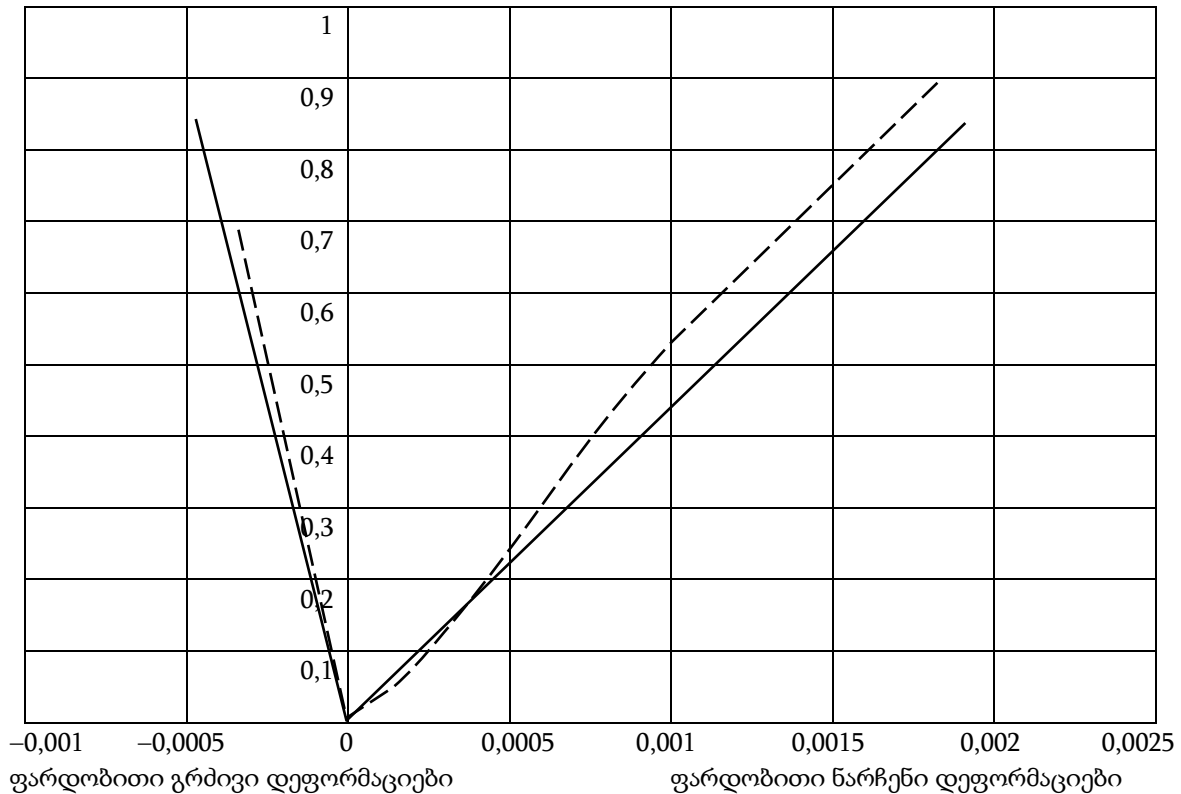


ნახ.4.7. ჯდომისას დეფორმაციის ცვლილების ექსპერიმენტალური მრუდები 5კ სერიისათვის

ეს უკანასკნელი ისევ შემცირებულია 3კ სერიის ნიმუშებისათვის გაბნევის დისპერსიის მსგავსად (ნახ.4.7).

საცდელი ნიმუშების ბეტონის ჯდომის დეფორმაციის სიდიდე დაკავშირებულია ბზარების წარმოქმნასთან. აღსანიშნავია აგრეთვე, რომ აღნიშნული დეფორმაციის გაბნევის დისპერსია დაკავშირებულია მოდიფიკატორის შემცველობაზე საკვლევ ბეტონში.

მოდულიკატორის გავლენა ბეტონში ჯდომის დეფორმაციაზე უფრო თვალსაჩინოდ წარმოდგენილია ნახ.4.8-ზე. ბეტონში მოდიფიკატორის სხვადასხვა შემცველობის (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%) გავლენას ჯდომის ზღვრულ დეფორმაციაზე ვაკვირდებით 180 დღე-ღამის განმავლობაში.



ნახ.4.8. დეფორმაციის დიაგრამა 20% 3კ სერიის ნიმუშებისათვის ფარდობითი დამაბულობის დონე

ამ გრაფიკიდან ჩანს, რომ მოდიფიკატორის დოზირების გაზრდით 10%-დან 50%-მდე ჯდომის ფარდობითი დეფორმაცია იზრდება თითქმის 2-ჯერ: 54×10^{-5} -დან 93×10^{-5} -მდე.

მოდულიკატორების გარეშე სერიისათვის (ტრადიციული ბეტონისათვის), ჯდომის დეფორმაციები, 10%-ით მოდიფიკატორის შემცველ ნიმუშების ბეტონის დეფორმაციის მაჩვენებლებს უტოლდება.

მოდულიკატორის 10%-ის და 20%-ის შემცველი წვრილმარცვლოვანი ბეტონის (ღორღის გარეშე შემავსებლით) და მოდიფიკატორის 20%-ის შემცველი მძიმე ბეტონის (შემავსებელში ღორღის დამატებით) ფარდობითი ჯდომის დეფორმაციები განსხვავდება ერთმანეთისაგან, შესაბამისად 10% და 50%-ით.

გამოცდის შედეგებით ვგებულობთ, რომ ჯდომის ფარდობითი დეფორმაციის უმცირესი მნიშვნელობა აქვს ახალი თაობის წვრილმარცვლოვან ბეტონს, მოდიფიკატორის 20%-იანი დანამატით. ასეთივე ჯდომის დეფორმაციით ხასიათდება მაღალი სიმტკიცის წვრილმარცვლოვანი ტრადიციული ბეტონი (მოდიფიკატორის 0%-ის შემცველობით).

4.4. ბეტონის სიმტკიცე ღერძულ გაჭიმვასა და კუმშვაზე

სიმტკიცე ღერძულ გაჭიმვაზე და კუმშვაზე განსაზღვრულ იქნა ნიმუშების ოთხი სერიისათვის 1კ, 2კ, 3კ და 5კ. კუმშვაზე გამოცდილი იქნა 10×10×10 სმ და 15×15×15 სმ ზომის ბეტონის კუბები, ხოლო ღერძულ გაჭიმვაზე გამოცდილი იყო 10×10×40 სმ ზომის ბეტონის პრიზმები. კუმშვაზე გამოცდისათვის დამზადებული იყო ბეტონის კუბები, თითოეული სერიისათვის 5-5 ნიმუში. ღუნვაზე გამოცდისათვის თითოეული სერიისათვის დამზადებული იყო 2-2 ნიმუში. გამოცდის შედეგები მოცემულია ცხრილში 4.2, ხოლო ცხრილში 4.1 მოცემულია წინასწარი გამოცდის შედეგები ღუნვაზე, რისთვისაც წინასწარ იყო დამზადებული თითოეული სერიისათვის ორ-ორი პრიზმა 10×10×40 სმ. გამოცდის წინასწარმა გამოკვლევებმა აჩვენა ბეტონის აღნიშნული მაჩვენებლების უფრო დაწვრილებით გამოკვლევის აუცილებლობა (ცხრილი 4.2).

ცხრილი 4.1

ღუნვისას გამოცდის შედეგები

№	ნიმუშების სერია	მოდიფიკატორის პროცენტული შემცველობა	ნიმუშების ასაკი, დღე-ღამე	ერთეული მნიშვნელობა მპა	მრღვევი ძაბვის საშუალო მნიშვნელობა მპა	შენიშვნა
1	1კ	0%	28	6,4 6,89	6,65	ტრადიციული ბეტონი
2	2კ	10%	28	7,23 6,27	6,75	წვრილმარცვლოვანი ბეტონი
3	3კ	20%	28	7,57 9,42	8,5	წვრილმარცვლოვანი ბეტონი
4	5კ	20%	28	12,3 12,4	12,4	ბეტონი შემკვრელში ღორღის დამატებით

სიმტკიცის გამოცდის შედეგები

სერიაში მოდიფ. შემცვ.	სიმტკიცე კუმშვაზე, მპა 10×10×10 სმ		სიმტკიცე კუმშვაზე, მპა 15×15×15 სმ		სიმტკიცე ღერძულ გაჭიმვაზე, მპა 10×10×40 სმ		დრეკადობის საწყისი მოდული გაჭიმვისას $E_B \cdot 10^{-3}$ მპა	
	ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.	ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.	ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.	ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.
1კ	10,3 83,7 84,3 84,4 86,4	85,8	86,1 82,2 87,3 87,3 82,2	85,8	2,21 2,74 2,35	2,44	60,4 87,2 98,1	81,9
2კ	100,8 103,7 105,1 102,4 108,5	104,1	100,2 90,1 91,2 86,1 102,7	96,1	2,84 2,84 2,64	2,78	41,3 39,2 60,4	47,0
3კ	106,2 106,7 102,7 107,6 107,8	106,2	94,6 99,3 101,7 96,5 94,8	98,6	3,19 2,94 2,45	2,86	43,4 39,2 41,3	41,3
4კ	98,1 108,8 98,8 107,4 106,4	105,85	103,4 102,3 106,9 102,3 102,3	103,0	4,81 4,21 3,92	4,31	42,5 44,8 50,6	45,9

სიმტკიცე ღერძულ გაჭიმვაზე, როგორც ცხრილ 4.2-ში მოცემული კვლევის შედეგებიდან ჩანს, მძიმე ბეტონის სიმტკიცე 35%-ით მეტია წვრილმარცვლოვანი ბეტონის სიმტკიცეზე. ასევე სიმტკიცე გაჭიმვაზე ღუნვისას იყო უფრო დიდი, ვიდრე საშუალო მნიშვნელობა წვრილმარცვლოვანი ბეტონისათვის [44].

20%-მდე მოდიფიკატორის შემცველობის მქონე ბეტონის (3კ სერია) სიმტკიცე უფრო მაღალია, ვიდრე 10%-მდე მოდიფიცირებული ბეტონი (2კ სერია), შესაბამისად $\approx 3\%$ ღერძული გაჭიმვისას და 6% გაჭიმვაზე ღუნვისას, შეიძლება ჩავთვალოთ როგორც მნიშვნელოვანი. ღუნვის სიმტკიცის ფარდობა გაჭიმვაზე სიმტკიცესთან ბეტონისათვის ტოლია 1,40, ხოლო წვრილმარცვლოვანი ბეტონისათვის ტოლია 1,59-1,65.

ზღვრული დეფორმაციები მძიმე ბეტონისათვის იყო უდიდესი, ვიდრე გამოკვლეული წვრილმარცვლოვანი ბეტონებისა (50%-ით გაჭიმვისას და 25%-ით ღუნვისას). წვრილმარცვლოვანი ბეტონების ზღვრული დეფორმაციები დაახლოებით

ერთნაირია. გაჭიმვაზე ზღვრული დეფორმაციის ფარდობა ღუნვაზე ზღვრულ დეფორმაციასთან დაახლოებით ტოლია 0,3-ის.

დრეკადობის საწყისი მოდული იზომებოდა დატვირთვის $0,25 \pm 0,35 R_{bm}$ დონეზე.

ამ სიდიდეების გაზომვის დაბალი სიზუსტის გამო, მიღებული მონაცემების ფანტვის კოეფიციენტი მნიშვნელოვანია, მაგრამ ერთიანობაში დრეკადობის საწყისი მოდული გაჭიმვაზე აღმოჩნდა კუმშვაზე დრეკადობის საწყისი მოდულის ტოლი.

კუმშვაზე და ღუნვაზე გამოცდების პარალელურად (ცხრ. 4.3) ხდებოდა ნიმუშების გამოცდა გაჭიმვისას ღუნვაზე. ნიმუშები წარმოდგენილი იყო პრიზმის სახით $10 \times 10 \times 40$ სმ. ნიმუშების გამოცდის ხანგრძლივობა შეადგენდა 28 დღე-ღამეს.

ცხრილი 4.3

ღერძული და კუმშვის ფარდობითი სიმტკიცეების კვლევის შედეგი

საცდელი ნიმუშების სერია	პრიზმა $10 \times 10 \times 40$ სმ				კუმშვის სიმტკიცის ფარდობა, ღერძული გაჭიმვის სიმტკიცესთან	ღერძული გაჭიმვის ფარდობითი დეფორმაციის ფარდობა, გაჭიმვაზე კუმშვისას ფარდობით დეფორმაციასთან
	ღერძული გაჭიმვა		სიმტკიცე კუმშვაზე			
	ზღვრული ფარდობითი დეფორმაცია $\times 10^{-5}$					
	ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.	ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.		
1კ	6,3	7,6	4,27	4,02	1,65	0,373
	9,3		6,82			
	7,3		3,97			
2კ	6,08	8,32	4,71	4,41	1,59	0,295
	9,5		4,27			
	9,38		4,27			
3კ	8,4	7,74	5,3	4,71	1,65	0,279
	9,06		4,85			
	5,75		3,97			
4კ	13,22	12,05	6,03	6,03	1,4	0,339
	13,15		6,03			
	9,78		6,03			

როგორც ცხრილ 4.2 და ცხრილ 4.3-დან ჩანს, გამოცდის შედეგები მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან, მიუხედავად იმისა, რომ ნიმუშები და მათი გამოცდის მეთოდის იყო ერთნაირი; განსხვავების მიზეზი შეიძლება იყოს განყალიბებიდან გამოცდამდე ნიმუშების შენახვის განსხვავებული პირობები. საცდელი ბეტონის პრიზმები განყალიბების შემდეგ განთავსებული იყო ნორმალური პირობების კამერაში ფაქტიურ ფარდობით ტენიანობაზე 100% და იმყოფებოდნენ გამოყოფილი კონდენსატების თხელი ფენის ქვეშ. ამ პირობებიდან შენაცვლებით

გამოგვექონდა მიკროკლიმატის კამერიდან ნიმუშები და ინახებოდა ოთახის ტემპერატურაზე 60-80% ტენიანობაზე.

გამყარების კამერიდან გამოტანილ ნიმუშებზე შემდგომი შენახვის პირობების გამოკვლევის მიზნით, დამზადებული იქნა დამატებით 2კ სერიის ნიმუშები. ჯერ მოხდა ორი ნიმუშის შრობა, შემდგომ კი ისინი გამოიცადა გაჭიმვით ღუნვაზე მოკლევადიან დატვირთვაზე (კამერიდან გამოტანიდან 5-25 წთ-ში), ხოლო დანარჩენი ორი ნიმუში დავაყოვნეთ $\approx 20^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურაზე და 60-70% ფარდობით ტენიანობაზე ოთხი დღის განმავლობაში. ამის შემდეგ ისინი გამოიცადა იმავე მეთოდით. მიღებული შედეგები მოცემულია ცხრილში 4.4.

ცხრილი 4.4.

სხვადასხვა პირობების გავლენა გაჭიმვაზე ღუნვისას

ნიმუშების სერიის პროცენტული შემადგენლობა	გაჭიმვა-ღუნვისას პრიზმის ზომები 15×15×60 სმ			
	გაშრობისთანავე გაზომილი სიმტკიცე, მპა		სიმტკიცე 4 დღე-ღამის გამოშრობის შემდეგ, მპა	
	ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.	ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.
2კ (10% ბმქ-კ)	11,64 10,64	11,14	5,02 5,83	5,43

გამოცდის შედეგებმა აჩვენა, რომ სიმტკიცე გაჭიმვაზე ღუნვისას მცირდება დაახლოებით 2-ჯერ.

ამიგად, გამოცდამდე ნიმუშების შენახვის პირობები ახდენენ მნიშვნელოვან გავლენას გაჭიმვა-ღუნვის სიმტკიცეზე. ამ გარემოებით შეიძლება აიხსნას ცხრილში 4.1, ცხრილში 4.2, ცხრილში 4.3 და ცხრილში 4.4. სიმტკიცის მნიშვნელოვანი განსხვავებები.

შენახვის პირობებით განსხვავებული ნიმუშები გამოცდილ იქნა კუმშვაზე. ამ ნიმუშების დრეკადობის საწყისი მოდულების უმეტესი სერიისათვის, ასევე განსხვავებულია (ცხრ.4.5). ამასთან ადგილი აქვს კანონზომიერებას, ნიმუშების შენახვას ნორმალური გამაგრების კამერაში, პრაქტიკულად გამოცდამდე აქვთ შედარებით მაღალი დრეკადობის საწყისი მოდულის მნიშვნელობები.

ტრადიციულ ბეტონებში აღნიშნული მოვლენები ადრეც გვხვდებოდა. ექსპერიმენტული მონაცემებიდან, რომელიც გვხვდება სხვადასხვა ავტორების მიმოხილვიდან [66] ჩანს, რომ გაჭიმვაზე და ღუნვაზე სიმტკიცე ნიმუშების ტენიანობის შემცირებით მცირდება.

ამ მოვლენის ერთ-ერთი შესაძლო ახსნა შეიძლება იყოს ტენიანობით ბეტონის ნიმუშების ზედაპირზე წარმოქმნილი წყლის შრის შედეგად სინოტივის გრადიენტი და მისგან გამოწვეული გამჭიმავი დაძაბულობის მეორეული ველი ნიმუშის ზედაპირულ ფენაზე [16] და ამ ველთან დაკავშირებული შესაძლო მიკრობზარები.

ცხრილი 4.5.

დრეკადობის საწყისი მოდული და პუასონის კოეფიციენტი

სერიის მარკირება მოდიფიკატორის პროცენტული შემცველობა	ბეტონის ხნოვანება დღე-ღამე	პრიზმები ზომით 10×10×40 სმ					
		პრიზმული სიმტკიცე, მპა		დრეკადობის საწყისი მოდული, $E_B \cdot 10^{-3}$ მპა		პუასონის კოეფიციენტი	
		ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.	ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.	ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.
1კ (0% ბმქ-კ)	34	74,7	79,3	45,5	43,9	0,273	0,275
	34	79,3		44,4		0,273	
	34	74,1	7,99%	41,9	4,9%	0,280	1,56%
	35	ხანგრძლივად		39,9	38,2	0,232	0,225
	35	დატვირთული		36,7		0,223	
	35	ნიმუშების სერია		37,1	5,09%	0,215	3,4%
2კ (10% ბმქ-კ)	34	85,4	81,0	44,5	44,2	0,206	0,223
	34	82,2		43,9		0,237	
	34	75,5	7,2%	44,2	0,9%	0,225	8,2%
	35	ხანგრძლივად		44,6	44,1	0,256	0,27
	35	დატვირთული		42,7		0,274	
	35	ნიმუშების სერია		45,0	3,1%	0,280	5,3%
3კ (20% ბმქ-კ)	32	76,8	74,9	43,2	44,1	0,284	0,283
	32	72,9		45,3		0,303	
	32	64,3	3,1%	44,7	2,9%	0,261	8,8%
	36	ხანგრძლივად		44,9	41,8	0,248	0,243
	36	დატვირთული		41,4		0,245	
	36	ნიმუშების სერია		42,3	4,7%	0,241	2,4%
4კ (50% ბმქ-კ)	34	66,7	63,7	41,3	40,3	0,250	0,24
	34	63,1		39,3		0,232	
	34	61,3	5,0%	40,1	2,9%	0,239	4,4%
	36	ხანგრძლივად		39,2	39,1	0,234	0,243
	36	დატვირთული		38,8		0,252	
	36	ნიმუშების სერია		39,2	0,7%	0,244	4,4%
5კ (20% ბმქ-კ) ღორღის დანამატი	34	76,1	68,2	36,9	37,1	0,265	0,258
	34	69,0		36,3		0,261	
	34	64,1	6,6%	38,1	2,8%	0,251	2,8%
	36	ხანგრძლივად		37,7	37,6	0,251	0,25
	36	დატვირთული		37,7		0,261	
	36	ნიმუშების სერია		37,4	0,1%	0,248	1,2%

მოდიფიკატორის შემცველ ბეტონს გააჩნია დაბალი შეღწევადობა, რომელიც მცირდება მოდიფიკატორის შემცველობის გაზრდასთან ერთად, ამის გამო ტენიანობის წარმოქმნილი ფენის გრადიენტიც იზრდება და მასთან ერთად ბეტონის ჯდომის დაძაბულობებიც იზრდება.

ტრადიციული ბეტონების შეღწევადობა მნიშვნელოვნად მაღალია და შესაძლებელია ტენიანობის ჯდომით გამოწვეული დაძაბულობის ვარდნა იყოს ნაკლები, ამიტომ აღნიშნული მოვლენები არ გამოვლენილა შესამჩნევად.

ბეტონის 50%-მდე მოდიფიკატორის შემცველობისას (4კ სერიის ნიმუშები) მასშტაბის კოეფიციენტები იყო უფრო მცირე, ვიდრე ბეტონის უფრო ნაკლები მოდიფიკატორის შემცველობისას. ამ უკანასკნელებისათვის მასშტაბის კოეფიციენტი ერთზე მეტია (ცხრ. 4.6). ეს შეიძლება აიხსნას იმით, რომ ბეტონის ზედაპირული ფენები შედარებით სუსტია, ვიდრე ბეტონის შიგა ფენები, მაგრამ ერთი და იგივე სერიის ნიმუშების ბეტონისათვის, ეს ფენა უნდა იყოს ერთნაირი სიღრმის, რადგანაც ეს დამოკიდებულია მარკაზე და წყალგაუმტარებლობის ხარისხზე, რომელიც ერთი და იმავე სერიის ბეტონისათვის ერთნაირია. ამგვარად, მიიღება მტკიცე ბირთვი, რომელიც უფრო მეტია 15 სმ წიბოს მქონე კუბებისათვის.

ცხრილი 4.6

დამატებითი სერიის ნიმუშების დრეკადობის საწყისი მოდული

№	მოდიფიკატორის პროცენტული შემცველობა	დრეკადობის საწყისი მოდული $E_B \cdot 10^{-3}$ მპა	
		ცალკეული მნიშვნ.	საშუალო მნიშვნ.
1	0% ბმქ-კ	30,5	-
2	5% ბმქ-კ	44,4	40,8
		37,7 40,4	
3	10% ბმქ-კ	47,5	45,0
		42,4	
4	15% ბმქ-კ	41,3	41,3
		41,4	
5	20% ბმქ-კ	40,1	41,7
		43,5	
		41,5	
6	ცემენტს + 20% ბმქ-კ	21,8	21,2
		24,0	
		17,9	

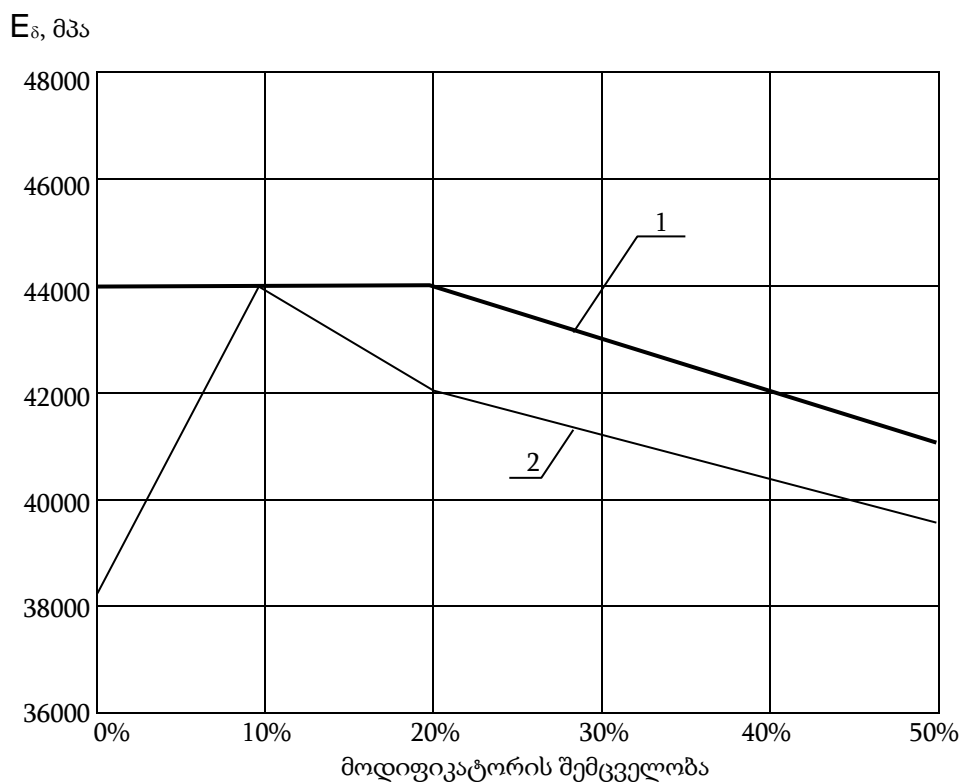
კუმშვის სიმტკიცის განსაზღვრისას, კუბის განივი კვეთის სიდიდე შედის კუბების ფორმულაში, ამიტომ კვეთის შემცირების გამო წარმოიქმნება გამჭიმავი ძაღვების დამატებითი ველი, რომელიც ძლიერ მოქმედებს კუმშვის სიმტკიცეზე, ვიდრე სხვა სიმტკიცის მდგომარეობაზე.

4.5. დრეკადობის საწყისი მოდული და პუასონის კოეფიციენტი

28 დღე-ღამის ხანგრძლივობის მოკლევადიან დატვირთვაზე დრეკადობის საწყისი მოდულის და პუასონის კოეფიციენტის გაზომილი მონაცემები მოყვანილია ცხრ. 4.5 და ნახ.4.8-ზე.

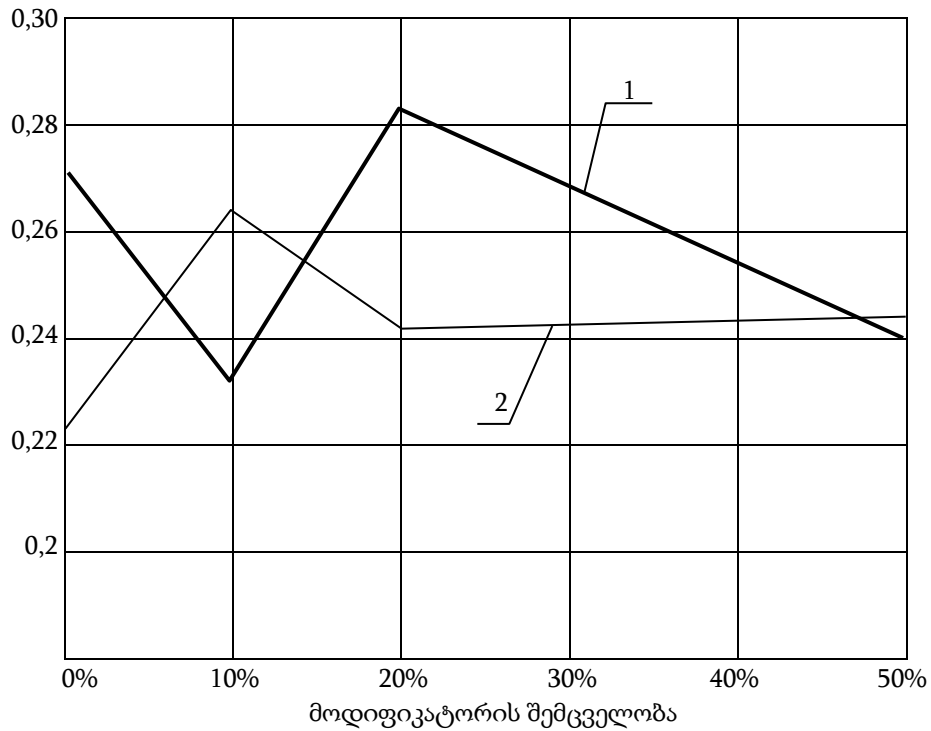
დარღვეული (დაშლილი) და ხანგრძლივ დატვირთვაზე დაყენებული ნიმუშების გამოცდის მონაცემები პრაქტიკულად ემთხვევა ერთმანეთს [45, 56, 47].

მოდულიკატორის დაბალი შემცველობის ბეტონის ნიმუშების გამოცდის შედეგები მოცემულია ცხრ.4.6-ში და ნახ.4.9-ზე. ნიმუშების დატვირთვის ქვეშ ყოფნის ხანგრძლივობა შეადგენდა ≈ 28 დღე-ღამეს.



ნახ.4.9. დრეკადობის საწყისი მოდულის ცვლილება მოდულიკატორის დოზირებაზე დამოკიდებულებით

ნახ.4.9.-ზე დრეკადობის მოდულის ცვლილება (1) შეესაბამება ბეტონის ნიმუშების სერიის ხანმოკლე დატვირთვას 28 დღე-ღამის განმავლობაში. დრეკადობის მოდულის (2) სახის ცვლილება შეესაბამება ხანგრძლივი დატვირთვის რეჟიმს.



ნახ.4.10. მონაცემები პუასონის კოეფიციენტზე მოდიფიკატორის დოზირებაზე დამოკიდებულებით

უნდა აღინიშნოს, რომ ხანმოკლე დატვირთვაზე (28 დღე-ღამე) გამოცდილი ბეტონის ნიმუშების სერიის დრეკადობის საწყისი მოდულის მრუდი და ხანგრძლივ დატვირთვაზე გამოცდილი ნიმუშების დრეკადობის საწყისი მოდულის მრუდები განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან, მაგრამ ორივე შემთხვევაში მრუდების (1) და (2) ცვლილებაში კანონზომიერება შენარჩუნებულია. თუმცა ცოცვადობაზე გამოცდილ ნიმუშებში დრეკადობის საწყისი მოდული დაბალია (ერთი და იგივე სერიის ნიმუშების შემთხვევაში). შედარებით დიდი განსხვავება შეიმჩნევა მოდიფიკატორის გარეშე მომზადებული ბეტონის საკონტროლო (1კ სერია) ნიმუშებში ($\approx 12\%$), ხოლო მძიმე ბეტონში (5კ სერია) განსხვავებამ შეადგინა $\approx 8\%$. 20%-მდე მოდიფიცირებულ ბეტონებში სხვაობამ შეადგინა 6%, ხოლო 50%-იანი მოდიფიცირების შემცველ ნიმუშების სერიაში (4კ) დრეკადობის საწყისი მოდულის სხვაობამ შეადგინა 3%. რაც შეეხება 10%-იან მოდიფიცირებულ ბეტონებს, მათში განსხვავება პრაქტიკულად არ შეინიშნება.

ჩვენი ვარაუდით, ზემოთ აღწერილი შედეგები განპირობებულია ბეტონის ნიმუშების სერიის განყალიბებიდან გამოცდამდე შენახვის განსხვავებული პირობებით. მოკლევადიან დატვირთვაზე 28 დღე-ღამის განმავლობაში ნიმუშების

სერია ინახებოდა ნორმალური პირობების კამერაში 100%-იანი ტენიანობით, რომელთა ზედაპირი დაფარული იყო მასზე კონდენცირებული წყლის თხელი ფენით. ნიმუშები გამოგვექონდა კამერიდან გამოცდამდე ერთი დღე-ღამით ადრე. ნიმუშების სერია, რომლებიც განკუთვნილი იყო ხანგრძლივ დატვირთვაზე გამოსაცდელად ნორმალური პირობების კამერიდან გამოგვექონდა 10-14 დღე-ღამის შემდეგ და შემდგომ ინახებოდა ჩვეულებრივ ტემპერატურაზე და ტენიან ნახერხში. ე.ი. ნიმუშები ინახებოდა შედარებით დაბალ ტენიანობაზე, ვიდრე ნორმალური გამაგრების კამერაში. როგორც ჩანს, ნიმუშების გამოცდაზე შენახვის აღწერილმა პირობებმა იმოქმედა იმ პროცესზე, რომელიც მიმდინარეობს ბეტონის დამკვლევებისას და ნიმუშების ბეტონის დრეკადობის საწყის მოდულზე, 28 დღე-ღამის ასაკში, გამოცდის შედეგებზე.

მიღებული შედეგებიდან გამომდინარეობს, რომ დრეკადობის საწყისი მოდულის მიხედვით 28-34 დღე-ღამის ასაკში ყველაზე უფრო ოპტიმალურად ითვლება ბეტონები 20%-იანი მოდიფიკატორის (ბმქ-კ) შემცველობით. მისი მოდული უტოლდება მსხვი (ღორღის) შემვსებზე დამზადებულ ბეტონებს, მოდიფიკატორის შემცველობით 20%. მოდიფიკატორის შემცველი ბეტონებიდან ერთ სერიაში 4%-ით დაბალია, ხოლო მეორე სერიაში კი 4,2%-ით მაღალია, ვიდრე ბეტონისა (5კ) მსხვილ შემვსებზე.

მიღებული ექსპერიმენტული მონაცემებიდან ჩანს აგრეთვე, რომ პუასონის კოეფიციენტი ნიმუშებისათვის, გამოცდილი მოკლევადიან დატვირთვაზე (28 დღე-ღამის ასაკში) და ნიმუშებისათვის ხანგრძლივ დატვირთვაზე ერთმანეთისაგან განსხვავდებიან $\approx 10\%$ -ის ფარგლებში, ამასთან კოეფიციენტის მინიმალური მნიშვნელობა შეადგენს 0,23-ს, მაქსიმალური 0,28-ს, ხოლო საშუალო 0,25, რაც მეტია სტანდარტით დადგენილ 0,2 სიდიდეზე.

4.6. ღერძულ გაჭიმვაზე და გაჭიმვაზე ღუნვისას ბეტონის სიმტკიცის ცვლილება მოკლევადიანი დატვირთვისას

შემოთავაზებული ახალი შემადგენლობის ბეტონის სიმტკიცის ცვლილება მოკლევადიანი დატვირთვისას (230 და 280 დღე-ღამის განმავლობაში) მოცემულია ცხრილში 4.7 და ცხრილში 4.8. საცდელი 2კ, 3კ, 5კ სერიის ნიმუშები წარმოდგენილი იყო 10×10×40 სმ პრიზმის სახით. აღნიშნული სერიის ნიმუშების გამოცდა ხდებოდა ბეტონის ღერძულ გაჭიმვაზე, სიმტკიცის ცვლილების დადგენის მიზნით (ცხრ.4.7, ცხრ.4.8), აგრეთვე სხვა ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების განსაზღვრისათვის. ხოლო 2კ, 3კ, 5კ ნიმუშების სერიის ბეტონის გაჭიმვაზე ღუნვისას განსაზღვრული სიმტკიცის ცვლილება და სხვა ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები მოცემულია ცხრილში 4.9 და ცხრილში 4.10.

ამ ცხრილებიდან ჩანს, რომ ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები მითითებული სერიის ნიმუშებში 7-8 თვის გამყარების შემდეგ პრაქტიკულად არ იცვლება. 1-2- თვის განმავლობაში გამაგრების შემდეგ კი - აღნიშნული მახასიათებლები მკვეთრად იცვლება.

ცხრილი 4.7

ღერძულ გაჭიმვაზე ბეტონის სიმტკიცის ცვლილება ≈230 დღე-ღამის ასაკში

ნიმუშების სერია, მოდიფიკატორის %-ული შემცველობა	ასაკი დღე-ღამე	პრიზმები 10×10×40 სმ					
		ღერძული გაჭიმვისას					
		სიმტკიცე მპა		გაჭიმვისას დრეკადობის საწყისი მოდული $E_{Br} \cdot 10^{-3}$ მპა		ზღვრული ფარდობითი დეფორმაცია $\epsilon \times 10^{-5}$	
		ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.	ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.	ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.
3კ (20% ბმქ-კ)	220	2,45	2,42	43,4	47,3	6,51	7,98
		2,45		46,3		8,78	
		2,45		52,2		8,64	
5კ (20% ბმქ-კ, ღორღის დანამატით)	230	2,16	2,42	41,2	41,3	5,7	6,19
		2,74		43,4		6,8	
		2,35		39,2		6,04	
2კ (10% ბმქ-კ)	240	2,55	2,42	43,4	46,9	7,71	6,02
		2,74		49,1		7,33	
		1,96		55,7		4,5	

ცხრილებში 4.7, 4.8, 4.9 და 4.10 მოყვანილი ექსპერიმენტული მონაცემების

საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ:

ცხრილი 4.8

ღერძულ გაჭიმვაზე ბეტონის სიმტკიცის ცვლილება ≈ 280 დღე-ღამის ასაკში

ნიმუშების სერია, მოდიფიკატორის %-ული შემცველობა	ასაკი დღე-ღამე	პრიზმები $10 \times 10 \times 40$ სმ					
		ღერძული გაჭიმვისას					
		სიმტკიცე მპა		გაჭიმვისას დრეკადობის საწყისი მოდული $E_{Br} \cdot 10^{-3}$ მპა		ზღვრული ფარდობითი დეფორმაცია $\epsilon \times 10^{-5}$	
		ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.	ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.	ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.
3კ (20% ბმქ-კ)	270	6,13	5,89	45,4	48,9	13,55	13,54
		5,64		49,1		13,41	
		5,89		52,3		13,07	
5კ (20% ბმქ-კ)	275	4,66	4,66	38,3	38,6	12,2	12,38
		4,41		37,3		11,96	
		4,91		40,2		12,47	
2კ (10% ბმქ-კ)	275	5,4	5,4	44,8	45,4	12,51	12,12
		5,4		43,6		12,33	
		5,4		46,7		11,52	

ცხრილი 4.9

ლუნვისას გაჭიმვაზე ბეტონის სიმტკიცის ცვლილება ≈ 230 დღე-ღამის ასაკში

ნიმუშების სერია, მოდიფიკატორის %-ული შემცველობა	ასაკი დღე-ღამე	პრიზმები $10 \times 10 \times 40$ სმ				ლუნვის სიმტკიცის ფარდობა ღერძულ გაჭიმვაზე სიმტკიცესთან	ღერძული გაჭიმვისას ზღვრული დეფორმაციის ფარდობა დეფორმაციაზე ლუნვისას
		გაჭიმვა ლუნვისას					
		სიმტკიცე მპა		გაჭიმული ბოჭკოს ზღვრული ფარდობითი დეფორმაცია $\epsilon \times 10^{-5}$			
		ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.	ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.		
3კ (20% ბმქ-კ)	220	4,71	4,71	26,75	20,25	1,95	0,394
		4,71		13,75			
5კ (20% ბმქ-კ), ლორღის დანამატით	230	6,47	5,89	20,0	20,0	2,43	0,31
		5,29		20,0			
2კ (10% ბმქ-კ)	240	4,41	4,27	11,75	13,88	1,76	0,434
		4,12		16,0			

შემოთავაზებული მოდიფიკატორის - ზესტაფონის ფეროშენადნობთა ქარხნის წიდის ნარჩენების, აგრეთვე აირდამჭერ ფილტრებში დაგროვილი მტვრის 10%-იანი და 20% ბეტონის ნარევი დამატებით 2კ და 3კ სერიის ნიმუშებში ბეტონის სიმტკიცე ღერძულ გაჭიმვაზე, ლუნვისას გაჭიმვაზე, ლუნვის სიმტკიცის ფარდობა ღერძულ

გაჭიმვაზე სიმტკიცესთან, ღერძული გაჭიმვისას ზღვრული დეფორმაციის ფარდობა დეფორმაციაზე ღუნვაზე გაჭიმვისას, გაჭიმვისას დრეკადობის საწყისი მოდული და ზღვრული ფარდობითი დეფორმაცია პრაქტიკულად ისეთივეა, როგორც ამავე მოდიფიკატორის 20%-იანი შემცველობის მძიმე ბეტონის (ნარევი ქვიშასთან ერთად ღორღის შემცველი) სიმტკიცე და ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები.

ცხრილი 4.10

ღუნვისას გაჭიმვაზე ბეტონის სიმტკიცის ცვლილება ≈ 280 დღე-ღამის ასაკში

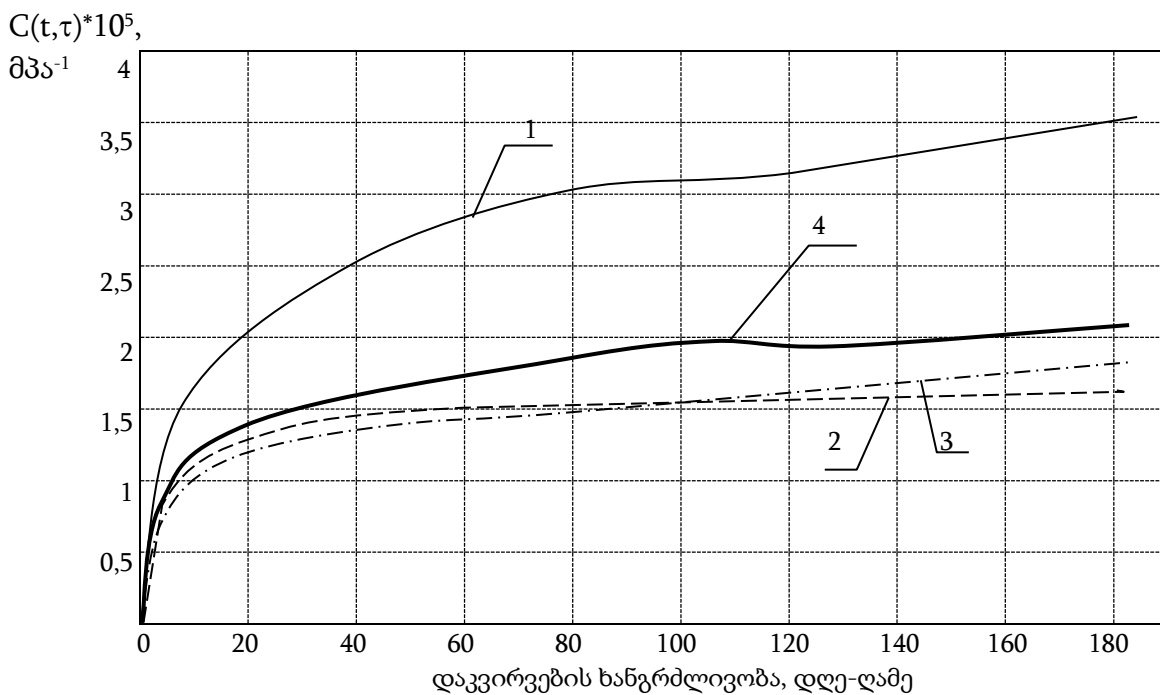
ნიმუშების სერია, მოდიფიკატორის %-ული შემცველობა	ასაკი დღე-ღამე	პრიზმები 10×10×40 სმ				ღუნვის სიმტკიცის ფარდობა ღერძულ გაჭიმვაზე სიმტკიცესთან	ღერძული გაჭიმვისას ზღვრული დეფორმაციის ფარდობა დეფორმაციაზე გაჭიმვა ღუნვისას
		გაჭიმვა ღუნვისას					
		სიმტკიცე მპა		გაჭიმული ბოჭკოს ზღვრული ფარდობითი დეფორმაცია $\times 10^{-5}$			
		ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.	ცალკ. მნიშვნ.	საშ. მნიშვნ.		
3კ (20% ბმქ-კ)	270	8,83 9,41	9,12	2,21 25,78	23,94	1,55	0,557
5კ (20% ბმქ-კ)	275	10,0 9,41	9,71	27,75 25,75	26,75	2,08	0,463
2კ (10% ბმქ-კ)	275	8,24 8,83	8,53	24,75 22,58	23,63	1,58	0,513

აღნიშნული მახასიათებლებით, შემოთავაზებული ტექნოლოგიით დამზადებული ბეტონი თავისი ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლებით არ ჩამოუვარდება სხვა სახის არსებულ მოდიფიცირებულ ბეტონებს [48, 49].

4.7. ღერძულ გაჭიმვაზე და გაჭიმვაზე ღუნვისას ცოცვადობის დეფორმაციის ექსპერიმენტული განსაზღვრა

გაჭიმვისას და ღუნვისას ცოცვადობის დეფორმაციების შედარებითი შეფასებისათვის გამოცდილ იქნა ოთხი სერიის ნიმუშები: 1კ, 2კ, 3კ და 5კ. ამ ნიმუშებიდან 2კ და 3კ სერიის ნიმუშები შეირჩა, როგორც საუკეთესო მაჩვენებლების მქონე: სიმტკიცეზე, კუმშვაზე, ღუნვაზე, ღერძულ გაჭიმვაზე, გაჭიმვისას დრეკადობის საწყისი მოდულით, ზღვრულ ფარდობით დეფორმაციაზე, ღუნვის

სიმტკიცის ფარდობით ღერძულ გაჭიმვაზე სიმტკიცესთან და სხვა ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლებით. ამ თვისებების მიხედვით შედარებით კიდევ უფრო უკეთესი მაჩვენებლები აქვს 3კ სერიის ნიმუშებს. 1კ და 5კ სერიის ნიმუშები ცოცვადობის დეფორმაციის განსაზღვრისათვის შეირჩა იმისათვის, რომ შეგვედარებია 2კ და 3კ სერიის ნიმუშების მაჩვენებლები ცოცვადობის დეფორმაციის მიხედვით, ჩვეულებრივ ტრადიციულ წვრილმარცვლოვანი (1კ) და შემოთავაზებული მოდიფიკატორით 20%-მდე შემცველობის მძიმე ბეტონის (5კ სერიის ნიმუშები), ცოცვადობის დეფორმაციების მიხედვით. ექსპერიმენტის შედეგები მოცემულია ნახ.4.11-ზე, სადაც (1) მრუდი შეესაბამება არამოდიფიცირებულ ტრადიციულ წვრილმარცვლოვანი ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის ცვლილებას დაკვირვების 180 დღე-ღამის ხანგრძლივობისას.



ნახ.4.11. ცოცვადობის ზომის ცვლილება დროში მოდიფიკატორის სხვადასხვა შემცველობისას

ნახ.4.11-ზე (2) მრუდი შეესაბამება 10%-მდე მოდიფიკატორის შემცველ ნიმუშების სერიას. ნახ.4.11-ზე (3) მრუდი შეესაბამება 20%-მდე მოდიფიკატორის შემცველი ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის ცვლილებას დროში. მრუდი (4) შეესაბამება 20%-მდე მოდიფიკატორის შემცველ მძიმე ბეტონის (ქვიშასთან ერთად ღორღის შემცველი ნიმუშები) ცოცვადობის დეფორმაციის ცვლილებას დროში (180 დღე-ღამის განმავლობაში).

როგორც ნახ.4.11-ზე მოცემული მრუდების შედარებიდან ჩანს, ცოცვადობის დეფორმაციის ცვლილებისას დროში (180 დღე-ღამის განმავლობაში) ყველაზე დიდი მნიშვნელობები ცოცვადობის დეფორმაციის, შეესაბამება (1) მრუდს. ე.ი. წვრილმარცვლოვან ტრადიციულ ბეტონის 1კ სერიის ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაცია დიდია დანარჩენი 2კ, 3კ და 4კ სერიის ნიმუშების ბეტონთან შედარებით. (2) და (3) მრუდებიდან ჩანს, რომ 2კ და 3კ სერიის ნიმუშების ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაცია პრაქტიკულად ერთნაირია და ისინი მცირედ განსხვავდება (4) მრუდით წარმოდგენილ მძიმე ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციაზე (4კ სერიის ნიმუშები).

ამრიგად, ცოცვადობის დეფორმაციის დროში ცვლილების მიხედვით, საუკეთესო ექსპერიმენტული შედეგი მიღებული იქნა 2კ, 3კ (შესაბამისად 10%-ით და 20%-ით) მოდიფიცირებული ნიმუშების ექსპერიმენტული მონაცემებით, რაც იმას ნიშნავს, რომ ამ სერიის ნიმუშების ბეტონი ხასიათდება ბზარების წარმოქმნის მაღალი წინაღობით [50, 51].

ნახაზებზე 4.12, 4.13, 4.14 და 4.15 მოცემულია ექსპერიმენტის შედეგები ღერძული გაჭიმვისას ნარჩენ დეფორმაციაზე 2კ, 3კ, 4კ და 5კ სერიის ნიმუშების ბეტონისათვის (დანართი 1).

IV განყოფილების დასკვნები

1. III განყოფილებაში, საკვლევი სერიის ნიმუშების ცოცვადობაზე დეფორმაციის კვლევების მიხედვით გამოვლენილია საუკეთესო შემადგენლობის ორი სერია 2კ და 3კ. მიუხედავად მოდიფიკატორების განსხვავებული შემცველობისა შესაბამისად 10% და 20%-ისა, მოდიფიკატორის ბეტონში შემცველობის ცოცვადობის დეფორმაციაზე გავლენის შემდგომმა კვლევებმა აჩვენა:
 - მოდიფიკატორის ბეტონის შემადგენლობაში გაზრდით 10%-მდე მნიშვნელოვნად მცირდება ცოცვადობის ზომა $1,4 \times 10^5$ მპა⁻¹-მდე;
 - 10%-ს ზემოთ, ბეტონში მოდიფიკატორის გაზრდით 20%-მდე ცოცვადობის ზომა იზრდება $1,64 \times 10^5$ მპა⁻¹-მდე;

– მოდიფიკატორის შემდგომი გაზრდით 50%-მდე, ბეტონის ცოცვადობის ზომა უმნიშვნელოდ, მაგრამ მაინც იზრდება $\approx 2 \times 10^5$ მკა⁻¹-მდე.

2. გამოვლენილი იქნა მოდიფიკატორის (მბქ-კ) ოპტიმალური შემცველობის ბეტონი. იგი შეიძლება იცვლებოდეს 10%-დან 20%-მდე;
3. ბეტონის პრიზმული სიმტკიცის დროში ცვლილების კვლევებმა აჩვენა, რომ საკვლევი სერიის ნიმუშების პრიზმული სიმტკიცე შესაბამისობაშია მათ ცოცვადობის სიდიდეებთან. უფრო დაბალი ცოცვადობის დეფორმაციის მქონე სერიის (2კ, 3კ) ნიმუშების სიმტკიცე, სხვა დანარჩენი სერიის ნიმუშების (1კ, 4კ) სიმტკიცეზე მაღალია;
4. ბეტონის ჯდომის დეფორმაციის კვლევებმა აჩვენა, რომ მის დროსთან დამოკიდებულებას აქვს აღმავალი ხასიათი, დაახლოებით 48 დღე-ღამის ხანგრძლივობამდე; ამის შემდეგ იგი პრაქტიკულად უცვლელი რჩება. ცვლილების სიდიდე შეადგენს $50 \cdot 10^5$ -დან $80 \cdot 10^5$ -მდე. შედარებით მაღალია ბეტონის ჯდომის დეფორმაცია ე.წ. ტრადიციული ბეტონისათვის (1კ სერია) დიდია მონაცემების გაბნევის ველიც საშუალო მნიშვნელობასთან შედარებით. მცირეა აგრეთვე საშუალოდან გადახრის, მონაცემების გაბნევის ველი.

ჩატარებული კვლევები მიუთითებს, რომ 2კ სერიის ნიმუშების ბეტონებში მიკრობზარების წარმოქმნის წინალობა შედარებით მაღალია, ვიდრე სხვა სერიის ნიმუშების ბეტონისათვის;

5. ექსპერიმენტებმა აჩვენა, რომ პრიზმული სიმტკიცე კუმშვაზე საკვლევი ბეტონისათვის დამოკიდებულია პრიზმული ნიმუშების ზომებზე. 10 სმ წიბოს მქონე კუბების სიმტკიცე ნიმუშების სერიისათვის 2კ, 3კ შესაბამისად არის 104,1 მკა და 106,2 მკა, ხოლო 15 სმ წიბოს კუბების 2კ, 3კ სერიის ნიმუშებისათვის ტოლია შესაბამისად 96,1 მკა და 98, 6 მკა.

პრიზმული სიმტკიცე ტრადიციული წვრილმარცვლოვანი და მძიმე ბეტონის კუმშვაზე 15, 5კ სერიის ნიმუშებისათვის, არაა დამოკიდებული საცდელი ნიმუშების ზომებზე და შეადგინა შესაბამისად 85,8 მკა და 105,0 მკა. ექსპერიმენტული მონაცემებით დასტურდება, რომ 2კ, 3კ წვრილმარცვლოვანი ბეტონის კუმშვაზე სიმტკიცე უტოლდება 5კ სერიის მძიმე ბეტონის სიმტკიცეს.

6. კვლევებმა აჩვენა, რომ საკვლევი 2კ, 3კ ბეტონების სიმტკიცე ღერძულ გაჭიმვაზე

უფრო მაღალია, შესაბამისად 2,78 მპა და 2,86 მპა, ვიდრე 1კ ნიმუშების სერიის ბეტონის სიმტკიცე 2,44 მპა.

დრეკადობის საწყისი მოდული 2კ, 3კ სერიის ნიმუშების ბეტონისათვის არის შესაბამისად $47,0 \cdot 10^{-3}$ მპა და $41,3 \cdot 10^{-3}$ მპა, ისინი ნაკლებია 1კ და პრაქტიკულად ტოლია 5კ სერიების ბეტონის გამოცდის შედეგებზე (რაც შეადგენს 81,9 მპა და 45,9 მპა-ს).

7. ექსპერიმენტულად განსაზღვრული იქნა პუასონის კოეფიციენტი ხუთივე სერიის 1კ, 2კ, 3კ, 4კ და 5კ ნიმუშების ბეტონისათვის, რომელიც ტოლია, შესაბამისად 0,275, 0,223, 0,283, 0,24, 0,258. ისინი აკმაყოფილებენ სტანდარტის მოთხოვნებს.

ზოგადი დასკვნები

1. ტრადიციული ბეტონების კვლევების ანალიზის საფუძველზე გამოვლენილია, რომ ცოცვადობის დეფორმაციის ცვლილების ხასიათი, ბეტონის მარკის გაზრდისას ღებულობს ექსპონენტას სახეს, რომლის ასიმპტოტა ბეტონის მარკის 200-ის ზემოთ ცვლილებისას, შეიძლება ჩათვლილი იქნას წრფესთან მიახლოებული. გამოვლენილი დამოკიდებულება შეიძლება გამოყენებული იქნას ტრადიციული ბეტონის წინასწარი შეფასების კრიტერიუმად, ხოლო ექსპონენტას წრფივი უბანი, ბეტონში ცოცვადობის დეფორმაციის მიხედვით, საჭირო ცემენტის შემცველობის განსაზღვრისათვის.
2. მაღალი სიმტკიცის მოდიფიცირებული ბეტონების კვლევების ანალიზის საფუძველზე შემოთავაზებულია მათი წინასწარი შეფასების კრიტერიუმი ე.წ. კვლევების განზოგადებული ემპირიული ინფორმაცია ცხრილის სახით. მისი საშუალებით ერთი კონკრეტული ექსპერიმენტის ცოცვადობის დეფორმაციის მიხედვით ბეტონი შეიძლება შედარდეს რომელიმე ცნობილ მაღალი სიმტკიცის ბეტონს.
3. ბეტონში ცოცვადობის დეფორმაციაზე, შემოთავაზებული მოდიფიკატორის პროცენტული შემცველობის გავლენის კვლევებმა აჩვენა, რომ მოდიფიკატორის გაზრდისას ცოცვადობა მცირდება და მინიმალურია 10%-მდე შემცველობისას. მოდიფიკატორის შემდგომი გაზრდით 50%-მდე ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაცია იზრდება.
4. ბმქ-კ მოდიფიკატორით მოდიფიცირებული ბეტონების პრიზმული სიმტკიცის დროში ცვლილების კვლევებმა აჩვენეს, რომ საკვლევი სერიის ნიმუშების ბეტონის სიმტკიცე შესაბამისობაშია მათი ცოცვადობის დეფორმაციის სიდიდესთან. კერძოდ, დაბალი ცოცვადობის დეფორმაციის მქონე სერიის ნიმუშების ბეტონის სიმტკიცე, უფრო მაღალი ცოცვადობის დეფორმაციის მქონე სერიის ნიმუშების ბეტონის სიმტკიცეზე მაღალია.
5. ბეტონის ჯდომის დეფორმაციის კვლევებმა აჩვენა, რომ შემოთავაზებული მოდიფიკატორის 10% და 20%-მდე შემცველობის ბეტონების ჯდომის დეფორმაციის სიდიდე დაბალია, ტრადიციული და 50%-მდე ბმქ-კ

მოდულიკატორის შემცველ ბეტონების ჯდომის დეფორმაციაზე. ასევე იგი დაბალია 20%-მდე მოდიფიკატორის შემცველ მძიმე ბეტონის ჯდომის დეფორმაციის სიდიდეზე.

6. ექსპერიმენტებმა აჩვენა, რომ პრიზმული სიმტკიცე კუმშვაზე დამოკიდებულია საკვლევი ბეტონების ნიმუშების ზომებზე. ექსპერიმენტული მონაცემებით დასტურდება, რომ 10%-მდე და 20%-მდე მოდიფიკატორის შემცველი წვრილმარცვლოვანი ბეტონების სიმტკიცე კუმშვაზე მაღალია და პრაქტიკულად არ ჩამოუვარდება 20%-მდე მოდიფიკატორის შემცველ მძიმე ბეტონის კუმშვის სიმტკიცის მონაცემებს.
7. განსაზღვრულია 10%, 20%-მდე მოდიფიკატორის შემცველი ბეტონების სიმტკიცე გაჭიმვაზე. იგი პრაქტიკულად უტოლდება ამავე მოდიფიკატორის 20%-მდე შემცველ მძიმე ბეტონის სიმტკიცეს.
8. ახალი მოდიფიკატორის შემცველ ბეტონებისათვის განსაზღვრულია პუასონის კოეფიციენტების და დრეკადობის საწყისი მოდულის კოეფიციენტების მნიშვნელობები. ისინი სრულ შესაბამისობაშია სხვა წვრილმარცვლოვანი მოდიფიცირებული ბეტონების ანალოგიურ მონაცემებთან.
9. ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების გამოვლენის მიზნით ჩატარებული ექსპერიმენტული კვლევები მიუთითებს იმაზე, რომ შემოთავაზებული ახალი მოდიფიკატორის 10% და 20%-ის ფარგლებში შემცველი ბეტონები ფლობენ უკეთეს ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებს და იგი არ ჩამოუვარდება ცნობილი მოდიფიცირებული ბეტონების ანალოგიურ მაჩვენებლებს.

ლიტერატურა

1. Берг О. Я., Щербаков Е. Н., Писенко Г. Н. Высокопрочный бетон. Стройиздат. 1971 г. - с. 69-83.
2. Железобетон в XXI веке. Состояние и перспективы развития бетона и железобетона в России. Москва, «Томир». 2001 г. - с. 52-67.
3. Каприелев С. С., Шейнфельд А. В., Силини Е. С., Жигулев Н. Ф., Бorigин С. Т. Высокопрочные бетоны повышенной морозостойкости с органоминеральным модификатором. Транспортное строительство. N1. 2000 г. - с. 24-27.
4. Сытник В. И. Исследование прочности деформативности и релаксации напряжений в высокопрочных бетонах. Бетон и железобетон, N7, 1962 г. - с. 297-302.
5. Сытник В. И., Иванов Ю. А. Усадка и ползучесть высокопрочных бетонов. Высокопрочные бетоны. Киев, 1967 г. - с. 84-89.
6. Мельник Р. А., Пацули А. Я. Исследование нелинейной ползучести высокопрочных бетонов. Бетон и железобетон, N3. 1973 г. - с. 39-40.
7. Мельник Р. А., Федорчук В. И., Лубенец И. И. Механические свойства высокопрочных бетонов марок 800 и 1000. Бетон и железобетоны, N8. 1975 г. - с. 7-10.
8. Методические рекомендации по исследованию усадки и ползучести бетона. МР1-75. Москва. НИИЖБ. 1975 г. - с. 75-87.
9. Щербаков Е. Н. О прогнозе величин деформаций ползучести и усадки тяжелый бетон. Труды ЦЕИИС, вып. 70., транспорт, 1969 г. - с. 141-162.
10. Щербаков Е. Н. Особенности ползучести бетона и способ прогнозирования этих деформаций. В сб.: Исследования прочности бетона и железобетонных конструкции. М.: ЦНИИС. 1992 г. - с. 27-34.
11. Щербаков Е. Н. Развитие практических методов учета ползучести и усадки бетона. Бетон и железобетон, N8, 1998 г. - с. 19-22.
12. Берг О. Я., Щербаков Е. Н., Прокопович И. Е., Застава М. М. К обоснованию единой методики нормирования деформации ползучести и усадки бетона. Изв. Вузов. Сер.: Строительство и Архитектура. N3. 1977 г. - с. 13-26.
13. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Москва, 1988 г. - с. 42-56.
14. Батраков В. Г. Модификаторы бетона – новые возможности. Материалы 1-ой всероссийской конференции по проблемам бетона и ж/б. Москва, 2001 г. - с. 17-25.

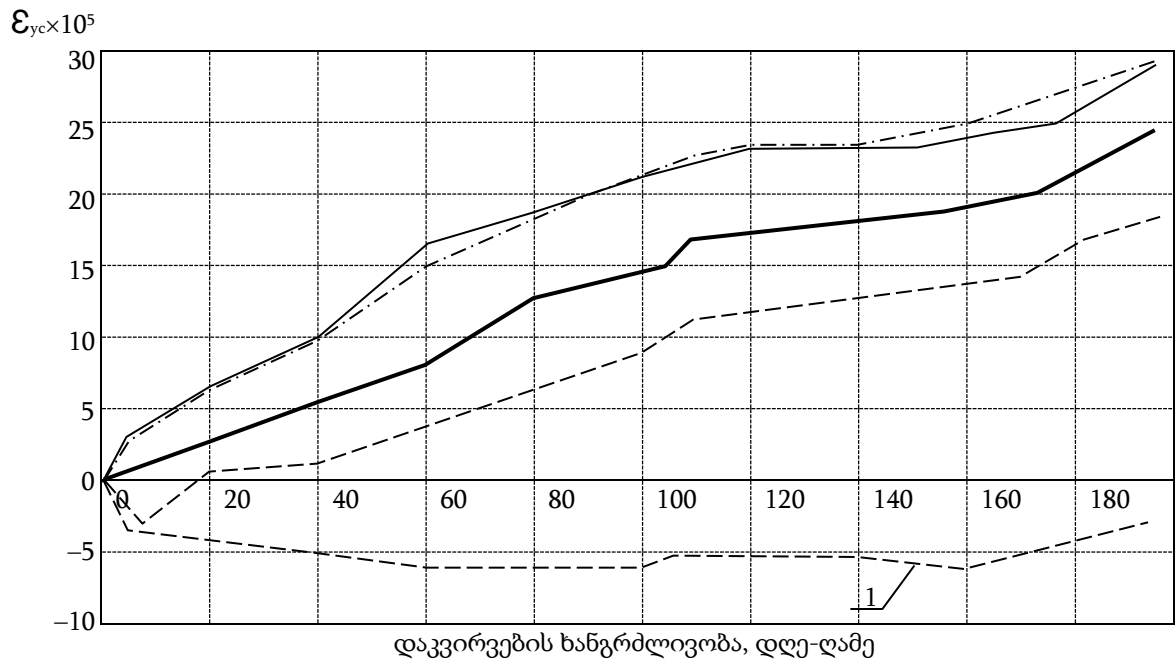
15. Каприелов С. С., Шейнфельд А. В., Кривобородов Ю. Р. Влияние структуры цементного камня с добавками Микрокремнезема и Суперпластификатора на свойства бетона. Бетон и железобетон №7. 1992 г. - с. 4-7.
16. Каприелов С. С., Батраков В. Г., Шейнфельд А. В. Модифицированные бетоны нового поколения: Реальность и перспективы. Бетон и железобетон №6. 1999 г. - с. 6-10.
17. Иссерс Ф. А., Булгаков М. Г., Вершинин Н. И. Прочностные и деформативные свойства высокопрочных бетонов с модификатором МБ-10-01. Бетон и железобетон №3. 1999 г. - с. 6-9.
18. Перо Л. Дж. Высокопрочные бетоны в Англии. Бетон и железобетон, №12, 1970 г. - с. 40-42.
19. Александровский С. В., Васильев П. И. Экспериментальные исследования ползучести бетона. В сборнике «Ползучесть и усадка бетона и ж/б-ных конструкции». Стройиздат, 1967 г. - с. 139-154.
20. Бондаренко В. М., Бондаренко С. В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. Стройиздат, 1982 г. - с. 113-128.
21. Ржаницин А. Р. Теория ползучести. Москва. Стройиздат. 1968 г. - с. 93-105.
22. Цицосани З. Н. Усадки и ползучесть бетона. Мецниереба. Тбилиси. 1997 г. - с. 88-95.
23. Яценко Е. А., Корнилова С. В., Бовин А. А., СЧоссу Г. Теория ползучести железобетонных конструкции. Днепропетровск, 2000 г. - с. 32-46.
24. Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкции. Стройиздат, Москва, 1988 г. - с. 25-37.
25. Улицкий И. И. Определение величин деформаций ползучести и усадки бетонов. Госстройиздат, Киев, 1963 г. - с. 47-62.
26. Александровский С.В. Расчет Бетонных и ж/б конструкции на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. Стройиздат, 1973 г. - с. 58-66.
27. Шейкин А. Е., Чеховский Ю. В., Бруссер М. И. Структура и свойства цементных бетонов. Стройиздат, 1979 г. - с. 125-133.
28. Прокопович И. Е., Застава М. М. О расчетном определении предельных длительных деформаций тяжелого бетона. Бетон и железобетон, №5, 1972, г. - с. 35-37.
29. Гвоздов А. А., Яшин А. В., Петрова К. В., Белобров И. К., Гужеев Е. А. Прочность структурные изменения и деформации бетона. Стройиздат, НИИЖБ, 1978 г. - с. 91-97.
30. ГОСТ 10180-90 Бетоны: Методы определения прочности по бетонным образцам.

31. ГОСТ 24452-80 Бетоны: Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона.
32. ГОСТ 24544-81 Бетоны: Методы определения деформации усадки и ползучести.
33. Доркин В. В., Зайцев Ю. В. Некоторые фундаментальные аспекты усадки цементных систем. сб. прочность и надежность конструкции. Москва, 1993 г. - с. 57-75.
34. Свиридов Н. В., Коваленко М. Г., Чесноков В. М. Механические свойства особо прочного цементного бетона. Бетон и железобетон, N2, 1991 г. - с. 7-9.
35. Свиридов Н. В. Особо прочный цементный бетон. Энергетическое строительство, N8. Москва. Стройиздат. 1991 г. - с. 21-29.
36. Ратинов В. Б., Розенберг Т. И. Добавки и бетон. Москва. Стройиздат. 1989 г. - с. 36-42.
37. Биациоли Ф. Товарная бетонная смесь: старый новый материал для XXI века. Материалы 1-ой всероссийской конференции по проблемам бетона и ж/б. - Москва, 2001 г. - с. 141-163.
38. Боженов Ю. М., Фаликман В. Р. Новый век: Новые эффективные бетоны и технологии. Материалы 1-ой всероссийской конференции по проблемам бетона и ж/б. - Москва, 2001 г. - с. 98-106.
39. Писанко Г. Н. Сопротивление высокопрочного бетона растяжению. Бетон и железобетон, N3, 1970 г. - с. 27-28.
40. Свиридов Н. В., Коваленко М. Г. Бетон прочного 150 МПа на рядовых порландцементов. Бетон и железобетон, N2, 1990 г. - с. 21-22.
41. Силина Е. С., Шейнфельд А. В., Жигулев Н. Ф., Борьгин С. Т. Свойства бетонных смесей с модификатором бетона МБ-01. Бетон и железобетон, N1, 2001 г. - с. 13-16.
42. Фудзт Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. М.: Мир, 1982 г. - с. 40-58.
43. Степанова В. Ф., Каприелов С. С., Шейнфельд А. В., Барыков П. И. Влияние добавок микрокремнезема на коррозионную стойкость арматурной стали в бетоне. Бетон и железобетон, N5, 1993 г. - с. 28-30.
44. Смирнов Н. В., Антонов Е. А., Дмитриев А. И., Каприелов С. С. и др. Перспективы применения бетонов с высокими эксплуатационными свойствами. Транспортное строительство, N12, 1998 г. - с. 16-18.
45. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона. Москва, Стройиздат, 1996 г. - с. 57-72.
46. Зылесов А. С., Кодыш Э. Н., Лемиш А. А., Никитин И. К. Расчет железобетонных

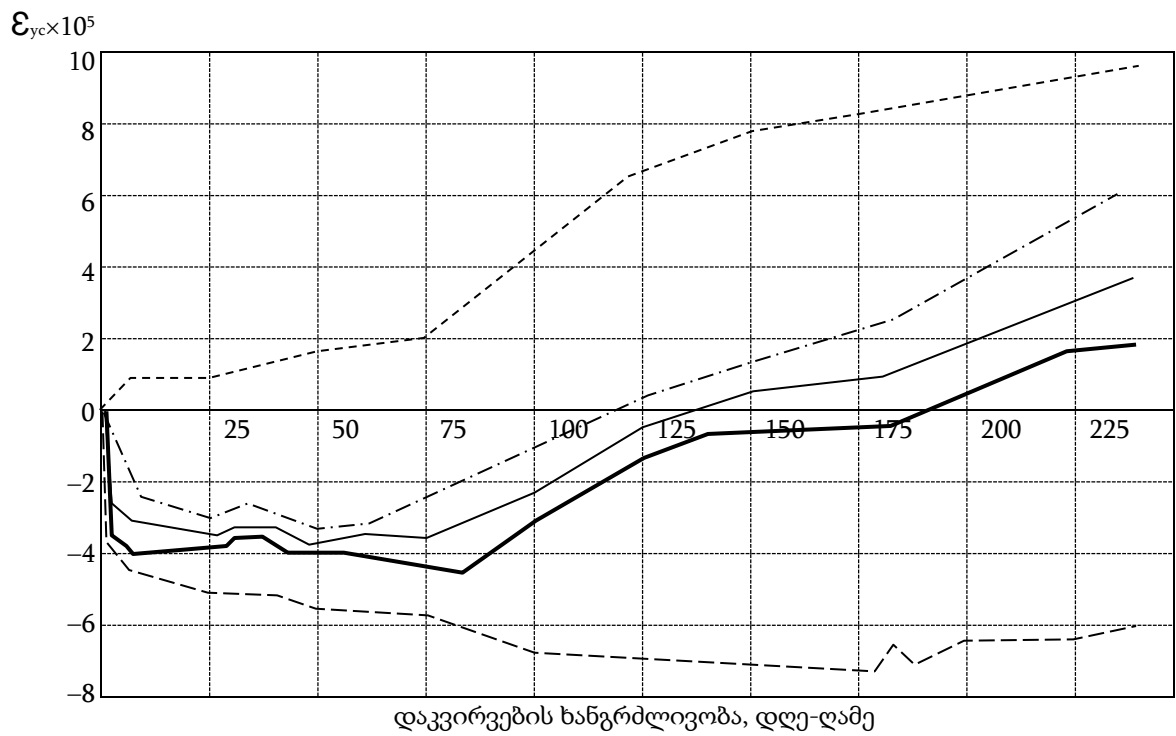
конструкции по прочности, трещиностойкости и деформациям. Москва, Стройиздат, 1988 г. - с. 102-126.

47. Грамбовецкий В. П. Новый бетон – новые термины. Строитель N2. 2001 г. - с. 63-68.
48. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Наука. - 1984 г. - с. 71-83.
49. Прокопович И. Е., Зедгенидзе В. А. Прикладная теория ползучести. Москва, Стройиздат, 1980 г. - с. 6-50.
50. ვ. კანკავა, ა. ნადირაძე, გ. როსნაძე. მაღალი სიმტკიცის წვრილმარცვლოვანი ბეტონი ორგანულ-მინერალურ მოდიფიკატორზე და მისი ტექნოლოგიური და ფიზიკურ მექანიკური თვისებების შესწავლა. ენერჯია - N3 (51). - თბილისი, 2009. - გვ. 142-145.
51. ვ. კანკავა, ა. ნადირაძე, გ. როსნაძე, ა. კანკავა. საწარმოო ტექნოლოგიური ნარჩენების ბაზაზე სამშენებლო მასალების (ცემენტი) მიღების შესაძლებლობების კვლევა და მათი ფიზიკურ მექანიკური თვისებების შესწავლა. ენერჯია - N3 (51). - თბილისი, 2009. - გვ. 146-149.
52. ვ. კანკავა, გ. როსნაძე და სხვა. დაბალი წყალმოთხოვნილების და მაღალი სიმტკიცის ცემენტების მიღება საწარმოო ტექნოლოგიურ ნარჩენებზე და მასზე დამზადებული ბეტონების მექანიკური მახასიათებლები. ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომები - №2 (42). - თბილისი, 2006. - გვ. 39-47.
53. გ. როსნაძე, ა. კანკავა, პ. ყიფიანი, მ. შალამბერიძე. მაღალი სიმტკიცის წვრილმარცვლოვანი ბეტონი ახალ მოდიფიკატორზე. საქართველოს საინჟინრო სიახლენი - N1 (92). - თბილისი, 2021. - გვ. 89-92.
54. გ. როსნაძე, ა. კანკავა, მ. შალამბერიძე, ბ. ბანძელაძე. ტრადიციული და მაღალი სიმტკიცის ბეტონების წინასწარი შეფასების კრიტერიუმი. საქართველოს საინჟინრო სიახლენი - N1 (92). - თბილისი, 2021. - გვ. 93-97.
55. გ. როსნაძე, ა. კანკავა, ბ. ბანძელაძე, მ. შალამბერიძე. ახალი შემადგენლობის წვრილმარცვლოვანი ბეტონის სიმტკიცის კვლევა. საქართველოს საინჟინრო სიახლენი - N2 (93). - თბილისი, 2021. - გვ. 25-28.

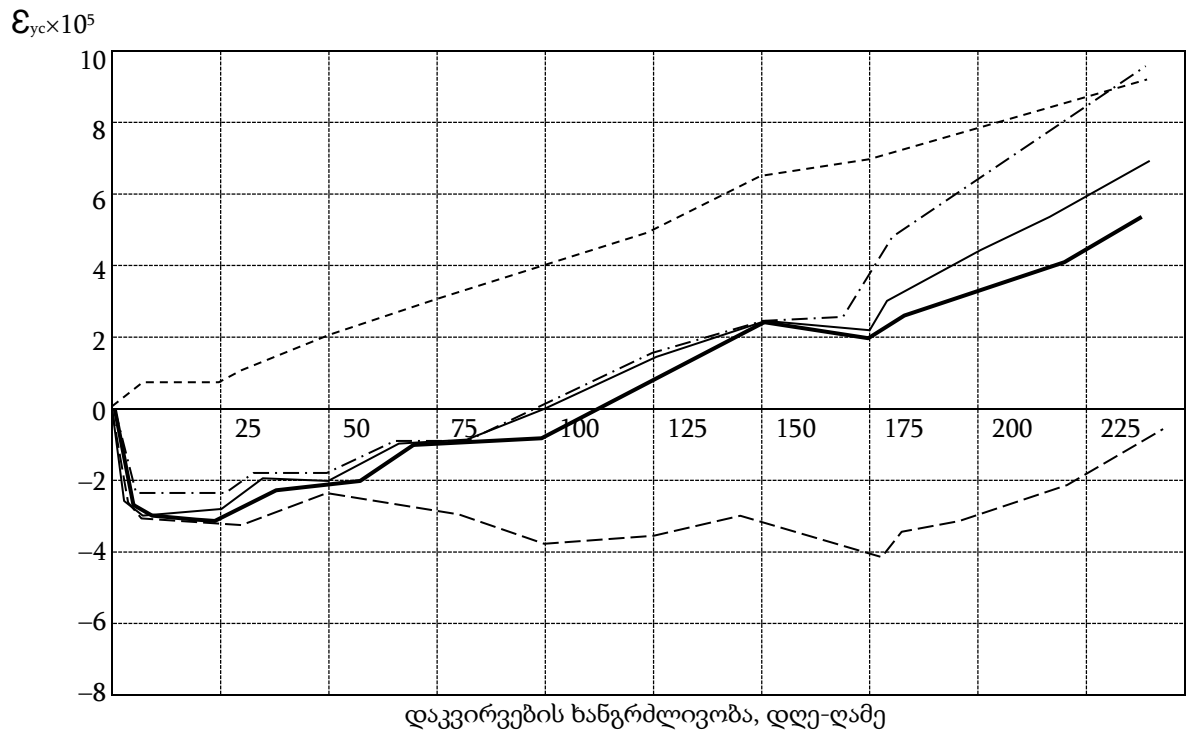
დანართი



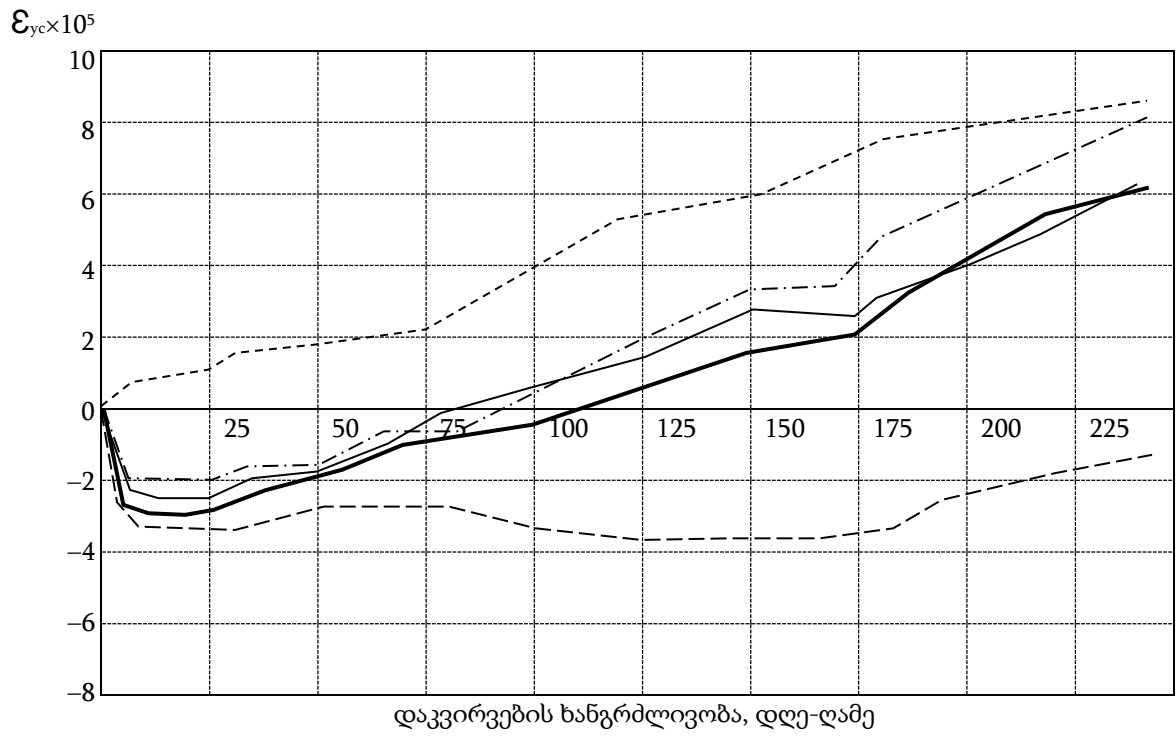
ნახ.4.12. ნარჩენი დეფორმაციები ღერძული გაჭიმვისას, 0,6R_{bm}; 2კ სერია



ნახ.4.13. ნარჩენი დეფორმაციები ღერძული გაჭიმვისას, 0,6R_{bm}; 3კ სერია



ნახ.4.14. ნარჩენი დეფორმაციები ღერძული გაჭიმვისას, $0,6R_{bm}$; 4კ სერია



ნახ.4.15. ნარჩენი დეფორმაციები ღერძული გაჭიმვისას, $0,6R_{bm}$; 5კ სერია