

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

მალხაზ ტურძელაძე, ლევან ზუკატიშვილი

სტრუქტურული ფაქტორების
გავლენა ბეტონის დეფორმირებასა
და რღვევაზე

თბილისი

2009

უაკ (UDC) 691.32+620.1.

ტ-92

წინამდებარე გამოკვლევის მიზანს შეადგენს ბეტონში ინტენსიური ბზარწარმოქმნის პროცესზე სტრუქტურული ფაქტორების გავლენის შესწავლა და ხანმოკლე დატვირთვების დროს მიღებული შედეგების საფუძველზე ბეტონის ხანგრძლივი სიმტკიცის პროგნოზირების მეთოდის შემუშავება. დასმული ამოცანის რეალიზაციისათვის ბეტონების მექანიკური თვისებების კვლევის ტენზომეტრულ მეთოდებთან კომპლექსში გამოყენებულია დესტრუქციის პროცესის შემსწავლელი აკუსტიკური ემისიის მეთოდი.

ნაშრომში კვლევების საფუძველზე მიღებულია საყურადღებო შედეგები დესტრუქციის პროცესებზე შემსვების სისხოს, სიმკვრივის, გამყარების პირობების, ტენზომეტრული მეთოდების, ასევე მასშტაბური ფაქტორის გავლენის შესწავლის თვალსაზრისით. დამუშავებულია რეკომენდაციები იმ დუდაბებისა და ბეტონების გამოყენების თაობაზე, რომელშიც სტატიკური დატვირთვის დროს ბზარწარმოქმნის პროცესები ნაკლები ინტენსიურობით ხასიათდებიან.

რეცენზენტები: აკადემიური დოქტორი.

ასოც. პროფ.

ზ. ქარუმიძე

აკადემიური დოქტორი.

გ. თათარაშვილი

© გამომცემლობა «მომავლიდან», 2009

ISBN 978-9941-0-1668-4

ყველა უფლება დაცულია. ამ წიგნის არც ერთი ნაწილი (იქნება ეს ტექსტი, ფოტო, ილუსტრაცია თუ სხვა) არანაირი ფორმით და საშუალებით (იქნება ეს ელექტრონული, თუ მექანიკური) არ შეიძლება გამოყენებულ იქნას გამომცემლის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

საავტორო უფლებების დარღვევა ისჯება კანონით.

შესავალი

თანამედროვე მშენებლობაში ძირითადად ორი მოთხოვნაა გასათვალისწინებელი – კონსტრუქციების საიმედოობის უზრუნველყოფა და მათი მასალათტევადობის შემცირება. ამ პრობლემის გადაჭრა, ახალი მასალების შექმნასთან ერთად, მათი მახასიათებლების გაუმჯობესების გზითაცაა შესაძლებელი. აქ კი დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ამ მახასიათებლების შეფასების მეთოდების სრულყოფას, რომელთა საშუალებითაც მიღებული უტყუარი ინფორმაციის საფუძველზე შესაძლებლობა მოგვეცემა უფრო სრულად გამოვიყენოთ საშენი მასალების, მათ შორის ბეტონისა და რკინაბეტონის სიმტკიცე და დეფორმაციული თვისებები.

იმისათვის, რომ გამოვავლინოთ ბეტონში არსებული რესურსები, პირველ რიგში შესწავლილ უნდა იქნეს მისი რღვევის მექანიზმი, კერძოდ, ამ პროცესის მიმდინარეობა და მასზე მოქმედი ფაქტორები. ამასთან დაკავშირებით, დიდი ხანია მიმდინარეობს კვლევები როგორც აღნიშნული პროცესის ფიზიკური ბუნების დასადგენად, ასევე იმ სპეციალური აპარატის შესაქმნელად, რომელიც მასალის ქცევის შეფასების საშუალებას მოგვცემს, როგორც მაკრო, ასევე მეზო და მიკროდონეებზეც.

ბეტონის რღვევის მექანიზმის შესწავლისადმი მიძღვნილი გამოკვლევების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მასალის რღვევა უეცრად შემდგარი ფაქტი, მყისიერი მოვლენა კი არაა, არამედ იგი თანდათანობით მზადდება და იწყება სხვადასხვა ზომისა და ფორმის მიკრობზარების წარმოქმნით, რომელთა გაჩენის ინტენსიურობაც დამოკიდებულია მრავალ ფაქტორზე; მათ შორის: დატვირთვის დონეზე, ბეტონის სტრუქტურაზე, გარემო პირობებზე და ა.შ. ცნობილია, რომ ბეტონში ბზარები ჩნდებიან მაშინაც კი, როდესაც დატვირთვა საერთოდ არ არსებობს ხოლო გარემო ფაქტორები ყველაზე ხელსაყრელია მისი გამყარებისათვის, თუმცა ეს მიკრობზარები საწყის ეტაპზე საფრთხეს ვერ უქმნის ბეტონის სიმტკიცეს. ბეტონის რღვევა იწყება მაშინ, როდესაც ცალკეული დეფექტები ერთიანდებიან და წარმოქმნიან ე.წ. მაკრობზარებს, ხოლო ეს უკანასკნელნი კი გადაიზრდებიან მაგისტრალურ ბზარებში, რომელთაც

მიყვავართ მასალის სრულ დაშლამდე. ცხადია ბეტონის ასეთი მდგომარეობა კონსტრუქციაში დაუშვებელია, მაგრამ შეუძლებელია ასევე მიკრობზარების გაჩენის ალბათობის ნულამდე შემცირებაც.

ამგვარად, ამოცანა მდგომარეობს ბზარწარმოქმნის პროცესის იმ ზედა ზღვრის დადგენაში, რომლის შემდგომ მასალის დესტრუქციის სპონტანური განვითარება იწყება და მისი შეჩერება შეუძლებელია.

ბეტონის სტრუქტურული ცვლილებების შესწავლას მეზო და მიკროდონეებზე უკანასკნელ წლებში განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა, რასაც მოწმობს 1979 წლიდან მასალების და კონსტრუქციების კვლევის ლაბორატორიების საერთაშორისო კავშირში ბეტონების რღვევის მექანიკის შემსწავლელი კომიტეტის შექმნა.

წინამდებარე კვლევა განეკუთვნება აღნიშნული მიმართულების სამუშაოებს, რაც გვაძლევს საფუძველს დავასკვნათ, რომ იგი აქტუალურია.

თავი I. ბეტონების სიმტკიცისა და დეფორმირების პროცესებისადმი მიძღვნილი კვლევების ანალიტიკური მიმოხილვა

1.1. რღვევის მექანიკა

კონსტრუქციული მასალების, მათ შორის ბეტონისა და რკინაბეტონის მექანიკური თვისებების კვლევას დიდი ხნის ისტორია აქვს. განსაკუთრებულ აქტუალობას აღნიშნული საკითხი იძენს უკანასკნელ პერიოდში, როდესაც ძლიერ გართულებულია მასალების მუშაობა სხვადასხვა კონსტრუქციაში და ასევე გამკაცრებულია მოთხოვნები ამ მასალების ეკონომიკურობის ამაღლებაზე.

იმისათვის, რომ სრულად გამოვიყენოთ მასალის შესაძლებლობანი (ავამაღლოთ მასში განვითარებული ძაბვის დასაშვები დონე), უკეთ უნდა ვიცოდეთ, როგორ ეწინააღმდეგება იგი გარე დატვირთვებს, როგორია მისი დეფორმირებისა და რღვევის მექანიზმი, ე.ი. ჩავწვდეთ მოვლენის ფიზიკურ არსს. ეს კი მკვლევარებისაგან მოითხოვს მასალის გამოცდის მეთოდების თანდათანობით სრულყოფას, რაც მასალების სიმტკიცისა და დეფორმირების ფენომენოლოგიურ თეორიებზე დაყრდნობით, საშუალებას მოგვცემდა გვემსჯელა დატვირთვის სხვადასხვა დონეზე მასალაში მიმდინარე პროცესებზე.

ბეტონისა და მსგავსი მყიფე მასალების რღვევის პროცესის ასახსნელად დამუშავებულ იქნა მრავალი თეორია, თუმცა უმრავლეს შემთხვევებში ეს ე.წ. «სიმტკიცის თეორიები» ანალიზებენ მხოლოდ მასალების სიმტკიცეს და ვერ ხსნიან კავშირს მათ დეფორმირებებსა და რღვევას შორის. ამ თეორიებს შორის შეიძლება გამოვყოთ სამი ძირითადი მიმართულება: ფენომენოლოგიური, სტატისტიკური და სტრუქტურული.

ფენომენოლოგიური (მექანიკური) თეორიის მიხედვით რღვევა განიხილება, როგორც მყისიერი მოვლენა და გაიგივებულია მასალის მთლიანობის დარღვევასთან. ეს კი თავის მხრივ დაკავშირებულია სიმტკიცის რაღაც გარკვეული, ზღვრული მნიშვნელობის მიღწევასთან.

ბეტონის სიმტკიცის თანამედროვე ფენომენოლოგიური თეორიის საფუძვლები რთული დამაბული მდგომარეობის დროს ჩამოყალიბებულია ა.

გვოზდევის მიერ [12]; მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტული მონაცემების გაანალიზებით მან შექმნა ძირითადი მოთხოვნები, რომელსაც უნდა აკმაყოფილებდეს ზღვრული ზედაპირი. კერძოდ, მან მიუთითა, რომ ზღვრული ზედაპირი უნდა ფართოვდებოდეს საშუალო დაბვის ისეთი მნიშვნელობების დროს, რომელიც შეესაბამება მნიშვნელოვან კუმშვას. ამის საფუძველზე მან აღწერა მრავალ ექსპერიმენტში შემჩნეული ფაქტი, ყოველმხრივი კუმშვის დროს აღძრული მთავარი დაბვების სხვაობების მნიშვნელოვანი ზრდის შესახებ. ფენომენოლოგიური თეორიის შემდგომი განვითარება წარმოებდა ზემოთხსენებული ზღვრული ზედაპირის აღმწერი განტოლების შემუშავების გზით. ო. ბერგი სამართლიანად მიუთითებს, რომ მათემატიკური წარმოდგენები, რომლებიც იზოტროპული მასალების რღვევის ასაწერადაა გამიზნული, მნიშვნელოვნადაა დაშორებული ისეთი არაერთგვაროვანი, კაპილარულ-ფოროვანი სხეულისაგან, როგორც ბეტონია. ასე, რომ, სიმტკიცის ფენომენოლოგიური თეორიები ასახავენ მხოლოდ აბსტრაქტულ მათემატიკურ კავშირებს, რომელთა ძირითადი პარამეტრები გამოითვლებიან რთული დაძაბული მდგომარეობის პირობებში ჩატარებული ექსპერიმენტების შედეგებით. ამ პარამეტრების გათვალისწინებით შეიძლება მიღწეულ იქნეს მათემატიკური გამოთვლებისა და ცდის შედეგების დამაკმაყოფილებელი თანხვედრა, მაგრამ რღვევის გამომწვევი ფიზიკური მიზეზები აუხსნელი რჩება.

სიმტკიცის სტატისტიკური თეორიები ფენომენოლოგიურთან შედარებით წინ გადადგმულ ნაბიჯად შეიძლება ჩაითვალოს. უფრო მეტი გამოყენება ჰპოვა ამ თეორიამ მყიფე რღვევის შემთხვევაში. ამ თეორიის თანახმად განიხილება უწყვეტი, იზოტროპული გარემო, რომელშიც განაწილებულია სტრუქტურის დეფექტები. ამ დეფექტების განაწილება ექვემდებარება სტატისტიკურ კანონს და განსაზღვრავს მასალის ნამდვილ სიმტკიცეს. ამ თეორიის თანახმად მასალის სიმტკიცე განისაზღვრება ყველაზე სუსტი პირველადი ელემენტით («სუსტი რგოლის» თეორია). სტატისტიკური თეორია, როგორც წესი, ვერ ითვალისწინებს ბეტონის რეალურ სტრუქტურას და მასთან დაკავშირებულ დაძაბული მდგომარეობის თავისებურებებს, კერძოდ, დაძაბულობის კონცენტრაციას შემვსების მარცვლებსა და ფორებთან, პირველადი, საწყისი მიკროდეფექტების

არსებობას ცემენტის ქვასა და შემვსების მარცვლებს შორის. ამიტომ სტატისტიკური თეორიის გამოყენება ბეტონებისათვის არსებული სახით ნაკლებად შესაძლებელია. თუმცა ამავე დროს, სტატისტიკური თეორიის დაშვება, რომ მასალის რღვევა დაზიანებების დაგროვების შემთხვევითი პროცესია, ყურადღებას იმსახურებს და გამოყენებას ჰპოვებს.

ზემოთ ჩამოთვლილ თეორიებთან შედარებით სიმტკიცის სტრუქტურული (ფიზიკური) თეორია გაცილებით ღრმად აანალიზებს მასალის სტრუქტურას. ამ თეორიის მიხედვით ის ზონები, სადაც პირველ რიგში შეიძლება წარმოიქმნას ე.წ. «ძალოვანი» ბზარები, შეიძლება იყოს ბეტონში არსებული წყვეტილობები ფორების, კაპილარების, ჩანართების, სედიმენტაციური სიბრტყეების და ა. შ. სახით.

მყარი ტანის სიმტკიცეზე დეფექტების გავლენა პირველად შეისწავლა გრიფიტმა, რომელმაც ყურადღება გაამახვილა ბზარების როლზე მყიფე რღვევის მექანიზმის კვლევისას [21]. მან წამოაყენა ჰიპოთეზა ე.წ. მოწყვეტის თეორიულ წინაღობასა და მის ფაქტიურ მნიშვნელობებს შორის არსებული დიდი სხვაობის გამომწვევ მიზეზებზე. დეფექტების არარსებობისას კვეთში ძაბვები განაწილებულია თანაბრად და სხეულის სიმტკიცე უახლოვდება მის თეორიულ მნიშვნელობას. გრიფიტმა ასევე ყურადღება გაამახვილა ერთ მნიშვნელოვან ფაქტზე, კერძოდ, ბზარებიანი ტანის ენერგეტიკულ მდგომარეობაზე. მან პირველმა მიუთითა, რომ მხოლოდ მუშაობის ნაწილი, რომელიც დრეკად ტანში გროვდება დეფორმირების პოტენციური ენერგიის სახით, თავისუფლდება ბზარის გახსნის შედეგად, დამაბულობის მოხსნის შემდგომ. პოტენციური ენერგიის მეორე ნაწილი გარდაიქმნება ახალი ზედაპირის ჭარბ ზედაპირულ ენერგად, რომელიც წარმოიქმნება ბზარის გაჩენის და გავრცელების შემთხვევაში, აქედან გამომდინარე, გრიფიტის მიერ ჩამოყალიბებული იქნა პირობები, რომელთა დროსაც ბზარი ინარჩუნებს წონასწორულ მდგომარეობას, ან განიცდის შემდგომ განვითარებას.

გასული საუკუნის 50-იან წლებში ირვინის მიერ, დრეკადობის წრფივი თეორიის საფუძველზე, ჩამოყალიბებული იქნა ზღვრული პირობები, რომლებიც სიმტკიცის პირველი თეორიის გარკვეულ ანალოგიას წარმოადგენენ.

ირვინის თეორიაში ზედაპირული ენერჯის ნაცვლად ფიგურირებენ ძაბვები, მათთვის დამახასიათებელი ინტენსიურობის კოეფიციენტებით.

ზემოთ ჩამოთვლილი თეორიები განეკუთვნებიან მყარ ტანებს ზოგადად და არ არიან დიფერენცირებული რომელიმე კონკრეტული მასალისათვის.

არაერთგვაროვანი მასალების, კერძოდ ბეტონების, დეფორმირებისა და რღვევის პროცესების კვლევებში, მათი ქცევის შესწავლით დატვირთვისას მიკრო და მაკროდონეებზე, ჩვენი შეხედულებით, გარდამტეხი როლი შეასრულეს ო. ბერგის, ა. გვოზდევის, ს. ჟურკოვის, ი. ზაიცევის, პ. რებინდერის, გ. რიუშის, ბ. სკრამტაევის და სხვა მეცნიერების ნაშრომებმა.

ა. გვოზდევმა დაადგინა [13], რომ მასალის არაერთგვარობა წარმოქმნის დამაბულობების აღმფოთების ველს, რომელიც ურთიერთქმედებს გარე დატვირთვებისგან გამოწვეულ ძაბვების ველთან და წარმოშობს ძაბვების კონცენტრაციას. რაც საკუთრივ მასალის სტრუქტურაში ხელს უწყობს პირველადი მიკრობზარების ჩამოყალიბებას. საწყისი მიკრობზარები დატვირთვის ზრდასთან ერთად ვითარდებიან, იზრდებიან და იწვევენ ბეტონის სტრუქტურის შემდგომ დარღვევას, რაც გამოიხატება, მასალის მოცულობის მოჩვენებითი ზრდით.

ცემენტის ქვისა და ბეტონის კუმშვისას მათი რღვევის მიზეზებს იკვლევდა ბ. სკრამტაევიც [49]. მან აღნიშნა ბეტონის სიმტკიცის ჩამოყალიბებაში ცემენტის ქვის წამყვანი როლი და აჩვენა, რომ წყალცემენტის ფარდობის ძალზე მცირე მნიშვნელობების დროსაც კი, ე.ი. როცა მასალის სტრუქტურა შედარებით მკვრივია, ცემენტის ქვის სიმტკიცე მისი ფორიანობით განისაზღვრება.

გ. რიუში [47] აკვირდებოდა ბეტონის დატვირთვისას მასში ულტრაბგერის გავრცელების სიჩქარეს. საწყის პერიოდში ულტრაბგერის გავრცელების სიჩქარე დატვირთვის ზრდასთან ერთად იზრდებოდა, რაც მასალის გამკვრივებაზე მეტყველებს. ბეტონში ბზარების გაჩენასთან ერთად ულტრაბგერის გავრცელების სიჩქარე მკვეთრად მცირდებოდა, რადგან მასალის მთლიანობის დარღვევა რხევების გავრცელების ხელისშემშლელი ფაქტორია.

ულტრაბგერის გავრცელების სიჩქარის ცვლილება ბეტონში მისი დატვირთვისას გამოკვლეული აქვთ აგრეთვე სხვა ავტორებსაც [7, 50].

ზემოთ წარმოდგენილი მასალა, რომელიც მყარი ტანის მთლიანობის რღვევის პროცესის შესწავლას ისახავს მიზნად, ცხადყოფს ტანის თანდათანობით დარღვევის ფაქტს, თუმცა ამ პროცესის კინეტიკის ახსნისაგან ის საკმაოდ შორს დგას.

ბეტონის სიმტკიცისა და დეფორმირების თეორიის განვითარებაში დიდი წვლილი შეიტანა პროფ. ო. ბერგმა [5,6]; შეისწავლა რა ცვლილებები, რომლებიც მიმდინარეობდნენ ბეტონის სტრუქტურაში მისი დატვირთვის დროს, მან ექსპერიმენტულად დაადგინა მოწყვეტის ბზარების როლი მაღალ დატვირთვებზე მასალის დეფორმირებისას. მიკროსკოპული დაკვირვებისა და ბეტონის პრიზმების სხვადასხვა მონაკვეთების თანმიმდევრული მიკროფოტოგრაფირების შედეგად მან აჩვენა, რომ დატვირთვის გარკვეულ საფეხურზე, რომლის შემდეგაც ნიმუშები კიდევ უძლებდნენ დატვირთვის მნიშვნელოვან მომატებას, ბეტონში წარმოიქმნებოდა მიკრობზარები.

შემდგომ სამუშაოებში, გრძივი და განივი დეფორმაციების ცვლილების ხასიათის შესწავლის გზით, მის მიერვე დაზუსტებული იქნა ამ ბზარების წარმოქმნის საზღვრები.

მყარი სხეულების რღვევის შესახებ ზემოთ მოყვანილი შეხედულებები ძირითადად განვითარებული იყო მექანიკოსების მიერ. საინტერესოა მასალის რღვევის პროცესის შეფასება და ახსნა ფიზიკოსების თვალთახედვით. მყარი ტანის ფიზიკის მიღწევები შესაძლებლობას ქმნის შესწავლილ იქნეს მასალების დეფექტურობა, მოლეკულურ და ატომურ დონეებზე. თბური ფლუქტუაციის შედეგად ატომური კავშირების გაწყვეტა და სუბმიკრო და მიკრობზარების თანდათანობით დაგროვება წარმოადგენს მყარი სხეული კინეტიკის კონცეფციის საფუძველს, რომელიც დაამუშავა პროფ. ს. ჟურკოვმა თანამოაზრეებთან ერთად [27, 28]. ამ კონცეფციის თანახმად, მასალის რღვევა განიხილება, როგორც დროში განვითარებადი პროცესი, რომელიც იწყება ტანზე მექანიკური ზემოქმედების დაწყების მომენტიდან და მთავრდება კატასტროფით – სხეულის დაშლით სხვადასხვა, ერთმანეთთან დაუკავშირებელ ნაწილებად. ამ მეცნიერების მოსაზრებით მასალის ხანგამძლეობა (სხეულის, როგორც ერთი მთელის არსებობის დრო) შეიძლება პირობითად დაიყოს ორ პერიოდად – კრიტიკული

მდგომარეობის მოსამზადებელი დრო და მაკრორღვევის დრო. მართალია მაკრორღვევის პერიოდს უკავია სხეულის პირობითი ხანგამძლეობის დროის უმცირესი ნაწილი, მაგრამ ის განსაკუთრებულ ყურადღებას იმსახურებს, რადგან მასალის რღვევის პროცესში განვითარებულ ხარისხობრივ ცვლილებებს ასახავს და შეესაბამება რღვევის მოსამზადებელი სტადიიდან ძალიან სწრაფ – ზვავისებრ სტადიაზე გადასვლას. ობიექტური მონაცემები იმის შესახებ, რომ მასალის რღვევა მყისიერი, ერთდროული აქტი კი არ არის, არამედ თანდათანობით მზადდება გარე დატვირთვების აღძვრის მომენტიდან და წარმოადგენს დროში განვითარებულ პროცესს, მიღებულ იქნა აკუსტიკური ემისიის სიგნალებისა და თავისუფალი ელექტრონების რეგისტრაციის გზით.

ჰ. რეზინდერის გამოკვლევებმა [41, 42] ცხადყვეს მიკრობზარების ელიფსოიდური ხასიათის შესახებ ფიზიკური წარმოდგენების სიმცდარე, მისი თვალსაზრისით მყარ სხეულებში, მიკრობზარებს გააჩნიათ სოლისებრი ფორმა წამახვილებული ბოლოებით.

რეალური, სოლისებრი მიკრობზარების წონასწორობის თეორიის დამუშავებას ეძღვნება ი. ფრენკელის [62], დ. შილკრუტის [70] და გ. ბარენბლატის [4] შრომები.

ი. ფრენკელი განიხილავს მახვილბოლოებთან ბზარებს, რომლებიც უსასრულოებაში არიან განფენილნი. მანვე წამოაყენა ამ ბზარების წონასწორობის რამდენიმე პირობა. დ. შილკრუტმა კი გაანალიზა მიკრობზარების წონასწორული მდგომარეობა მათ ნაპირებს შორის არსებული კუთხეების ცვლილებების საფუძველზე.

გ. ბარენბლატმა განავითარა ბზარების წონასწორობის თეორია ვარიანტულ პრინციპებზე დაყრდნობით. ბარენბლატის თეორია, გრიფიტის თეორიისაგან განსხვავებით, ეფუძნება სამ დამატებით პოსტულატს. მიღებული განტოლებები საშუალებას იძლევიან დატვირთვის პირობებიდან გამომდინარე განისაზღვროს ბზარების კრიტიკული ზომები.

ი. ზაიცევი [29] ბეტონის სტრუქტურას განიხილავს, როგორც რთულ, იერარქიულ აგებულების სისტემას, რომლის ელემენტები (ქვესისტემები) განეკუთვნებიან სხვადასხვა დონეებს. ამიტომ, ელემენტების გარკვეული

ავტონომიურობის გამო, თითოეულ მათგანში შესაძლებელია განვითარდეს დეფორმირებისა და რღვევის პროცესები, სხვა იგივე რიგის ელემენტებში მიმდინარე ანალოგიურ პროცესებთან მჭიდრო კავშირის გარეშე. მანვე ჩამოაყალიბა ბეტონის სტრუქტურის იერარქიული სქემა სახასიათო დეფექტებითა და არაერთგვაროვნებით. ამ დეფექტებში გამოყოფილია ორი ძირითადი: პირველი რიგის დეფექტები – მომრგვალებული არაერთგვაროვნობები სიღრუეების სახით (მიკრო და სუბმიკრო სტრუქტურის ფორები) და მეორე რიგის – დეფექტები ბზარების სახით (ცემენტის ქვის მიკროსტრუქტურული ბზარები, ასევე ბზარები, რომლებშიც წარმოიქმნებიან მსხვილი შემვსებისა და მატრიცის საკონტაქტო ზონაში) შესაძლებელია აგრეთვე დეფექტების ორივე ტიპის ურთიერთშერწყმული არსებობაც. ზემოთ ჩამოყალიბებული ჰიპოთეზის საფუძველზე ი. ზაიცევი ახდენს ბეტონის დეფორმირებისა და რღვევის პროცესების მოდელირებას სხვადასხვა დამაბული მდგომარეობების დროს, დატვირთვის მოქმედების ხანგრძლივობის გათვალისწინებით.

ბეტონი, ისევე როგორც ყველა სხვა მასალა, არ შეიძლება წარმოვიდგინოთ იმ გარემოსგან იზოლირებულად, რომელშიც ის იმყოფება. ის ძალზე მგძნობიარეა გარე პირობების, კერძოდ, ფიზიკური, ქიმიური თუ მექანიკური ზემოქმედების მიმართ. თუმცა მისი რეაქცია ამ ზემოქმედებაზე საკმაოდ შენელებულია. მიუხედავად ამისა, ნებისმიერი ასეთი ურთიერთობა გარემოსთან მასზე წარუშლელ კვალს ტოვებს და გავლენას ახდენს ბეტონის შემდგომ მდგომარეობაზე. რ. ლერმიტის ფრთოსანი გამოთქმის მიხედვით «ბეტონს მეხსიერება გააჩნია». არცთუ იშვიათად ის «ავმეხსიერიც» არის, როცა არ ითვალისწინებენ მასზე გარემოს ზემოქმედების უმრავლეს მომენტებს და ისტორიას. რასაკვირველია, გარემოს ზემოქმედებით შეიძლება მნიშვნელოვნად შეიცვალოს ბეტონის მექანიკური თვისებები – სიმტკიცე, დეფორმაციულობა და ა.შ.

1928 წელს აკადემიკოს პ. რებინდერის მიერ დადგენილ იქნა გარემოს მნიშვნელოვანი შექცევადი გავლენა, გამოხატული ზედაპირულაქტიური ნივთიერებების მიერ ფიზიკური (შექცევადი) ადსორბციის გამო, მათი

დეფორმირებისა და რღვევის წინაღობის ხელშესახებ დაქვეითებაში. შემდგომი გამოკვლევებით, რომლებიც ჩატარებულ იქნა სხვადასხვა მყარ სხეულზე და მათ შორის ბეტონზეც, დადასტურებულ იქნა გარემოს ფიზიკურ-ქიმიური ზემოქმედების საერთო ხასიათი მყარი სხეულების მექანიკურ თვისებებზე. დადგინდა იქნა აგრეთვე, რომ ეს გავლენა არ არის დაკავშირებული კოროზიასთან, გახსნასთან ან სხვა რაიმე ქიმიურ გარდაქმნასთან [41,42]; ის ძირითადად არის მყარი სხეულის თავისუფალი ზედაპირული ენერჯის შემცირების შედეგი გარემოს აქტიური მოლეკულების მიერ ნამდვილ ზედაპირზე ფიზიკური ადსორბციის გამო; დესორბციის შემდეგ სხეულის თავისუფალი ზედაპირული ენერჯია იზრდება პირველად სიდიდემდე და მექანიკური თვისებები აღდგება.

ლიტერატურაში გარემოს გავლენის აღნიშნული მექანიზმი ცნობილია, როგორც სიმტკიცის შემცირების ადსორბციული და მყარი სხეულის დეფორმაციის შემსუბუქების ეფექტი.

1.2. ბეტონის დეფორმირების და რღვევის შესწავლის

ექსპერიმენტული მეთოდები

მყარ სხეულებში ბზარწარმოქმნის პროცესის ექსპერიმენტული კვლევებისათვის დღეისათვის გამოიყენება შემდეგი მეთოდები: ულტრაბგერის გავრცელების სიჩქარე (სხვადასხვა სახეობის ულტრაბგერითი რხევების ჩახშობა და გაბნევა – გრძივი, ღუნვადი, ზედაპირული და სხვა), რენტგენული სხივების გაბნევა (კინორენტგენოგადაღება), ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრია, სტრუქტურის ფორიანობის გამოკვლევა (ვერცხლისწყლიანი ფორომეტრია, კაპილარული კონდენსაცია), ოპტიკური, ელექტრონული (ელექტრონული სიგნალების რეგისტრაცია) ტომოგრაფია, დიელექტრული რელაქსაცია, აკუსტიკური ემისია და სხვა.

გასული საუკუნის 60-იანი წლების დასასრულს, საქ. მეცნიერებათა აკადემიის სამშენებლო მექანიკისა და სეისმომედეგობის ინსტიტუტის ბეტონის

ფიზიკურ-ქიმიური კვლევის ლაბორატორიაში, პროფ. ზ. წილოსანის ხელმძღვანელობით ჩატარებულ იქნა ექსპერიმენტები გაჭიმული ცემენტის ქვის სტრუქტურაში ბზარის გავრცელების სიჩქარის შესწავლის მიზნით [64]. დატვირთვის სხვადასხვა საფეხურის შესაბამისი რენტგენოკადრების შედარებისას ავტორები მიდიან დასკვნამდე, რომ სურათის პოზიტივზე ნათელი ზოლის გაჩენა იმ რაიონში, სადაც შემდგომ ხდება ნიმუშის რღვევა, მეტყველებს ცემენტის ქვის სტრუქტურის გაფაშრებაზე, თუმცა მასალის რღვევა საბოლოო თვალსაზრისით ლოკალიზდება გარკვეულ სიბრტყეში. მასალის სტრუქტურის გაფხვიერება ხდება მეზობელ კვთებშიც, წარმოიქმნება რა რღვევის წინა, საკმაოდ განიერი ზონა. ეს შეიძლება აიხსნას მხოლოდ დატვირთვის დროს ნიმუშში მიკრობზარების გაჩენით და განვითარებით. ამავე სამუშაოში ავტორები შეეცადნენ ბზარების გავრცელების სიჩქარის გაზომვას, ამისათვის გამოყენებულ იქნა დროის გაზომვის იმპულსური მეთოდი.

ცემენტის ქვისა და ბეტონის გამოშრობისას აღძრული შიგა დაძაბულობების როლის შეფასების მიზნით, დატვირთული და დაუტვირთავი ნიმუშების ხანგრძლივი დეფორმაციების განვითარებაში, დაყენებულ იქნა ექსპერიმენტები წვრილმარცვლოვანი ბეტონისაგან დამზადებული რვიანების გრეხაზე [66]. ზ. წილოსანი და ა. საყვარელიძე, რომლებიც ამ სამუშაოს ავტორებად გვევლინებიან, უპირატესობას ანიჭებენ გამოცდის ამ სქემას იმიტომ, რომ ხანგრძლივი ძაბვებით გამოწვეული გრეხის დეფორმაცია (ძვრის კუთხე), არ მახინჯდება ნიმუშის ტენშემცველობით და დეფორმაციით.

ექსპერიმენტებმა აჩვენეს, რომ რაც უფრო მშრალი იყო გარემო (მაშასადამე, რაც უფრო ხელსაყრელი გახლდათ შეკლების დეფორმაციის განვითარების პირობები), უფრო ინტენსიურად ვითარდებოდა ძვრის დეფორმაცია. ქცევის მიზეზი მშრალ გარემოში, უპირაწია ვეძებოთ იმ დესტრუქციულ მოვლენებში, რომელთაც ადგილი ჰქონდათ ბეტონში გარე დატვირთვების და ინტენსიურად განვითარებული შეკლების ერთდროული და ურთიერთ გამამლიერებელი მოქმედებისას. გამოშრობადი ცემენტის ქვის და შემვსების მარცვლების დეფორმაციების შეუთავსებლობამ ხელი შეუწყო მიკრობზარების წარმოქმნას. ამ ვარაუდის შესამოწმებლად ნიმუშების განტვირთვის შემდეგ დამზადებულ იქნა

გამჭვირვალე შლიფები (ნახეხი). შლიფებზე მიკროსკოპულმა დაკვირვებამ ცხადყო სტატიის ავტორების ვარაუდის მართებულობა: ბზარების ყველაზე მეტი რაოდენობა აღმოჩნდა მშრალ გარემოში გამოცდილ ნიმუშებში.

ცემენტის ქვისა და ბეტონის თვისებების ჩამოყალიბებაში განსაკუთრებული როლი ენიჭება მათ ფორიანობას. ამიტომ ამ საკითხის შესწავლას დიდი მნიშვნელობა აქვს. ჯერ კიდევ XX საუკუნის დასაწყისში, როცა ფებს იდგამდა მეცნიერება ბეტონის შესახებ, მალიუგა და ფერე ბეტონის სიმტკიცეს უკავშირებდნენ მასში ფორების შემცველობას.

ფორიანობის განმსაზღვრელი როლი ცემენტის ქვისა და ბეტონის თვისებების ფორმირებაში აღიარებულია სხვა შემდგომდროინდელ გამოკვლევებშიც; ფორები არამარტო ამცირებენ განივი კვეთის ფართობს, რომელზედაც გარე დატვირთვებით აღძრული ძალები გადანაწილდებიან, არამედ ძაბვების კონცენტრატორებადაც გვევლინებიან. ეს განსაკუთრებით თვალშისაცემია მყიფე სხეულების შემთხვევაში, რომელთათვისაც სამართლიანია მოყვანილი დამოკიდებულება [35].

$$R = K(1 - \lambda)^n;$$

სადაც K და n მუდმივებია, ხოლო λ ფორიანობა.

R და λ დამოკიდებულების არაწრფივი ხასიათი აიხსნება იმით, რომ ფორები ძაბვების კონცენტრატორები არიან. მაგრამ მათი როლი ბეტონში მხოლოდ ამ ფუნქციით არ შემოიფარგლება. ფორები თამაშობენ ძირითად როლს ცემენტის ქვისა და ბეტონის გარემოსთან ურთიერთქმედების დროს, განსაზღვრავენ რა მასალის ისეთ თვისებებს, როგორებიცაა: შეღწევადობა, თბოგამტარობა, წყალშთანთქმა და ა.შ. ამით აიხსნება ის დიდი ინტერესი, რომელიც გამოხატულია ბეტონის ფორიანობის შესწავლისადმი კვლევების სფერო მოიცავს ფორების წარმოშობის მექანიზმს, მათ განაწილებას, ზომებს, ასევე დამოკიდებულებას ფორიანობას, ცემენტის ქვისა და ბეტონის ფიზიკურ და მექანიკურ თვისებებს შორის.

ცემენტის ქვისა და ბეტონის სიმტკიცეზე და დეფორმირებაზე ფორიანობის სტრუქტურისა და მასში არსებული ტენის გავლენის შესწავლის მიზნით დიდი სამუშაოები იქნა ჩატარებული საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის კ.

ზავრიევის სახელობის სამშენებლო მექანიკისა და სეისმომედეგობის ინსტიტუტის ბეტონების ფიზიკურ-ქიმიური მექანიკის ლაბორატორიაში პროფ. ზ. წილოსანის ხელმძღვანელობით [64, 65, 66]. შევჩერდეთ ამ მრავალრიცხოვანი შრომებიდან ერთ-ერთზე, რომელშიც გამოკვლეულ იქნა ცვლილებები ცემენტის ქვის კაპილარულ-ფოროვან სტრუქტურაში მკუმშავი დატვირთვის ხანგძლივი ზემოქმედებისას [64]. მყარ სხეულებში ფორიანი სტრუქტურის კვლევის მეთოდებთან ავტორების მიერ არჩეულ იქნა კაპილარული კონდენსაციის ხერხი. ცნობილი იყო რა სხვადასხვა ინტეგრალური ფორიანობის მქონე ცემენტის ქვის დესორბციის მონაცემები და დატვირთვის რეჟიმი, განისაზღვრებოდა სხვადასხვა ზომის ფორების და კაპილარების მოცულობები. შედეგები წარმოდგენილი იყო დიაგრამების სახით, რომელთა შედარებამაც ცხადყო, რომ ის ფორების მოცულობა, რომელთა რადიუსი აღემატება 1000\AA , დატვირთულ ნიმუშებში უფრო მეტი იყო ვიდრე დაუტვირთავებშია. მოვლენის მექანიზმი სამუშაოში წარმოდგენილია შემდეგნაირად: დატვირთვის მოქმედების შედეგად ხდება ცალკეულ ფორებსა და კაპილარებს შორის არსებული კედლების რღვევა, რაც იწვევს მათი მოცულობების შერწყმას, ე.ი. მათ გამსხვილებას, ამიტომ წვრილი ფორების ფარდობითი წილი დატვირთულ ცემენტის ქვაში, ბუნებრივია მცირდება.

ჰოლოგრაფია, რომელმაც ფართო გამოყენება ჰპოვა ლითონის და პოლიმერული მასალებისაგან შექმნილი ნაკეთობების და კონსტრუქციების დაძაბულ – დეფორმირებულ მდგომარეობის კვლევის საქმეში, ბეტონების შემთხვევაში შედარებით მწირად გამოიყენება. ზ. წილოსანისა და გ. დალაქიშვილის მიერ ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით შესწავლილ იქნა ცემენტის ქვისა და ბეტონის შეკლების დეფორმაციის დროს განვითარებული ბზარწარმოქმნის პროცესი [16]. მიღებული ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამების მიხედვით შეგვიძლია მიკრობზარების წარმოქმნის ადგილმდებარეობის პროგნოზირება, ასევე შესაძლებელია მათ განვითარებაზე თვალყურის დევნება უფრო ადრეულ სტადიაზე, ვიდრე ამის საშუალებას იძლევა ვიზუალური დაკვირვება.

მასალების საიმედოობის შემოწმება დაფუძნებულია მექანიკური მახასიათებლებით გაზომვაზე. თუმცა ასეთი მიდგომა ხასიათდება მრავალი, არსებითი ნაკლოვანებით. როგორც ცნობილია, მასალის რღვევას იწვევენ მისი მდგომარეობის პარამეტრების ცვლილებები, რომელთაც ლოკალური ხასიათი აქვთ. ლოკალურად იცვლებიან ამავე დროს, უშუალოდ განსაზღვრადი ფიზიკური თვისებებიც, რის გამოც მსხვილგაბარიტული ნაკეთობების დიაგნოსტიკისათვის საჭირო ხდება ან გაზომვის უზარმაზარი სისტემების, ან ოპერატიული სკანირების რთული აპარატურის გამოყენება, რაც ტექნიკურად ძნელად შესასრულებელია. ამიტომ მასალების ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები საექსპლუატაციოსთან შედარებით გამარტივებულ პირობებში განისაზღვრება. გარდა ამისა, რიგ მახასიათებლებს აქვს პირობითი ხასიათი და მცირედ მგრძობიარენი არიან მასალაში არსებული დეფექტების და არაერთგვარობების მიმართ.

რეალური მასალების დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის თანამედროვე თეორიული და ექსპერიმენტული ანალიზის შესაძლებლობების შეზღუდულობამ, ასევე სტატისტიკური მიდგომის ნაკლოვანებებმა, შეიძლება გამოიწვიონ ნაკეთობების და კონსტრუქციების ექსპლუატაციაში მიღების დაუსაბუთებელი გამკაცრება, ან სახიფათო დეფექტებიანი ნაკეთობების გამოყენება შენობებსა და ნაგებობებში. დეფექტების ზომების, მასალაში განაწილების, ასევე მათი გავრცელების სიჩქარის დადგენის მეთოდებმა შეიძლება გარკვეული წვლილი შეიტანოს მასალების ექსპლუატაციაში დასაბუთებული მიღების ნორმების დაწესების თვალსაზრისით [15].

ზემოთ ჩამოყალიბებული თვალსაზრისიდან გამომდინარე, ნათელია, რომ მასალის სტრუქტურის დეფექტების შესაფასებლად უნდა არჩეულ იქნეს არა მასალის ფიზიკურ-მექანიკური პარამეტრები, არამედ იმ ფიზიკური პროცესების მახასიათებლები, რომლებიც თან სდევს დეფექტების განვითარებას. მათ შორის ყურადღებას იმსახურებს დამაბულობის ტალღების გამოსხივების პროცესები, რომლებიც განპირობებულია მასალის სტრუქტურაში არსებული დეფექტების განვითარებით. ამ მოვლენას ეწოდება აკუსტიკური ემისია, ან დამაბულობის ტალღების ემისია აღნიშნული ტალღების პარამეტრების გაზომვა საშუალებას

იძლევა აღმოვაჩინოთ სხვადასხვა დეფექტი, შევაფასოთ მათი ზომები, საშიშროების ხარისხი, ვიწინასწარმეტყველოთ მრღვევი დატვირთვა.

ტალღური მოვლენების წარმოშობა მყარ სხეულებში მათი დეფორმირებისა და რღვევის დროს დიდი ხანია ცნობილია. კალის დეფორმირებისას აღძრულმა ბგერითმა ეფექტმა მიიღო სახელწოდება – «კალის ყვირილი». ანალოგიური მოვლენები აღნიშნულია სხვადასხვა მასალაზე ჩატარებულ ლაბორატორიულ ექსპერიმენტებში. მაგალითად ა. კლასენი აკვირდებოდა ქვის მარილისა და თუთიის დეფორმირების თანმხლებ ბგერით ეფექტებს [22].

1952 წელს აკადემიკოსების ა. სკოჩინსკისა და გ. გამბურცევის ინიციატივით ო.ი. შმიდტის სახელობის ფიზიკისა და სამთო საქმის ინსტიტუტებში დაიწყო მთის ქანების დეფორმაციული ხმაურის სანდო ნიშნების გამოვლენის მიზნით ექსპერიმენტების ჩატარება [27]. ანალოგიური გამოკვლევები ტარდებოდა საზღვარგარეთ [18]; კონსტრუქციულ მანქანათსამშენებლო მასალებში დეფორმაციული ხმაურის გამოკვლევა ჩატარებულ იქნა გერმანიაში ი. კაიზერის მიერ 1953 წელს [49]. მან დაადგინა განმეორებადი დატვირთვებისას ხმაურის აღარ წარმოქმნის ფაქტი (ე.წ. კაიზერის ეფექტი) და აღნიშნა დეფორმაციული ხმაურის განსაკუთრებული პარამეტრების არსებობის შესახებ, რომლებიც შეესაბამებიან დრეკადობის, დენადობის და სიმტკიცის ზღვრებს.

ა. სკოფილდმა აკუსტიკური ემისიის, როგორც ფიზიკური მოვლენის შესწავლის მიზნით ჩაატარა სამუშაო აშშ-ს შეიარაღებული ძალების ხელმძღვანელობის დაკვეთით [19]; მან პირველად შემოიღო ტერმინი «აკუსტიკური ემისია». ამასთან, სწავლობდა აკუსტიკური ემისიის კორელაციას თუთიაში, ალუმინში და ოქროში დისლოკაციების მოძრაობასთან. შემდგომი სამუშაოები უკვე დაკავშირებული იყო კონსტრუქციების დეფექტურობის შესწავლასთან. თანამედროვე პირობებში ექსპერიმენტული სამუშაოებით და აპარატურის კონსტრუქციებით დაკავებულნი არიან ისეთი ფირმების სამეცნიერო ცენტრები, როგორებიცაა «Douglas Aircraft» და «General Electric», მეტალურგიის კორპორაცია, სამხედრო საჰაერო ძალები და უნივერსიტეტები. ფართოდ იკვლევენ საავიაციო და კოსმოსურ ტექნიკას, წყალქვეშა კონსტრუქციებს. გამოკვლევებმა მნიშვნელოვანი დრო წაიღეს და პირველი

შედეგები მიღწეულ იქნა გასული საუკუნის 70-იანი წლების დასაწყისში. აკუსტიკურ ემისიასთან დაკავშირებული საკითხები რეგულარულად განიხილებოდა საერთაშორისო კონფერენციებზე.

აკუსტიკური ემისიის მეთოდი უპირატესად გამოიყენება ლითონური და პოლიმერული მასალების დეფექტური სტრუქტურის გამოსაკვლევად; კვლევები ჩატარდა აგრეთვე ხეზე, კერამიკაზე, მინაზე და მთის ქანებზე. ბეტონისათვის ამ მეთოდმა ჯერჯერობით მხოლოდ შეზღუდული გამოყენება ჰპოვა.

პირველი, რომელმაც ყურადღება გაამახვილა ბეტონებში, მათი დატვირთვის დროს აღძრულ ხმაურზე და მისი რეგისტრაციისათვის გამოიყენა აკუსტიკური აპარატურა იყო რ. ლერმიტი [32]. დატვირთვის დაბალ საფეხურებზე მის მიერ აღმოჩენილ იქნა სუსტი ხმაური, რომელიც სწრაფად წყდებოდა ან მნიშვნელოვნად მცირდებოდა, თუკი მუდმივ დატვირთვას შევინარჩუნებდით. მაგრამ დატვირთვის შემდგომი გაზრდით სულ სხვა ხასიათის ხმაური წარმოიქმნება – იგი გაცილებით ძლიერი და მკვეთრია, ვიდრე დატვირთვის დაბალ საფეხურებზე წარმოქმნილი ხმაური. რ. ლერმიტმა ამ მოვლენას უწოდა «ტკაცუნი». ამ ხმაურის თავისებურებაა – სიხშირის ზრდა დატვირთვის ზრდასთან ერთად, დატვირთვის მრღვევ მნიშვნელობასთან მიახლოებისას იზრდება რხევის ამპლიტუდა.

იმის დასადასტურებლად, რომ «ტკაცუნი» წარმოადგენს ბეტონის შიგნით მიმდინარე რღვევის მაუწყებელ სიგნალებს, წარმოდგენილია ნიმუშიდან ამოხერხილი შლიფი, რომლის მოკროსკოპის ქვეშ გულმოდგინედ დათვალიერება საშუალებას იძლევა დავრწმუნდეთ საკმაოდ დიდი ზომების ბზარების არსებობაში (დაახლოებით 1 მმ-ის ფარგლებში). ლერმიტმა ყურადღება მიაქცია პუასონის კოეფიციენტის ცვლილებასაც, მანამ, სანამ დატვირთვა არ მიაღწევს გარკვეულ, ზღვრულ მნიშვნელობას, განივი გაფართოების ფარდობა გრძივ დეფორმაციასთან მუდმივია ან მცირდება. ამ ზღვრის გადამეტებისას კი ეს ფარდობა იწყებს ზრდას. ასე მქდავანდება ბეტონში ინტენსიური ბზარწარმოქმნის დაწყების პროცესი. რობერტ ლერმიტმა აღწერა მოვლენის საერთო ხასიათი და მიუთითა მისი აკუსტიკური ემისიის მეთოდით შეფასების შესაძლებლობის შესახებ.

გ.პოტკოვიჩმა სხვებთან ერთად [40], ტენზომეტრულ, მეთოდებთან კომპლექსში, ბზარწარმოქმნის პროცესის შეფასება დატვირთვის სხვადასხვა საფეხურებზე მოახდინა აკუსტიკური ემისიის მეთოდითაც.

პიეზოელექტროგადამწოდის მეშვეობით, რომელიც დამაგრებულია ნიმუშზე, ხდება ბზარის გაჩენისას აღძრული ბგერითი იმპულსების ელექტრულ იმპულსებად გარდაქმნა და თვითჩამწერი აპარატურით მისი რეგისტრაცია. ეს იმპულსები ხასიათდებიან დროის ერთეულში გამოყოფილი ენერგიით. ცდები ტარდებოდა ცემენტქვიშისაგან დამზადებული ნიმუშების ღერძულ კუმშვაზე.

ავტორები მიუთითებენ, რომ დატვირთვის სხვადასხვა საფეხურზე მასალის დეფორმირებისას შთანთქმული ჯამური ენერგიის ცვლილების ხასიათი დაახლოებით ერთნაირია. უფრო მტკიცე ბეტონებს შეესაბამება გამოყოფილი ენერგიის უფრო მაღალი დონეები და ჰისტერეზისის მარყუჟის დიდი სიმკვრივეები. ჩატარებული საკვლევო სამუშაოს მიხედვით ავტორები ასკვნიან, რომ მიკრორღვევების ენერგია შეიძლება მიღებულ იქნეს მასალის სიმტკიცის კრიტერიუმად და მასალის მრღვევი ზემოქმედებისადმი წინააღობის უფრო მგრძობიარე პარამეტრია, ვიდრე სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე.

სიმტკიცის ზღვრის 1,1-ჯერ ცვლილებას შეესაბამება გამოსხივების ენერგიის 1,8-ჯერ ცვლილება.

ხანგრძლივი ღერძული დატვირთვისას მიკრობზარების ჩამოყალიბების და განვითარების პროცესების შესწავლისას ენერგეტიკული მიდგომა პრიორიტეტულია ნ. ტემნიკის [52] მიერ შესრულებულ სამუშაოშიც. მიკრობზარწარმოქმნაზე ენერგოდანახარჯები წარმოადგენენ სტრუქტურის რღვევის ხარისხის ძირითად რაოდენობრივ მახასიათებელს და შესაძლებელია ბეტონის ხანგრძლივი სიმტკიცისა და მიკრობზარწარმოქმნის ენერგიას შორის ურთიერთკავშირის მოძებნა – თვლის სტატიის ავტორი. მიკრობზარწარმოქმნის შეფასება აკუსტიკური გამოსხივების მონაცემებზე დაყრდნობით ხორციელდება ბრიულისა და კიერის ხმაურსაზომი აპარატურით.

ნ. ტემნიკი მიუთითებს, რომ ნიმუშის ხანმოკლე დატვირთვისას შეიძლება გამოიყოს სამი მონაკვეთი. მათგან პირველი ხასიათდება გამოყოფილი ენერგიის შენელებული ზრდით, რაც აიხსნება ყველაზე უფრო სუსტი კავშირების

ლიკვიდაციით და საწყისი მიკრობზარების დახურვით. ამ მონაკვეთზე გამოიყოფა რღვევის ჯამური ენერგიის 5-8%.

მეორე მონაკვეთი ხასიათდება მიკრობზარწარმოქმნის პროცესის სტაბილიზაციით და გამოყოფილი ენერგიის მუდმივობით. ამ მონაკვეთზე გამოიყოფა რღვევის ჯამური ენერგიის 25-30%.

მესამე მონაკვეთი ხასიათდება შთანთქმული ენერგიის დაქვეითებით, რომელიც მიკრობზარწარმოქმნის პროცესის ნაწილობრივი ჩაქრობით აიხსნება. ახალი მიკრობზარები არ წარმოიქმნება, ხოლო შემდგომში მათი გაერთიანების, შერწყმის და მაგისტრალურ ბზარებში გადაზრდის აქტიური პროცესი იწვევს ენერგიის გამოყოფის მკვეთრ ამაღლებას. ამ მონაკვეთზე გამოყოფილი ენერგიის რაოდენობა 60-70%-ია რღვევის ჯამური ენერგიისა.

ვ. კაბიში [30] იკვლევდა მსუბუქ ბეტონებში მექანიკურ მახასიათებლებსა და აკუსტიკური ემისიის პარამეტრებს შორის კორელაციურ კავშირებს. აკუსტიკური ემისიის სიგნალებს იწვევდნენ სხვადასხვა ფორმის შტამპების ჩაწნებით, გამოსაცდელ ნიმუშებში. ამ დროს წარმოიქმნებოდა ლოკალური რღვევის კერები, რომლებიც ფიქსირდებოდნენ მათი შესაბამისი დაძაბულობის ტალღების რეგისტრაციით. ვ. კაბიშის მტკიცებით მსუბუქი ბეტონის მექანიკურ მახასიათებლებსა და აკუსტიკური ემისიის პარამეტრებს შორის კორელაციის კოეფიციენტი ერთს უახლოვდება.

ა. მერკინი და ი. დომოკევა [36] გვთავაზობენ ბეტონის სიმტკიცისა და ერთგვარობის შეფასების სტატისტიკურ მეთოდს. ამ მიზნით გამოყენებული იქნა აკუსტიკური ემისიის მეთოდი. როგორც ცნობილია, ბეტონის სიმტკიცის მახასიათებლების გაზნევა ჩვეულებრივ ფასდება რამდენიმე ნიმუშის გამოცდის შედეგების საშუალო მნიშვნელობით; ამგვარი შეფასება არამგრძობიარეა მასალის სტრუქტურული არაერთგვარობის მიმართ და ვერ ავლენს რღვევის სტატისტიკურ ხასიათს. აე-ს მეთოდით საიმედოდ ფიქსირდება მასალაში წარმოქმნილი ბზარები. გამოიყენეს რა ეს მოვლენა, ავტორები ახდენდნენ აე-ს სიგნალების რეგისტრაციას 0,25 მგპა ძაბვის ინტერვალით. აგებული იქნა გრაფიკები, რომლებზედაც ასახულ იქნა ძაბვისა და აკუსტიკური ემისიის (აე-ს) იმპულსების ფარდობითი მნიშვნელობები. მათი ანალიზი გამოიყენებოდა

სიმტკიცის სტატისტიკური გაზნევის შეფასებისათვის. კერძოდ, მათემატიკური სტატისტიკის მეთოდით ხდებოდა მასალის არაერთგვარობის კოეფიციენტის გამოთვლა, რომელიც მიუთითებდა ტყუპი ნიმუშების სიმტკიცეების გაზნევის მნიშვნელობაზე.

ბეტონის ხანგრძლივი წინაღობის გამოკვლევას აკუსტიკური ემიის მეთოდით ეძღვნება ვ. ლოგუნოვას, ი. მიხალევსკაიასა და ა. მასლევცოვის [22] ექსპერიმენტული სამუშაო. სტატიის ავტორების აზრით, ხანგრძლივ წინაღობად აღიქმება ის კრიტიკული ძაბვა, რომელიც ნაგებობის ექსპლუატაციის დროს მასზე მოქმედი სხვადასხვა ფაქტორის გამო არ იწვევს მის რღვევას. ბეტონის ხანგრძლივი წინაღობის გამოკვლევა დაკავშირებული უნდა იყოს მიკრორღვევების ხარისხთან, რომელიც არ იწვევს მასალის მზიდუნარიანობის დაქვეითებას.

მიკრობზარების დასაშვები მოცულობა განისაზღვრება ემისიის მეთოდით. აე-ს პარამეტრების (იმპულსების წარმოქმნის ინტენსიურობა, ამპლიტუდა და სიგნალის ენერგია) გაზომვამ და ამ პარამეტრების მნიშვნელობების გრაფიკულმა შედარებამ მექანიკურ მახასიათებლებთან (ძაბვა, დეფორმაცია) საშუალებას მისცეს ავტორებს დაედგინათ, რომ ღერძულ კუმშვაზე ბეტონის ხანგრძლივი წინაღობის შეფარდება მრღვევ დატვირთვისთან მუდმივი სიდიდეა და ტოლია $R_{\text{ხანგრძლივი}} = 0,63$;

მიკრობზარების ხასიათი სამი სხვადასხვა შედგენილობის ბეტონში აკუსტიკური ემისიის მეთოდით იქნა გამოკვლეული ი. რიბიევის და სხვათა მიერ, ნაშრომში [46]. ექსპერიმენტები ტარდებოდა ხრეშზე და ქვიშაზე, კარბონატულ ღორღზე და კარბონატულ ქვიშაზე და კარბონატული ღორღზე და კვარცის ქვიშაზე დამზადებულ ნიმუშებზე. ნიმუშები გამოიცდებოდა ღერძულ კუმშვაზე დატვირთვის სხვადასხვა საფეხურებზე დაყოვნებით. ამ დროს ფიქსირდებოდა როგორც ცალკეულ საფეხურებზე იმპულსების რაოდენობა, ასევე იმპულსების საერთო რაოდენობა – N_p . ადრეული იმპულსების ჩამოყალიბება დარეგისტრირდა ხრეშზე და კვარცის ქვიშაზე დამზადებულ ბეტონის ნიმუშებში, ისინი შეესაბამებოდნენ საკონტაქტო ზონაში მიკრობზარების წარმოქმნას. კარბონატულ შემკვებებზე დამზადებულ ბეტონის

ნიმუშებში მიკრობზარწარმოქმნა იწყებოდა დატვირთვის უფრო გვიანდელ საფეხურებზე, მაგრამ გაცილებით ინტენსიურად, რასაც სტატიის ავტორები ხსნიან მიკრობზარების გაჩენით არა მარტო საკონტაქტო ზონაში და დულაბში, არამედ კარბონატული შემცველის მსხვილ მარცვლებშიც.

ბეტონის დეფორმირებისა და რღვევის საკითხებისადმი მიძღვნილი სამუშაოების განხილვამ გვიჩვენა, რომ კვლევები ამ მიმართულებით მხოლოდ საწყის სტადიაზე იმყოფებიან. ბეტონის რღვევის პროცესში გარკვეული კანონზომიერების გამოვლენის მიზნით, ჩატარებულმა ცალკეულმა ცდებმა სასურველი ნაყოფი ვერ გამოიღეს. ეს პირველყოვლისა განპირობებულია თვით მასალის, ბეტონის, სპეციფიკურობით, და მასზე მოქმედი ფაქტორების მრავალრიცხოვნობით, რომლებიც დიდ ზეგავლენას ახდენენ საკვლევი მასალის სიმტკიცესა და დეფორმირებაზე. მიუხედავად ამისა, კვლევის ზემოთ მოყვანილი შედეგები საფუძველს იძლევიან დავრწუნდეთ იმაში, რომ ბეტონის დატვირთვისას მასში მიმდინარე სტრუქტურული ცვლილებები კარგად აიწერება აკუსტიკური ემისიის მეთოდით. ვინაიდან აკუსტიკური ემისიის პარამეტრები გვევლინებიან ბეტონში მიმდინარე ფიზიკური გარდაქმნების ინფორმაციის შემცველ მახასიათებლებად, მათ მართებულ გამიფვრაზეა დამოკიდებული მასალის თვისებების შეუმცდარი შეფასება ექსპლუატაციის სხვადასხვა რეჟიმის დროს.

ზემოთ ნათქვამს თუ დავაკონკრეტებთ, შეიძლება დავასკვნათ, რომ ბეტონის რღვევა როგორც ხანგრძლივი, ასევე ხანმოკლე დატვირთვების დროს განპირობებულია ერთი და იგივე ფაქტორებით – მიკრობზარების გაჩენით და დაგროვებით. ხანმოკლე დატვირთვების დროს ამ პროცესს უფრო ფორსირებული ხასიათი აქვს, ვიდრე ბეტონის ხანგრძლივი დატვირთვის დროს. თუმცა საბოლოო შედეგი ერთნაირია: რღვევა ხორციელდება მასალაში დეფექტების გარკვეული, კრიტიკული კონცენტრაციის მიღწევის შემდეგ. დაზიანების დაგროვების პროცესის ანალიზი, ამ მოვლენის კინეტიკის შესწავლა, წარმოადგენს შემდგომი კვლევების ძირითად ამოცანას. ამასთან გათვალისწინებულ უნდა იქნეს სხვადასხვა ფაქტორის სტრუქტურის, გარემო პირობების, დატვირთვის ხასიათის, გამყარების პირობების და სხვა გავლენა, რომელიც შესწავლილ უნდა იქნას დესტრუქციის პროცესების კვლევის თანამედროვე მეთოდებთან კომპლექსში.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, წინამდებარე სამუშაოს მიზანს შეადგენს ინტენსიური ბზარწარმოქმნის დაწყების დონეზე მოქმედი სხვადასხვა ფაქტორის გავლენის შესწავლა და ხანმოკლე დატვირთვების საფუძველზე ხანგრძლივი სიმტკიცის პროგნოზირების მეთოდის შემუშავება. ამ მიზნით ნაშრომში ბეტონის სიმტკიცისა და დეფორმაციულობის კვლევის თანამედროვე მეთოდებთან კომპლექსში გამოყენებულ იქნა ჩვეულებრივი, ბეტონის მექანიკური თვისებების შემსწავლელი ცნობილი მეთოდები.

ბეტონების ფიზიკურ-ქიმიური მექანიკის ძირითად დებულებებზე დაყრდნობით ნაშრომში განხილულია შემდეგი საკითხები:

ა) შემცვების სისხოს, მისი მოცულობითი შემცველობის და სიმკვრივის გავლენა ბეტონის დეფორმირებასა და რღვევაზე;

ბ) გამყარების პირობების გავლენა ბეტონის დეფორმირებისა და რღვევის პროცესებზე;

გ) ბეტონში ინტენსიური ბზარწარმოქმნის დაწყების პროცესზე ტენშემცველობის გავლენის შესწავლა;

დ) მაპლასტიცირებელი დანამატების ზემოქმედების შესწავლა ბეტონში მიმდინარე დესტრუქციულ პროცესებზე;

ე) დატვირთვის ინტენსიურობასა და აკუსტიკური ემისიის სიგნალებს შორის კორელაციური დამოკიდებულების დადგენა.

თავი II. კვლევის მიმართულების არჩევა და ცდის ჩატარების მეთოდოლოგია

2.1. აკუსტიკური ემისიის მეთოდის დახასიათება

წინამდებარე ნაშრომში მიღებულ იქნა გადაწყვეტილება, რომ ბეტონის ბზარწარმოქმნის პროცესის შემსწავლელ მრავალ მეთოდთაგან უპირატესობა მიგვენიჭებინა და აგვერჩია აკუსტიკური ემისიის სიგნალების რეგისტრაციის მეთოდი. აკუსტიკური ემისიის სიგნალები შეიძლება მომდინარეობდნენ მყარი სხეულების დეფორმირებისას სხვადასხვა წყაროდან. ჩვეულებრივ ისინი იუწყებიან მასალის შიგა სტრუქტურის ძალიან სრაფი, ლოკალური ცვლილების შესახებ. აკუსტიკური ემისიის გამომწვევი მიზეზი სხვადასხვა მასალისათვის სხვადასხვაა; ასე მაგალითად: სრიალი დისლოკაციისას, გაორება, მარტენსიტული ტიპის ფაზური გარდაქმნები და რა თქმა უნდა მიკრობზარწარმოქმნა, ბზარების განვითარება და ხახუნის პროცესები. ატომების სრიალი, გაორება და ფაზური გარდაქმნები არღვევენ სტრუქტურის მთლიანობას და ამით განაპირობებენ გარემოში დრეკადი ტალღების გამოყოფას. ასეთი ტალღების ზუსტი ანალიზი ბეტონის შემთხვევაში გაძნელებულია და არც არის მიზანშეწონილი, რადგან ისინი ხასიათდებიან დაბალი ენერგიით და სწრაფად მიილევიან მასალაში მაღალი სიხშირის გამო. ამ მოვლენების აკუსტიკური ემისია შესწავლილია სხვა უფრო ერთგვაროვანი მასალების (ლითონები, პოლიმერები, შენადული ნაერთები და სხვ).

ბზარების წარმოქმნის დროს მექანიკური ტალღების გამოსხივება შეიძლება აიხსნას მასალის იმ ნაწილის დინამიკური განტვირთვით, რომელიც ბზარის ნაპირებს ესაზღვრება. ამავე ეფექტს იწვევს ბზარების ნახტომისებრი ზრდაც [15].

ვ. ფინკელის [61] აზრით, განვითარებადი ბზარის დრეკადი ტალღის წარმოქმნას ხელს უწყობს მისი სიჩქარის პულსაცია, ასევე მიმართულების მკვეთრი ცვლილება, ე.ი. აკუსტიკური სიგნალების წარმოქმნის ერთ-ერთ მიზეზად შეიძლება დავასახელოთ ბზარების განტოტვა.

ბზარების განვითარებისას წარმოქმნილ აკუსტიკურ მოვლენებს იკვლევდნენ მრავალ ნაშრომში [18, 19, 22, 24].

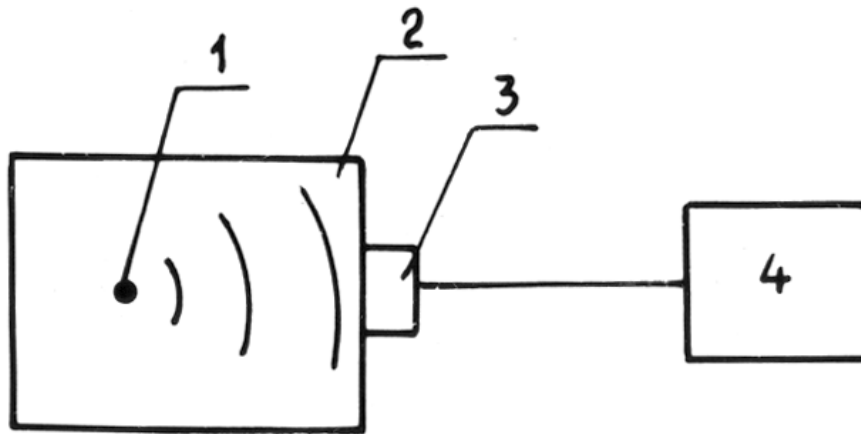
ყოველგვარი მშრალი ხახუნი მიმდინარეობს ზედაპირების მიკროარაერთგვარობების პლასტიკური დეფორმაციების თანხლებით. სხეულების შემადგენელი ნაწილების ურთიერთსრიალის დროს ირღვევა ძველი და ჩნდება ახალი საკონტაქტო უბნები. ყველაფერმა ამან შეიძლება გამოიწვიოს მიკრობზარების წარმოქმნა ხახუნის ზედაპირებზე. ამგვარი პროცესები მიმდინარეობენ სხეულის შიგნითა (ტანში) მისი დეფორმირების დროს. ხახუნის შედეგად გამოწვეული მექანიკური ტალღები ასევე აკუსტიკური ემისიის ჩამოყალიბების საფუძველია. გერმანელი მეცნიერი ი. კაიზერი მიიჩნევდა გაგლეჯვის ზედაპირების ურთიერთხახუნის პროცესს, რომელიც მასალის შიგნით მისი დეფორმირებისას მიმდინარეობს, აკუსტიკური სიგნალების აღმოცენების ერთ-ერთ ძირითად მიზეზად [21].

ზემოთ მინიშნებული წყაროები, რა თქმა უნდა, ვერ ამოწურავენ აე-ს იმპულსების წარმოშობის ყველა მიზეზს, მაგრამ ისინი ითვლებიან ძირითად კერებად ბეტონში ბგერითი რხევების გაჩენისა. აქედან გამომდინარე აკუსტიკური ემისიის, როგორც მოვლენის ცნება შეიძლება ასე განისაზღვროს: «აკუსტიკური ემისია არის მასალის შიგა სტრუქტურის დანამიკური, ლოკალური გადაწყობით გამოწვეული მექანიკური ტალღების გამოსხივების პროცესი» [15].

ზემოთქმულიდან გამომდინარე შეიძლება დავასკვნათ, რომ მექანიკური ტალღები შეიძლება გამოთავისუფლდნენ, როგორც სუბმიკროსკოპულ და მიკროსკოპულ დონეებზე (ერთგვაროვანი მასალების მესრებში წარმოქმნილი სრიალის და გაორების პროცესები დეფორმაციისას, ფაზის სწრაფად მიმდინარე მარტენსიტული გარდაქმნები), ასევე მიკროდონეებზეც (ბზარების გაჩენა, მათი განვრცობა და განვითარება, რღვევისა და ხახუნის პროცესები).

წყაროების სიდიდის მიხედვით, იმიტირებული ბგერითი სიგნალები ვრცელდებიან რამდენიმე ათეული რიგის სიხშირეებით, კერძოდ ინფრაბგერიდან (<16 ჰც-ზე, როგორც მიწისძვრების შემთხვევაში) დაწყებული და ულტრაბგერით დამთავრებული (<16 კჰც-ზე) [23].

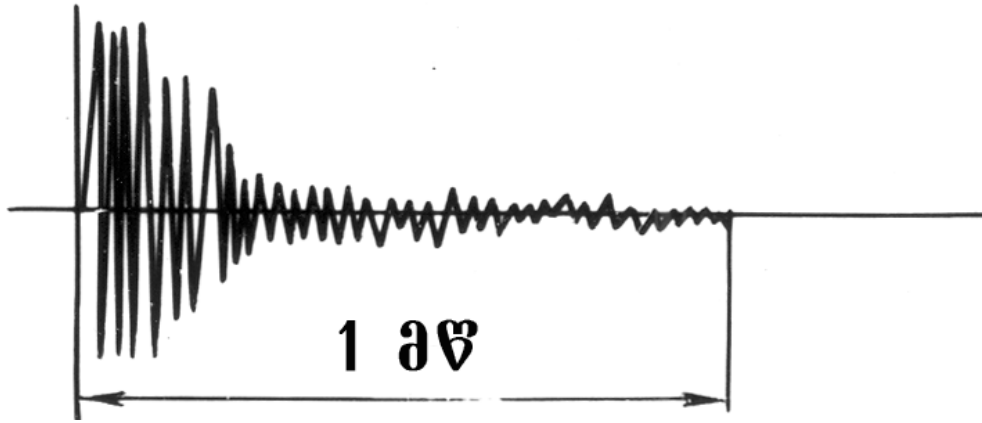
აკუსტიკური სიგნალების რეგისტრაციის უმარტივესი სქემა წარმოდგენილია ნახ. 2.1.-ზე.



ნახ. 2.1. აე-ს პარამეტრების რეგისტრაციის სქემა

გამოსაკვლევ სხეულში 2 აღძრული მექანიკური იმპულსები, რომლებიც 1 წყაროს მიერ არიან გამოწვეულნი, გარდაიქმნებიან ელექტრულ სიგნალებად კონტაქტური პიეზოგარდამქმნელით 3. ეს ელექტრული სიგნალები ძლიერდება, გადამუშავდება და რეგისტრირდება ელექტრონული აპარატურით 4.

ტალღური მოძრაობის დისპერსია მყარ სხეულში იწვევს საწყისი მექანიკური სიგნალის ფორმის დამახინჯებას. შემდეგი დამახინჯების მიზეზია გარდამქმნელის თვისებები. საწყისი მექანიკური იმპულსის მცირე ენერჯის გამო, რათა მოხდეს ხელსაწყოს მგრძნობიარობის ამაღლება, როგორც წესი იყენებენ პიეზოგადამწოდებს. ამ გადამწოდების მუშაობა დაფუძნებულია გარკვეული კრისტალების თვისებებზე, რაც გამოიხატება მათზე მექანიკური ზემოქმედების შემთხვევაში ელექტრული სიგნალის აღძვრის ფენომენზე (პიეზოელექტრული ეფექტი), ამიტომ მექანიკური ზემოქმედების ცალკეული ციკლის დროს აღიძვრება თავად გარდამქმნელის რეზონანსული რხევები, ხოლო გარდამქმნელის ბოლოში გამოსულ ელექტროსიგნალს ექნება რადიოიმპულსის სახე, რომელიც ნახ. 2.2-ზე ასახული.



ნახ. 2.2. ელექტრონულ ოსცილოგრაფზე დაფიქსირებული სიგნალის სახე

დეკლარაციის საშიშროების თავიდან აცილების მიზნით, რომელიც შესაძლებელია წარმოიშვას შემხვედრი, ძლიერი ელექტრული ველების (>1000 ვოლტ/მმ), დიდი მექანიკური დამაბულობის, ან ატომური გამოსხივების ზემოქმედების (>10¹⁰_{რად}) დროს, ბგერითი ემისიის გარდაქმნილი სიგნალები საკვლევი ობიექტის ზედაპირიდან არინებული უნდა იქნას სპეციალური ტალღამეტარებით, ოსცილოგრაფზე რეგისტრაციის და შემდგომი ანალიზისათვის.

თუ ორი მექანიკური სიგნალის წარმოშობის დრო აღემატება გარდამავალი პროცესების მიმდინარეობის დროს საკვლევ სხეულში, ამ შემთხვევაში აკუსტიკური ემისიის იმპულსები აღქმულნი იქნებიან ხელსაწყოს მიერ, როგორც დისკრეტული თანმიმდევრობა და ამ ტიპის ემისიას ეწოდება დისკრეტული ემისია.

თუ ბგერითი იმპულსები წარმოიქმნებიან ძალიან მჭიდრო თანმიმდევრობით, მაშინ ფაქტიურად შეუძლებელი ხდება ერთი სიგნალის მეორედან გამოცალკევება. ამ შემთხვევაში საქმე გვაქვს უწყვეტ აკუსტიკურ ემისიასთან, რომელიც ოსცილოგრაფზე გამოისახება როგორც მთლიანი ელექტრული ტალღა.

აკუსტიკური ემისიის პარამეტრები. უნდა აღინიშნოს, რომ დღემდე არ არის სტანდარტიზებული აკუსტიკური ემისიის ტერმინოლოგია. გამოქვეყნებულ სამუშაოებში ერთი და იგივე ცნების აღსანიშნავად ხშირად სხვადასხვა ტერმინი

იხმარება, რაც ძალიან ართულებს მიღებულ შედეგების გაგებას და ინფორმაციის გაცვლას. უნდა აღინიშნოს, რომ ამ სამუშაოში, ჩვენს მიერ გამოყენებული იქნება [15] წიგნში მოყვანილი ტერმინები. აკუსტიკური ემისიის პარამეტრებია: იმპულსების საერთო რაოდენობა (დროის გარკვეულ შუალედში დისკრეტული აკუსტიკური ემისიის იმპულსების საერთო რაოდენობა), ჯამური აკუსტიკური ემისია [დროის საკვლევ ინტერვალში აკუსტიკური ემისიის სიგნალების რაოდენობა დაწესებული შეზღუდვის (დისკრიმინაციის) დონის პირობებში], აე-ს აქტიურობა (იმპულსების საერთო რაოდენობა დროის ერთეულში), აკუსტიკური ემისიის სიგნალების ამპლიტუდა [აე-ს ინტენსივობა (ჯამური აკუსტიკური ემისია, დროის ერთეულში), აკუსტიკური ემისიის იმპულსის (ტალღის) მაქსიმალური მნიშვნელობა დროის მოცემულ შუალედში], ამპლიტუდური განაწილება (დროის არჩეულ შუალედში აე-ს იმპულსების ამპლიტუდების განაწილება), აე-ს სიგნალების ენერგია (დროის მოცემულ ინტერვალში, წინასწარ დადგენილი სიხშირის ზონაში, გამოყოფილი ენერგია), აე-ს სპეციალური სიმკვრივე (აე-ს სიგნალების განაწილება ენერგიის სიხშირის მიხედვით).

როგორც აღნიშნული იყო, მასალაში წარმოქმნილი მექანიკური ტალღები, პიეზოგარდაქმნელით გარდაიქმნება ელექტრულ სიგნალებად. პრაქტიკაში ძირითადად ამ ელექტრული სიგნალებით ოპერირებენ, რომლებიც ასევე შეგვიძლია დავახასიათოთ ზემოთ ჩამოთვლილი პარამეტრებით.

ჩვენთვის ცნობილია, რომ აე-ს სიგნალები წარმოიქმნებიან დიდი სიხშირის დიაპაზონში – სმენით აღსაქმელი ხმაურიდან ულტრაბგერებით იმპულსებამდე. პრაქტიკულად გასაზომი სიხშირე იმყოფება 30 ჰერცისა და 200 კილოჰერცის შუალედში. გასაზომი დიაპაზონის შეზღუდვა ძირითადად განპირობებულია სხვადასხვა ხელის შემშლელი ფაქტორის თავიდან აცილების მიზნით (როგორებიცაა დანადგარის ხმაური, წნეხის ფილების მოძრაობა და სხვა). ასე მაგალითად, დ. მოსესოვის [37] მონაცემებით აე-ს იმპულსების სიხშირის დიაპაზონი ბეტონისათვის იცვლება 20 კჰც-დან 120 კჰც-მდე. სხვა ექსპერიმენტატორები [71, 72] იყენებენ აპარატურას, რომლის რხევის სიხშირის დიაპაზონი მერყეობს 1,6 კჰც-დან 50 კჰც-მდე შესაბამისი გარდამქმნელების და

ფილტრების შერჩევით სიხშირის სპექტრი ცალკეული ექსპერიმენტებისათვის მიღებულია სხვადასხვა.

აკუსტიკური ემისიის სიგნალების მართებული ინტერპრეტაციისთვის აუცილებელია ნათელი მოვფინოთ, თუ რამდენად შეესაბამებიან ოსცილოგრაფზე რეგისტრირებულ იმპულსები მასალაში დატვირთვისას მიმდინარე დესტრუქციულ მოვლენებს. ამ მიზნით ს. ჟურკოვის და მისი მოწაფეების ნაშრომში [28] გამოკვლეული იქნა რაოდენობრივი ურთიერთდამოკიდებულება მყარ ტანში წარმოქმნილ დეფექტებსა და დარეგისტრირებულ ელექტრულ სიგნალებს შორის. ამასთან რეგისტრირდებოდა როგორც სიგნალების საერთო რაოდენობა, ასევე მათი ამპლიტუდური განაწილებაც. შემდეგ ხდებოდა ნიმუშის განტვირთვა და დატვირთვის გამო მასში გაჩენილი ბზარების გამოკვლევა ხდებოდა ოპტიკური მიკროსკოპით, ნიმუშიდან ამოკვეთილი ნახეხების (შლიფების) მეშვეობით. ექსპერიმენტების გაკონტროლების მიზნით ნახეხის (შლიფის) ამოღება ხდებოდა დაუტვირთავი ნიმუშებიდანაც. ნახეხების შედარებამ ცხადყო, რომ მიკრობზარების უმეტესობა წარმოშობილ იქნა დატვირთვის შემდეგ, თუმცა მათი გარკვეული კონცენტრაცია დაუტვირთავ ნიმუშებშიც აღინიშნებოდა. ნახეხის ზედაპირზე ბზარების რაოდენობის დათვლის შემდეგ წარმოებდა მათი სეპარაცია ზომების მიხედვით. ამის შემდეგ ნიმუშიდან წარმოებდა 5000 მკმ სისქის ნახეხის ამოღება, მასზე ბზარების დათვლა და ა.შ. ამან საშუალება მისცა ავტორებს მიეღოთ ბზარების კონცენტრაციის სურათი ნიმუშის მთელს მოცულობაში და ეს მონაცემები შეედარებინათ იმპულსების მთვლელ აპარატზე დაფიქსირებული აკუსტიკური სიგნალების სპექტრისათვის. აღმოჩნდა, რომ ნახეხებზე დათვლილ ბზარების და აკუსტიკური სიგნალების რაოდენობებს შორის სხვაობა მხოლოდ რამდენიმე ერთეულს შეადგენდა. ასევე გამოკვლეულ იქნა დამოკიდებულება ბზარის სიგრძესა და გამოსხივებული იმპულსის ამპლიტუდას შორის. ამისათვის ორ ნიმუშს შორის მაგრდებოდა სხვადასხვა დიამეტრის მინის ძაფები. ღუნვისას ეს ძაფები მყიფედ იმსხვრეოდნენ და მათი მსხვრევისას წარმოქმნილი დრეკადი იმპულსი რეგისტრირდებოდა პიეზოგადამწოდით, რომელიც თავის მხრივ მიმაგრებული იყო ნიმუშის

ზედაპირზე, ელექტრულ სიგნალად გარდაქმნილი ტალღები შემდგომ ხვდებოდნენ ამპლიტუდურ ანალიზატორში. სიგნალის ამპლიტუდის პარამეტრების დამოკიდებულება მინის ძაფების დიამეტრზე წრფივი აღმოჩნდა.

ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე ექვს არ იწვევს რომ აე-ს პარამეტრები უტყუარ ინფორმაციის გვაწვდიან მასალის შიგნით მიმდინარე სტრუქტურულ ცვლილებებზე და ხელსაწყოს მგრძობიარობის ზღურბლის მართებული გრადუირებით შეიძლება მოვიცვათ მასალის დესტრუქციის მთელი პროცესი.

მიკრობზარების წარმოქმნის და დაგროვების პროცესების შესასწავლად სხვადასხვა მეცნიერის მიერ გამოყენებული იქნა აე-ს სხვადასხვა პარამეტრი, სხვადასხვა შეხამებით. ასე მაგალითად, ს. ჟურკოვსკისა და მისი მოწაფეების სამუშაოებში მიკრობზარების დაგროვების კინეტიკის შესწავლის და მასალების ხანგამძლეობის პროგნოზირების მიზნით გამოიყენებოდა აე-ს იმპულსების რაოდენობისა და ამპლიტუდური განაწილების ანალიზი. მიმოხილვით ნაწილში აღნიშნული იყო, რომ გ. პოჩტოვიკი და ნ. ტემნიკი ბეტონის სიმტკიცის შესაფასებლად იყენებდნენ ბზარწარმოქმნის ენერჯის პარამეტრებს. აკუსტიკური ემისიის ენერჯია და სიგნალების ამპლიტუდური ანალიზი გამოიყენება აგრეთვე. ვ. ლოგუნოვასა და ე. მიხალევსკაიას ნაშრომში [33], ბეტონის ხანგრძლივი წინააღმდეგობის პროგნოზირებისთვის.

წინამდებარე ნაშრომში წარმოებდა აე-ს იმპულსების რეგისტრაცია და დათვლა სხვადასხვა შედგენილობის ბეტონების აე-ს ხასიათის განმასხვავებელი ნიშანთვისებების დადგენის მიზნით; ასევე შეისწავლებოდა სხვადასხვა პირობებში გამყარებულ ბეტონის ნიმუშებში ბზარების დაგროვების კინეტიკა; წარმოებდა აგრეთვე ბეტონის კაპილარებში და ფორებში მუდმივად არსებული თხევადი ფაზის როლის შეფასება დესტრუქციის პროცესებში.

2.2. გამოყენებული აღჭურვილობა და აპარატურა

აკუსტიკური ემისიის მეთოდის გამოყენება მოითხოვს მუშაობის განსაკუთრებულ პირობებს, რადგან ყოველგვარი გარეშე ხმაური

ექსპერიმენტების ჩატარების დროს წარმოადგენს ხელის შემშლელ ფაქტორს – ცრუ სიგნალების წყაროს. ამიტომ იმ გამოსაცდელ მანქანებს, რომლებიც უზრუნველყოფენ ნიმუშის დატვირთვას, მოეთხოვებათ უხმაურო, ჩუმი მუშაობა. როგორც ცნობილია, ყველა ჰიდრავლიკური წნეხი აღჭურვილია ჰიდროტუმბოებით, რომელთა მოძრაობაც უზრუნველყოფილია ელექტროძრავებით. ჰიდროტუმბოს მუშაობისას აღიძვრება ვიბრაციები, რომელიც გადაეცემა ჰიდრავლიკური წნეხის ძალოვან დანადგარს და მასში ჩაჭედილი ნიმუში განიცდის ვიბრაციას. ამ მდგომარეობაში აკუსტიკური გადამწოდი, რომელიც ნიმუშის წიბოზეა მიჭერილი, იღებს ცრუ სიგნალებს რხევის შედეგად და აე-ს ჭეშმარიტი სიგნალები ძნელად გასარჩევი ხდება. ხელის შემშლელი ხმაურის თავიდან აცილების მიზნით ან უარი უნდა ითქვას ელექტრონულ ამძრავიან ჰიდროდგუშზე, ან ჰიდროდგუშში უნდა დაცილდეს წნეხის ძალოვან ნაწილს ისეთ მანძილზე, რომელზეც ვიბრაცია და რხევები საგრძნობი აღარ იქნება.

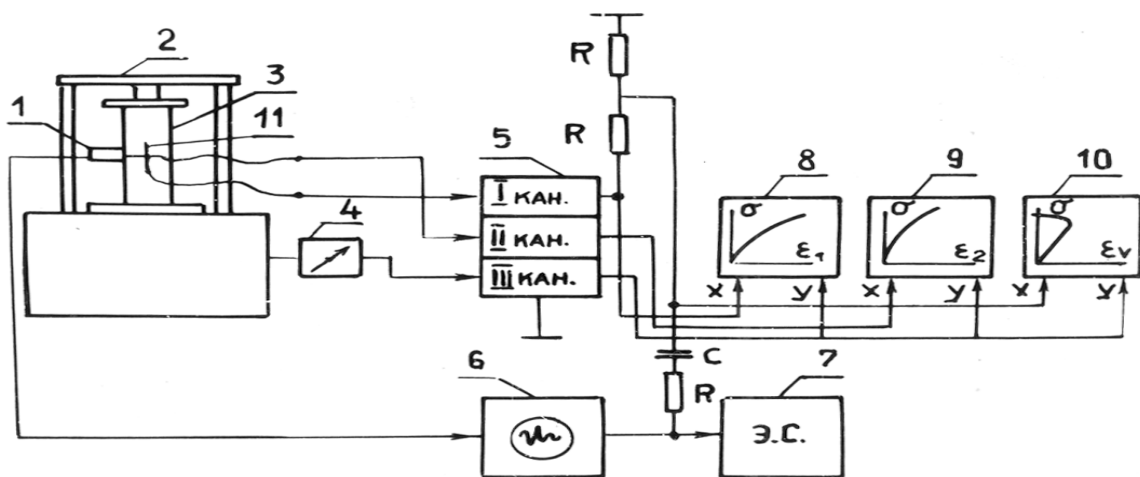
ჩვენს მიერ ნიმუშების გამოსაცდელ მოწყობილობად შერჩეული იქნა 100 ტონიანი ჰიდრავლიკური წნეხი. ის დამონტაჟებული იქნა მასიური ბეტონის ფუნდამენტზე. წნეხის ფუძესა და ფუნდამენტს შორის მოთავსებულ იქნა ცილინდრული ფორმის რეზინის ქვესადებები (6 ცალი). ამგვარად, მაამორტიზებელი რეზინის საშორისები წარმოადგენენ წერტილოვან საყრდენებს ფუნდამენტზე და მინიმუმადე დაჰყავთ შესაძლო ვიბრაციების გადაცემა საძირკვიდან წნეხზე.

ამგვარად, წნეხის ვიბროიზოლაციის უზრუნველყოფამ მაამორტიზებელი რეზინის საშორისებით და მასიური ფუნდამენტის არსებობამ, საშუალება მოგვცეს მინიმუმადე შეგვემცირებინა შესაძლო ვიბრაციების და რხევების გავლენა აკუსტიკური ემისიის სიგნალების ჩამოყალიბებაზე.

ჰიდრავლიკური წნეხის მიერ განვითარებული ძალვა ვიზუალურად კონტროლირდება სანიმუშო მანომეტრით. დატვირთვისას აღნიშნული ძალვა მანომეტრის გარდა იზომება სპეციალურად დამზადებული და წნეხში ჩამონტაჟებული ტენზომეტრული ძალის საზომით, რომელიც ბურდონის მილაკს წარმოადგენს და რომელზეც ორი მხრიდან დაწებებულია

ტენზორეზისტორები. მილაკი ორივე ბოლოთი ჩაჭერილია კორპუსში და მათგან ერთ-ერთით მისი შიგა ღრუ მიერთებულია წნეხის ცილინდრის ღრუსთან, რის საფუძველზეც ის დეფორმირდება. მილაკზე დამაგრებულ ტენზორეზისტორები აღიქვამენ მილის ზედაპირზე განვითარებულ დეფორმაციებს. ამ დროს აღიძვრება ძალვის პროპორციულ ელექტრონური სიგნალი. ეს სიგნალი შემდგომ ძლიერდება ტენზოგამაძლიერებელი მოწყობილობით და შეიძლება გაიზომოს ან მიეწოდოს გრაფომგებს.

გამოსაცდელი სისტემის პრინციპული ელექტრული სქემა ნაჩვენებია ნახ. 2.3.-ზე.



ნახ. 2.3. გამოსაცდელი სისტემის ელექტრული სქემა

1. პიეზოელექტრული გარდამქმნელი; 2. ჰიდრავლიკური წნეხი; 3. ბეტონის ნიმუში; 4. მანომეტრული ტენზორეზისტული გადამწოდი; 5. ტენზომეტრული გამაძლიერებლები; 6. ელექტრული ოსცილოგრაფი; 7. ელექტრული მთვლეელი; 8. გრძივი დეფორმაციის გრაფიკამგები; 9. განივი დეფორმაციის გრაფომგები 10. მოცულობითი დეფორმაციის გრაფომგები; 11. ტენზორეზისტორები

ბეტონის პრიზმაში დატვირთვისას აღძრული აკუსტიკური სიგნალები აღიქმებიან პიეზოგადამწოდის 1 მიერ. აკუსტიკური ემისიის (აე) სიგნალების დათვლა წარმოებს «აზ-33» ტიპის ელექტრული მთვლელის მიერ, ნორმალიზებული სიგნალების გამართვა ხდებოდა ელექტრონული ოსცილოგრაფ «С-68»-ით. ჩატარებულ ექსპერიმენტში ოსცილოგრაფი მუშაობს ცდის რეჟიმში, ე.ი. მხოლოდ აკუსტიკური სიგნალის შემოსვლის შემთხვევაში

წარმოიქმნება სხივი და ეს ნორმალიზებული სიგნალი მიეწოდება ელექტრულ მთვლელს.

გრაფომგებად გამოყენებულია «ПДС-021» ტიპის ორკორდინატიანი თვითჩამწერი პოტენციომეტრები. გრძივი, განივი და მოცულობითი დეფორმაციების დიაგრამები იწერება ერთდროულად სამ გრაფომგებზე თითოეული ნიმუშისათვის ცალ-ცალკე. დიაგრამის ჩასაწერად ბეტონის პრიზმების წახნაგებზე დაწებებულია ტენზორეზისტორები გრძივი და განივი მიმართულებით. ტენზორეზისტორების ბაზაა 30 მმ. ექსპერიმენტების დროს ხდება აე-ს სიგნალების შესაბამისი ნიშნების დატანა დიაგრამებზე, რათა უფრო თვალსაჩინო გახდეს დესტრუქციის პროცესი.

ამგვარად, გამოყენებული ელექტრონული, გამაძლიერებელი და მარეგისტრირებელი აპარატურა საშუალებას იძლევა ჩაწერილი იქნას გრძივი, განივი და მოცულობითი დეფორმაციების დიაგრამები, დათვლილ იქნას დატვირთვისას წარმოშობილი აე-ს იმპულსების საერთო რაოდენობა და დაფიქსირებულ იქნას მათი განაწილება დატვირთვის ზრდის მიხედვით. ხოლო ელექტრული ოსცილოგრაფის ეკრანზე წარმოებდეს ვიზუალური დაკვირვება შემოსული სიგნალების ფორმაზე, ზომებზე და ჩაქრობის ხარისხზე.

2.3. გასაზომი აპარატურის მგრძობიარობის შერჩევა

გასაზომი აპარატურის მგრძობიარობის ზღურბლები ლიტერატურულ წყაროებში სხვადასხვა მკვლევარის მიერ სხვადასხვაა შერჩეული. ეს დამოკიდებულია მასალის სტრუქტურაზე, მარეგულირებელი აპარატურის ტიპზე ელექტრული სიგნალის გამძლიერების სიდიდეზე და სხვა. დ. მოსესოვის სამუშაოში [37] აპარატურის მგრძობიარობა იცვლება 100-დან 200 მიკროვოლტამდე. ს. ჟურკოვმა., ვ. კუკსენკომ, ვ. პეტროვმა, რომლებიც ცდებს ატარებდნენ მთის ქანებზე, გამოიყენეს 250 მკვ მგრძობიარობის აპარატურა. ევროპულ ავტორების სტატიებში [23, 71, 72] ეს ზღურბლი მერყეობს 50-დან 500 მკვოლტამდე.

ოსცილოგრაფის საკუთარი ხმაური საშუალებას არ იძლევა 20 მკვოლტამდე მგრძნობიარობის ზღურბლის დაწევისა.

ჩვენს ექსპერიმენტებში პიეზოგარდამქნელის და ოსცილოგრაფის ტიპის მიხედვით მგრძნობიარობის ზღურბლი დადგენილ იქნა 100 მკ ვოლტის ფარგლებში.

2.4. გამოყენებული მასალები და გამოცდილი ნიმუშები

ნაშრომში დასმული საკითხების გადაჭრის მიზნით გამოყენებულ იქნა შემდეგი მასალები და დამზადებულ იქნა შემდეგი ნიმუშები.

ა) ბეტონის დესტრუქციის პროცესის მიმდინარეობაზე სტრუქტურული ფაქტორების მოქმედების შესწავლის მიზნით გამოყენებული იქნა სამი შედგენილობის ბეტონი: ჩვეულებრივი, წვრილმარცვლოვანი და ქვიშოვანი. მსხვილ შემვსებად გამოყენებულ იქნა ბაზალტის ღორღი (ფრაქციებით 5-10მმ ჩვეულებრივი ბეტონისათვის და 2,5-5მმ წვრილმარცვლოვანი ბეტონებისათვის); წვრილ შემვსებად კი დარკვეთის ქვიშა 2,5მმ-მდე ფრაქციით; პორტლანდცემენტი 500 მარკის. ბეტონის შედგენილობა ითვალისწინებდა 400 მარკის მიღებას. დაყალიბებულ იქნა 40X40X160 მმ ზომის პრიზმები – ისინი ინახებოდნენ ნორმალურ პირობებში და გამოცდილ იქნენ 2 თვის ასაკში. მთლიანად დამზადებულ იქნა 24-24 ნიმუში – ტყუპები თითოეული სერიისათვის.

ბ) ბეტონის სახის (შემვსების სიმკვრივის) გავლენის შესწავლის მიზნით ბეტონის დესტრუქციის პროცესის მიმდინარეობაზე დამზადებულ იქნა ნიმუშები 40X40X160 მმ ზომებით მსუბუქი და მძიმე ბეტონისაგან.

200 მარკის მსუბუქი ბეტონისათვის შემვსებად გამოყენებულ იქნა ახალქალაქის ვულკანური წიდა (ღორღი ფრ. 5-10 მმ, ქვიშა < 2,5მმ). I შედგენილობის ბეტონისათვის $f/c = 0,65$. კონუსის განშლა შემრხვე მაგიდაზე = 101 მმ; II შედგენილობის ბეტონისათვის $f/c=0,8$; კონუსის განშლა_ 105მმ.

M200 მარკის მძიმე ბეტონისათვის შემვსებად გამოყენებულ იქნა დარკვეთის ქვიშა ფრ. 2,5მმ-მდე. მარნეულის ბაზალტის ღორღი ფრ. 5-10მმ; I

შედგენილობის ბეტონისათვის $f/c=0,45$. კონუსის განშლა შემრხევ მაგიდაზე ტოლია 104 მმ. II შედგენილობისათვის $f/c=0,5$; კონუსის განშლა _ 106მმ; ორი თვის შემდეგ 12-12 ნიმუში გამოცდილ იქნა ლერძულ კუმშვაზე.

გ) აე-ს ინტენსიურობაზე სხვადასხვა სახის ქიმიური დანამატების გავლენის შესწავლის მიზნით დამზადებულ იქნა ნიმუშების 6 სერია ქვიშოვანი ბეტონისაგან (დულაბი). პრიზმები ზომებით 40X40X160 მმ. ქვემოთ მოყვანილია ბეტონის შედგენილობები თითოეული სერიისათვის.

I სერია _ დულაბი დანამატების გარეშე; საბაზო შედგენილობა; ცემენტ-ქვიშის თანაფარდობა $c : ქვ = 1:3$; $f/c = 0,45$;

II სერია _ საბაზო შედგენილობას ემატება სუპერპლასტიფიკატორი C-3 0,6%-ის ოდენობით ცემენტის მასიდან;

III სერია _ წყლის ხარჯი მცირდება $f/c = 0,35$; ხოლო დანამატი C-3 შეგვყავს 0,6%-ის რაოდენობით ცემენტის მასიდან;

IV სერია _ ცემენტის ხარჯი მცირდება საბაზო შედგენილობასთან შედარებით 25%-ით. C-3 ემატება 0,8%-ის ოდენობით ცემენტის მასიდან $c/ქვ = 1 ; 4$.

V სერია _ ცემენტის ხარჯი შემცირებულია საბაზოსთან შედარებით 25%-ით; ემატება სუპერპლასტიფიკატორი CSF; $f/c = 0,45$;

VI სერია_ საბაზო შედგენილობას ემატება ჰიდროფობიზატორი KЭ-12 – 35 0,1%-ის ოდენობით ცემენტის მასიდან; $c:ქვ = 1:3$; $f/c = 0,41$. ნიმუშები ინახებოდა ნორმალურ პირობებში. თითოეული სერიიდან გამოცდილ იქნა 12-12 ნიმუში ორი თვის ასაკში.

დ) დეფორმირებისა და რღვევის პროცესებზე ბეტონის გამყარების პირობების გავლენის შესწავლის მიზნით დაყალიბებული იქნა პრიზმული ნიმუშები, ზომებით 40X40X160 მმ წვრილმარცვლოვანი ბეტონისაგან. ბეტონის შედგენილობა: მარნეულის ადგილმდებარეობის ღორღი ფრაქციით 5-10 მმ; ქვიშა დარკვეთის (2,5 მმ-მდე ფრაქციით) და პორტლანდცემენტი M 500 მარკის. $f/c = 0,5$. ბეტონის შედგენილობა გაანგარიშებულ იქნა 400 მარკაზე. ნიმუშების ნაწილი ინახებოდა ბუნებრივ პირობებში (ნორმალური და ჰაერმშრალი). ნაწილი დაჩქარებულად გამყარდა (თბოტენიანი დამუშავება). პრიზმები

გამოცდილ იქნა ოთხი თვის ასაკში; მანამდე ისინი ინახებოდნენ სხვადასხვა ტენიანობის გარემოში, გაორთქლილი და გაუორთქლავი ნიმუშებისათვის შექმნილი იქნა სამი გარემო:

1) გაუორთქლავი ნიმუშები:

I სერია _ 112 დღე ნორმალურ პირობებში შენახვა (გამოცდამდე).

II სერია _ 28 დღე ნორმალურ პირობებში, ხოლო დარჩენილი 84 დღე ჰაერმშრალ პირობებში.

III სერია _ 7 დღე ნორმალურ პირობებში, ხოლო დარჩენილი დრო ჰაერმშრალ პირობებში.

2) გაორთქლილი ნიმუშები:

IV სერია _ გაორთქლის შემდეგ 112 დღე იმყოფებოდნენ ნორმალურ პირობებში.

V სერია _ გაორთქლის შემდეგ 28 დღე ნორმალურ პირობებში _ ხოლო შემდეგ _ ჰაერმშრალ პირობებში.

VI _ სერია გაორთქლის შემდეგ გამოცდამდე ნიმუშები ინახებოდნენ ჰაერმშრალ პირობებში.

თითოეული სერიისათვის დამზადებულ იქნა 24-24 ნიმუში.

ე) აე-ს ინტენსიურობაზე ბეტონის ტენშემცველობის გავლენის შესწავლის მიზნით ჩატარებულ იქნა ექსპერიმენტები 40X40X160 მმ ზომის წვრილმარცვლოვანი ბეტონის ნიმუშებზე; მსხვილი შემკვების ზომები: ბაზალტის ღორღი 5 _ 10 მმ; ქვიშა ფრაქციით < 2,5მმ-ზე; რუსთავის ცემენტის ქარხნიდან მარკით 400; წ/ც = 0,5; ნიმუშები მყარდებიან ნორმალურ პირობებში, ხოლო გამოცდის წინ მათზე ტარდებოდა სხვადასხვა პროცედურა. ამავე დროს გაზომვის შედეგების გაზნევის მინიმუმამდე შემცირების მიზნით, რომელიც გამოწვეულია ბეტონის გამკვრივების სხვადასხვა ხარისხით, წარმოებდა ნიმუშების გულდასმით შერჩევა მასით მიხედვით. მასებს შორის განსხვავება არ აღემატებოდა 0,5%-ს. ყველა ნიმუში გამოცდამდე შრებოდა სამრობ კამერაში 105°C-ზე, გამომშრალი ნიმუშებიდან ნაწილი იჟდინთებოდა ვაკუუმის პირობებში წყლით, ხოლო ნაწილი გაწმენდილი არაპოლარული ნავთით. ნიმუშების ნაწილი კი გამოიცდებოდა გამომშრალ მდგომარეობაში. სულ გამოცდილ იქნა 12-12 ნიმუში თითოეული სერიისათვის.

2.5. ნიმუშების გამოცდის მეთოდოლოგია

საკონტროლო ცდების ჩატარებისას ნათელი გახდა, რომ იმ მომენტისათვის, როცა აკუსტიკური ემისიის სიგნალების პირველი დარეგისტრირება ხდება დატვირთვის საწყის საფეხურებზე, პრიზმის წიბოები იწყებენ ჩამოფხვნას. საკონტაქტო ზედაპირების განაპირა მხარეებზე ჩამოტყდება პატარა ნაწილები, რაც ტკაცუნს იწვევს და ამის გამო აღიძვრება აე-ს ფუჭი სიგნალები. ხშირად ხდება ისეც, რომ ეს პროცესი საკმაოდ მდოვრედ ერწყმება ბეტონში მიმდინარე დესტრუქციის პროცესს, ხოლო ფუჭი სიგნალები ხელს გვიშლიან ბზარწარმოქმნის ჭეშმარიტი სურათის აღქმაში. ამგვარი ხელის შემშლელი მოვლენების მთლიანად აღმოფხვრის მიზნით წარმოებდა წიბოების მოხეხვა და მოსწორება სააბრაზივო ქვით. ყველაფერმა ამან საშუალება მოგვცა, რომ ბზარწარმოქმნის ქვედა ზღვრამდე აე-ს იმპულსები ძალზე იშვიათად დაგვეფიქსირებინა.

დატვირთვის ადრეულ სტადიებზე აკუსტიკური ემისიის სიგნალების წარმოქმნის ერთ-ერთ მიზეზად შეიძლება განვიხილოთ ნიმუშის ტორსული ზედაპირების არასწორი ფორმა. ასეთი ნიმუშების წნეხის ფილების ქვეშ მოთავსებისას შეუძლებელია უზრუნველყოთ ფილის სიბრტყეების მთლიანი შეხება ნიმუშების ზედაპირზე. კონტაქტი ხდება ძალზე შეზღუდულ ფართობებზე, რაც იწვევს მოქმედი დატვირთვის ძლიერ ლოკალიზებას და მცირე ფართობებზე დიდი გადაძაბვების შედეგად ტორსულ სიბრტყეებში წარმოებს ლოკალური მიკრორღვევები, რაც ასახვას ჰპოვებს აკუსტიკურ სიგნალებში, იმ დროს როდესაც ბეტონის პრიზმაში დაძაბულობა ძალზე მცირეა, დაახლოებით 5% მრღვევი დატვირთვიდან.

ანალოგიური მოვლენა დაიკვირვება ნიმუშების არასწორი გეომეტრიული დაცენტრების შედეგადაც. ნიმუშების ზომების შემცირებასთან ერთად ზემოთმოყვანილი მოვლენა უფრო საჭირობოროტო ხდება. ამ ხელისშემშლელი

ფაქტორების თავიდან აცილებისათვის გამოსაცდელი ნიმუშები გულმოდგინედ უნდა დათვალიერდეს და შეირჩეს.

მართებული გეომეტრიული დაცენტრებისათვის გამოყენებულია მუხლასახსრული მექანიზმი. ნახევარსფეროში არსებული მუხლი იოლად გადაადგილდებოდა საზეთი საშუალების ხელშეწყობით და ამგვარად განაპირობებდა ნიმუშის სწორ გეომეტრიულ დაცენტრებას. აღნიშნულმა ღონისძიებებმა საშუალება მოგვცეს ბზარწარმოქმნის ჭეშმარიტი სურათის დამახინჯებები მაქსიმალურად აგვეცილებინა თავიდან.

ექსპერიმენტი ისე დაიგეგმა, რომ უზრუნველყოფილიყო ბეტონის კუმშვის დიაგრამების ჩაწერა და აკუსტიკური ემისიის სიგნალების დარეგისტრირება და დათვლა.

კუმშვის დიაგრამების ავტომატური ჩაწერა ხორციელდება შემდეგნაირად: ბეტონის პრიზმის ურთიერთსაწინააღმდეგო წახნაგზე დაწესებულია ტენზორეზისტორები გრძივი და განივი მიმართულებით. ტენზორეზისტორების ბაზაა 50 და 30 მმ (პრიზმების ზომებიდან გამომდინარე). წინაღობა ტოლია 200 ომისა. ტენზორეზისტორები წყვილ-წყვილად პარალელურადაა შეერთებული და მათი საერთო წინაღობა ტოლია 100 ომის. რაც განაპირობებს კარგ შეთანწყობას ტენზოგამაძლიერებელთან. ტენზომეტრულ გამაძლიერებლად გამოყენებულია რვაარხიანი ხელსაწყო «8AHR - 7». პრიზმის წახნაგებზე დაწებებული ტენზორეზისტორები ამავე დროს ჩართულნი არიან გამაძლიერებლის ნახევარწრედში. ისინი ნიმუშის დატვირთვისას იღებენ დეფორმაციებს და გარდაქმნიან მათ პროპორციულ ელექტრულ სიგნალებად. ეს სიგნალები ტენზოგამაძლიერებლის შესაბამისი არხებით ძლიერდება და მიეწოდება გრაფომგებების ჰორიზონტალურ შესასვლელებს. ვერტიკალურ შესასვლელებზე იმავე გრაფომგებებისა მიეწოდება დატვირთვის პროპორციული ელექტრული სიგნალი.

ამგვარად, დატვირთვის პროცესში გრაფომგებების შესასვლელებში ერთდროულად შემოდის დატვირთვისა და დეფორმაციების შესატყვისი ელექტრული სიგნალები, რაც უზრუნველყოფს კოორდინატთა სისტემაში მოცულობით დეფორმაციების დიაგრამების ავტომატურ ჩაწერას.

როგორც უკვე აღნიშნული იყო, ბეტონის ნიმუშში აღძრული აკუსტიკური სიგნალები აღიქმებიან პიეზოგადამწოდის მიერ და გარდაიქმნებიან ელექტრულ სიგნალებად. ეს სიგნალები ზონდით მიეწოდება «C1 – 68» ტიპის ოსცილოგრაფს, აე-ს სიგნალების დათვლა წარმოებს «R3-33» ტიპის ელექტრული მთვლელით. გრაფომგებად გამოყენებულია «ПДС-021» ტიპის ორკოორდინატიანი თვითჩამწერი პოტენციომეტრები. გრძივი, განივი და მოცულობითი დეფორმაციების დიაგრამები იწერებოდა ერთდროულად სამ გრაფომგებში, თითოეული ნიმუშისათვის ცალ-ცალკე. ექსპერიმენტების დროს ხდებოდა აე-ს სიგნალების შესაბამისი ნიშნაკების დატანა დიაგრამებზე, რათა უფრო თვალსაჩინო ყოფილიყო დესტრუქციის პროცესი. ნიმუშები მიგვყავდა რღვევამდე და ამ დროს ფიქსირდებოდა აე-ს იმპულსების საბოლოო რაოდენობა.

დატვირთვისას თვითჩამწერის კალამი ავტომატურად გადაადგილდება ჰორიზონტალური მიმართულებით და სადიაგრამე ქაღალდზე გახაზავს დატვირთვის შესაბამის ხაზს. აკუსტიკური სიგნალის გაჩენის შემთხვევაში იგივე თვითჩამწერის კალამი აკეთებს ვერტიკალურ სვლას წარმოქმნილი იმპულსის ტაქტში. ამგვარად, არის უზრუნველყოფილი აე-ს იმპულსების განაწილების დიაგრამა დატვირთვაზე დამოკიდებულებით.

ანალოგიურად დაიტანება აკუსტიკური ემისიის სიგნალების შესაბამისი ნიშნაკები ბეტონის ნიმუშის მოცულობითი დეფორმაციების დიაგრამებზე.

III თავი. სტრუქტურული ფაქტორების გავლენა ბეტონის დეფორმირებისა და რღვევის პროცესებზე

გასული საუკუნის 80-იან წლებში პროფესორი ა. გვოზდევნი ეყრდნობოდა რა ო. ბერგის და მისი მოწაფეების ხანგრძლივ და საფუძვლიან გამოკვლევებს ბეტონის დეფორმირებისა და რღვევის სფეროში, წერდა «მიუხედავად ბეტონის სტრუქტურაში არსებული დეფექტების სიუხვისა და მათში შიგა დაძაბულობის მნიშვნელოვანი სიდიდეებისა, რომლებიც კრისტალიზაციური წნევითა და შეკლების დეფორმაციებით არიან გამოწვეული, ჯერ კიდევ ღერძული კუმშვისას დატვირთვის საწყის სტადიაზე (ამ დროს აღძრული დაძაბულობები ო. ბერგის მიერ აღნიშნული იყო R_y^0 -თი) არ იწვევენ ახალი მიკრობზარების გაჩენას, რომლებიც შეიძლება აღმოგვეჩინა მიკროსკოპული ან რენტგენოსკოპული დაკვირვებით ნიმუშიდან ამოჭრილ თხელ ფირფიტებზე, ან დაგვეფიქსირებინა ირიბი მეთოდით – გრძივი და განივი დეფორმაციების სიდიდის და ულტრაბგერითი იმპულსის გავრცელების სიჩქარის გაზომვით» [13].

იგივე ა. გვოზდევნი ო. შახისა და ს. ჩანდრას ნაშრომის ანალიზისას აკეთებს დასკვნას: «აღმოჩნდა, რომ ცემენტის ქვისა და შემდგომის საკონტაქტო ზედაპირებზე ჯერ კიდევ დატვირთვამდე არსებული მიკრობზარები პრაქტიკულად არ ვითარდებოდნენ (იზრდებოდნენ) ბზარწარმოქმნის ქვედა ზღვრის R_y^0 სიდიდის მიღწევამდე» [12].

სიმტკიცის კინეტიკური კონცეფციის პოზიციიდან გამომდინარე თერმოდინამიკური ბიძგები ვერ ამოგდებენ ელემენტარულ ნაწილაკებს (მოლეკულები, ატომები, იონები) პოტენციური ორმოდან ენერგეტიკული ბარიერის გადალახვის გარეშე [43, 44]. მაგრამ ბეტონში თავიდანვე არსებობენ პირველსაწყისი (ჩანასახოვანი) მიკრობზარები, რომელთა ზომები რამდენიმე ათეული რიგით აღემატებიან მოლეკულათაშორის (ატომთაშორის) დაშორებებს [28, 29], ამიტომ ჩვენი თვალსაზრისით ბეტონის დატვირთვისას იხსნებიან და ვითარდებიან უკვე არსებული მიკრობზარები და ახალწარმოქმნები, როგორც

ეს მიღებულია სამეცნიერო ლიტერატურაში, ამგვარი აზრი არის განვითარებული რამდენიმე კვლევაშიც [10, 47, 7].

ბეტონის სტრუქტურაში არსებული დაძაბულობების კონცენტრაცია არის გაანალიზებული შემდეგ შრომებში [13, 17, 29]. სფერული ფორმის შემთხვევაში გამჭიმავი ძაბვების მიმართულება ამ სამუშაოების მიხედვით ძირითადად ემთხვევა პირველი მიკრობზარების მიმართულებას. უფრო დეტალური ანალიზი შემსვების მარცვლების გავლენისა პირველ მიკრორღვევებზე დრეკადობის თეორიის მეთოდებით, ჩატარებულია ო. ბერგის და მისი თანამშრომლების მიერ [5, 6]. სტრუქტურული თეორიები საკმაოდ ღრმად აანალიზებენ დატვირთვის ქვეშ მასალის ქცევის ფიზიკურ არსს, მაგრამ არც ისინი არიან დაზღვეული ხარვეზებისაგან. მაგალითად, ფორმის და ჩანართების მასალის მოცულობაში განაწილების სტატისტიკური ხასიათი ამ თეორიის მიხედვით გათვალისწინებული არ არის. და კიდევ სტრუქტურული თეორიები პრაქტიკულად შეზღუდულნი არიან პირველი მიკრობზარების წარმოქმნის გამომწვევი ძაბვების განსაზღვრით და ვერ აღწერენ ბეტონის რღვევის მთელ პროცესს, რომელიც მოიცავს დაზიანებების თანდათანობით დაგროვებას და ბზარების განვითარებას.

ამიტომ უფრო პერსპექტიულად გვეჩვენება ბეტონების დეფორმირებისა და რღვევის პროცესების შესწავლის სრულიად ახლებური მიდგომა. ის შედგება დეფორმირებისა და რღვევის პროცესების კომპლექსური გამოკვლევების, ცალკეული მოვლენების ძირითადი კანონზომიერების დადგენის და მათი შემდგომი მათემატიკური ანალიზისგან.

ა.შეიკინის მიხედვით [69], ბეტონში მიკრობზარების წარმოქმნა შესაძლებელია მოხდეს შემდეგი ფაქტორების გამო:

- ტემპერატურული და შეკლების გადაძაბვები, რომლებიც ბეტონში აღიძვრება. გარემოსთან თბური და მასათა ცვლის პროცესებისას (შიგა ძაბვები);
- გამყარებად ცემენტის ქვაში ფაზური გარდაქმნების ასევე კრისტალიზაციური და ოსმოსური წნევების გამო აღძრული საკუთარი ძაბვები;
- ბეტონის ფოროვან სივრცეში არსებული თხევადი ფაზის გაყინვით გამოწვეული გადამეტაბვები;

– გარე მექანიკური ზემოქმედებით აღძრული ძაბვები და სხვა.

გ. გორჩაკოვის, ლ. ორენტლიხერის და სხვათა შრომებში ჩამოყალიბებულია ბეტონის ტანში ბზარწარმოქმნის სამი ძირითადი პირობა:

– ბეტონის კომპონენტების დასკდომა (დაბზარვა) გარე ძალებისა და გარემოს ზემოქმედების შედეგად;

– ბეტონის, როგორც იზოტროპული მთლიანი სტრუქტურის, გარემომცველ პირობებთან ურთიერთქმედების შედეგად გამოწვეული დაბზარვა (მაკროსტრუქტურული ძაბვები, ანუ I სახის ძაბვები);

– ბეტონის კომპონენტების ურთიერთქმედებით გამოწვეული დაბზარვა (მიკროსტრუქტურული ბზარები, ანუ II სახის საკუთარი ძაბვები);

დადგენილია, რომ ბეტონის დასკდომის სხვადასხვა მიზეზებს შორის, ყველაზე არსებითია შეკლების ძაბვები, რომლებიც გამოწვეულია გარემოსთან თბური და მასათა ცვლის პროცესებით და ფიზიკურ-ქიმიური გარდაქმნებით.

ცემენტის ქვის (ბეტონის) შეკლების დეფორმაციები მათი გამომწვევ მიზეზებზე დამოკიდებულებით იყოფა შემდეგ სახეებად: კონტრაქციული შეკლება, კარბონატული შეკლება, ტენისმიერი პირველადი, პლასტიკური შეკლება შეჭიდებამდე, ტენისმიერი შეკლება შეჭიდების შემდგომ.

მოცემულ ექსპერიმენტულ სამუშაოში მთავარი ამოცანა იყო დაგვედგინა ბზარწარმოქმნის ის ზედა ზღვარი, რომლის შემდგომაც ბზარების განვითარება ბეტონში სპონტანური ხდება მისი თავიდან აცილება შეუძლებელია. ამ თავში გამოკვლეულია სხვადასხვა ფაქტორის (ხარისხობრივი, რაოდენობრივი) გავლენა ამ ზღვარზე. ბეტონის დესტრუქციის პროცესის შემსწავლელ აკუსტიკურ მეთოდთან ერთად გამოყენებულია ტენზომეტრული მეთოდი. აე-ს სიგნალების რეგისტრაციის დროს ავტომატურად ხდებოდა გრძივი, განივი და მოცულობითი დეფორმაციების დიაგრამების ჩაწერა. წარმოებდა აკუსტიკური კვლევების შედეგების შეჯერება დეფორმირების დიაგრამების სახასიათო უბნებთან. გამოთქმულია მოსაზრება, რომ ბეტონის დეფორმირებისას განვითარებულ შეუქცევად პროცესებში განმსაზღვრელი როლი ეკუთვნის ბზარების ჩამოყალიბებას და განვითარებას.

3.1. შემვსების სისხოს, მისი მოცულობითი შემცველობის გავლენა ბეტონის დეფორმირებაზე და რღვევაზე

ცნობილია, რომ ცემენტის გელის გამყარების პროცესში, ბეტონის მდგენელების ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებს შორის არსებული განსხვავების გამო, წარმოიქმნება დაძაბულობის შიგა ველი, რომლის განაწილება არ ემორჩილება უწყვეტი გარემოს პირობებს [2]. დაძაბულობის ველის არაერთგვარობაზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს შემვსების მარცვლების ფორმა, რელიეფი და სისუფთავე. ასევე მისი გრანულომეტრული შედგენილობა. აქედან გამომდინარე ცემენტის ქვასთან შემვსების შეჭიდების სიმტკიცე დიდწილად განსაზღვრავს საკუთრივ ბეტონის სიმტკიცესაც.

ცემენტის ქვის, როგორც ერთიანი, უწყვეტი გარემოს კვლევისას, რომელშიც განაწილებულია სხვადასხვა სიმკვრივის სფერული ტანები, განსაზღვრულ იქნა, რომ მცირე არაერთგვარობების მახლობლად ლოკალური მომჭიმავი ძაბვები შეიძლება გაიზარდოს 9-ჯერ მთელ ტანში განაწილებულ ძაბვებთან შედარებით [20].

მსხვილი შემვსები კარდინალურად ცვლის ბეტონის მიკრორღვევების კინეტიკას. ასე მაგალითად, რ. დევისის [18], ე. ჰუმელის [24] და გ. რიუშის [48] შრომებში, შედარებულ იქნა სხვადასხვა გრანულომეტრული და მინერალოგიური შედგენილობის შემვსების გავლენა ბეტონის ტენისმიერ დეფორმაციებზე. ჩატარებული ცდების შედეგები ნათელს ხდიან შემვსების გრანულომეტრიისა და მინერალოგიის გავლენას აღნიშნულ დეფორმაციებზე.

რ. კარლსონის [10] ექსპერიმენტებით დადასტურებულ იქნა, რომ ბეტონში ბზარწარმოქმნის პროცესებზე დიდ გავლენას ახდენს როგორც მისი გრანულომეტრული შედგენილობა, ასევე შემვსების მარცვლების ზედაპირების ფორმა და ხორკლიანობა. ა. ნევილმა [38] აღნიშნულის საწინააღმდეგოდ

გამოთქვა მოსაზრება, რომ მსხვილი შემვსების სიდიდე და ფორმა როგორც წესი გავლენას ვერ ახდენს ბეტონის ბზარმედეგობაზე, თუმცა, რაც უფრო დიდია შემვსები, მით უფრო თხელი ბეტონის ფენა ეკვრის მას და აქედან გამომდინარე, ბეტონის შეკლებაც ნაკლებია.

როგორც პირველ თავში იყო აღნიშნული, სხვადასხვა მინერალოგიური შედგენილობის შემვსებებით დამზადებული ბეტონების მიკრობზარწარმოქმნის პროცესი აკუსტიკური ემისიის მეთოდით გამოკვლეულ იქნა ი. რიბიევის და სხვების მიერ [46].

ბეტონის ბზარმედეგობაზე დიდ გავლენას ახდენს შემვსების მარცვლების დრეკადი თვისებებიც; მაგ. შემვსებად ლითონის გამოყენების შემთხვევაში შეკლების დეფორმაციების სიდიდე მცირდება 30%-ით ხოლო კერამიტიც გამოყენების შემთხვევაში ეს დეფორმაცია იზრდება 36%-მდე, ჩვეულებრივ შემვსებებზე დამზადებულ ბეტონებთან შედარებით [25].

მყარ, მტკიცე შემვსებებზე დამზადებული ბეტონის შლიფების შემოწმებამ ცხადყო რომ ბეტონის რღვევამდე მსხვილ, მაღალი სიმტკიცის შემვსებში ბზარების რაოდენობა მცირეა და ისინი გავლენას ვერ ახდენენ კონგლომერატული მასალის სიმტკიცეზე. შემვსების მარცვლები, როგორც წესი იმსხვრევიან ცემენტის ქვაში მაგისტრალური ბზარების განვითარების შემდეგ.

როგორც 2.4-ში იყო აღნიშნული სხვადასხვა შედგენილობის ბეტონებში დესტრუქციის პროცესის შესწავლის მიზნით გამოყენებულ იქნა სამი შედგენილობის ბეტონი: ჩვეულებრივი, წვრილმარცვლოვანი და ქვიშოვანი. თითოეული სერიისათვის დამზადებულ იქნა 24-24 ნიმუში – ტყუპისცალი. ექსპერიმენტის პროცესში წარმოებდა აე-ს იმპულსების დათვლა სათვლელ მოწყობილობაზე. ამავდროულად ხდებოდა აე-ს იმპულსების განაწილების დიაგრამების ჩაწერა დატვირთვებზე დამოკიდებულებით და მოცულობითი დეფორმაციების დიაგრამების ჩაწერა. ნიმუშები მიგვყავდა რღვევამდე და ფიქსირდებოდა აე-ს სიგნალების საერთო რაოდენობა. გამოცდის შედეგები დამუშავებულ იქნა მოქმედი სტანდარტის შესაბამისად. პრიზმების დატვირთვის სიჩქარე იყო 0,2 მგპა/წამში.

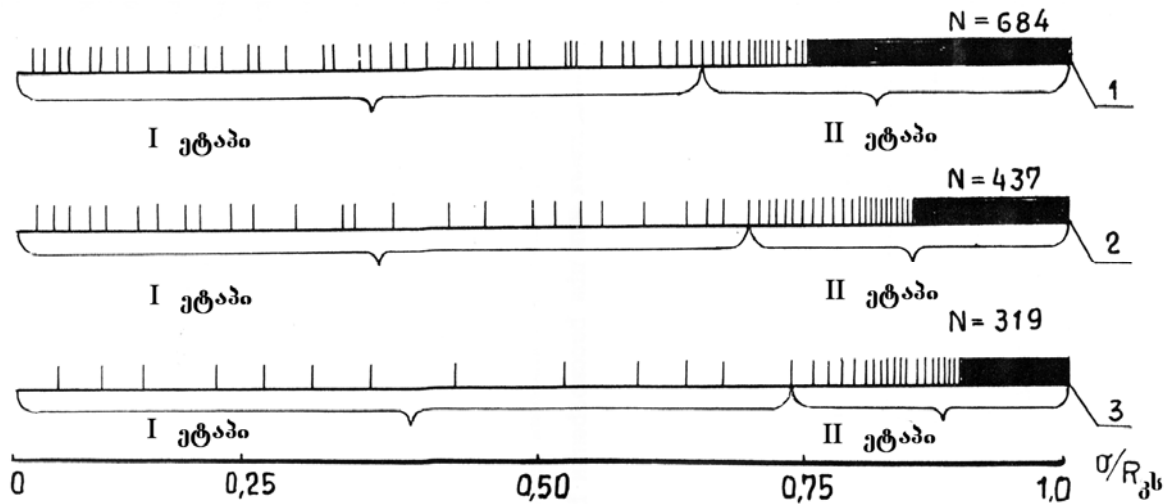
ცხრილ 3.1-ში მოცემულია აკუსტიკური ემისიის სიგნალების რაოდენობის საშუალო მნიშვნელობები დატვირთვის ინტენსიურობის შესაბამისად (σ / R_{35}).

ცხრილი 3.1.

აე-ს იმპულსების საშუალო მნიშვნელობები ძაბვის ფარდობით სიდიდეებზე (n/R_{35}) დამოკიდებულებით

	ჩვეულებრივი ბეტონი	წვრილმარცვლოვანი ბეტონი	დუღაბი
0,05	4	3	1
0,10	7	5	2
0,15	10	7	3
0,20	13	9	4
0,25	15	11	5
0,30	18	12	6
0,35	20	14	7
0,40	23	15	7
0,45	26	17	8
0,50	29	18	8
0,55	32	20	9
0,60	35	22	10
0,65	38	23	11
0,70	42	25	13
0,75	49	29	17
0,80	61	35	23
0,85	79	45	23
0,90	118	65	31
0,95	224	112	48
0,100	684	437	319

როგორც ექსპერიმენტებმა გვიჩვენეს, ქვიშოვან ნიმუშებში აე იწყება დატვირთვის უფრო მაღალ დონეზე, ვიდრე ჩვეულებრივ და წვრილმარცვლოვან ბეტონებში. ნახ. 3.1-ზე მოყვანილი დიაგრამებიდან ჩანს, რომ აე-ს სიგნალების განაწილების ხასიათის მიხედვით შეიძლება გამოვყოთ ორი ეტაპი. პირველ ეტაპზე ფიქსირდება მხოლოდ ერთეული სიგნალები, მეორეზე – გამოყოფილი სიგნალების რაოდენობა საგრძნობლად მატულობს და თანდათანობით გადადის უწყვეტ ემისიაში.



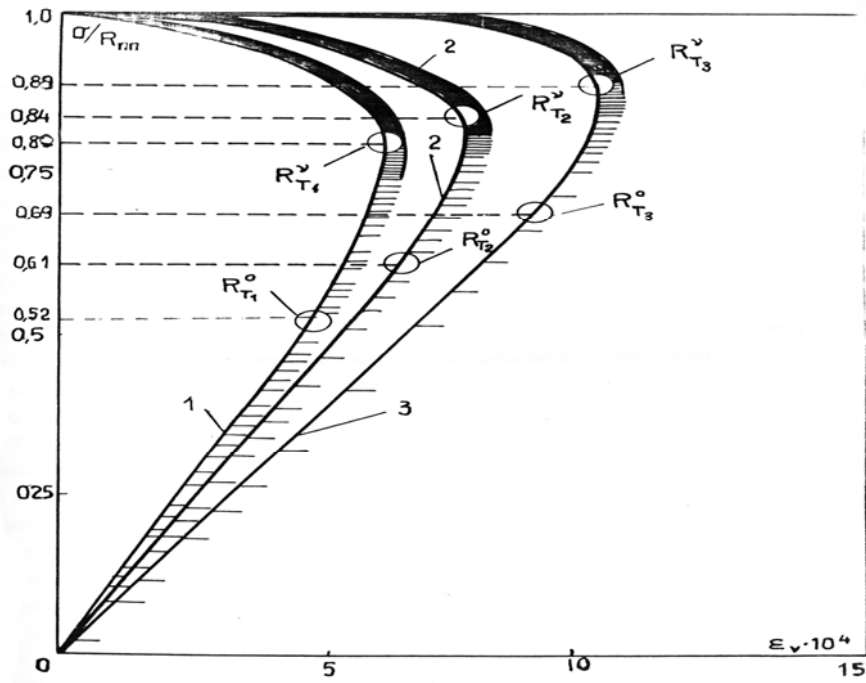
ნახ. 3.1. აე-ს იმპულსების განაწილების დიაგრამები დატვირთვაზე დამოკიდებულებით.

1-ჩვეულებრივი ბეტონი; 2-წვრილმარცვლოვანი ბეტონი; 3-დულაბი.

დატვირთვის დონე, რომლის დროსაც ერთი ეტაპიდან მეორეზე გადასვლა ხდება, ბეტონის შედგენილობაზეა დამოკიდებული. ასე მაგალითად, ჩვეულებრივი ბეტონებისათვის, რომლებიც ხასიათდებიან 40 მგპა სიმტკიცით, პირველი ეტაპი გრძელდება მრღვევი დატვირთვის 0,6-0,65 მნიშვნელობამდე, ხოლო მეორე 0,6-0,65 ვიდრე ნიმუშის რღვევამდე (ნახ. 3.1.1); დულაბისაგან დამზადებული ნიმუშებისათვის პირველი მონაკვეთის განფენილობა მრღვევი დატვირთვის 0,75-0,8-მდეა გაზრდილი, ხოლო მეორე მონაკვეთი შესაბამისად დამოკ-ლებულია (ნახ. 3.1.3). წვრილმარცვლოვან ბეტონს შუალედური მდგომარეობა უკავია (ნახ. 3.1.2). ეს ვითარება გამოწვეულია იმით, რომ დულაბის ნიმუშები უფრო ერთგვაროვანია, ვიდრე ჩვეულებრივი და წვრილმარცვლოვანი და დაზიანებების დაგროვება მათში დატვირთვის გაცილებით მაღალ საფეხურებზე ხდება. თვით რღვევა ხორციელდება გაგლეჯვის შედეგად, ენერჯის დიდი ოდენობის გამოყოფით. ნახ. 3.1.-დან ჩანს, რომ ჩვეულებრივი და წვრილმარცვლოვანი ბეტონებისათვის მეორე ეტაპი უფრო განფენილია ვიდრე დულაბის ნიმუშებისათვის.

ბეტონის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე დესტრუ-ქციის პროცესის დამოკიდებულების ხასიათის მიზნით, გამოცდის დროს თვითჩამწერი ორკოორდინატიანი ხელსაწყოებით ხდებოდა მოცულობითი

დეფორმაციის დიაგრამების ჩაწერა კოორდინატებში დეფორმაცია-ძაბვა. მეტი თვალსაჩინოების მიზნით ამ მრუდებზე ჰორიზონტალური ნიშნაკების – ტირეების სახით ავტომატურად დატანილ იქნა აე-ს იმპულსების შესაბამისი ჭდეები (ნახ. 3.2.).



ნახ. 3.2. ბეტონის ნიმუშების მოცულობითი დეფორმაციების დიაგრამები.
 1-ჩვეულებრივი ბეტონი; 2-წვრილმარცვლოვანი ბეტონი; 3-ქვიშოვანი ბეტონი (დულაბი).

ეს დიაგრამები აგებულია დეფორმაციების გასაშუალებული მნიშვნელობების მიხედვით, ყოველი გამოცდილი სერიისათვის.

ამ დიაგრამებზეც, როგორც აე-ს იმპულსების განაწილების მიხედვით, ასევე თვით მრუდის $n = f(\xi_v)$ მოხაზულობით, შეიძლება გამოვყოთ ორი ეტაპი. თუ განვიხილავთ პროფ. ო. ბერგის მიერ ჰიპოთეზირებულ ბზარწარმოქმნის ზედა ზღვარს (R_{β}^{ν}) მაშინ ცხადი გახდება, რომ ამ ზღვრის მიღწევამდე მთლიანობის რღვევა ატარებს ეპიზოდურ ხასიათს. ამაზე მეტყველებს კანტიკუნტი სიგნალები, რომლებიც, როგორც ჩანს, დაკავშირებულნი არიან პირველადი დეფექტების ენერგეტიკული მდგომარეობის შეცვლასთან. ამ მონაკვეთზე აღძრული იმპულსების საერთო რაოდენობა რამდენიმე ათეულს ითვლის და იმპულსების მთლიანი რაოდენობის 10%-ზე ნაკლებს შეადგენს. ამასთან, აე-ს სიგნალების შესატყვისი ნიშნაკების განაწილებას შემთხვევითი ხასიათი აქვს. ბზარწარმოქმნის ზედა ზღვრის (R_{β}^{ν}) შემდგომ იმპულსების ნიშნულებს შორის

მანძილი იმდენად მცირდება, რომ ისინი პრაქტიკულად ერწყმიან კიდევაც ერთმანეთს. ეს მიუთითებს ძალზედ ინტენსიურ ბზარწარმოქმნაზე, რომელიც დაიკვირვება ბეტონის პრიზმის საბოლოო რღვევამდე.

ცხრილი 3.2.-ში მოყვანილია ბეტონის საკვლევი შედგენილობების პრიზმული სიმტკიცის და ბზარწარმოქმნის ქვედა ($R_{\text{პ}}^o$) და ზედა ($R_{\text{პ}}^v$) ზღვრების გასაშუალოებული მნიშვნელობები. ამ მონაცემებით ნახ. 3.2.-ზე აგებულია მოცულობითი დეფორმაციების გასაშუალოებული მრუდები, ხოლო ცხრილ 3.1.-ის მონაცემებით დამაბულობის ფარდობითი მნიშვნელობის და აე-ს იმპულსების რაოდენობის გრაფიკები – $n/R_{\text{პ}} = f(N)$ (ნახ. 3.3).

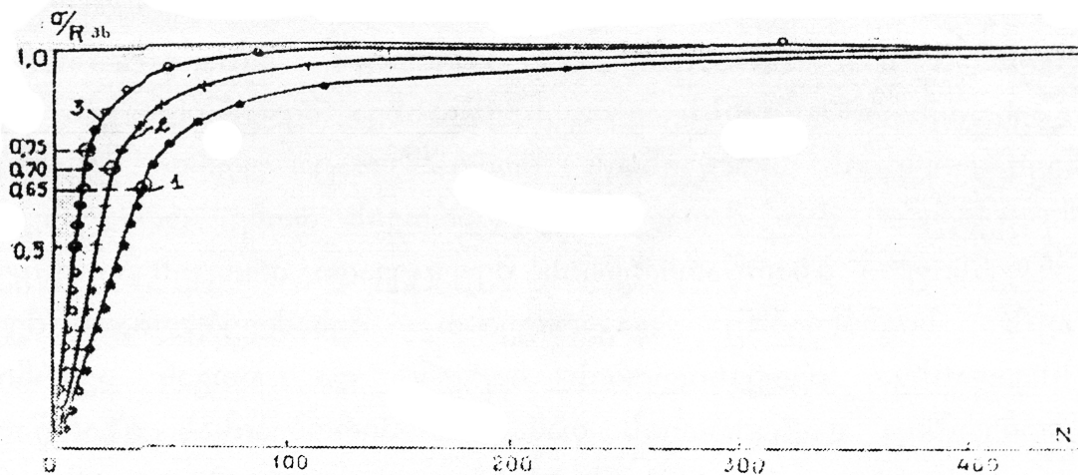
$n/R_{\text{პ}} - (N)$ დამოკიდებულების გრაფიკებზე შეიძლება გამოიყოს ორი მახასიათებელი უბანი; მათგან პირველი, რომელიც სწორხაზოვანია, გრძელდება დატვირთვის გარკვეულ დონემდე, რომლის ქვემოთაც უკანასკნელის მონოტონურ ზრდას მოყვება ბზარების თითქმის პროპორციული განვითარება. ამ ზღვრის შემდგომ ბზარების განვითარების პროცესი ინტენსიფიცირდება, რომელსაც შეესატყვისება მეორე მონაკვეთის გრაფიკის გამრუდება.

ერთი მონაკვეთიდან მეორეზე გადასვლის შესაბამისი ზღვრის მნიშვნელობა საკვლევი სამი შედგენილობის ბეტონისათვის სხვადასხვა აღმოჩნდა. ასე მაგალითად, დულაბისათვის ეს გადასვლა სწარმოებს მრღვევი დატვირთვის 0,75; წვრილმარცვლოვანი ბეტონისათვის 0,70 და ჩვეულებრივი ბეტონისათვის – 0,65 $R_{\text{პ}}$;

ცხრილი 3.2.

პრიზმული სიმტკიცის გასაშუალოებული (მგპა) და ბზარწარმოქმნის (ქვედა და ზედა) ზღვრების მნიშვნელობები ბეტონის საკვლევი შედგენილობისათვის

	ჩვეულებრივი ბეტონი			წვრილმარცვლოვანი ბეტონი			დულაბი		
	R_d^0 / R_{35}	R_d^y / R_{35}	R_{35}	R_d^0 / R_{35}	R_d^y / R_{35}	R_{35}	R_d^0 / R_{35}	R_d^y / R_{35}	R_{35}
1	0,41	0,77	38	0,61	0,85	41	0,70	0,89	38
2	0,45	0,76	42	0,65	0,82	39	0,69	0,93	36
3	0,47	0,78	40	0,63	0,80	38	0,64	0,88	37
4	0,48	0,79	39	0,68	0,84	35	0,60	0,82	42
5	0,58	0,83	43	0,49	0,76	39	0,63	0,86	40
6	0,53	0,82	41	0,55	0,80	40	0,78	0,95	40
7	0,55	0,83	40	0,52	0,84	36	0,69	0,83	44
8	0,65	0,81	39	0,63	0,88	35	0,67	0,86	35
9	0,57	0,82	38	0,60	0,84	39	0,61	0,80	39
10	0,51	0,81	37	0,61	0,83	43	0,65	0,90	34
11	0,51	0,79	36	0,63	0,89	40	0,76	0,95	37
12	0,45	0,84	35	0,60	0,81	42	0,70	0,90	41
13	0,53	0,80	41	0,70	0,88	40	0,65	0,82	39
14	0,63	0,81	45	0,58	0,84	38	0,66	0,89	38
15	0,43	0,83	44	0,50	0,80	39	0,79	0,92	41
16	0,47	0,83	40	0,59	0,85	37	0,73	0,91	39
17	0,56	0,79	39	0,71	0,93	35	0,73	0,85	40
18	0,45	0,84	42	0,69	0,89	36	0,73	0,89	41
19	0,44	0,79	38	0,59	0,82	38	0,72	0,95	41
20	0,53	0,79	41	0,66	0,84	38	0,69	0,87	42
21	0,55	0,84	40	0,61	0,83	41	0,74	0,93	43
22	0,60	0,81	42	0,51	0,85	37	0,70	0,90	40
23	0,49	0,80	38	0,57	0,84	44	0,65	0,87	39
24	0,63	0,81	40	0,67	0,85	42	0,65	0,89	39
საშ. ჯამი	0,52	0,80	40	0,61	0,84	38,83	0,69	0,89	39,375



ნახ. 3.3. აე-ს იმპულსების რაოდენობის და დატვირთვის ფარდობითი

$$\text{მნიშვნელობების დიაგრამები } \frac{\sigma}{R_{35}} = f(N)$$

1-ჩვეულებრივი ბეტონი; 2-წვრილმარცვლოვანი ბეტონი; 3-ქვიშოვანი ბეტონი (დულაბი).

თუ შევადარებთ ამ მონაცემებს ნახ. 3.2.-ზე გამოსახული ბზარწარმოქმნის ზედა ზღვრებს ($R_{\text{გ}}^{\text{v}}$), ნათელია, რომ ბზარწარმოქმნის ზედა ზღვრების საშუალო მნიშვნელობები ჩვეულებრივი, წვრილმარცვლოვანი და ქვიშოვანი ბეტონებისათვის მაღალია (შესაბამისად 0,80; 0,84 და 0,89 მრღვევი დატვირთვიდან), ვიდრე ნახ. 3.3-ზე გამოსახული (0,65; 0,70; 0,75) – ეს მიუთითებს იმაზე, რომ აკუსტიკური ემისიის მეთოდი საშუალებას იძლევა უფრო ადრე დავაფიქსიროთ დაზიანებების დაგროვების შეუქცევადი პროცესების დაწყება, ვიდრე ამას დეფორმაციების გაზომვის ტენზომეტრულ მეთოდებზე დაყრდნობით მოვახერხებდით.

ზემოთ მოყვანილი ექსპერიმენტული მონაცემები გვიჩვენებს, რომ აე-ს სიგნალების რეგისტრაცია საშუალებას გვაძლევს დავაფიქსიროთ განსხვავება სხვადასხვა შედგენილობის ბეტონების დესტრუქციის პროცესებს შორის. რაც უფრო ერთგვაროვანია სტრუქტურა, მით მაღალია დატვირთვის დონე, რომლის შემდეგაც ინტენსიური ბზარწარმოქმნის შეუქცევადი პროცესები იწყება. ე.ი. აე-ს სიგნალებზე დაკვირვებით შესაძლებელია შევადაროთ სხვადასხვა შედგენილობის ბეტონი და მათგან ავირჩიოთ ის, რომელშიც დატვირთვის თანაბარი პირობებისას ბზარწარმოქმნის პროცესი ნაკლები ინტენსიურობით ხასიათდება. უკანასკნელი კი როგორც ცნობილია, კონსტრუქციების ხანმედეგობის საწინდარია.

3.2. ბეტონის კუმშვისას დეფორმირებისა და რღვევის პროცესებზე შემსვების სიმკვრივის გავლენა

ცნობილია, რომ ბეტონში შემსვები ამუხრუჭებს შეკლების და შესაბამისად პირველი მიკრობზარების წარმოქმნის პროცესს. ამ პროცესის ხარისხი მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული არა მარტო შემსვების რაოდენობაზე, არამედ მის სიმკვრივეზეც. ფოროვანი შემსვებები თვითონ განიცდიან შეკლებას გამოშრობისას, თუმცა ტენისმიერი დეფორმაციები მათში გაცილებით მცირეა, ვიდრე ცემენტის ქვაში.

[20] მონაცემების მიხედვით საშუალო მინერალოგიური შემადგენლობის ცემენტებზე დამზადებული ცემენტის ქვის შეკლების სიდიდე შეადგენს 3-4მმ/მ-ზე ხოლო ხსნარისა და ბეტონის შეკლება საშუალოდ 0,6-0,8 და 0,2-0,32 მმ/მ-ის ფარგლებში მერყეობს.

რ. ლერმიტის [32] მონაცემებით ცემენტის ქვის, ხსნარისა და ბეტონის შეკლების დეფორმაციის სიდიდეების შეფარდება შეადგენს შესაბამისად 5:2:1, ბეტონში ცემენტის ქვის შემცველობასთან შეკლების და მამასადამე ბზარმედგობის პროპორციულ დამოკიდებულებაზე მიუთითებენ ინგლისელი მეცნიერები [31].

დადგენილია, რომ კირქვოვან შემვსებებზე ბეტონის შეკლების დეფორმაციები მცირედ აღემატება უფრო მტკიცე მთის ქანების შემვსებებზე დამზადებული ბეტონისას [39].

ბზარმედგობაზე ცემენტის მინერალოგიური შედგენილობების მოქმედების გამოსაკვლევად გამოიყენება ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდი, რომელიც იძლევა ბზარების გაჩენის მომენტის დაფიქსირების საშუალებას შეკლებისა და გარე მექანიკური დატვირთვის ერთობლივი მოქმედებისას [16].

ზემოთ მოყვანილი მოსაზრებიდან გამომდინარე გარკვეულ ინტერესს წარმოადგენს სხვადასხვა სიმკვრივის შემვსებებზე დამზადებული ბეტონის დესტრუქციის პროცესის შესწავლა, რაც შეადგენს ნაშრომის ამ თავში განხილული საკითხის ძირითად მიზანს.

ექსპერიმენტისათვის მსუბუქი და მძიმე ბეტონებისაგან დამზადდა ნიმუშები ზომებით 40X40X160 მმ. M-200 მსუბუქი ბეტონისათვის შემვსებად გამოყენებულ იქნა ახალქალაქის ვულანური წიდა (ღორდი ფრ. 5 ÷ 10 მმ, ქვიშა < 2,5 მმ). I შედგენილობის ბეტონისათვის წ/ც=0,65, კონუსის განშლა შემრხევ მაგიაზე = 101 მმ; II შედგენილობის ბეტონისათვის წ/ც=0,8, კონუსის განშლა = 105 მმ.

M-200 მარკის მძიმე ბეტონისათვის შემვსებად გამოყენებულ იქნა დარკვეთის ქვიშა ფრ. 2,5 მმ-მდე; მარნეულის ბაზალტის ღორდი ფრ. 5-10მმ; I შედგენილობის ბეტონისათვის წ/ც=0,45. კონუსის განშლა შემრხევ მაგდიაზე =

104 მმ; II შედგენილობისთვის $\nu/\epsilon=0,5$; კონუსის განშლა =106 მმ; ორი თვის შემდეგ 12-12 ნიმუში გამოცდილ იქნა ღერძულ კუმშვაზე.

გამოცდის სისტემის პრინციპული ელექტრული სქემა ნაჩვენებია §2.2.-ში ნახ. 2.3-ზე.

ცხრილი 3.3-ში მოყვანილია აკუსტიკური სიგნალების საშუალო მნიშვნელობები თითოეული სერიისათვის.

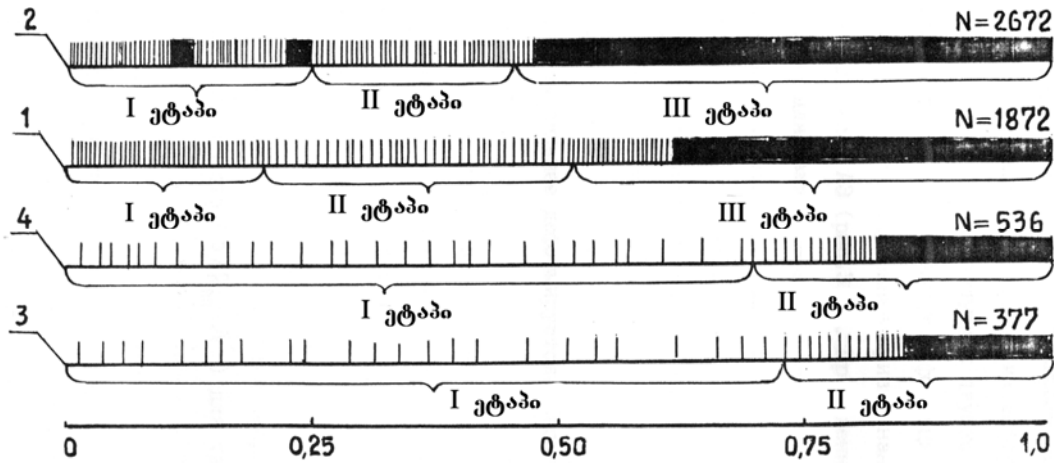
ცხრილი 3.3.

აე-ს სიგნალების რაოდენობის საშუალო მაჩვენებლებისა და ძაბვის ფარდობითი მნიშვნელობების დამოკიდებულების ცხრილი

ნარევი № σ /R $_{კს}$	მსუბუქი ბეტონი		მძიმე ბეტონი	
	I შემაღვენლობა	II შემაღვენლობა	I შემაღვენლობა	II შემაღვენლობა
0,05	9	11	2	3
0,10	18	23	4	6
0,15	27	35	6	8
0,20	35	47	8	10
0,25	41	59	10	12
0,30	47	58	12	14
0,35	53	76	13	16
0,40	59	84	15	18
0,45	65	93	16	20
0,50	71	103	17	22
0,55	78	115	19	24
0,60	86	130	20	26
0,65	97	150	21	28
0,70	114	176	23	30
0,75	141	214	26	34
0,80	183	274	30	39
0,85	256	366	38	47
0,90	395	566	51	66
0,95	724	964	86	121
1,00	1872	2672	377	536

ექსპერიმენტმა გვიჩენა, რომ მსუბუქი ბეტონის პრიზმებში აე-ს სიგნალების ინტენსიური გამოყოფა იწყება დატვირთვის მოდებისთანავე და

გრძელდება ნიმუშების რღვევამდე. მძიმე ბეტონის შემთხვევაში კი, ეს პროცესი გაცილებით ნაკლები ინტენსიურობით ხასიათდება (ნახ. 3.4).



ნახ. 3.4. დატვირთვის ფარდობითი სიდიდეებისა და აე-ს იმპულსების განაწილების დიაგრამები.

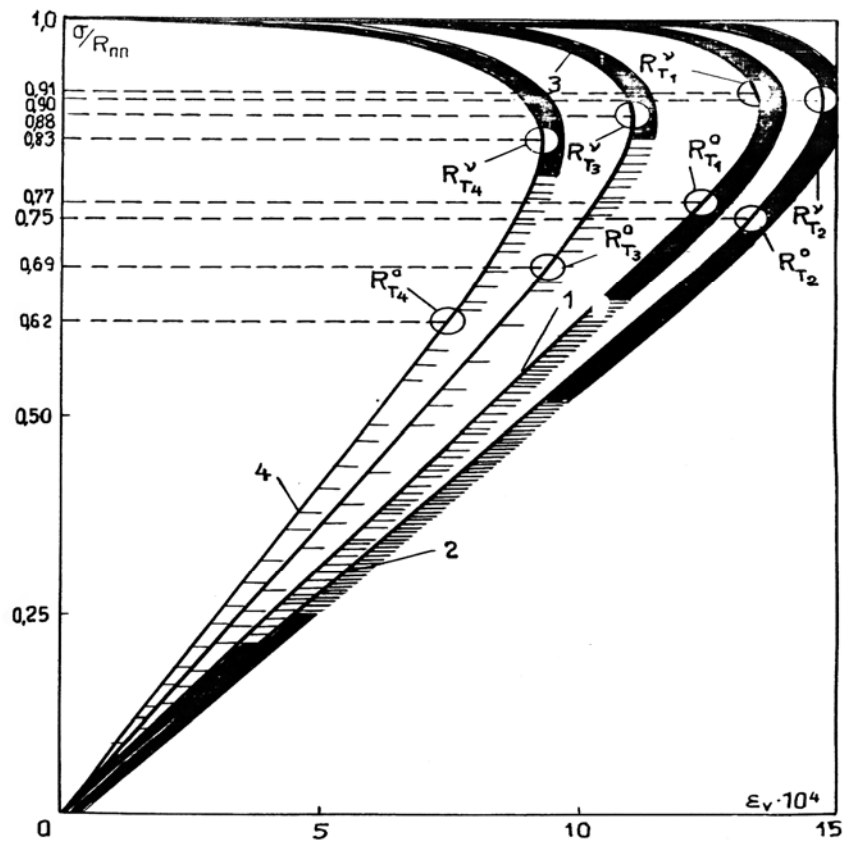
1-მსუბუქი ბეტონი, I შედგენილობა; 2-მსუბუქი ბეტონი II შემადგენლობა; 3-მძიმე ბეტონი; I შედგენილობა; 4-მძიმე ბეტონი, II შემადგენლობა.

ნახ. 3.4-ზე ნაჩვენები დიაგრამებიდან ნათელია, რომ აე-ს სიგნალების რაოდენობის განაწილების მიხედვით მსუბუქი ბეტონის პრიზმებისათვის შესაძლებელია გამოვყოს სამი უბანი (ნახ. 3.4.1 და 3.4.2). პირველ უბანზე ხდება აე-ს სიგნალების საკმაოდ ინტენსიური გამოყოფა, რომლის შემდეგაც სიგნალების რიცხვი მცირდება (II უბანი), მესამე ეტაპზე წარმოქმნილი სიგნალების რაოდენობა კვლავ მატულობს, რომლებიც საბოლოოდ გადაიზრდებიან უწყვეტ ემისიაში, რაც ნიმუშების რღვევის მანიშნებელია.

მძიმე ბეტონებში ეს პროცესი სხვაგვარად წარმოგვიდგება: შესაბამისი დიაგრამები შეიძლება დაიყოს ორ ეტაპად: პირველ ეტაპზე ფიქსირდება მხოლოდ ერთეული სიგნალები, რომელთა რიცხვი იმპულსების საერთო რაოდენობის მხოლოდ 10% თუ შეადგენს, ხოლო მეორე ეტაპზე გამოყოფილი სიგნალების რიცხვი იზრდება და თანდათან უწყვეტ ემისიაში გადადის.

ასევე გამოკვლეულ იქნა აღნიშნული ბეტონების დესტრუქციის პროცესის დამოკიდებულება მათ დამაბუღ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე. ამ მიზნით

ავტომატურად იქნა ჩაწერილი მოცულობითი დეფორმაციის დიგრამები კოორდინატებში დეფორმაცია-ძაბვა (ნახ. 3.5).



ნახ. 3.5. მოცულობითი დეფორმაციის დიგრამები

1. მსუბუქი ბეტონი – I შედგენილობა;
2. მსუბუქი ბეტონი – II შედგენილობა;
3. მძიმე ბეტონი – I შედგენილობა; 4. მძიმე ბეტონი – II შედგენილობა;

ნახ. 3.4.-ზე და ნახ. 3.5-ზე მოყვანილი დიგრამებიდან ჩანს, რომ მსუბუქი და მძიმე ბეტონების დამაბულ დეფორმირებული მდგომარეობა და დესტრუქციის პროცესები მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან. ასე მაგალითად სახასიათო წერტილები (R_s^o , R_s^v), რომლებიც ბზარწარმოქმნის ქვედა და ზედა ზღვრებზე მიუთითებენ, მსუბუქ ბეტონებში უფრო მაღალ დატვირთვებზე აღინიშნება, ვიდრე მძიმე ბეტონებში. რაც შეეხება დესტრუქციის პროცესს, იგი გაცილებით ინტენსიურად მიმდინარეობს მსუბუქ ბეტონებში და აე-ს იმპულსების რაოდენობა თითქმის 5-ჯერ მეტია ($N = 2672$) ვიდრე მძიმე ბეტონისათვის - ($N = 536$) (ცხრილი 3.3).

ცხრილი 3.4-ში მოყვანილია პრიზმული სიმტკიცეებისა და ასევე ბზარწარმოქმნის ქვედა და ზედა ზღვრების ფარდობითი მნიშვნელობები ბეტონების საკვლევი შედგენილობებისათვის. ამ მონაცემების საფუძველზე ნახ. 3.5.-ზე წარმოდგენილია მოცულობითი დეფორმაციების გასაშუალებული მრუდები. ასევე ცხრილი 3.3-ის მონაცემებით ნახ. 3.6.-ზე აგებულია აე-ს იმპულსების ძაბვების ფარდობითი დეფორმაციის მნიშვნელობებზე დამოკიდებულების გრაფიკები.

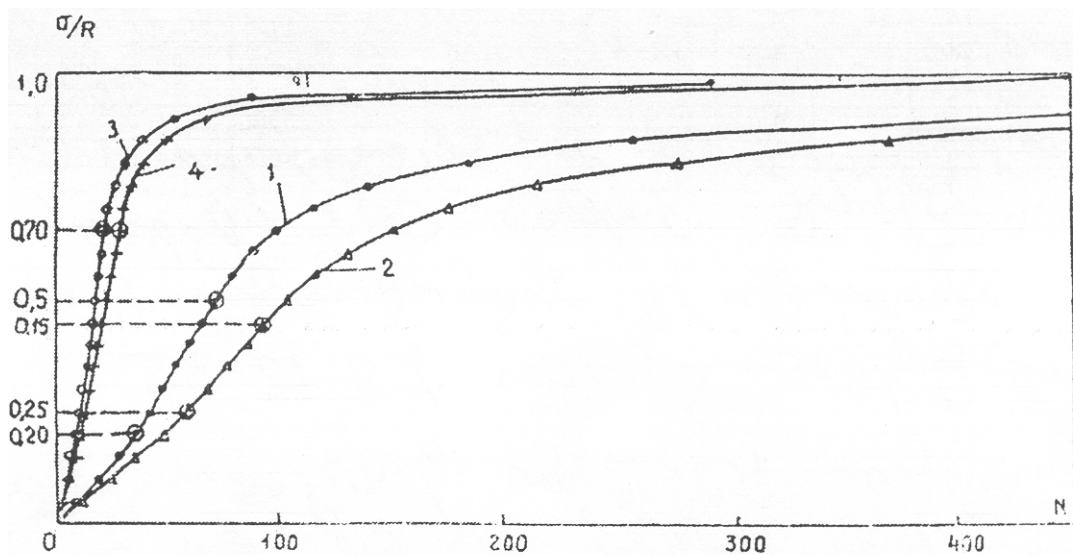
ცხრილი 3.4.

პრიზმული სიმტკიცეების და ბზარწარმოქმნის (ქვედა და ზედა) ზღვრების ფარდობითი სიდიდეების მნიშვნელობები მსუბუქი და მძიმე ბეტონებისათვის

№ ნიმუშის	მსუბუქი ბეტონი						მძიმე ბეტონი					
	I შემაღენლობა			II შემაღენლობა			I შემაღენლობა			II შემაღენლობა		
	$R_{\text{მ1}}^0 / R_{\text{მ1}}$	$R_{\text{მ1}} / R_{\text{მ1}}$	$R_{\text{მ1}}$	$R_{\text{მ2}}^0 / R_{\text{მ2}}$	$R_{\text{მ2}} / R_{\text{მ2}}$	$R_{\text{მ2}}$	$R_{\text{მ3}}^0 / R_{\text{მ3}}$	$R_{\text{მ3}} / R_{\text{მ3}}$	$R_{\text{მ3}}$	$R_{\text{მ4}}^0 / R_{\text{მ4}}$	$R_{\text{მ4}} / R_{\text{მ4}}$	$R_{\text{მ4}}$
1	0.80	0.94	18.75	0.77	0.90	19.17	0.72	0.88	20.375	0.65	0.85	20.00
2	0.78	0.93	24.25	0.75	0.89	20.00	0.66	0.84	21.00	0.62	0.86	18.125
3	0.75	0.90	20.635	0.78	0.90	19.58	0.70	0.86	18.75	0.64	0.86	23.125
4	0.72	0.88	18.75	0.73	0.86	19.25	0.65	0.89	21.375	0.63	0.82	21.875
5	0.79	0.91	19.00	0.73	0.90	20.83	0.68	0.91	22.5	0.59	0.79	18.75
6	0.75	0.91	21.00	0.78	0.92	21.25	0.70	0.86	23.125	0.60	0.83	20.00
7	0.77	0.94	19.375	0.80	0.94	20.00	0.69	0.87	20.31	0.55	0.76	17.5
8	0.70	0.89	20.00	0.69	0.84	21.65	0.73	0.91	19.375	0.61	0.81	21.56
9	0.81	0.96	22.5	0.68	0.92	18.75	0.61	0.84	18.75	0.54	0.79	18.75
10	0.80	0.93	21.25	0.76	0.89	18.75	0.70	0.86	18.125	0.62	0.86	20.00
11	0.75	0.87	21.25	0.73	0.92	20.83	0.75	0.89	23.125	0.58	0.85	20.00
12	0.73	0.90	18.75	0.70	0.88	22.25	0.70	0.87	21.56	0.63	0.88	20.625
13	0.82	0.96	20.00	0.80	0.94	21.00	0.78	0.93	21.25	0.59	0.85	20.94
14	0.70	0.86	20.00	0.77	0.90	20.65	0.67	0.88	20.94	0.72	0.90	19.69
15	0.78	0.89	20.625	0.72	0.86	23.00	0.77	0.92	21.875	0.64	0.91	21.56
16	0.67	0.84	21.875	0.71	0.90	21.25	0.68	0.89	19.69	0.70	0.86	21.875
17	0.79	0.93	23.125	0.77	0.91	20.83	0.70	0.90	20.00	0.57	0.85	18.44
18	0.70	0.91	22.5	0.80	0.93	21.67	0.74	0.91	20.00	0.63	0.89	21.875
19	0.83	0.94	17.5	0.72	0.85	22.5	0.65	0.85	20.625	0.64	0.78	21.31
20	0.76	0.90	20.0	0.71	0.86	21.67	0.69	0.90	18.75	0.58	0.80	19.69
21	0.84	0.96	21.25	0.80	0.92	22.00	0.75	0.93	21.875	0.63	0.88	20.00
22	0.81	0.95	21.875	0.76	0.88	22.75	0.64	0.82	20.00	0.57	0.85	23.125
23	0.77	0.89	18.125	0.75	0.91	21.25	0.62	0.84	19.69	0.72	0.91	22.19
24	0.83	0.94	23.75	0.79	0.88	22.00	0.72	0.89	20.31	0.64	0.87	18.44
საშ. მნიშ.	0.77	0.91	20.55	0.75	0.90	21.00	0.69	0.88	20.58	0.62	0.85	20.35

$(\bar{n} / R_{\text{მ}} N)$ დამოკიდებულების გრაფიკებზე მძიმე ბეტონებისათვის შეიძლება გამოვყოთ ორი უბანი: პირველი – $0,7 R_{\text{მ}}$ დატვირთვამდე თითქმის სწორხაზოვანია, და მეორე – $0,7 R_{\text{მ}}$ ზემოთ, რომელსაც გრაფიკის გამრუდება

შეესაბამება (ნახ. 3.63 და 3.64). რაც შეეხება მსუბუქ ბეტონებს, აქ შეიძლება გამოიყოს სამი სახასიათო უბანი (ნახ. 3.6.1 და 3.6.2), პირველ უბანზე ($0,2 R_{\text{ს}}$ -მდე I შედგენილობისათვის და $0,25 R_{\text{ს}}$ -მდე II შედგენილობისათვის), მიმდინარეობს აე-ს სიგნალების ინტენსიური გამოყოფა. ეს მონაკვეთები არაწრფივია. მეორე ეტაპზე ($0,2 R_{\text{ს}}$ -დან $0,5 R_{\text{ს}}$ I შედგენილობისათვის და $0,25 R_{\text{ს}}$ -დან $0,45 R_{\text{ს}}$ II შედგენილობისათვის) დგება გარკვეული სტაბილიზაციის მომენტი აე-ს იმპულსების წარმოქმნის პროცესში. ინტენსიურობაც რამდენადმე კლებულობს. მესამე ეტაპზე სიგნალების გამოყოფა კვლავ მატულობს და ძლიერდება ვიდრე ნიმუშის რღვევამდე.



ნახ. 3.6 აე-ს იმპულსების რაოდენობისა და ძაბვების ფარდობითი დეფორმაციების დამოკიდებულების გრაფიკები 1-მსუბუქი ბეტონი, I შემადგენლობა; 2-მსუბუქი ბეტონი, II შედგენილობა; 3-მძიმე ბეტონი, I შედგენილობა; 4-მძიმე ბეტონი, II შემადგენლობა;

ასეთი განსხვავების მიზეზი, ჩვენი აზრით არის მსუბუქ ბეტონებში შემცველისა და მატრიცის სიმტკიცეებს შორის დიდი სხვაობა. მსუბუქი შემცველი, თავისი დაბალი სიმტკიცის გამო, ბეტონში მსხვრევას იწყებს დატვირთვის მოდებისთანავე და ეს პროცესი გრძელდება ნიმუშის საბოლოო რღვევამდე. თავდაპირველად, ბზარწარმოქმნის ქვედა ზღვრამდე (R_s^0), წარმოქმნილი აკუსტიკური სიგნალების უდიდესი ნაწილი მოდის სწორედ მსუბუქ შემცველებზე,

ხოლო დატვირთვის მაღალ საფეხურებზე პროცესში თანდათანობით ერთვებიან მატრიცის და საკონტაქტო ზონების ბზარებიც. რაც შეეხება ბზარწარმოქმნის ზედა ზღვარს ($R_{\text{ზ}}^7$) იგი უფრო მაღალ საფეხურებზეა ($\sigma/R_{\text{ზ}} = 0,83; 0,88$). ეს შეიძლება აიხსნას იმით, რომ მსუბუქ ბეტონებში შემვსების ძლიერ დაბალი სიმტკიცის გამო დატვირთვებს თავის თავზე იღებს ცემენტის ქვის მატრიცა. რომელიც დატვირთვის თითქმის ბოლო საფეხურამდე დრეკადად დეფორმირდება. იქმნება თითქოს და პარადოქსალური მდგომარეობა მსუბუქ ბეტონებში დატვირთვისას ბზარწარმოქმნის პროცესი გაცილებით ინტენსიურად მიმდინარეობს, ვიდრე მძიმე ბეტონებში. ხოლო ბზარწარმოქმნის ზედა ზღვარი ($R_{\text{ზ}}^9$), რომლის შემდეგაც რღვევის ზვავისებრი პროცესი იწყება, უფრო მაღალ საფეხურზე ფიქსირდება. დაზიანების დაგროვების პროცესი მსუბუქ ბეტონებში შემდგომ გამოკვლევას და შესწავლას საჭიროებს.

3.3. სხვადასხვა სახის ქიმიური დანამატების გავლენა ბეტონში მიმდინარე დესტრუქციულ პროცესებზე

ცნობილია, რომ სუპერპლასტიკატორები წარმოადგენენ ქიმიურ დანამატებს, რომელთა შეყვანაც ბეტონის ნარევი იწვევს მისი ძვრადობის ძლიერ მომატებას წყლის ხარჯის გაზრდის გარეშე. მათ განეკუთვნება დანამატები, რომელთა ოპტიმალური დოზირება საშუალებას იძლევა მცირედ ძვრადი ბეტონის ნარევი (კონუსის ჯდენა 2-3 სმ) გადავაქციოთ სხმულ ნარევიად (კონუსის ჯდენა 10 სმ-მდე) ბეტონის სიმტკიცის კლების გარეშე.

სუპერპლასტიფიკატორად ჩვენს მიერ გამოყენებული იქნა ნაფტალინის (სულფირირებული ნაფტალინ-ფორმალდეჰიდური ნაერთი) გამათხევადებელი

C-3 და მაღალდისპერსული კაჟმიწა CSF (შვედური წარმოების პროდუქტი);
ჰიდროფობიზატორის სახით კი ჰაერშემყვანი დანამატი Kჰ-12-35.

ზოგიერთი მკვლევარი შეისწავლის ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებების გავლენას ბეტონის ბზარმედეგობაზე. აღნიშნავენ, რომ მათი შეყვანა ბეტონის ნარევეში მნიშვნელოვნად ამცირებს ბეტონის კაპილარული შეკლების სიდიდეს და ზრდის ბზარმედეგობას, რაც განპირობებულია კაპილარებში წყლის ჩაზნექილი მენისკების ზედაპირებზე აღძრული მომჭიმავი ძალების შემცირებით, რაც საბოლოოდ იწვევს კაპილარებში ჯამური კაპილარული წნევის შემცირებას [8].

დასმული ამოცანის შესასრულებლად ჩვენს მიერ დამზადებული იქნა ნიმუშების 6 სერია ქვიშოვანი ბეტონისაგან (დუღაბი). პრიზმები ზომებით 40X40X160მ. ქვემოთ მოყვანილია ბეტონის შედგენილობები თითოეული სერიისათვის:

I სერია – დუღაბი დანამატების გარეშე. საბაზო შედგენილობა; ცემენტ-ქვიშის თანაფარდობა.

ც/ქვ=1:3; წ/ც=0,45;

II სერია – საბაზო შედგენილობას ემატება სუპერპლასტიფიკატორი C-3 0,6%-ის ოდენობით ცემენტის მასიდან.

III სერია – წყლის ხარჯი მცირდება – წ/ც=0,35; ხოლო დანამატი C-3 შეგვყავს 0,6%-ის რაოდენობით ცემენტის მასიდან;

IV სერია – ცემენტის ხარჯი მცირდება საბაზო შედგენილობასთან შედარებით 25%-ით; C-3 ემატება დუღაბს 0,8%-ით ოდენობით ცემენტის მასიდან. ც/ქვ=1:4;

V სერია – ცემენტის ხარჯი შემცირებულია საბაზოსთან შედარებით 25%-ით; ემატება სუპერპლასტიფიკატორი CSF; წ/ც=0,45;

VI სერია – საბაზო შედგენილობას ემატება ჰიდროფო-ბიზატორი Kჰ-12-35 0,1%-ის ოდენობით ცემენტის მასიდან; ც/ქვ=1:3; წ/ც=0,41. ნიმუშები ინახებოდნენ ნორმალურ პირობებში.

თითოეული სერიიდან გამოცდილი იქნა ნიმუში _ 12-12 ორი თვის ასაკში. ნიმუშების გამოცდა ჩატარებულ იქნა შემდეგი მეთოდის საფუძველზე:

ექსპერიმენტი ისე იქნა დაგეგმილი, რომ შესაძლებელი გამხდარიყო ბეტონის კუმშვის დიაგრამების ავტომატური ჩაწერა დატვირთვის პროცესში და ამავდროულად დაგვერეგისტრირებინა და დაგვეთვალა აკუსტიკური ემისიის სიგნალები.

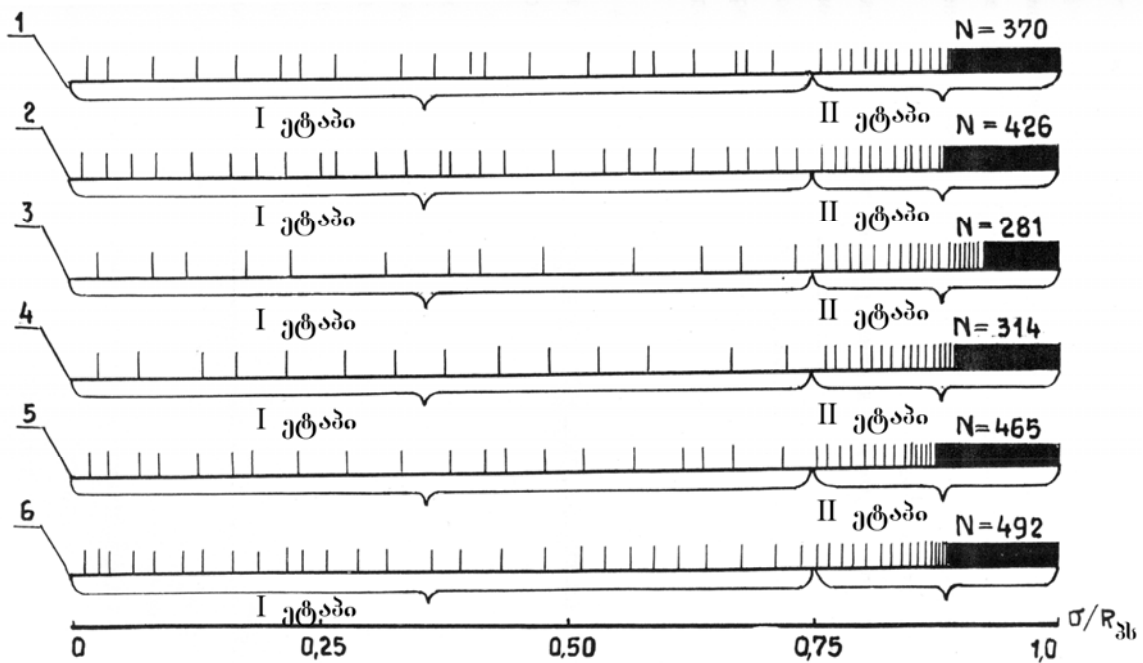
ცხრილი 3.5.-ში მოცემულია აე-ს იმპულსებით გასაშუალოებული მნიშვნელობები ძაბვის ფარდობით სიდიდეებზე დამოკიდებულებით $n/R_{\%} - N$.

3.7. ნახაზზე წარმოდგენილი დიაგრამიდან ჩანს, რომ პრინციპული განსხვავება გამოსაცდელი ნიმუშების დატვირთვის დროს აღძრულ აკუსტიკური ემისიის იმპულსების წარმოშობის ხასიათში არ დაიკვირვება. აე-ს იმპულსების განაწილების დიაგრამები მსგავსია, მაგრამ აე-ს იმპულსების გამოყოფის ინტენსიურობაში გარკვეული განსხვავება მაინც შეინიშნება.

ცხრილი 3.5.

აკუსტიკური ემისიის იმპულსების გასაშუალოებული მნიშვნელობის ცხრილი დატვირთვის ინტენსივობაზე დამოკიდებულებით ($n/R_{\%} - N$).

სერიის N	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
I სერია	2	3	4	5	7	8	9	10	12	13	14	16	17	19	20	23	27	32	45	370
II სერია	2	4	5	7	8	10	12	14	16	17	18	20	21	23	25	28	32	38	54	426
III სერია	1	2	3	4	5	5	6	7	8	9	9	10	11	12	13	16	20	27	39	281
IV სერია	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12	13	14	17	21	27	40	314
V სერია	2	4	5	7	8	9	10	11	13	14	15	16	18	19	20	24	29	38	62	465
VI სერია	3	5	7	9	11	13	14	15	17	18	20	22	23	25	27	30	35	43	69	492



ნახ. 3.7. აკუსტიკური ემისიის იმპულსების დატვირთვაზე დამოკიდებულების განაწილების დიაგრამები

1-I სერია – საბაზო ნიმუშები, $f/c=0,45$; 2-II სერია-საბაზო +C-3=0,6%; $f/c=0,45$; 3-III სერია – $f/c=0,35$, C-3=0,6%; 4-IV სერია $c<25\%$, C-3=0,8%; 5-V სერია – $c<25\%$; CSF-0,8%, $f/c=0,45$; 6-VI სერია; $f/c=0,41$, Kჰ-12-35;

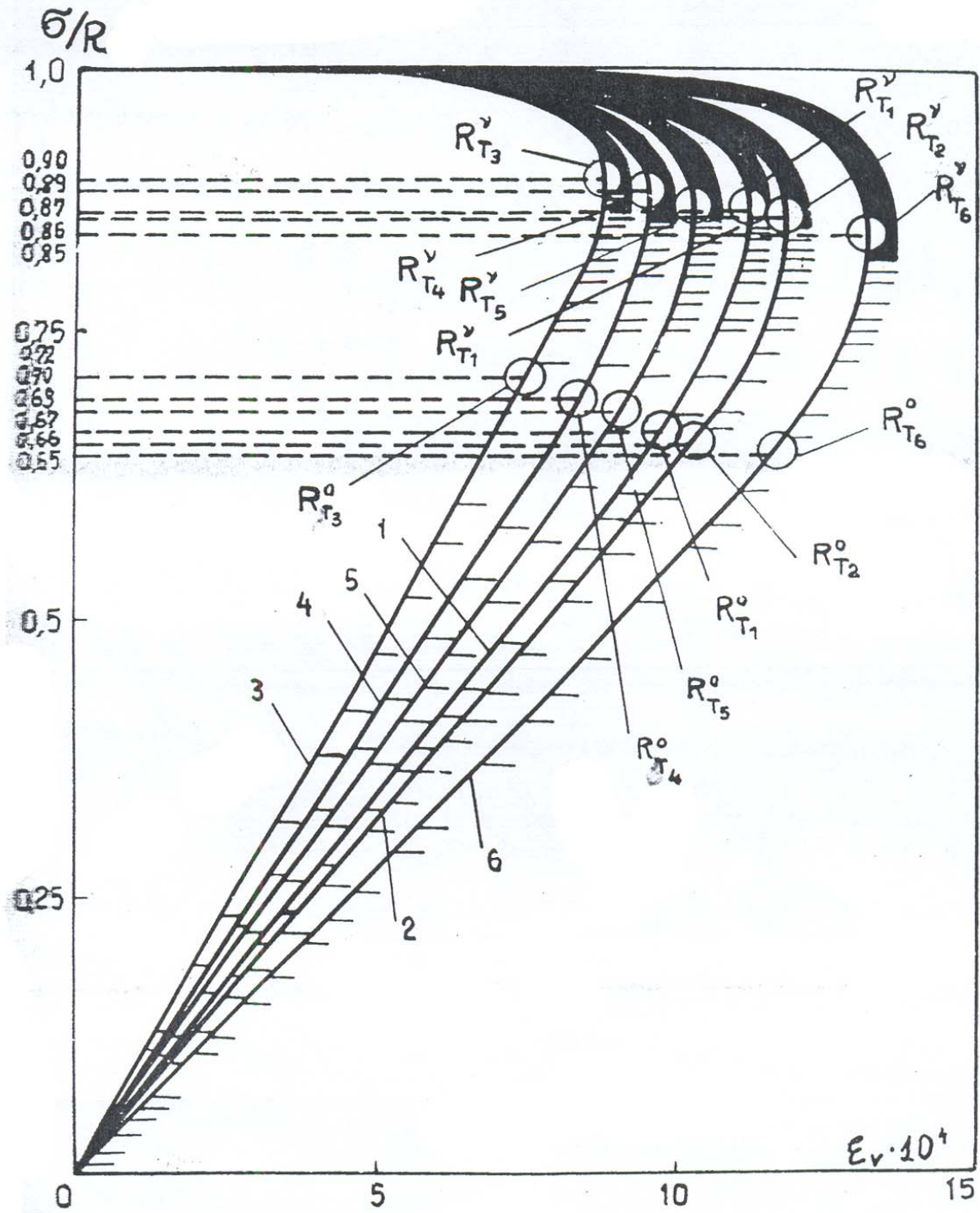
ასე მაგალითად, აე-ს იმპულსების გამოყოფის ყველაზე დაბალი ინტენსიურობით ხასათდება ნიმუშების III სერია (ნახ. 3.7.3) – სუპერპლასტიფიკატორის C-3-ის 0,6%-ის დამატებით ცემენტის მასიდან, $f/c=0,35$. მორე ადგილზე IV სერიის ნიმუშები (ნახ. 3.7.4)-სადაც ცემენტის ხარჯი საბაზოსთან შედარებით შემცირებულია 25%-ით, ხოლო $f/c=0,45$; ყველაზე მაღალი ინტენსივობით აე-ს იმპულსების გამოყოფის ხასიათდება VI სერიის ნიმუშები, რომლებზეც დამატებულია ჰიდროფობიზატორი Kჰ-12-35 0,1%-ით ოდენობით ცემენტის მასიდან, $f/c=0,41$. ეს დიაგრამები გაყოფილია ორ უბნად. პირველ უბანზე ხდება აე-ს იმპულსების კანტი-კუნტად დაფიქსირება. ხოლო მეორეზე კი ინტენსიურობა მკვეთრად იზრდება და უწყვეტ ემისიაში გადადის.

ჩვენს მიერ ასევე გამოკვლეულ იქნა ბეტონის დესტრუქციის პროცესისა და მისი დეფორმირებული მდგომარეობის ურთიერთდამოკიდებულება. ნახ 3.8-ზე წარმოდგენილია ბეტონის მოცულობითი დეფორმაციის გასაშუალებული

მნიშვნელობები. ეს დიაგრამები ურთიერთმსგავსია. მაგრამ ბევრი რამითაც განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან (ნახ. 3.8).

როგორც მოსალოდნელი იყო ყველაზე მეტად დეფორმირდებიან VI სერიის ნიმუშები. ცნობილია, რომ ჰიდროფობიზატორები არიან ჰაერშემყვანი დანამატები და ისინი ბეტონის ფორიანობას ზრდიან. ყველაზე ნაკლებად III სერიის ნიმუშები დეფორმირდებიან (ნახ. 3.8. 3). ეს ადვილად აიხსნება: წ/ც-ის ფარდობის შემცირებით მცირდება ბეტონში არსებული ფორები, კაპილარები და სხვა დეფექტები. დანარჩენ სერიებს შუალედური მდგომარეობა უკავიათ (ნახ. 3.8.1, 3.8.2, 3.8.4, 3.8.5). ასევე შეიძლება ითქვას დეფორმირების სახასიათო წერტილებზეც (R_s^0 და R_s^y).

ცხრილ 3.6-ში მოყვანილია პრიზმული და ბზარწარმოქმნის ზედა და ქვედა ზღვრების (R_s^0 და R_s^y) გასაშუალებული მნიშვნელობები ბეტონის საკვლევი შედგენილობებისთვის.



ნახ. 3.8. მოცულობითი დეფორმაციის დიაგრამები
 1-I სერია; 2-II სერია; 3-III სერია; 4-IV სერია; 5-V სერია; 6-VI სერია.

ცხრილი 3.6.

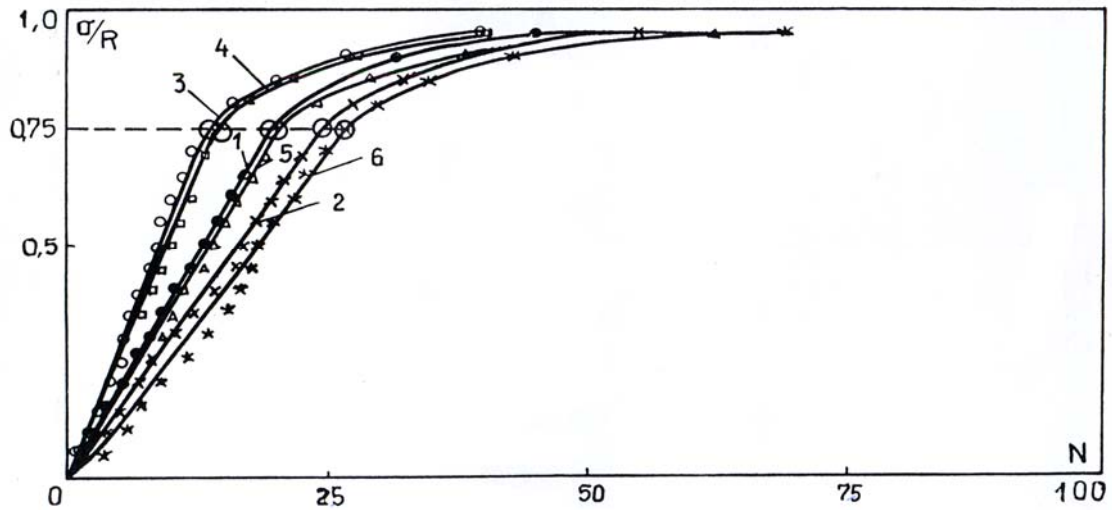
პრიზმული და ბზარწარმოქმნის ზედა და ქვედა ზღვრების (R_s^o და R_s^y)
 გასაშუალებული მნიშვნელობები

ნომ №	I სერია			II სერია			III სერია			IV სერია			V სერია			VII სერია		
	$\frac{R_1^0}{R_{1n}}$	$\frac{R_1^p}{R_{1n}}$	R_{sh1}	$\frac{R_2^0}{R_{2n}}$	$\frac{R_2^p}{R_{2n}}$	R_{sh2}	$\frac{R_3^0}{R_{3n}}$	$\frac{R_3^p}{R_{3n}}$	R_{sh3}	$\frac{R_4^0}{R_{4n}}$	$\frac{R_4^p}{R_{4n}}$	R_{sh4}	$\frac{R_5^0}{R_{5n}}$	$\frac{R_5^p}{R_{5n}}$	R_{sh5}	$\frac{R_6^0}{R_{6n}}$	$\frac{R_6^p}{R_{6n}}$	R_{sh6}
I	0,71	0,86	31,5	0,70	0,85	35,5	0,71	0,90	45,5	0,69	0,87	38,5	0,71	0,90	36,8	0,67	0,87	33,2
2	0,64	0,84	35,0	0,66	0,88	36,8	0,75	0,93	38,5	0,73	0,91	30,0	0,67	0,85	38,5	0,65	0,84	33,2
3	0,66	0,85	29,0	0,63	0,83	32,5	0,70	0,91	45,5	0,68	0,89	36,8	0,68	0,86	37,3	0,62	0,84	36,8
4	0,73	0,92	33,0	0,70	0,87	33,3	0,77	0,94	42,0	0,72	0,88	31,5	0,65	0,89	40,5	0,70	0,89	29,0
5	0,65	0,82	30,0	0,64	0,86	39,5	0,68	0,88	40,5	0,75	0,92	32,0	0,74	0,92	41,0	0,65	0,87	28,8
6	0,67	0,90	30,0	0,72	0,90	36,0	0,75	0,89	39,0	0,71	0,90	34,0	0,70	0,90	34,0	0,63	0,86	30,0
7	0,63	0,85	31,0	0,67	0,89	34,8	0,67	0,89	40,0	0,74	0,90	35,5	0,69	0,89	41,8	0,68	0,85	31,5
8	0,69	0,89	32,0	0,66	0,85	35,0	0,70	0,90	41,5	0,67	0,87	35,3	0,72	0,91	42,0	0,64	0,82	30,5
9	0,66	0,87	33,0	0,65	0,84	34,0	0,81	0,95	42,5	0,68	0,86	33,5	0,66	0,85	40,5	0,59	0,80	30,8
10	0,71	0,91	32,5	0,63	0,87	31,3	0,72	0,91	41,5	0,69	0,89	34,0	0,70	0,88	39,5	0,69	0,88	31,3
11	0,65	0,83	30,0	0,68	0,84	33,0	0,69	0,87	39,5	0,77	0,92	29,5	0,68	0,89	35,5	0,67	0,89	29,5
12	0,69	0,88	34,0	0,62	0,80	37,5	0,67	0,88	41,0	0,71	0,87	37,0	0,69	0,87	41,5	0,65	0,84	32,5
CP	0,67	0,87	31,8	0,66	0,86	35,0	0,72	0,90	41,4	0,70	0,89	34,0	0,69	0,87	39,0	0,65	0,85	31,4

ექსპერიმენტებმა გვიჩვენეს, რომ სუპერპლასტიფიკატორის C-3-ის დამატებით საბაზო შედგენილობაზე (წ/ც-ის და ც/ქვ თანაფარდობების შეუცვლელად) სათანადო ეფექტი არ მიიღწევა. პირიქით, სიმტკიცის ზრდა მართალია საბაზო ნიმუშებთან შედარებით ხდება 10%-ით, მაგრამ აე-ს იმპულსების წარმოქმნა ინტენსიფიცირდება (ნახ. 3.7.2, 3.8.2).

ეფექტი ვლინდება მხოლოდ იმ შემთხვევებში, როცა ან წ/ც-ის ფარდობა ან ცემენტის ხარჯი მცირდება (ნახ. 3.7.3, 3.8.3 და 3.7.4, 3.8.4). წყლის ხარჯის შემცირებით იზრდება სიმტკიცე დაახლოებით 25%-ით და მცირდება აე-ს იმპულსების წარმოქმნა. ცემენტის ხარჯის შემცირება საბაზოსთან შედარებით 25%-ით, არ ამცირებს სიმტკიცეს, პირიქით 5%-ით ზრდის (იხ. ცხრ. 3.6). აე-ს იმპულსების წარმოშობა საბაზოსთან შედარებით ნაკლები ინტენსივობით ხასიათდება (მე-2 ადგილი აქვს სერიაში). შვედური წარმოების პროდუქტის, მაღალდისპერსიული კაჟმიწის CSF-ის დამატებით, ცემენტის ხარჯი 25%-ითაა შემცირებული, მიიღწევა სიმტკიცის ზრდა საბაზოსთან შედარებით დაახლოებით 18%-ით, მაგრამ ამავე დროს ინტენსიფიცირდება აე-ს იმპულსების გამოყოფის პროცესი. რაც შეეხება ჰაერშემცვანი დანამატით Kჰ-12-35-ის შემთხვევას, ამ დროს ნიმუშების სიმტკიცის ზრდა არ დაიკვირვება, ხოლო აე-ს სიგნალების წარმოქმნის პროცესი ყველაზე მაღალი ინტენსივობით ხასიათდება.

ბოლოს შეიძლება დავასკვნათ, რომ სუპერპლასტიფიკატორი C-3 ხელს უწყობს დუღაბის სტრუქტურის გაუმჯობესებას, რადგან ბეტონის ტექნოლოგიური თვისებების გაუმჯობესება (ძვრადობის და დენადობის გაზრდა) წ/ც/-ის ფარდობის შემცირების საშუალებას იძლევა. ეს კი თავის მხრივ მაღალი სიმტკიცის მცირედდაზიანებული სტრუქტურის მიღების წინაპირობაა.



ნახ. 3.9. აე-ს იმპულსების რაოდენობის და ძაბვის ფარდობითი მნიშვნელობების დამოკიდებულების გრაფიკები.

3.4. დულაბის ასაკის გავლენა მისი დესტრუქციის

პროცესზე ღერძული კუმზისას

როგორც პარაგრაფ 3.3-ში იყო აღნიშნული, ნიმუშების ნაწილი (12-12 ნიმუში თითო სერიაში), ინახებოდა ნორმალურ პირობებში და გამოცდილი იქნა ორი წლის ასაკში. ნიმუშები გამოიცადნენ ცნობილი მეთოდით.

ცხრილი 3.7-ში მოცემულია აე-ს იმპულსების საშუალო მნიშვნელობები ნიმუშების თითოეული სერიისათვის ძაბვის ფარდობით მნიშვნელობებზე დამოკიდებულებით $\sigma / R_{35} - N$, ხოლო ცხრილ 3.8-ში მოყვანილია პრიზმული სიმტკიცეებისა და ბზარწარმოქმნის ზედა და ქვედა ზღვრების (R_s^0 და R_s^y) გასაშუალოებული მნიშვნელობები ნიმუშების საკვლევი სერიებისათვის.

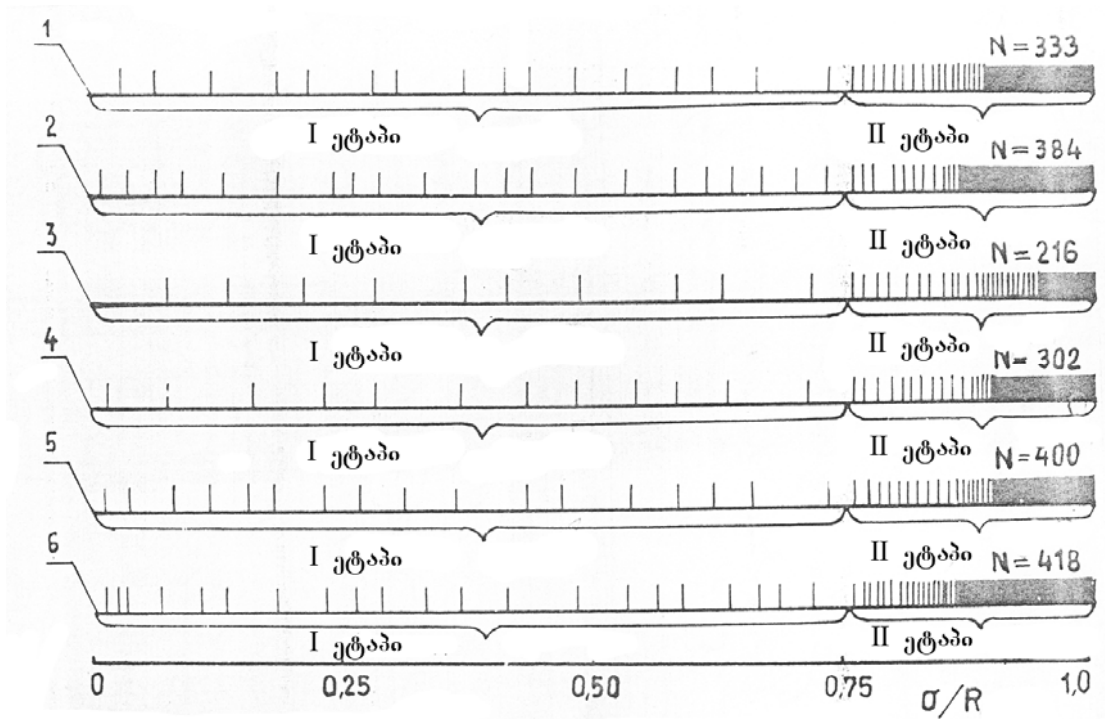
თუ შევადარებთ ნახ. 3.10-ზე გამოსახულ დიაგრამებს პარაგრაფ 3.3-ის ნახ. 3.7-ზე მოცემულ დიაგრამებს მათში განსხვავებას აე-ს იმპულსების დაგროვების მიხედვით ნაკლებად შევამჩნევთ. ზუსტად ასევე შეიძლება ვიმსჯელოთ მოცულობითი დეფორმაციების დიაგრამებზეც (ნახ. 3.11). ორწლიანი ნიმუშებიდან ყველაზე უფრო დეფორმირდება K3-12-35 ქიმიური დანამატით დამზადებული პრიზმები, ყველაზე ნაკლებად C-3 სუპერპლასტიფიკატორიანი ნიმუშები, $\eta/\epsilon=0,35$ (ნახ. 3.11.6 და 3.11.3).

ცხრილი 3.7.

ძაბვის ფარდობით მნიშვნელობებზე აე-ს იმპულსების საშუალო მნიშვნელობების დამოკიდებულების ცხრილი $\sigma / R_{35} - N$

№ სერია	σ/R																			
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0
I სერია	1	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12	13	14	15	16	20	25	31	44	331
II სერია	2	4	5	6	7	9	10	11	13	14	15	16	18	19	20	23	28	35	47	384
III სერია	0	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	8	8	9	10	13	17	24	33	216
IV სერია	1	2	2	3	4	5	5	6	7	8	9	10	11	11	12	15	20	26	35	302
V სერია	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	20	25	32	53	400
VI სერია	3	4	6	7	8	10	11	12	13	14	15	17	18	20	21	24	29	37	62	418

თუ შევადარებთ ნახაზებზე 3.8-ზე და 3.11-ზე გამოსახულ დიაგრამებს ცალკე-ცალკე, სერიების მიხედვით, მაშინ ცხადი გახდება, რომ ორწლიანი ნიმუშები ნაკლებად დეფორმირდებიან, ვიდრე ორთვიანი. გარდა ამისა, სახასიათო წერტილები (R_s^0 და R_s^y) ორწლიანი ნიმუშებს უფრო მაღლა აქვს, ვიდრე ორთვიან პრიზმებს.



ნახ. 3.10. აე-ს იმპულსების დატვირთვებზე დამოკიდებულებით განაწილების დიაგრამები
 1-I სერია; 2-II სერია; 3-II სერია; 4-IV სერია; 5-V სერია; 6-VI სერია.

ნახაზებზე 3.12-3.17 გამოსახულია ძაბვის ფარდობითი დეფორმაციებისა და აე-ს იმპულსების რაოდენობის დამოკიდებულების გრაფიკები თითოეული სერიისათვის ცალ-ცალკე, როგორც ორთვიან, ისე ორწლიან ასაკში.

გრაფიკული გამოსახულებების ანალიზი გვამღევეს საშუალებას დავასკვნათ, რომ ორწლიანი ნიმუშების ექვსივე სერიაში ხდება აე-ს იმპულსების გამოყოფის რამდენადმე შემცირება, ორთვიან ნიმუშებთან შედარებით. ამასთან მცირდება წარმოქმნილი იმპულსების საერთო რაოდენობაც, რომელთა სიდიდეები მეტი თვალსაჩინოების მიზნით გამოტანილია ამ დიაგრამებზე. რაც შეეხება ინტენსიური ბზარწარმოქმნის დაწყების სამანს, აქ არავითარი ცვლილება არ მომხდარა: ყველა სერიისათვის ეს აღინიშნება 0,75 ნიშნულზე მრღვევი დატვირთვიდან.

ცხრილი 3.8.

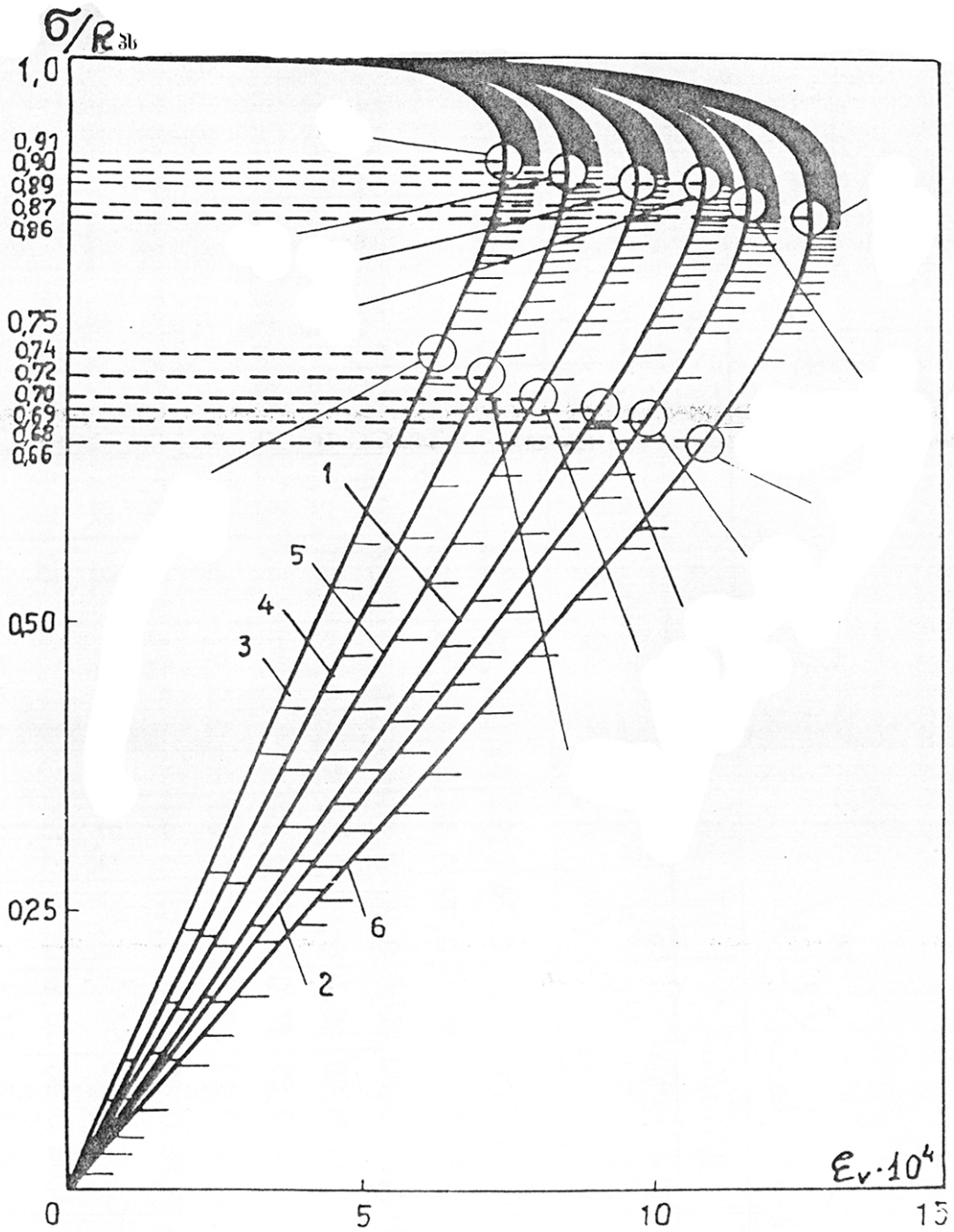
**საკვლევი ნიმუშების სიმტკიცის ზრდის მაჩვენებლები
 ორი წლის განმავლობაში**

№ როგ ზე	I სერია			II სერია			III სერია			IV სერია			V სერია			VI სერია		
I	0,72	0,88	48,8	0,70	0,86	50,3	0,74	0,90	64,0	0,75	0,92	55,0	0,70	0,90	42,0	0,67	0,86	48,8
2	0,69	0,86	43,3	0,66	0,90	52,8	0,77	0,95	68,5	0,69	0,84	57,8	0,66	0,85	49,3	0,69	0,88	45,0
3	0,67	0,85	42,0	0,65	0,83	50,0	0,70	0,92	56,3	0,70	0,89	50,5	0,72	0,89	43,0	0,64	0,85	44,0
4	0,73	0,94	52,0	0,71	0,89	48,8	0,80	0,94	64,8	0,72	0,88	52,5	0,68	0,88	45,0	0,62	0,84	41,0
5	0,65	0,83	45,0	0,68	0,87	47,0	0,76	0,89	67,5	0,77	0,93	48,8	0,73	0,91	51,0	0,65	0,86	38,8
6	0,68	0,90	46,5	0,69	0,91	53,3	0,75	0,88	60,0	0,71	0,90	50,5	0,70	0,92	42,5	0,68	0,90	42,0
7	0,70	0,90	42,5	0,72	0,93	55,0	0,73	0,90	66,0	0,74	0,92	53,0	0,72	0,92	46,0	0,72	0,91	39,3
8	0,69	0,88	43,5	0,67	0,86	54,0	0,73	0,89	60,5	0,68	0,87	45,0	0,71	0,93	44,8	0,64	0,85	40,0
9	0,66	0,86	44,0	0,68	0,85	50,6	0,69	0,86	59,5	0,69	0,88	47,3	0,66	0,87	41,5	0,66	0,87	41,5
10	0,71	0,91	46,8	0,66	0,84	52,4	0,70	0,89	63,0	0,74	0,91	46,3	0,73	0,90	43,5	0,63	0,89	43,0
11	0,70	0,92	42,8	0,70	0,88	49,0	0,81	0,96	65,7	0,80	0,95	54,0	0,65	0,89	47,0	0,64	0,80	42,0
12	0,68	0,90	49,5	0,65	0,84	50,0	0,72	0,92	68,4	0,70	0,86	50,0	0,68	0,87	46,0	0,65	0,85	40,8
CP 34	0,69	0,89	46,5	0,68	0,87	50,5	0,74	0,91	63,7	0,72	0,90	50,9	0,70	0,89	45,1	0,66	0,86	42,2

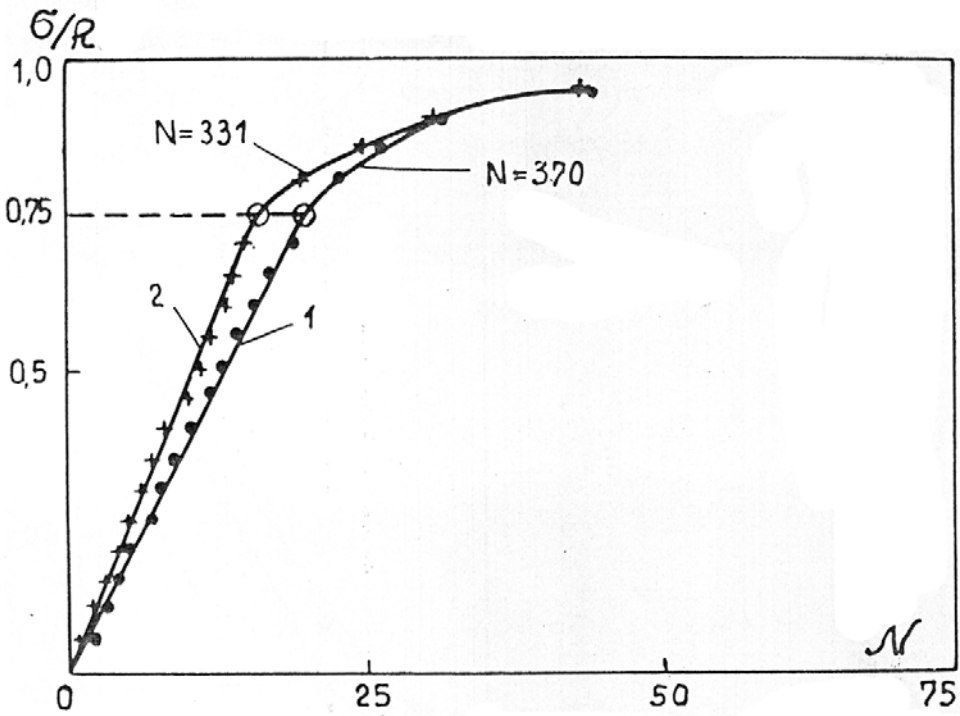
გარკვეულ ინტერესს წარმოადგენს საკვლევი ნიმუშების სიმტკიცის ზრდის მაჩვენებლები ორი წლის განმავლობაში მოგვეყვას ეს სიდიდეები %-ში სერიების მიხედვით: I სერია – 46%; II სერია – 44%; III სერია – 54%; IV სერია – 50%; V სერია – 17%; VI სერია – 34%;

როგორც ჩანს, ყველაზე მეტად სიმტკიცეში მოიმატეს III და IV სერიის ნიმუშებმა, რომლებშიც დესტრუქციის პროცესი ყველაზე ნაკლები ინტენსიურობით ხასიათდება.

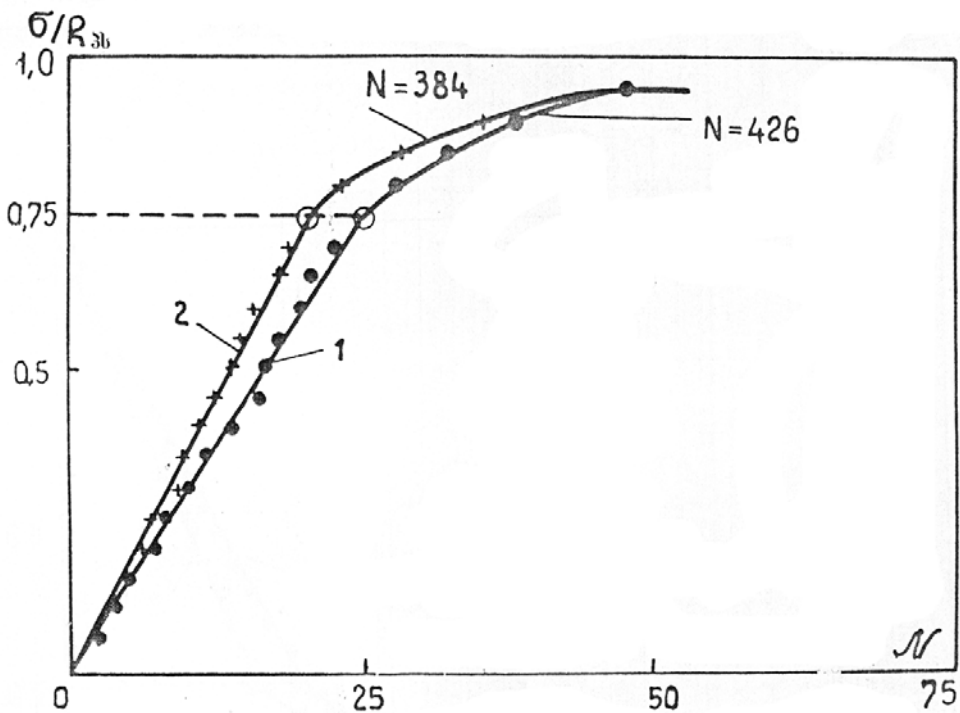
დასასრულს შეიძლება ითქვას, რომ საკვლევი ქვიშოვანი ბეტონის (დულაბის) ასაკის მატებასთან ერთად (ნორმალურ პირობებში გამყარებისას) დესტრუქციის პროცესის ინტენსიურობა ყველა სერიაში კლებულობს და აე-ს იმპულსების საერთო რაოდენობა მცირდება. ხოლო ზღვარი, რომლის მიღწევის შემდეგაც აე-ს სიგნალების დიდი რაოდენობით წარმოქმნა იწყება უცვლელი რჩება ($0,75 R_{yk}$). ბეტონის ასაკის გავლენა ბზარწარმოქმნის პროცესზე არ არის ძნელი ასახსნელი. ცნობილია, რომ კლინკერის მინერალების ჰიდრატაციის პროცესი არ შემოიფარგლება მხოლოდ 28 დღით. არამედ ის მრავალ წელს გრძელდება. თანდათანობით რეაქციაში შედიან ჯერ კიდევ არაჰიდრატირებული ცემენტის ნაწილაკები, მცირდება ცემენტის გელური მდგენელი. სტრუქტურა უფრო კომპაქტური და ერთგვაროვანი ხდება. წარმოებს ე.წ. ბზარების «თვითშევისება», სწორედ ამით აიხსნება ბეტონის სიმტკიცის მატება და აე-ს იმპულსების გამოყოფის პროცესის შემცირება.



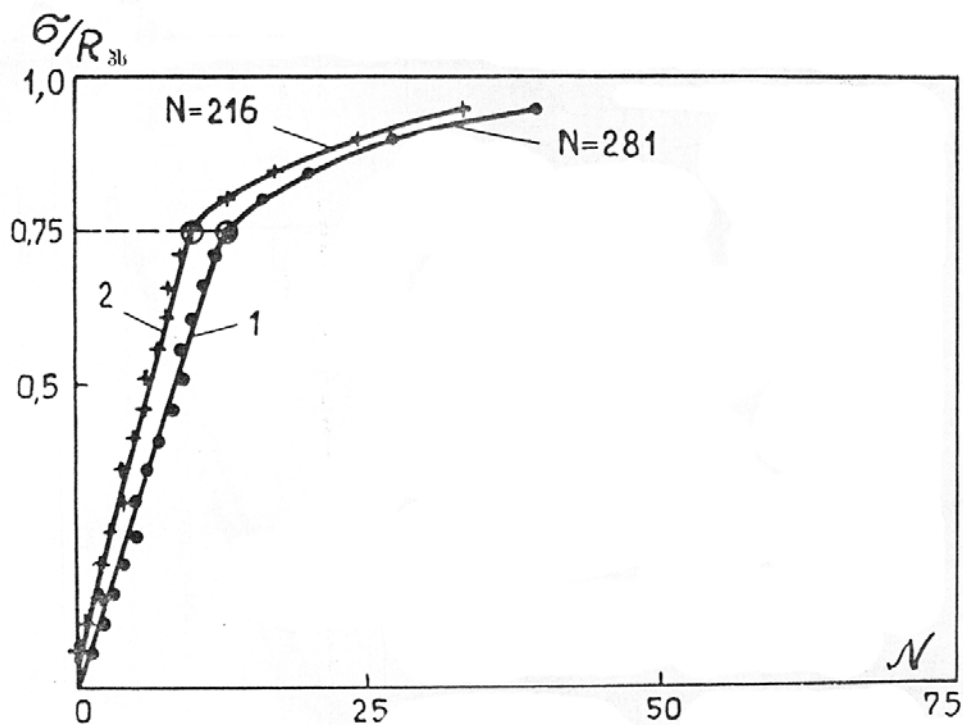
ნახ. 3.11. მოცულობითი ცვლილებების დიაგრამები
 1-I სერია; 2-II სერია; 3-III სერია; 4-IV სერია; 5-V სერია; 6-VI სერია.



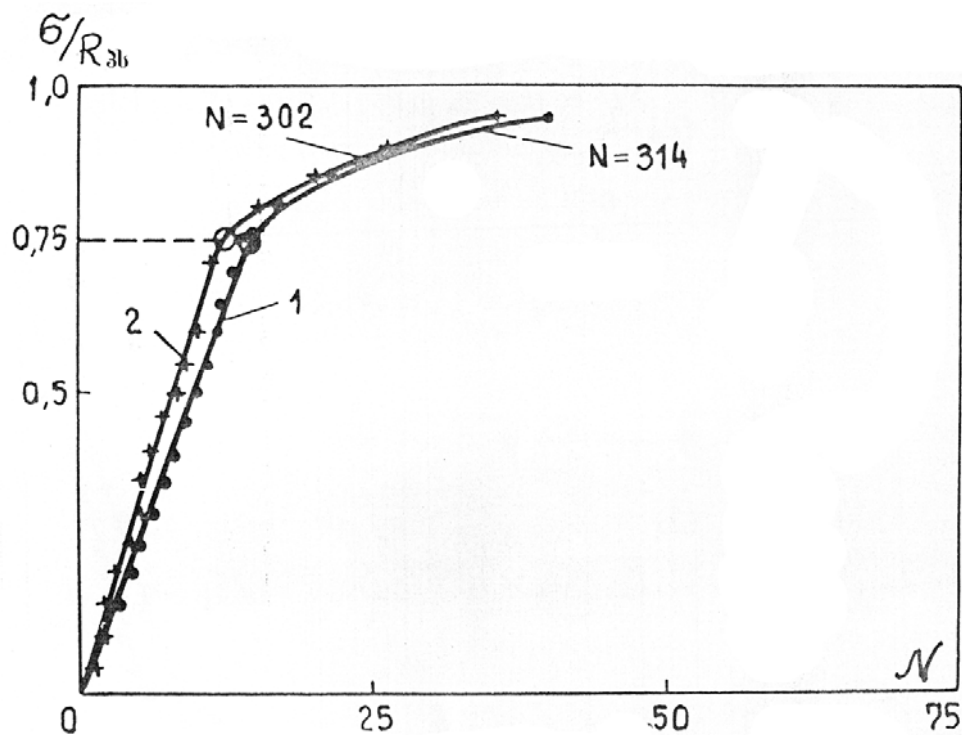
ნახ. 3.12. აე-ს იმპულსების რაოდენობის დატვირთვის ინტენსიურობაზე დამოკიდებულების გრაფიკები $\sigma/R_{\text{შ}} - N$; ნიმუშების I სერია; 1-2 თვის ასაკში გამოცდილი; 2-2 წლის ასაკში გამოცდილი



ნახ. 3.13. აე-ს იმპულსების რაოდენობის დატვირთვის ინტენსიურობაზე დამოკიდებულების გრაფიკები $\sigma/R_{\text{შ}} - N$; ნიმუშების II სერია; 1-2 თვის ასაკში გამოცდილი; 2-2 წლის ასაკში გამოცდილი

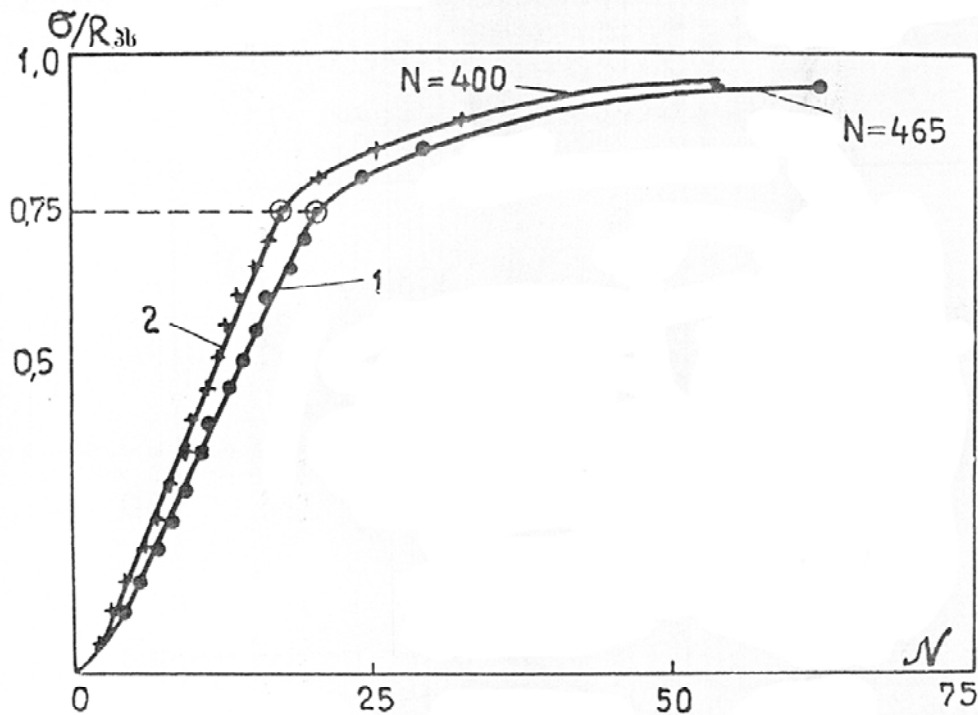


ნახ. 3.14. აე-ს იმპულსების რაოდენობის დატვირთვის ინტენსიურობაზე დამოკიდებულების გრაფიკები $\sigma/R_{\sigma s} - N$; ნიმუშების III სერია; 1-ორი თვის ასაკში გამოცდილი; 2-ორი წლის ასაკში გამოცდილი



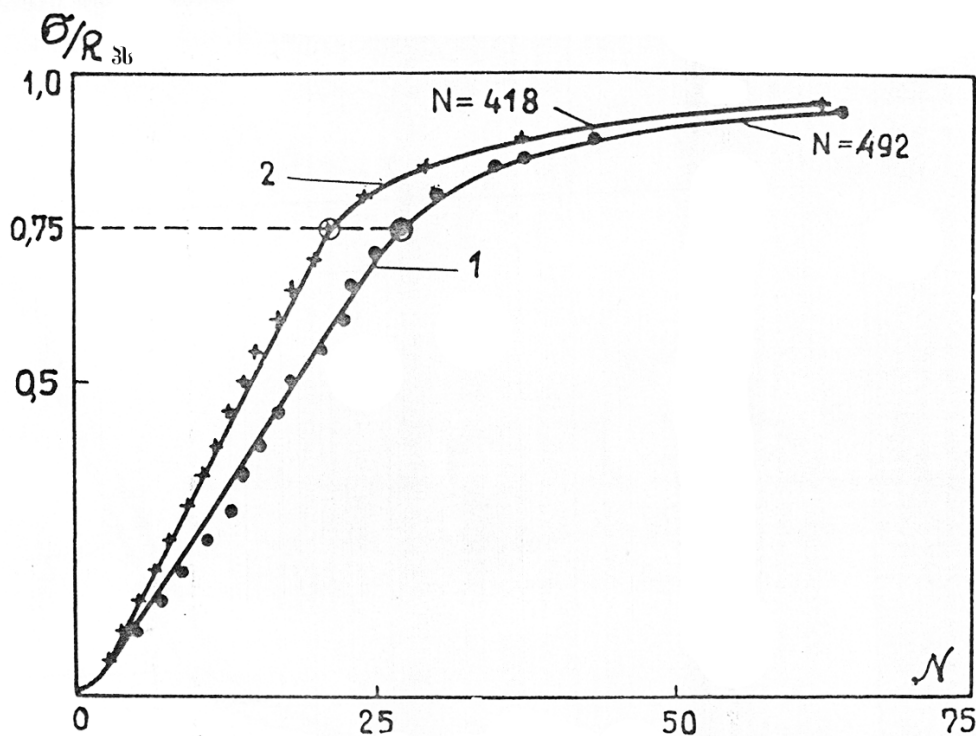
ნახ. 3.15. აე-ს იმპულსების რაოდენობის დატვირთვის ინტენსიურობაზე დამოკიდებულების გრაფიკები $\sigma/R_{\sigma s} - N$;

ნიმუშების IV სერია; 1-ორი თვის ასაკში გამოცდილი; 2-ორი წლის ასაკში გამოცდილი



ნახ. 3.16. აე-ს იმპულსების რაოდენობის დატვირთვის ინტენსიურობაზე დამოკიდებულების გრაფიკები $\sigma/R_{\sigma s} - N$;

ნიმუშების V სერია; 1-ორი თვის ასაკში გამოცდილი; 2-ორი წლის ასაკში გამოცდილი



ნახ. 3.17. აე-ს იმპულსების რაოდენობის დატვირთვის ინტენსიურობაზე დამოკიდებულების გრაფიკები $\sigma/R_{\sigma s} - N$;

ნიმუშების VI სერია; 1-ორი თვის ასაკში გამოცდილი; 2-ორი წლის ასაკში გამოცდილი

3.5. გამყარების პირობების გავლენა ბეტონის დეფორმირებისა და რღვევის პროცესებზე

დეფორმირებისა და რღვევის პროცესებზე ბეტონის გამყარების პირობების გავლენის შესწავლის მიზნით დაყალიბებული იქნა პრიზმული ნიმუშები, ზომებით 40X40X160 მმ, წვრილმარცვლოვანი ბეტონისაგან. ბეტონის შედგენილობა: მარნეულის ადგილმდებარეობის ღორღი ფრაქციით $5 \div 10$ მმ; ქვიშა დარკვეთის (2,5 მმ-მდე ფრაქციით). და პორტლანდცემენტი, კასპის ცემენტის ქარხნიდან M500. $f/c=0,5$; ბეტონის შედგენილობა გაანგარიშებული იქნა 400 მარკაზე. ნიმუშების ნაწილი ინახებოდა ბუნებრივ პირობებში (ნორმალური და ჰაერმშრალი) და ნაწილი დაჩქარებულად გამყარდა (თბოტენიანი დამუშავება). პრიზმები გამოცდილი იქნა ოთხი თვის ასაკში; მანამდე ისინი ინახებოდნენ სხვადასხვა ტენიანობის გარემოში. გაორთქლილი და გაუორთქლავი ნიმუშებისათვის შექმნილი იქნა სამი გარემო:

1. გაუორთქლავი ნიმუშები:

I სერია – 112 დღე ინახებოდნენ ნორმალურ პირობებში (გამოცდამდე).

II სერია – 28 დღე ნორმალურ პირობებში, ხოლო დარჩენილი 84 დღე ჰაერმშრალ პირობებში.

III სერია – 7 დღე ნორმალურ პირობებში, ხოლო დანარჩენი დრო ჰაერმშრალ პირობებში.

2. გაორთქლილი ნიმუშები:

IV სერია – გაორთქლის შემდეგ 112 დღე იმყოფებოდნენ ნორმალურ პირობებში.

V სერია – გაორთქლის შემდეგ 28 დღე ნორმალურ პირობებში – ხოლო შემდეგ – ჰაერმშრალ პირობებში.

VI სერია – გაორთქლის შემდეგ გამოცდამდე ინახებოდნენ ჰაერმშრალ პირობებში.

ტყუპისცალი ნიმუშები გამოიცადნენ ოთხი თვის ასაკში 3.1 და 3.2. პარაგრაფებში აღწერილი მეთოდიკით. ცდის შედეგები დამუშავებულია მოქმედი სტანდარტის შესაბამისად.

3.9. ცხრილში მოცემულია აე-ს იმპულსების გასაშუალოებული რაოდენობები ძაბვების ფარდობითი მნიშვნელობების მიხედვით $n/R_{\text{ს}}$ – ხოლო

ცხრილ 3.10-ში მოყვანილია პრიზმული სიმტკიცეების და ბრაზწარმოქმნის ზედა და ქვედა ზღვრების (R_s^0 და R_s^y) გასაშუალოებული მნიშვნელობები.

ცხრილი 3.9

აე-ს იმპულსების საშუალო მნიშვნელობები ძაბვის ფარდობით სიდიდეებზე დამოკიდებულებით

სერიის № \ σ/R_{sp}	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
I სერია	2	4	6	8	10	12	13	15	17	18	20	22	24	26	33	43	58	80	128	663
II სერია	1	3	5	7	9	10	11	13	14	16	17	19	21	23	27	35	47	69	109	487
III სერია	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	14	16	17	20	25	32	47	81	296
IV სერია	5	8	12	15	18	21	24	27	30	33	37	40	43	47	61	89	132	203	311	784
V სერია	4	6	8	10	13	15	17	20	22	24	26	29	31	33	40	56	82	120	183	569
VI სერია	3	5	7	9	11	13	14	16	18	20	22	25	27	29	36	49	74	105	152	504

ცხრილი 3.10^ა

ბუნებრივი გამყარების პირობებში გამოცდილი ნიმუშების შედეგები

ცხრილი 3.10^ბ

გაორთქლილ პირობებში გამოცდილი ნიმუშების შედეგები

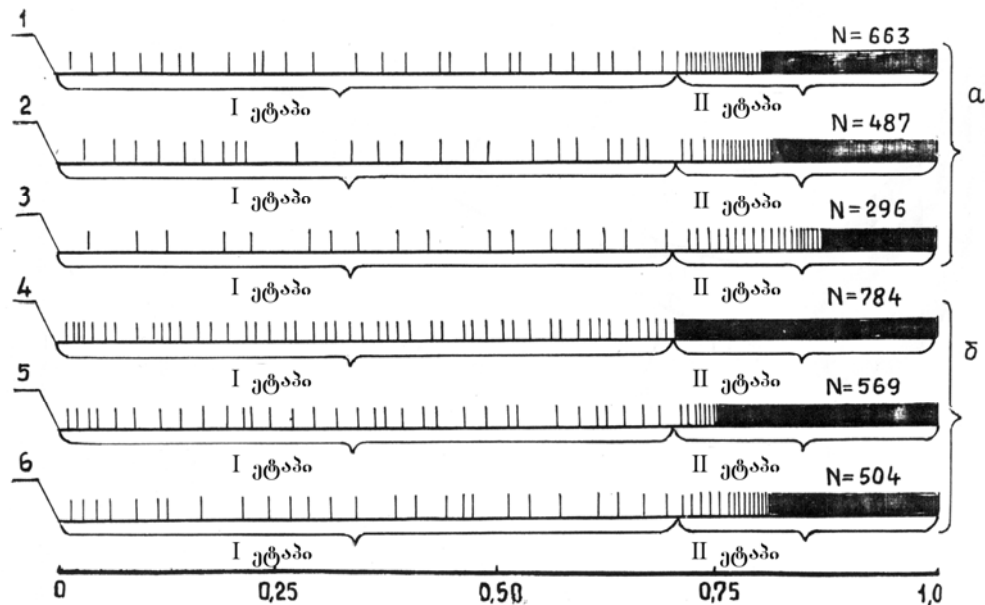
ნიმ.	გაორთქლილი ნიმუშები								
	I სერია			II სერია			III სერია		
	$R_{\Delta_4}^0 / R_{\Delta_4}$	$R_{\Delta_4}^V / R_{\Delta_4}$	R_{Δ_4}	$R_{\Delta_5}^0 / R_{\Delta_5}$	$R_{\Delta_5}^V / R_{\Delta_5}$	R_{Δ_5}	$R_{\Delta_6}^0 / R_{\Delta_6}$	$R_{\Delta_6}^V / R_{\Delta_6}$	R_{Δ_6}
1	0,60	0,79	47,75	0,57	0,77	39,375	0,48	0,70	38,75
2	0,65	0,85	40,125	0,63	0,89	40,0	0,51	0,79	39,5
3	0,75	0,93	43,125	0,68	0,87	38,75	0,59	0,82	37,75
4	0,58	0,77	46,0	0,55	0,78	41,875	0,47	0,68	42,375
5	0,70	0,90	44,625	0,66	0,83	45,0	0,50	0,71	36,75
6	0,61	0,81	59,375	0,58	0,79	40,625	0,52	0,74	39,25
7	0,64	0,87	44,0	0,61	0,83	35,625	0,60	0,82	34,375
8	0,58	0,81	42,75	0,65	0,87	38,125	0,54	0,69	40,625
9	0,60	0,84	48,125	0,56	0,80	40,375	0,47	0,73	39,175
10	0,68	0,89	43,125	0,59	0,82	40,25	0,48	0,75	40,00
11	0,63	0,85	46,25	0,66	0,83	37,75	0,55	0,81	43,75
12	0,57	0,79	44,0	0,58	0,79	40,125	0,60	0,76	38,25
13	0,63	0,83	43,75	0,64	0,81	41,0	0,57	0,78	33,75
14	0,68	0,88	45,25	0,56	0,77	44,375	0,50	0,74	41,25
15	0,64	0,86	47,0	0,63	0,82	40,625	0,59	0,80	37,50
16	0,61	0,80	38,125	0,52	0,75	43,0	0,46	0,78	38,75
17	0,67	0,82	44,375	0,54	0,76	41,25	0,50	0,80	35,625
18	0,62	0,80	45,0	0,79	0,79	39,25	0,54	0,73	37,125
19	0,63	0,81	40,75	0,64	0,81	35,0	0,56	0,75	36,25
20	0,58	0,79	43,25	0,57	0,78	38,125	0,49	0,70	38,00
21	0,69	0,88	42,0	0,60	0,81	40,625	0,46	0,72	35,75
22	0,71	0,91	41,25	0,55	0,78	39,775	0,51	0,80	36,125
23	0,65	0,77	42,625	0,70	0,91	38,75	0,63	0,82	37,00
24	0,64	0,79	43,0	0,79	0,80	39,0	0,53	0,79	41,25
საშ.	0,63	0,83	43,58	0,60	0,80	40,0	0,53	0,76	38,2
მნიშ.									

ექსპერიმენტებმა გვაჩვენეს და ეს ჩანს კიდევაც ნახ. 3.18-ზე გამოსახულ გრაფიკებზე, რომ აე-ს სიგნალების უფრო ინტენსიური გამოყოფით ხასიათდებიან გაორთქლილი ნიმუშები (ნახ. 3.18, ბ).

თუ შევადარებთ სხვადასხვა პირობებში გამყარებულ პრიზმებს, მაშინ ნათელი გახდება, რომ აე-ს სიგნალების წარმოშობის ინტენსიურობა ტენიან პირობებში გამყარებულ ნიმუშებში უფრო მეტია (ნახ. 3.18.1 და 3.18.4) ვიდრე ჰაერმშრალ პირობებში გამყარებული ნიმუშებისა (ნახ. 3.18.3 და 3.18.6) რაც შეეხება II და V სერიის ნიმუშებს (28 დღე ტენიან გარემოში, ხოლო შემდეგ დარჩენილი დრო ჰაერმშრალ პირობებში) მათ საშუალო მდგომარეობა უკავიათ (ნახ. 3.18.2 და 3.18.5).

ნახ. 3.19-ზე და ნახ. 3.20-ზე წარმოდგენილია მოცულობითი დეფორმაციების გასაშუალოებული დიაგრამები. ამ გრაფიკული გამოსახულების ანალიზი გვაძლევს საშუალებას, დავასკვნათ, რომ ყველაზე

უფრო დეფორმირდებიან ტენიან, ნორმალურ პირობებში შენახული ნიმუშები (ნახ. 3.19.1) და (ნახ.3.20.4). ხოლო ყველაზე ნაკლებად ოთხი თვის განმავლობაში ჰაერმშრალ პირობებში (ნახ. 3.19.3) და (ნახ. 3.20.6.) სახასიათო წერტილები – ბზარწარმოქმნის ქვედა და ზედა ზღვრების (R_s^0 და R_s^y) ტენიან ნიმუშებს უფრო ზემოთ აქვთ გრაფიკზე, ვიდრე ჰაერ-მშრალ პირობებში შენახულ ნიმუშებს.

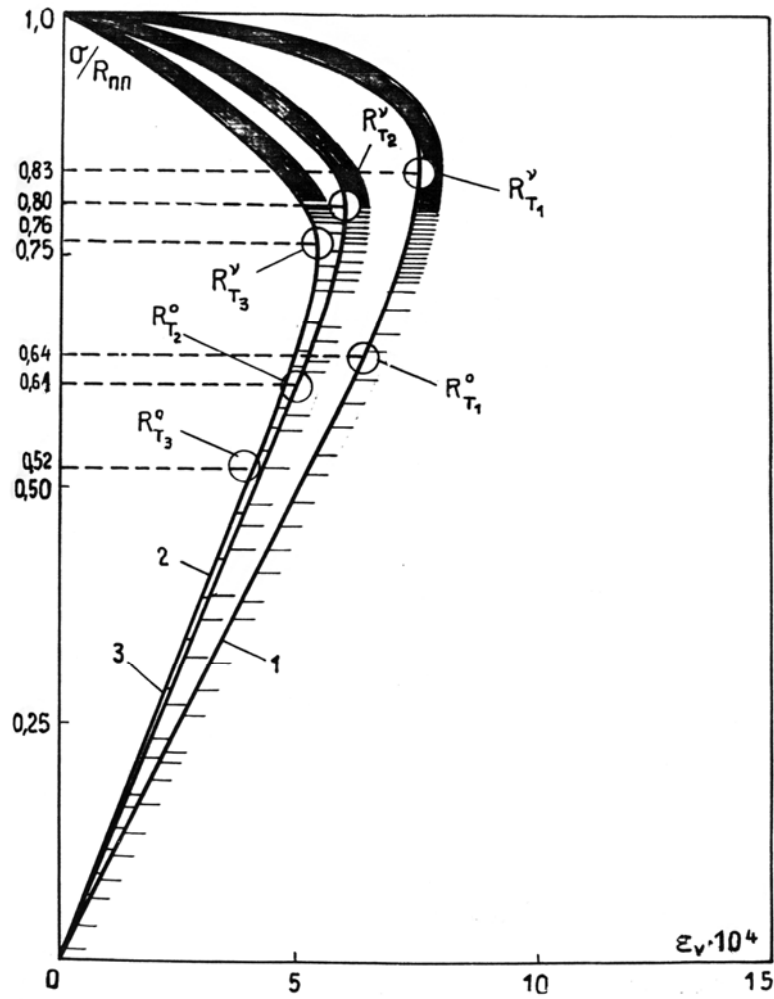


ნახ. 3.18. აე-ს იმპულსების ძაბვებზე დამოკიდებულების დიაგრამები.
 ა-გაუორთქლავი ნიმუშები: 1-I სერია; 2-II სერია; 3-III სერია
 ბ-გაორთქლილი ნიმუშები: 4-IV სერია; 5-V სერია; 6-VI სერია

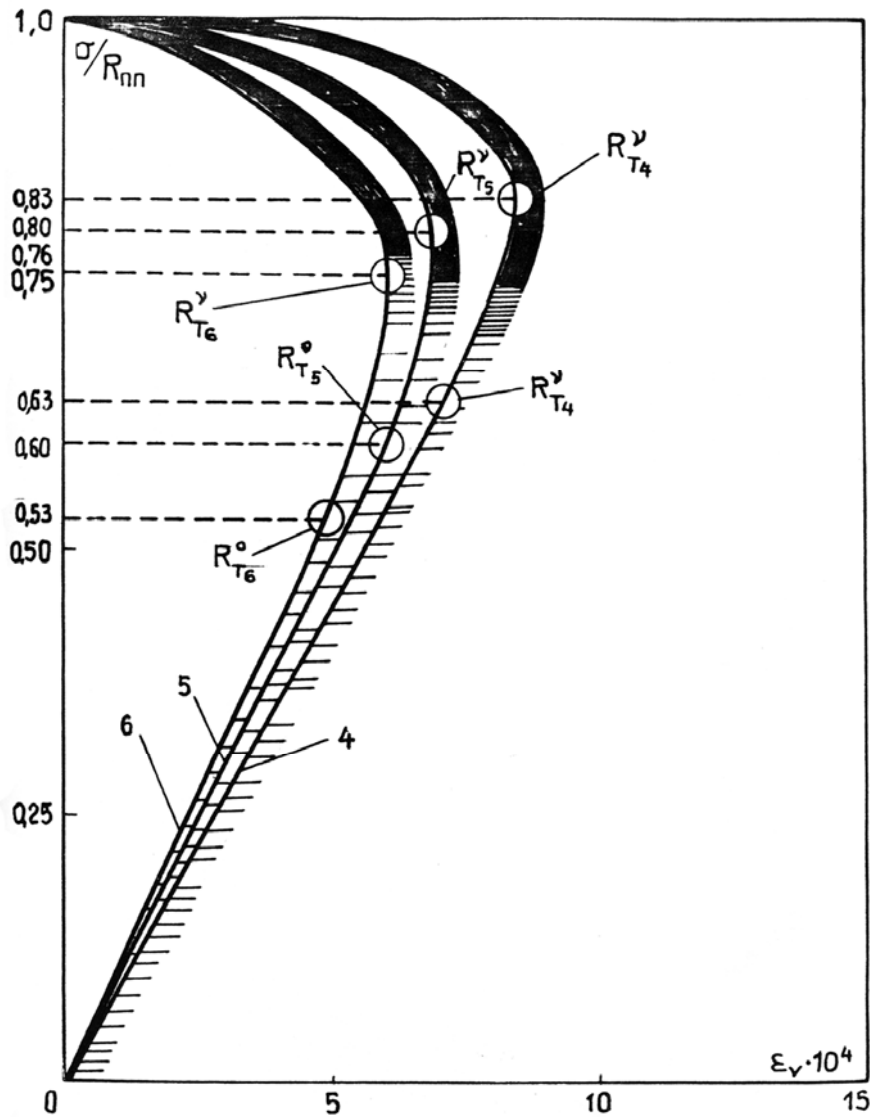
გაორთქლილი ნიმუშები უფრო დეფორმირდებიან (ნახ. 3.20) ვიდრე გაუორთქლავი პრიზმები (ნახ. 3.19) რაც შეეხებათ ბზარწარმოქმნის ზედა და ქვედა ზღვრებს, ისინი დაახლოებით ერთ დონეზე არიან გაორთქლილი და გაუორთქლავი შესაბამისი სერიების ნიმუშებიათვის.

აკუსტიკური ემისიის სიგნალების გამოყოფის ინტენსივობას შორის სხვაობა გაორთქლილი და გაუორთქლავი ნიმუშების შემთხვევაში, შედარებით ადვილად ასახსნელია, ვინაიდან ნიმუშების თბური დამუშავებისას ტემპერატურული გადამეტება და ტენის სწრაფი გამოყოფა ქმნის ბეტონში მიკრობზარებისა და სხვა სახის არაერთგვაროებების წარმოქმნის ხელსაყრელ პირობებს. ამიტომ გაორთქლილ ნიმუშებში მეტი რაოდენობით მიკრო და მაკრო არაერთგვაროებების (დეფექტების) არსებობა, ვიდრე ბუნებრივ პირობებში

გამყარებულ ნიმუშებში, ეჭვს არ იწვევს. ეს აისახება სწორედ აკუსტიკური ემისიის ტალღების ინტენსივობაზე.



ნახ. 3.19. მოცულობითი დეფორმაციის დიაგრამები.
 ბუნებრივი გამყარების ნიმუშები 1-I სერია; 2-II სერია; 3-III სერია



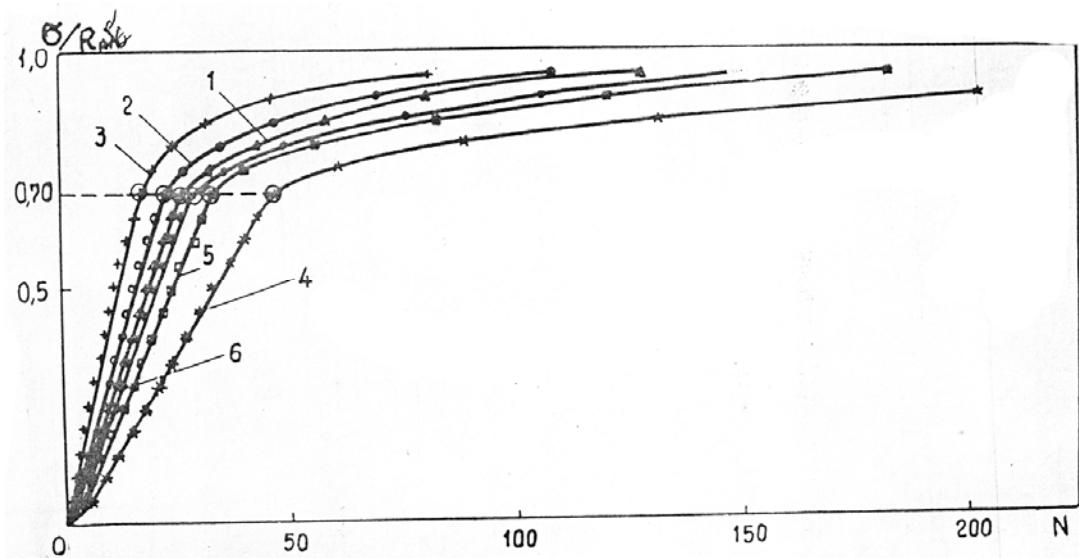
ნახ. 3.20. მოცულობითი დეფორმაციის დიაგრამები გაორთქლილი ნიმუშები 4-IV სერია; 5-V სერია; 6-VI სერია.

რაც შეეხება ნორმალურ პირობებში მომწიფებულ (გამყარებულ) ნიმუშებში დეფორმაციისას აე-ს სიგნალების გამოყოფის ინტენსიურობას, ჰაერმშრალ პირობებში გამყარებულ პრიზმებთან შედარებით, ეს შესაძლებელია აიხსნას, იმით რომ უფრო ტენიან ნიმუშებში (ნორმალურ პირობებში) მიკროფორებში და კაპილარებში მყოფი კაპილარული დაჭიმულობის ძალებით მოჭიმული წყალი არღვევს ფორებისა და კაპილარების გამყოფ კედლებს დატვირთვისას და განაპირობებს აკუსტიკური სიგნალების ინტენსიურ გამოყოფას.

ჰაერ-მშრალ პირობებში გამყარებული ნიმუშებში წარმოიქმნებიან უფრო დიდი ზომის ფორები და კაპილარები გამყარების დროს წყლის ინტენსიური

გამოყოფის გამო. კაპილარული დაჭიმულობის ძალები აქ შესუსტებულია. დატვირთვისას ფორები და კაპილარები დეფორმირდებიან გარკვეულ დონემდე მათი მთლიანობის დაურღვევლად. ეს კი განაპირობებს აე-ს იმპულსების წარმოქმნის ნაკლებ ინტენსიურობას.

და ბოლოს ნახ. 3.21-დან ჩანს, რომ დატვირთვის ზედა ზღვარი, რომლის შემდეგაც აე-ს სიგნალების წარმოქმნის პროცესი სპონტანური ხდება, არ არის დამოკიდებული გამყარების პირობებზე და იმყოფება მრღვევი დატვირთვის დაახლოებით 0,7 ნიშნულზე.



ნახ. 3.21. აე-ს იმპულსების რაოდენობისა და ძაბვების ფარდობითი მნიშვნელობების გრაფიკები $\sigma/R_{\sigma}-N$
 1,2,3 – ბუნებრივი გამყარების ნიმუშები; 4,5,6-გაორთქლილი ნიმუშები
 1-I სერია; 2-II სერია; 3-III სერია, 4-სერია; 5-V სერია; 6-VI სერია

3.6. ბეტონის ტენშემცველობის გავლენა ინტენსიური ბზარწარმოქმნის დონეზე ღერძული კუმშვისას

§ 3.5-ში აღნიშნული იყო, რომ ნორმალურ პირობებში გამყარებული ნიმუშები ხასიათდებოდნენ აე-ს ინტენსიურობის უფრო მაღალი დონით, ვიდრე ჰაერმშრალ პირობებში შენახული ნიმუშები. გამოთქმული იყო მოსაზრება იმის

თაობაზე, რომ ეს მოვლენა განპირობებული იყო ბეტონის ფორებში და კაპილარებში მყოფი წყლით, რომელიც იწვევს ბზარების წონასწორული მდგრადობის ადსორბციულ დაქვეითებას. მაგრამ ეს საჭიროებდა ექსპერიმენტულ დადასტურებას.

მეორეს მხრივ, ასევე გარკვეულ ინტერესს იწვევს რა გავლენას ახდენს აკუსტიკური სიგნალის ჩახშობაზე, მისი წარმოშობის ადგილიდან ელექტრო აკუსტიკურ გარდაქმნამდე, ბეტონის ფორებისა და კაპილარების წყლით შევსების სხვადასხვა ხარისხი.

დასმული საკითხების გამოკვლევის მიზნით ჩატარებულ იქნა ექსპერიმენტები 40X40X160 მმ ზომის წვრილმარცვლოვანი ბეტონისაგან დამზადებულ პრიზმებზე. ნიმუშები მყარდებოდნენ ნორმალურ პირობებში, ხოლო გამოცდამდე მათ უტარდებოდათ სხვადასხვა პროცედურები. გაზომვის შედეგების გაზნევის მინიმუმამდე შემცირების მიზნით, რომელიც ბეტონის გამკვრივების სხვადასხვა ხარისხით შეიძლება იყოს გამოწვეული, ხდებოდა მათი გულდასმითი შერჩევა მასის მიხედვით. მასათა შორის განსხვავება არ აღემატებოდა 0,5%. (იხ. § 2.4).

იმისათვის, რომ გამოგვერკვია სიმტკიცის დაქვეითების ადსორბციული ეფექტის ზეგავლენა აე-ს სიგნალების გამოყოფაზე, ჩატარებულ იქნა შემდეგი ექსპერიმენტი: გულდასმით შერჩეული ტყუპისცალი-ნიმუშები (36 ცალი) გამოშრობილ იქნა მუდმივ წონამდე 105°C-ზე საშრობ კამერაში. გამომშრალი ნიმუშების ნაწილი (12 პრიზმა) გამოცდილი იქნა გამომშრალ მდგომარეობაში. 12-12 ნიმუში-პრიზმა გაჟღენთილ იქნა ვაკუუმის პირობებში წყლით და გაწმენდილი არაპოლარული ნავთით. ექს-პერიმენტი (ნიმუშების გამოცდა) მიმდინარეობდა ერთი დღის განმავლობაში. ცდის შედეგები დამუშავებული იქნა და ცხრილ 3.11-ში მოცემულია აე-ს იმპულსების საშუალო მნიშვნელობები ძაბვების ფარდობით მნიშვნელობებზე დამოკიდებულებით (n/R_{35-N}).

მიღებული ექსპერიმენტული შედეგების ანალიზი (იხ. ნახ. 3.22 და 3.23) გვიჩვენებს რომ აე-ს იმპულსების რაოდენობა მუდმივ წონამდე გამომშრალ და არაპოლარული ნავთით გაჟღენთილ ნიმუშებში თითქმის ერთნაირია. ეს მოსალოდნელიც იყო, რადგან ორივე სერიის პრიზმებში სიმტკიცის

აღსორბციული შემცირებით ეფექტი არ შეიძლება გამოვლენილ იქნას ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებების აღსორბციული შრეების არ არსებობის გამო.

ცხრილი 3.11

აე-ს იმპულსების საშუალო მნიშვნელობების ძაბვის ფარდობით მნიშვნელობებზე დამოკიდებულების ცხრილი (N/R_{სს}-N).

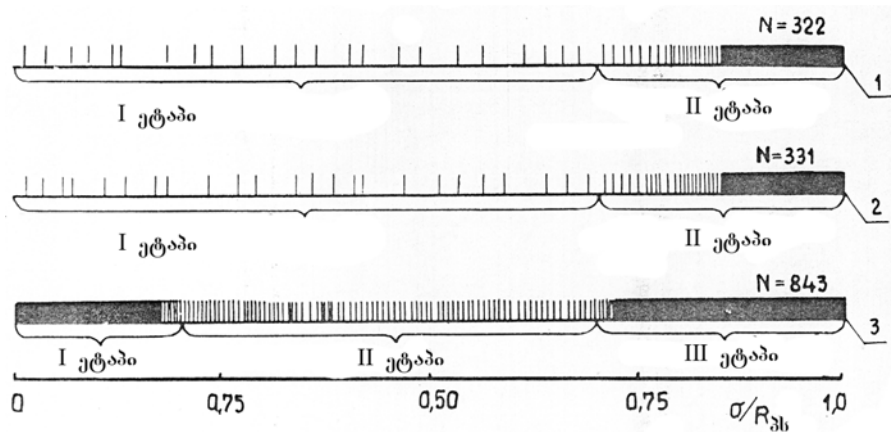
N/R _{სს} № სიგრძე	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
	გამომშრალი ნიმუშები I სერია	2	4	6	7	9	10	12	13	15	17	18	19	21	23	27	33	42	56	84
ნავთით გაჟღენთილი ნიმუშები II სერია	2	4	6	8	9	11	12	14	16	17	19	21	22	24	28	33	41	54	82	331
წყლით გაჟღენთილი ნიმუშები III სერია	18	36	51	64	74	83	91	99	107	115	123	130	137	144	156	172	195	231	294	843

აე-ს სიგნალების რეგისტრაციის შედეგების დამთხვევა ამ ორი სერიის ნიმუშებისთვის განაპირობა იმ ფაქტმა, რომ თხევადი არაპოლარული მასით ფორების შემსვებამ (ნავთი) გავლენა ვერ მოახდინა აკუსტიკური ტალღების ჩაქრობაზე ნიმუშების მოცემული ზომებისა და ჩვენს მიერ შერჩეული მგრძნობიარობის ზღურბლის შემთხვევაში.

ყურადღებას იმსახურებს ის მოვლენა, რომ მრღვევი დატვირთვის 0,7-0,75 დონემდე აე-ს იმპულსების წარმოშობის სიხშირე არ იცვლებოდა და მხოლოდ ამ ზღვრის გადალახვის შემდეგ ის შესამჩნევად ძლიერდებოდა ან თანდათანობით უწყვეტ ემისიაში გადადიოდა (ნახ. 3.22.1; 3.22.2 და 3.23.1 და 3.23.2). ეს მიუთითებს აღნიშნულ ზღვრამდე ბეტონის დესტრუქციის პროცესის ნაკლებ სახიფათოობაზე. დატვირთვის ყოველ ინტერვალში მდგრადობადაკარგული ბზარების (დეფექტების) რაოდენობა ერთი და იგივე იყო.

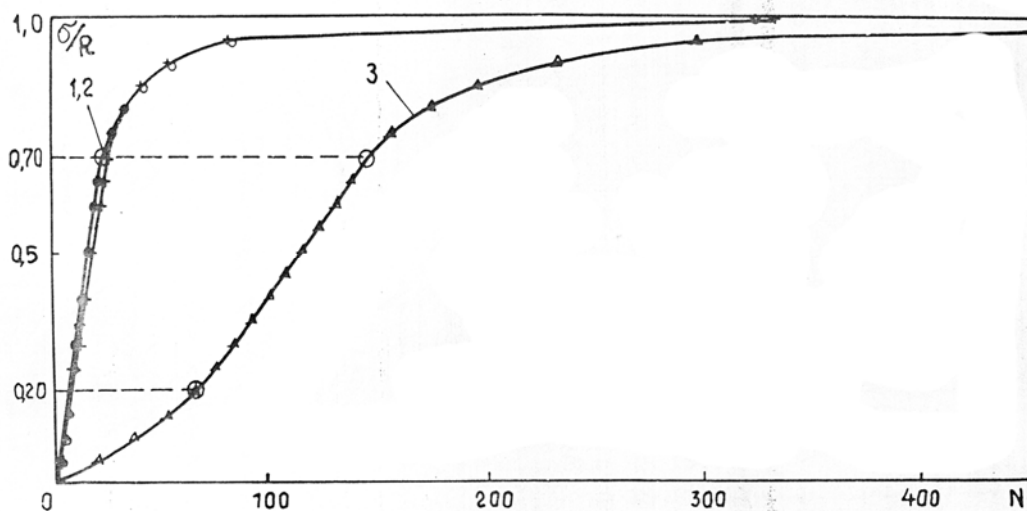
სულ სხვა სურათი დაიკვირვება წყლით გაჟღენთილი ნიმუშების შემთხვევაში (იხ. ნახ. 3.22.3 და 3.23.3). დატვირთვის პირველ საფეხურებზე ბეტონის სტრუქტურაში მიმდინარე მიკრორღვევების ამსახველი სიგნალების რაოდენობა რამდენჯერმე მეტი იყო, ვიდრე გამომშრალი და ნავთით გაჟღენთილ ნიმუშებში. ეს კიდევ ერთხელ ადასტურებს სიმტკიცის

ადსორბციული შემცირების ეფექტს, რომელიც ბეტონის ფორებში და კაპილარებში ადსორბირებული წყლის შემთხვევაში გამოვლინდება.



**ნახ. 3.22. აე-ს იმპულსების ძაბვების მიხედვით განაწილების დიაგრამები
1-გამომშრალი ნიმუშები 2-ნავით გაჟღენთილი ნიმუშები; 3-წყლით
გაჟღენთილი ნიმუშები**

მრუდების მოხაზულობების შედარებამ საშუალება მოგვცა გაგვეკეთებინა დასკვნა, რომ თუკი გამომშრალ და ნავით გაჟღენთილ ნიმუშებში სტრუქტურული მიკროორღვევების განვითარება მრღვევი დატვირთვიდან დაახლოებით 0,7 სიდიდემდე მიმდინარეობდა თანაბარზომიერად, წყლის გაჟღენთილი ნიმუშებში სურათი შეიცვალა. დატვირთვის პირველივე საფეხურებზე წყლის ადსორბირებული შრეების არსებობამ განაპირობა, რომ ბეტონში უკვე არსებული დეფექტების მნიშვნელოვანი ნაწილი, გვევლინება რა მიკროორღვევების შესაძლო კერებად, კარგავდა წონასწორობას და მდგრადობას მცირე ძაბვაზეც კი. შემდგომში კი აე-ს სიგნალების რაოდენობა დატვირთვის მომდევნო საფეხურზე მცირდებოდა (I ეტაპის დასახული, ნახ. 3.22.3), მაგრამ უფრო მეტია ვიდრე გამომშრალ ან ნავით გაჟღენთილ ნიმუშებში. ბევრად მეტი აღმოჩნდა აგრეთვე სიგნალების ჯამური მნიშვნელობაც, რომელიც დაფიქსირდა გამოსაცდელი ნიმუშების მზიდუნარიანობის დაკარგვის მომენტში. ამასთან წყლით გაჟღენთილი ნიმუშების სიმტკიცეც უფრო ნაკლები აღმოჩნდა ვიდრე წინა სერიების ნიმუშებისა.



ნახ. 3.23. აე-ს იმპულსების რაოდენობისა და ძაბვების ფარდობითი მნიშვნელობების გრაფიკები σ/R vs N

- 1- გამომშრალი ნიმუშები; 2-ნავთით გაჟღენთილი ნიმუშები
3- წყლით გაჟღენთილი ნიმუშები

დასასრულს შეიძლება დავასკვნათ, რომ აე-ს სიგნალების ზემოთ მოყვანილი მაჩვენებლები ობიექტურად გვიდასტურებენ იმ ფაქტს, რომ ბეტონის მიმართ ადსორბციულად აქტიური წყალი აადვილებს მასში ბზარების წარმოშობას და განვითარებას. ეს კი განაპირობებს ბეტონის დეფორმირების პროცესის გაძლიერებას და სიმტკიცის კლებას, როგორც ხანმოკლე ასევე ხანგრძლივი დატვირთვებისას.

3.7. წვრილმარცვლოვან ბეტონში ბზარწარმოქმნის პროცესზე მასშტაბური ფაქტორის გავლენა

ბზარწარმოქმნის პროცესზე ღერძული კუმშვის დროს მასშტაბური ფაქტორის გავლენის შესწავლის მიზნით 400 მარკის წვრილმარცვლოვანი ბეტონისაგან დამზადებულ იქნა პრიზმული ნიმუშები 12-12 თითოეული სერიისათვის, ზომით 100X100X400, 70X70X280 და 40X40X160 მმ, პრიზმები გამოცდილ იქნა ოთხი თვის ასაკში. ექსპერიმენტი ტარდებოდა პ. 2.2-ში აღწერილი მეთოდიკით. ცხრილი 2.20-ში მოყვანილია აკუსტიკური სიგნალების (აე) საშუალო მნიშვნელობები თითოეული სერიისათვის და ამ მონაცემების საფუძველზე აგებულია დიაგრამები კოორდინატებში – აკუსტიკური ემისიის

(აე-ს) იმპულსების რაოდენობა – ძაბვის ფარდობითი მნიშვნელობა ($\sigma_1 / R_{3\text{ს}} - N$) (ნახ. 3.24).

კვლევის შედეგების ანალიზი (ცხრ. 3.12 და ნახ. 3.24) გვიჩვენებს, რომ მასშტაბური ფაქტორი გავლენას ახდენს აე-ს სიგნალების წარმოქმნის ინტენსიურობაზე. კერძოდ, ნიმუშების ზომების ზრდასთან ერთად, რამდენჯერმე იზრდება გამოყოფილი იმპულსების რაოდენობა.

ამ მოვლენის ახსნა შემდეგნაირად შეიძლება: თუ ჩავთვლით, რომ საწყისი დეფექტები თანაბარზომიერადაა განლაგებული ნიმუშ-პრიზმების მოცულობაში, მაშინ დიდი ზომის ნიმუშებში აე-ს სიგნალების წარმოქმნის ალბათობა იზრდება იმდენჯერ, რამდენჯერაც დიდი პრიზმის მოცულობა აღემატება მცირე პრიზმის მოცულობას, ასე მაგალითად 7X7X28სმ ზომების მქონე პრიზმის მოცულობა ტოლია: 1382 სმ³-ის და 5,36-ჯერ აღემატება – 4X4X16=256სმ³-პრიზმის მოცულობას, ხოლო აე-ს სიგნალების რაოდენობა დატვირთვის დაბალ საფეხურებზე დაახლოებით 6-ჯერ მეტია. დატვირთვის ზრდასთან ერთად ეს რიცხვი თანაბარზომიერად მცირდება (ცხრ. 3.12). რაც შეეხება 10X10X40 სმ და 4X4X16 სმ ზომის პრიზმებს აქ ასეთ თანაფარდობასთან გვაქვს საქმე – 4000 სმ³:256სმ³=15,625. აე-ს სიგნალების რაოდენობის შეფარდება კი დაახლოებით 13-14 ფარგლებში მერყეობს. დატვირთვის გაზრდისას ეს ფარდობა უფრო მცირდება და მაღალ დატვირთვაზე (0,8-0,9 მრღვევი ძალიდან) – 11-12-ია.

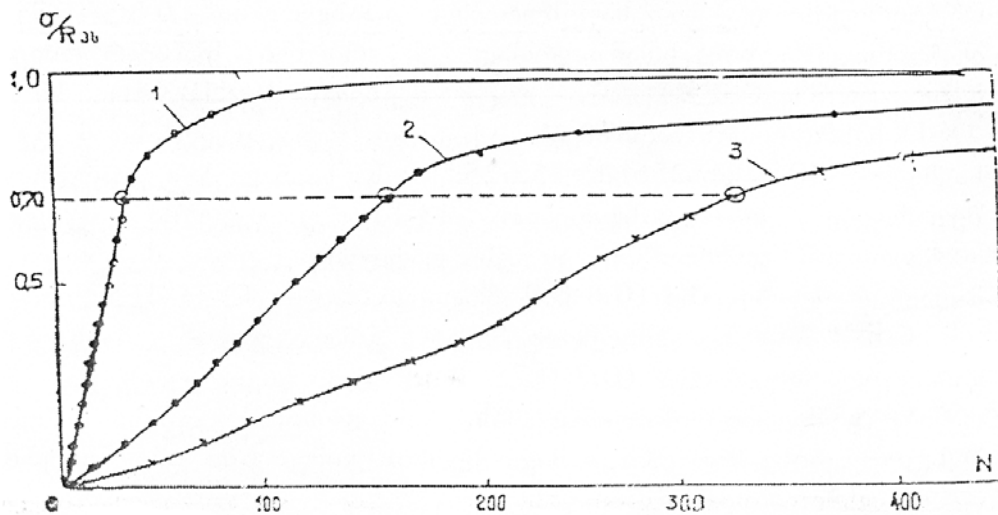
ნახ. 3.24-ზე წარმოდგენილი გრაფიკებიდან ჩანს, რომ გარკვეულ ზღვრამდე (0,7-0,75 $R_{3\text{ს}}$) აე-ს სიგნალების გამოყოფა თანაბარზომიერად მიმდინარეობს. ამ დონის მიღწევის შემდეგ დესტრუქციის პროცესი სამივე სერიის ნიმუშებში ინტენსიურდება და უწყვეტ ემისიაში გადადის.

ბოლოს შეიძლება აღინიშნოს, რომ გამოსაცდელი ნიმუშების ზომების ზრდასთან ერთად იზრდება აე-ს სიგნალების რაოდენობა დაახლოებით იმდენჯერ, რამდენჯერაც პრიზმის მოცულობები განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან. დატვირთვის ზრდასთან ერთად ეს განსხვავება კლებულობს, რაც შეეხება ინტენსიური ბზარწარმოქმნის დაწყების დონეს ($R_{3\text{ს}}^y$), მასზე მასშტაბური ფაქტორი გავლენას ვერ ახდენს.

ცხრილი 3.12

აკუსტიკური ემისიის სიგნალების საშუალო მნიშვნელობების (N) და ძაბვის ფარდობითი სიდიდეების (σ / R_{3s}) დამოკიდებულება

σ / R_{3s} \ № სერია	I სერიის ნიმუშები 40x40x160მმ	II სერიის ნიმუშები 70x70x280მმ	III სერიის ნიმუშები 100x100x400მმ
0,05	2	13	37
0,10	4	26	66
0,15	6	39	92
0,20	8	51	118
0,25	10	63	144
0,30	12	75	168
0,35	14	87	190
0,40	16	98	210
0,45	18	109	230
0,50	20	120	250
0,55	22	130	269
0,60	24	140	287
0,65	26	150	306
0,70	28	159	324
0,75	32	173	361
0,80	39	200	443
0,85	53	260	603
0,90	74	370	693
0,95	108	549	1538
0,100	438	1321	3014



ნახ. 3.24. აე-ს იმპულსების რაოდენობის (N) და ძაბვების ფარდობითი მნიშვნელობების ($\frac{\sigma}{R}$ კს) დამოკიდებულების დიაგრამები 1. 40X40X160 მმ. ზომის ნიმუშები; 2. 70X70X280 მმ. ზომის ნიმუშები; 3. 100X100X400მმ. ზომის ნიმუშები

თავი IV. ბეტონების ღერძული კუმშვისას აე-ს იმპულსების რაოდენობისა და დატვირთვის ინტენსიურობის დამოკიდებულების აპროქსიმაცია

ბეტონის მექანიკურ მახასიათებლებსა (მაზვა, დეფორმაცია) და აკუსტიკური ემისიის პარამეტრებს (იმპულსების რაოდენობა, სიგნალის რხევის ამპლიტუდა, ინტენსიურობა) შორის კორელაციური კავშირი არასაკმარისადაა გამოკვლეული. [28, 72] ნაშრომებში მოცემულია აე-ს იმპულსების რაოდენობას და დატვირთვის ინტენსიურობას შორის არსებული დამოკიდებულების ანალიზი, აღნიშნულია, რომ დიაგრამების დასაწყისში და ბოლოში დაიკვირვება არასტაციონალური მონაკვეთები, რომელთა განფენილობაც ხასიათდება არაწრფივობით. ამ სამუშაოების ავტორები ვარაუდობენ, რომ არაწრფივ მონაკვეთებს შორის არსებული უბანი გამოხატავს წრფივ დამოკიდებულებას აე-ს იმპულსების რაოდენობასა და დატვირთვის დონეს შორის. აღნიშნული კავშირის მათემატიკურად აღწერის მცდელობას განსახილველი ნაშრომების ავტორების მიერ ადგილი არ ჰქონია. არადა, $\sigma / R_{3b} = f(N)$ დამოკიდებულების მრუდების ოჯახის განსაზღვრა ძალზე მნიშვნელოვანია, რადგან იგი შეიძლება გამოყენებულ იქნეს კონსტრუქციაში ბეტონის მზიდუნარიანობის რესურსის შესაფასებლად.

ამიტომ, ამ სამუშაოში გაკეთებულია $(\sigma / R_{3b} - N)$ დამოკიდებულების აპროქსიმაციის გარკვეული ცდა. რაღაც ამგვარი განხორციელებულ იქნა ადრეულ ნაშრომში [53]. მაშინ ეს დამოკიდებულება აპროქსიმირებულ იქნა ექსპონენციალური მრუდით.

შემდგომმა ძიებებმა მიგვიყვანეს მეორე რიგის განტოლებამდე, რომელიც წარმოდგენილია არაცხადი სახით:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + y = 0; \quad (4.1.)$$

(4.1.) განტოლების მეშვეობით კარგად აღიწერება $\sigma / R_{3b} - N$ დამოკიდებულება გამოსაცდელი ნიმუშების სერიებისათვის.

ქვემოთ მოცემულია A,B,C და D კოეფიციენტების მნიშვნელობები და მოყვანილია ექსპერიმენტული და ანალიტიკური მრუდების შედარება საკვლევი ბეტონების შედგენილობებისათვის.

4.1. $(\sigma / R_{sb} - N)$ დამოკიდებულების მრუდები ჩვეულებრივი, წვრილმარცვლოვანი და ქვიშოვანი ბეტონებისათვის

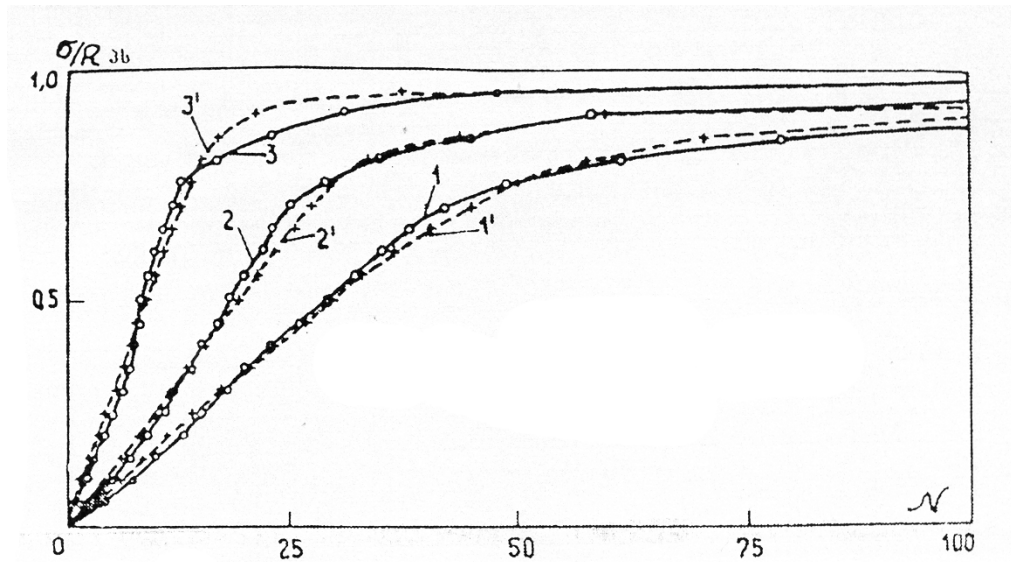
4.1. ცხრილში მოცემულია A,B,C და D კოეფიციენტების მნიშვნელობები ზემოაღნიშნული ბეტონებისათვის

ცხრილი 4.1.

A,B,C და D კოეფიციენტების მნიშვნელობები

კოეფიციენტები	A	B	C	D
ბეტონის დასახელება				
ჩვეულებრივი ბეტონი	57,17	-1,07	$1,02 \times 10^{-4}$	-56,47
წვრილმარცვლოვანი ბეტონი	41,94	-1,09	$1,89 \times 10^{-4}$	-38,89
ქვიშოვანი ბეტონი	19,12	-1,08	$2,34 \times 10^{-4}$	-17,95

ნახ. 4.1-ზე წარმოდგენილია აე-ს იმპულსების რაოდენობასა და დატვირთვის ინტენსიურობას შორის დამოკიდებულების ექპერიმენტული და ანალიტიკური მრუდები.



ნახ. 4.1. $\sigma/R_{sb} - N$ დამოკიდებულების დიაგრამები

ჩვეულებრივი ბეტონი

1. ექსპერიმენტული მრუდი

1'. ანალიტიკური მრუდი

წვრილმარცვლოვანი ბეტონი

2. ექსპერიმენტული მრუდი

2'. ანალიტიკური მრუდი

ქვიშოვანი ბეტონი

3. ექსპერიმენტული მრუდი

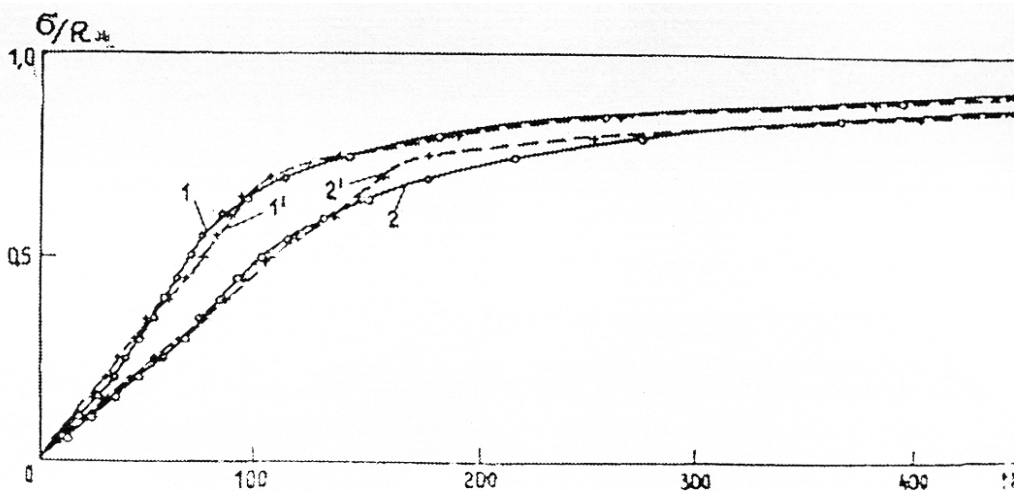
3'. ანალიტიკური მრუდი

4.2. $(\sigma/R_{sb} - N)$ დამოკიდებულების აპროქსიმაცია მსუბუქი ბეტონისათვის

ცხრილში 4.2. მოყვანილია 4.1. განტოლების კოეფიციენტების (A, B, C, D) მნიშვნელობები მძიმე და მსუბუქი ბეტონებისათვის, ხოლო 4.2 ნახაზზე წარმოდგენილია $(\sigma/R_{sb} - N)$ დამოკიდებულების ექსპერიმენტული და ანალიტიკური მრუდი მსუბუქი ბეტონისათვის.

A, B, C, D მნიშვნელობები მძიმე და მსუბუქი ბეტონებისათვის

ბეტონის დასახელება	კოეფიციენტები	A	B	C	D
	ნარების №				
მსუბუქი ბეტონი	I შემაღენლობა	226,37	-1,531	$6,92 \times 10^{-4}$	-157,35
	II შემაღენლობა	298,10	-1,460	$4,16 \times 10^{-4}$	-218,75
მძიმე ბეტონი	I შემაღენლობა	69,91	-2,302	$12,3 \times 10^{-4}$	-37,99
	II შემაღენლობა	84,52	-2,184	$8,71 \times 10^{-4}$	-47,37



ნახ. 4.2. $\sigma / R_{sb} - N$ დამოკიდებულების დიაგრამები მსუბუქი ბეტონისათვის

I შედგენილობა

1. ანალიტიკური მრუდი

1'. ექსპერიმენტული მრუდი

II შედგენილობა

2. ანალიტიკური მრუდი

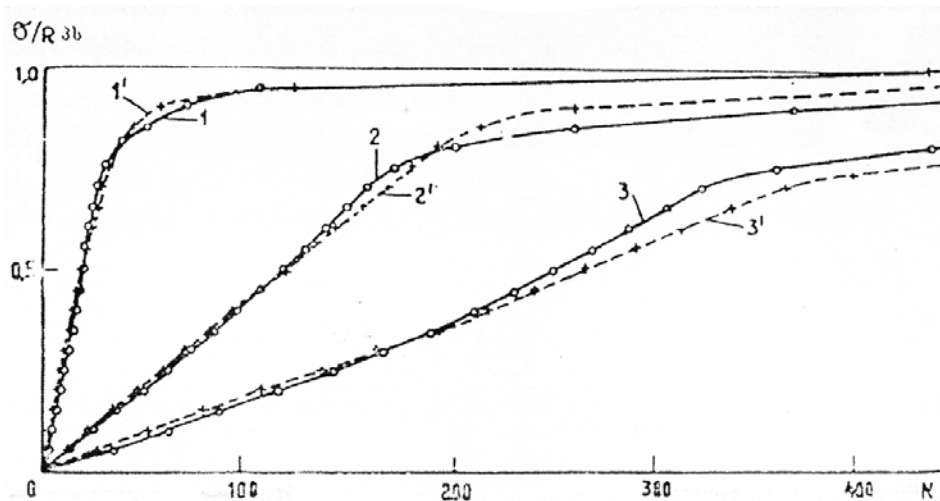
2'. ექსპერიმენტული მრუდი

4.3. მასშტაბური ფაქტორი და აე-ს იმპულსების რაოდენობასა და დატვირთვის ინტენსიურობას შორის დამოკიდებულება

4.3. ცხრილში მოყვანილია A,B,C,D კოეფიციენტების მნიშვნელობები საკვლევი ბეტონებისათვის ხოლო 4.3 ნახაზზე კი $(\sigma / R_{sb} - N)$ დამოკიდებულების ექსპერიმენტული და ანალიტიკური მრუდები

A,B,C,D, კოეფიციენტების მნიშვნელობები

კოეფიციენტები	A	B	C	D
ბეტონის დასახელება				
ნიმუშების ზომები 40x40x160მმ	38,11	-1,06	$1,305 \times 10^{-4}$	-38,104
ნიმუშების ზომები 70x70x280მმ	272,11	-1,44	$8,77 \times 10^{-4}$	-243,63
ნიმუშების ზომები 100x100x400მმ	461,07	-1,28	$2,07 \times 10^{-4}$	-768,88



ნახ. 4.1. $\sigma / R_{sb} - N$ დამოკიდებულების დიაგრამები

ნიმუშები ზომებით 40X40X160 მმ.

1. ექსპერიმენტული მრუდი

1'. ანალიტიკური მრუდი

ნიმუშები ზომებით 70X70X280 მმ.

2. ექსპერიმენტული მრუდი

2'. ანალიტიკური მრუდი

ნიმუშები ზომებით 100X100X400 მმ.

3. ექსპერიმენტული მრუდი

3'. ანალიტიკური მრუდი

დასასრულს უნდა აღინიშნოს, რომ აკუსტიკური ემისიის (აე) მეთოდი ბეტონის დესტრუქციის პროცესის დიდი სანდოობით აღწერის საშუალებას იძლევა. დადგენილია კორელაციური კავშირი ბეტონის კუმშვის სახასიათო უბნებსა და აე-ს სიგნალების ინტენსიურობას შორის.

რაც უფრო ერთგვაროვანია ბეტონის სტრუქტურა, მით მაღალია დატვირთვის ის დონე, რომლის შემდეგაც დესტრუქციის პროცესების ინტენსიური განვითარება იწყება.

აე-ს იმპულსების წარმოქმნის ინტენსიურობა მსუბუქ ბეტონებში 5-ჯერ მეტია, ვიდრე მძიმე ბეტონებში, რაც აიხსნება მსუბუქ ბეტონებში შემვსებსა და მატრიცის სიმტკიცეებს შორის დიდი განსხვავებით.

დადგენილია, რომ სუპერპლასტიფიკატორების დამატებით ბეტონზე, წყლის და ცემენტის შემცირებული ხარჯის დროს, აე-ს იმპულსების ინტენსიურობა კლებულობს, რაც მცირედეფექტიანი, მაღალი სიმტკიცის სტრუქტურის მქონე ბეტონის მიღების საიმედო გარანტია.

ქვიშოვანი ბეტონის (დუღაბის) ასაკის გავლენა მასში მიმდინარე დესტრუქციის პროცესზე შემდეგნაირად გამოიხატა: ორი წლის ასაკის ყველა სერიის ნიმუშებში აღინიშნა აე-ს – გამოყოფილი სიგნალების რამდენადმე შემცირება ორი თვის ნიმუშებთან შედარებით.

გაორთქლილი ნიმუშების კუმშვისას აე-ს იმპულსების გაცილებით მეტი რაოდენობა ფიქსირდება, ვიდრე ნორმალურ პირობებში გამყარებული ნიმუშების შემთხვევაში, რაც გაორთქლილი ნიმუშების უფრო დეფექტური სტრუქტურით არის განპირობებული.

ბეტონის ბზარმედეგობაზე ტენშემცველობის გავლენის შესწავლამ ცხადყო, რომ ადსორბციულად აქტიური წყალი, იმყოფება რა მასალის ფორებში და კაპილარებში, აადვილებს მასში მიკრობზარების წარმოქმნის და განვითარების პროცესს.

აე-ს ხასიათზე მასშტაბური ფაქტორის გავლენის გამოკვლევის შედეგებმა გვიჩვენეს, რომ ნიმუშების ზომების ზრდასთან ერთად იზრდება აე-ს სიგნალების რაოდენობა დაახლოებით იმდენჯერ, რამდენჯერაც გამოსაცდელი ნიმუშების მოცულობები განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან. დატვირთვის ზრდასთან ერთად ეს განსხვავება კლებულობს. ინტენსიური ბზარწარმოქმნის დაწყების დონეზე ($R_{\text{ბ}}^{\prime}$), მასშტაბური ფაქტორი გავლენას ვერ ახდენს.

ლიტერატურა

1. Авербух Н.И., Вайнберг В.Е. Излучение упругих волн развивающимся дефектом/Проблема неразрушающего контроля. – Кишинев: Штинца, 1983, с. 3-5.
2. Ашрабов А.А., Зайцев Ю.В. Элементы механики разрушения бетонов. – Ташкент: УКИТУВЧИ, 1991, 238с.
3. Bazant Z., Cedolin L. Propagation of crack bakdle in heterogenous materials//Adu. Fract. Res. Prepr. 5th Int. Conf. Fract. Res. Cannes. – 1989. – Vol. 4. Oxford e.a. 1989. – p. 103-107.
4. Баранблатт Г.И. Теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении/Аннотации докладов Всесоюзн. съезда по теоретической и прикладной механике. – М. – Изд-во АН СССР, 1970, с. 12.
5. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. М. Госстроиздат. 1962. с. 97.
6. Берг О.Я., Писанко Г.И., Щербаков Е.Н. Проблема прочности бетона//Бетон и железобетон. – 1976. - №3. с. 5-8.
7. Бриджшен П. Исследование больших пластических деформацией и разрыва/Пер. с англ. – М.: ИЛ. 1995, 109с.
8. Виноградов С.Д. Акустическое наблюдение процессов разрушения горных пород. – М.: Наука, 1984, 84с.
9. Воробьев В.А., Мосесов М.Д., Попов В.П. Метод и автоматическая установка для определения поверхностной энергии хрупких материалов по акустической эмиссии//Дефектоскопия. – 1998. - №10, - с. 79-82.
10. Carlson B.U. Drying shrinkade of concrete effected by many factors//Proc. ASTM. – 1988, - 38. -11. –с. 38-47;
11. Гвоздев А.А. Некоторые особенности формирования бетона и теории ползучести // Труды ЦНИСК. Ползучесть строительных материалов и конструкции. – 1964. – Вып. 21 – с. 4-8.
12. Гвоздев А.А., Берг О.Я. Основные направления развития теории железобетона//Бетон и железобетон. – 1970. - №4, - с. 14-15.

13. Гвоздев А.А., Байков В.Н. К вопросу о поведении железобетонных конструкции в стадии близкой к разрушению//Бетон и железобетон, 1980, №9, с. 3-5.
14. Горчаков Г.И., Иванов И.А. О комплексной характеристике структуры бетона//Бетон и железобетон. – 1984. №1 – с. 22.
15. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. – М.: Из-во стандартов. 1976, 270с.
16. Далакашвили Г.А., Какичашвили Ш.Д., Цилосани З.Н. Исследование деформации бетона голографическими методами. – Тбилиси: Мецниереба, 1989, 77с.
17. Crostack U.A., Roeder E.A. Anwendung der Schallemissions analyse zur Bestimmung von Vorgängen der Rissbildung und Rissausbreitung//Der Maschinenschaden 48 (2001), R.I. – S. 17-22.
18. Davis B.E., Davis H.E., Broun E.H. Plastic flour and Voleume change of Concrete//Soc. for Test. Proc. 1987. – p. 37.
19. Dunegan H.L., Harris D.O., Tetelman A.S. Detection of fatigue crack growth by acoustic emission techniques//Materials Evaluation: - 1979. – v. 28. №10. – p. 221-227.
20. Десов А.Е. Некоторые вопросы структуры, прочности и деформативности бетона./Структура, прочность и деформация бетонов/НИЖБ. – М. 1976, с. 17-30.
21. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых талах/Пер. с франц. – М.: Наука, 1992, 385с.
22. Egle D.M., Tatro C.A. Analyse of acoustic – emission strain waves//I. Acoustical Soc. Am. – 1987. – v. 41. №2. – p. 321-327.
23. Eisenblatter I., Fanniuger G. Zur Anwendung der Schallemissions analyse in Forschung und Technuck//Metall. - №1 – 1997. – p. 51.
24. Cillis P.P. Disclotion monitions and acoustic emission//Materials Res. Stand. – 1972. – v. 11, №3. – p. 11-13.

25. Hofa I., Moczko A., Pyszniak I. Evaluation of the degree of destruction of axially compressed concrete by acoustic methods/18th Cong. Mater. Test. – 2002. – т.3. – с. 1209. – 1211.
26. Журков С.Н. Проблема прочности твердых тел//Вестник АН СССР. 1987. - №11. с. 68-71.
27. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел//Вестник АН СССР. – 1988. - №3. – с. 46.
28. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Физические основы прогнозирования механического разрушения//ДАН СССР. – 1981. – т. 239. - №6. – с. 1350-1353.
29. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения. – М.: Стройиздат. 1982, 194с.
30. Кабыш В.М. Разработка и исследование механоакустического метода испытания физико-механических свойств легких бетонов/Автореф. дисс. канд. техн. наук. – Рига, 1982, 19с.
31. Knill I.L., Franklin I.A., Maloke A.U. Acoustic emission generated during phase transformations in metal and alloys//Int. J. Nondestructive Testing. – 1989. – v. 1, №3 – p. 113-121.
32. Лермит Р. Проблемы технологий бетона М, Госстройиздат, 1959, с. 470.
33. Логунова В.А., Михалевская Н.В., Маслевцов А.В. Исследование долговременного сопротивления бетона с помощью метода акустической эмиссии//Известия ВНИИГ, СНТ. – 1986. – т. 136. – с. 106-110.
34. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. – м.: Высшая школа, 1988, 238с.
35. Малюга И.Г. Состав и способ приготовления цементного раствора (бетона)//Инженерный журнал. – Петербург. – 1985. - №3. – с. 9.
36. Меркин А.П., Фокин Г.А., Домокеева А.О. Оценка прочности и однородности бетона методом акустической эмиссии//Проблемы прочности. – 1981. - №5. – с. 28-30.

37. Мосесов М.Д. Применение акустических методов для исследования процессов трещинообразования и механизма разрушения бетона/Автореф. дисс. канд. техн. наук. – М., 1984, 19с.
38. Невилль А.М. Свойства бетона. – М.: Госстройиздат, 1982. 256с.
39. Надирадзе А.Д. Применение известняковых заполнителей в бетоне для гидротехнических сооружений//Труды координац. совещание по гидротехнике. – 1985. – Вып. 60. – с. 125-131.
40. Применение сейсмоакустического метода в горном деле//Сборн. статей. – М.: Наука, 1987, 187с.
41. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика. – М.: Знание, 1968, 68с.
42. Ребиндер А.А. Адсорбционное влияние среды на механические свойства твердых тел. Некоторые вопросы усталостной прочности стали с учетом влияния активной среды. – Киев.: АН УССР. - 1965. – с. 56-68.
43. Регель В.Р. К вопросу о кинетике трещин в процессе разрушения твердых тел//НСТФ. – 1976. – т. 26. - №2. – 25-33.
44. Регель В.Р., Слуцкер А.И. Кинетическая природа прочности//Физика сегодня и завтра. – Л.: Наука, 1988, 46с.
45. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.К. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М., 1985, 560с.
46. Рыбьев И.А., Соколов Г.В., Шелухина И.В. и др. Изучение микротрещинообразования бетона акустическими методами//Бетон и железобетон. – 1982. - №5 – с. 32-33.
47. Rüsч Н. Physikalische Fragen der Betouprütung//Zement, Kalk, Cips. – 1969. №1 – S. 23-27.
48. Rüsч Н., Kondina К., Hilsdorf Н. Characters der geschlags auf das Criecken für stahlbeton. – 1972. – S. 146-149.
49. Скрамтаев Б.Г. Исследование прочности бетона и пластичности бетонной смеси. – М.: ЦНИИС, 1956, 36с.
50. Состав, структура и свойства цементных бетонов/Под. ред. д.т.н. проф. Г.И. Горчакова. – М.: Стройиздат, 1986, 144с.

51. Структура, прочность и деформация бетонов/Под. ред. А.Е. Десова. – М.: Стройиздат, 1976, 336с.
52. Темник Н.Л. Исследование упругих импульсов в бетоне, возникающих за счет образования микротрещин при длительном осевом нагружении. неразрушающий контроль напряженно-деформированного состояния конструкционных материалов и изделий с использованием эмиссии волн напряжений/Тезисы докл. – Хабаровск, 1992. – с. 36-38.
53. Турдзеладзе М.Н. Зависимость между числом импульсов АЭ и интенсивностью нагружения в бетоне при осевом сжатии/III Закавказская конференция молодых строителей//Тезисы докладов. – Ереван, 1984. – с. 108.
54. ტურძელაძე მ., ქარუმიძე ბ. ბეტონში ინტენსიური ბზარწარმოქმნის პროცესზე შემვსების სიმკვრივის გავლენა//საშენი მასალები და ნაკეთობები, თბილისი, 1999.
55. ტურძელაძე მ., ქარუმიძე ზ. წვრილმარცვლოვან ბეტონში ბზარწარმოქმნის პროცესზე მასშტაბური ფაქტორის გავლენა//საშენი მასალები და ნაკეთობები, თბილისი 2000, გვ. 12-14.
56. ტურძელაძე გ., ზუკატიშვილი ლ. სტრუქტურული ფაქტორების გავლენა ბეტონის დეფორმირებისა და რღვევის პროცესებზე// მშენებლობა, თბილისი, 2006, გვ. 60-65.
57. ტურძელაძე მ., ზუკატიშვილი ლ. ბეტონის გამყარების გავლენა მის დეფორმირებასა და რღვევაზე//მშენებლობა, თბილისი 2008, გვ. 134-139.
58. ტურძელაძე მ. ბეტონის სტატისტიკური დატვირთვების დროს ინტენსიური ბზარწარმოქმნის პროცესზე სხვადასხვა ფაქტორის გავლენა. თბილისი, „პოლიექსპრესი“, 2006, 87გვ.
59. ტურძელაძე მ., ჩუბინიძე თ. მსუბუქი ბეტონის ზოგიერთი თვისება და მათზე მოქმედი ფაქტორები.//მშენებლობა, თბილისი 2007, გვ. 83-86.
60. Федоров А.Е. Физико-химические основы процессов развития напряжений и деформаций в цементном камне и их влияние на структуру, свойства и долговечность бетона из-во Наука, М. 1984, 261 с.

61. Финкель В.М. Физика разрушения. Рост трещин в твердых телах. – М.: Металлургия, 1980, 176с.
62. Френкель Я.И. Теория обратимых и необратимых трещин в твердых телах//ЖТФ. – т. 22, - Вып. II. – с. 185-207.
63. Фудзий Т., Дзако Н. Механика разрушения композиционных материалов/Пер. с япон. – М.: Мир, 1982, 232с.
64. Цилосани З.Н. Усадка и ползучесть бетона – Тбилиси, Мецниереба, 1979, 228с.
65. Цилосани З.Н., Квирикадзе О.П. О физической природе зависимости прочности и деформативности цементного камня от скорости нагружения//Сообщения АН ГССР. – 1973. – 31. – с. 56-63.
66. Цилосани З.Н., Сакварелидзе А.В. Структурные изменения в цементном камне при высыхании/VI международ. конгресс по химии цемента. Т.П. Кн. 1. – М.: Стройиздат, 1976, с. 371-375.
67. Shaf S.P. Some recent research on mechanical properties of concrete//Schwecter Archiu. – 37, №12, 1981, p. 25-31.
68. Чоговадзе Д.В. Исследование процесса деформирования и механизма разрушения цементного камня при растяжении/Автореф. дисс. канд. техн. наук., Тбилиси, 1968, 20с.
69. Шейкин А.Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня. – М.: Стройиздат. 1974, 178с.
70. Шилькрут Д.И. К теории развития реальных микротрещин в твердых телах в процессе деформации//ДАН ССР. – 1968. – 122. №1. – с. 99-103.
71. Weiger H., Klausen D. Ermudunge verhalten von beton. Auswirkung einer Beanspruchung in Dauerfestigkeits-bereich//Betonwerk Fertigteil-Technik. – H.U. – 1989. – S. 214-220.
72. Weigler H., Klausen D. Die Schallemissionsanalgye. Verfahren und anwendung bei Beton//Betonwerk Fertigteil-Technic-H12. – 1990. S.709-716.

ს ა რ ჩ ე ვ ი

შ ე ს ა ვ ა ლ ი;

თავი I. ბეტონების სიმტკიცისა და დეფორმირების

პროცესებისადმი მიძღვნილი კვლევების ანალიტიკური მიმოხილვა;

1.1. რღვევის მექანიკა;

1.2. ბეტონის დეფორმირების და რღვევის შესწავლის ექსპერიმენტული მეთოდები;

თავი II. კვლევის მიმართულების არჩევა და ცდის ჩატარების

მეთოდიკა;

2.1. აკუსტიკური ემისიის მეთოდის დახასიათება;

2.2. გამოყენებული აღჭურვილობა და აპარატურა;

2.3. გასაზომი აპარატურის მგრძობიარობის შერჩევა;

2.4. გამოყენებული მასალები და გამოცდილი ნიმუშები;

2.5. ნიმუშების გამოცდის მეთოდიკა;

თავი III. სტრუქტურული ფაქტორების გავლენა ბეტონის

დეფორმირებისა და რღვევის პროცესებზე;

3.1. შემვსების სისხოს, მისი მოცულობითი შემცველობის გავლენა ბეტონის დეფორმირებაზე და რღვევაზე;

3.2. ბეტონის კუმშვისას დეფორმირებისა და რღვევის პროცესებზე შემვსების სიმკვრივის გავლენა;

3.3. სხვადასხვა სახის ქიმიური დანამატების გავლენა ბეტონში მიმდინარე დესტრუქციულ პროცესებზე;

3.4. დუღაბის ასაკის გავლენა მისი დესტრუქციის პროცესზე ღერძული კუმშვისას;

3.5. გამყარების პირობების გავლენა ბეტონის დეფორმირებისა და რღვევის პროცესებზე;

3.6. ბეტონის ტენშემცველობის გავლენა ინტენსიური ბზარწარმოქმნის დონეზე ღერძული კუმშვისას;

3.7. წვრილმარცვლოვან ბეტონში ბზარწარმოქმნის

პროცესზე მასშტაბური ფაქტორის გავლენა;

თავი IV. ბეტონების ღერძული კუმშვისას აე-ს იმპულსების

რაოდენობისა და დატვირთვის ინტენსიურობის

დამოკიდებულების აპროქსიმაცია;

4.1. $(\sigma / R_{sb} - N)$ დამოკიდებულების მრუდები ჩვეულებრივი,

წვრილმარცვლოვანი და ქვიშოვანი ბეტონებისათვის;

4.2. $(\sigma / R_{sb} - N)$ დამოკიდებულების აპროქსიმაცია მსუბუქი

ბეტონისათვის;

4.3. მასშტაბური ფაქტორი და აე-ს იმპულსების

რაოდენობასა და დატვირთვის ინტენსიურობას

შორის დამოკიდებულება;

ლიტერატურა.