

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

გიორგი თურმანიძე

ბეტონის შეკლების და ბზარმედეგობის ექსპერიმენტულ-თეორიული  
კვლევა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

სადოქტორო პროგრამა მშენებლობა

შიფრი 0732

თბილისი

2022 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში  
სამშენებლო ფაკულტეტი  
ჰიდროინჟინერიის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: აკადემიური დოქტორი, პროფესორი  
გიორგი დალაქიშვილი

რეცენზენტები: ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი  
გელა ყიფიანი

აკადემიური დოქტორი, პროფესორი ბარბარა კილასონიძე

დაცვა შედგება ----- წლის „-----“ ----- , ----- საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის -----  
----- საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოს სხდომაზე  
კორპუსი ----- , აუდიტორია -----  
მისამართი: 0160 , თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,  
ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი: დემური ტაბატაძე

## ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

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

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

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

მაგრამ ამასთან ერთად სულ უფრო მეტი ყურადღება ეთმობა ბეტონის შეკლებისა და ბზარმედეგობის ბუნების შესწავლას. ეს სამუშაოები აუცილებელია იმ ფიზიკური თეორიების შესამუშავებლად, რომლებითაც უნდა დასრულდეს ბეტონის შეკლებისა და ცოცვადობის მრავალწლიანი გამოკვლევები.

ვინაიდან ბეტონის შეკლებისა და ცოცვადობის ბუნების შესწავლისას მკვლევარებს შეხება უწევთ საკმაოდ რთული აგებულების მასალებთან და

დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე ზეგავლენის მომხდენი ფაქტორების დიდი რაოდენობის არსებობასთან, ერთიანი აზრი ბეტონის შეკლებისა და ბზარმდეგობის ბუნებაზე ჯერ არ არსებობს. ასე რომ ბეტონის შეკლების ბუნებისა და მექანიზმის განვითარების აღსაწერად შემოთავაზებულია 10-ზე მეტი თეორია. ამასთან დაკავშირებით, ბეტონის შეკლებისა და ბზარმდეგობის ბუნების შესახებ კვლევების გაღრმავება, ფიზიკისა და ფიზიკური ქიმიის უახლესი მიღწევების მოზიდვით, ამჟამად ბეტონმცოდნეობის ერთ-ერთ ყველაზე აქტუალურ ამოცანად ითვლება. ბეტონში სტრუქტურული დაძაბულობების შესწავლის თაობაზე სხვადასხვა მკვლევარის მიერ ჩატარებული შრომების ანალიზმა აჩვენა, რომ მათში განხილული იყო ან მეტისმეტად გამარტივებული მათემატიკური მოდელები, რომლებიც მათი ანალიზური აღწერის ჩატარების საშუალებას იძლეოდნენ, ანდა შესწავლილი იყო ფიზიკური მოდელები, რომლებშიც ბეტონის ერთ-ერთი კომპონენტი ჩანაცვლებული იყო მოდელოური (ოპტიკურ-მგრძნობიარე) მასალით. ამგვარი ცვლილების დროს გარდაუვალად ცემენტის ქვასა და შემვსების მარცვალს შორის ურთიერთქმედების რთული სურათის ცალკეული მხარეების დაკარგვა ხდებოდა. ზემოთქმულის გათვალისწინებით, ცემენტის ქვის დეფორმირებული მდგომარეობის შესასწავლად გადაწყდა, რომ ნაშრომში გამოყენებული ყოფილიყო ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდი, რომელსაც არ გააჩნია მითითებული ნაკლი - როგორცაა საკვლევ ფიზიკურ მოდელებში ოპტიკურად მგრძნობიარე მასალის ჩართვის აუცილებლობა. ჰოლოგრაფია, რომელმაც ფართო გამოყენება პოვა ლითონებისა და პოლიმერული მასალებისგან მომზადებული ნაკეთობების და კონსტრუქციების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის გამოკვლევისას, ბეტონისა და რკინაბეტონის კვლევებისას ჯერ კიდევ ნაკლებად გამოიყენება. მეტიც, ყველა არსებულ ნაშრომში, როგორც წესი, მიმდინარეობდა მხოლოდ ხანმოკლედ მიმდინარე პროცესების შესწავლა. ცემენტის ქვის და ბეტონის შეკლების დეფორმაციების და ბზარმდეგობის კვლევების მიმართ გამოყენების

კუთხით ჰოლოგრაფია ადრე არავის გამოუყენებია. 2019 წელს, საქართველოს ტექნიკური ინივერსიტეტის, სამშენებლო ფაკულტეტზე ჩამოყალიბდა „ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის სასწავლო, სამეცნიერო და საკვლევო ლაბორატორია“, სადაც შესრულდა აღნიშნული ნაშრომი ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის მეთოდის გამოყენებით. (სსიპ შოთა რუსთაველის ფონდი, საგრანტო პროექტი ფარგლებში FR 18-11671).

**თემის აქტუალობა** განპირობებულია იმით რომ, ბეტონისა და რკინაბეტონის კვლევებში დამაბულ-დეფორმაციული მდგომარეობის, შეკლების და ბზარმედეგობის პროცესების კვლევაში გამოიყენება ურღვევი მეთოდები მათი დადებითი და უარყოფითი მხარეების გათვალისწინებით. აღნიშნული ნაშრომი წარმოადგენს ერთ-ერთ პიონერულ კვლევას ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის (ლაზერული ტექნიკის, ნანო ტექნოლოგიური, ნ.მ. სიზუსტით) გამოყენებისა ისეთი რთული კომპოზიტური არერთგვაროვანი მასალის როგორცაა ბეტონი და მასში მიმდინარე გამყარების ადრეულ სტადიაზე კონტრაქციული შეკლების და ასაკოვან ასაკში მატრიცასა და შემვსებს შორის საკონტაქტო ზონაში მიმდინარე პროცესები. წარმოდგენილია შედარებითი ბზარმედეგობის საკითხები სხვადასხვა მინერალოგიური შედგენილობის 6 ნაირსახეობის ცემენტზე დამზადებული დუღაბის ნიმუშებზე და გამოკვლეულია ყველაზე ბზარმედეგი ცემენტის ნაირსახეობა სამწერტილოვანი ღუნვის შემთხვევაში. აღნიშნული მეთოდით გამოკვლეულია ბეტონის ნიმუშზე სხვადასხვა ტემპერატურული ზემოქმედების შედეგად მიღებული რიცხოზრივი მონაცემების საფუძველზე მატრიცასა და საკონტაქტო ზონაში წარმოქმნილი გადაადგილებები. ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის გამოყენებით პირველად იქნა დადგენილი რღვევის მექანიკის გამოყენებით ნიმუშის ბზარის წვეროში ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტი ( $K_{Ic}$ ).

ამრიგად შეკლებისა და ბზარმედეგობის პროცესებში ჩაღრმავება უახლესი ფიზიკური მეთოდების გამოყენებით ითვლება ერთ-ერთ აქტუალურ ამოცანად ბეტონმცოდნეობაში.

**თემის სიახლე** არამართო საცნობარო ლიტერატურაში, არამედ სამეცნიერო წყაროებშიც არ მოიძებნება ინფორმაცია ბეტონის გამყარების ადრეულ სტადიაზე ხანგრძლივი პროცესების (რამოდენიმე ათეული საათი) უკონტაქტოდ დაკვირვებისა, აღნიშნული მეთოდი იძლევა საშუალებას ხარისხობრივად და რიცხობრივი მონაცემების საფუძველზე შევაფასოთ მყარი სხეულის დეფორმაციული მდგომარეობა სამგანზომილებებაში  $x, y, z$  და სხვადასხვა შედგენილობის ბეტონის შეკლება, ბზარმდეგობა და მისი განვითარების პროცესების გამოკვლევა ლაზერული ტექნიკის გამოყენებით.

- გამოკლეულია, ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის გამოყენებით, ცემენტისქვისა და ბეტონის შეკლების, პროცესის ზოგიერთი თავისებურება რომელიც არ აღნიშნებოდა ადრე:
- ნაჩვენებია რა როლს ასრულებს ცემენტის მატრიცასა და შემვსებების შეჭიდება, თავისუფალ და ხისტად ჩამაგრების შემთხვევაში, აგრეთვე რა როლს თამაშობს შემვსებების გადაადგილება ბეტონის ფორმირების ველზე შეკლების დროს. ყოველივე ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე საკითხების შესწავლა მეტად აქტუალურია და წარმოადგენს სამეცნიერო სიახლეს.

**ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს** კონტრაქციული შეკლების და ასაკოვან ასაკში დეფორმაციების განვითარების ხასიათის კვლევა და ცალკეული ფაქტორების როლის დადგენა (მატრიცისა და შემვსებების მარცვლების გადაადგილებების შეზღუდვის ხარისხის, ცემენტის სახეობის, წყალ-ცემენტის თანაფარდობის და სხვ.) ამ დეფორმაციების განვითარებაში. ასევე, მიზანს წარმოადგენდა შეკლებითი ბზარების წარმოქმნისა და განვითარების პროცესის გამოკვლევა და ამ პროცესზე ცემენტის სახეობის (მინერალოგიური შედგენილობის) ზეგავლენა.

სადისერტაციო ნაშრომში ექსპერიმენტულ-თეორიული კვლევების საფუძველზე დასმულია შემდეგი სახის ამოცანები:

1. შესავალი
2. ლიტერატურული მიმოხილვა

3. ცემენტის ქვისა და ბეტონის შეკვრის ვადებისა და სტრუქტურის ჩამოყალიბების გამოკვლევა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით;

4. დასკვნები;

**მიღებული შედეგების საიმედო დაფუძნებულია** ექსპერიმენტული სამუშაოების მსვლელობისას მაღალი სიზუსტის ერთმოდინი, ჰელიუმ-ნეონის (50 მკტ) უწყვეტი მოქმედების ლაზერის, ტალღის სიგრძე 633 ნ.მ საშუალებით, აგრეთვე ჩვენი პროექტის საფუძველზე დამონტაჟდა მაღალი სტაბილურობის ვიბრო დამცავი ჰოლოგრაფიული მაგიდა ოპტიკური ხელსაწყოებით. დისერტაციის ექსპერიმენტული ნაწილი შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის, სამშენებლო ფაკულტეტზე „ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის სასწავლო, სამეცნიერო, საკვლევ ლაბორატორიაში“, რომელიც აღჭურვილია თანამედროვე ხელსაწყო-დანადგარებით, რაც თავის მხრივ გარანტიას კვლევის მაღალი სიზუსტით შესრულებისა.

**მიღებული შედეგების პრაქტიკული გამოყენება** შესაძლებელია საქართველოს სამშენებლო ინდუსტრიაში, ბეტონმცოდნეობაში და სხვადასხვა კომპოზიციური მასალების დამაბულ დეფორმაციული თვისებებისა და ბზარმდეგობის ტემპერატურული ზემოქმედებისა და რღვევის მექანიკის საფუძველზე ბეტონში არსებული თვალის უხილავი ბზარის ჩასახვა მისი განვითარება და რღვევის წინა სტადიაზე კრიტიკული კოეფიციენტის გამოთვლის (ბზარმდეგობის კოეფიციენტი) გაანგარიშება. დიდი სიზუსტით, მიღებულია როგორც ვიზუალური ისე რიცხობრივი მონაცემები, რომელსაც განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება ბეტონის მაღლივი კაშხლების მშენებლობაში. ჩატარებული კვლევის საფუძველზე შემუშავებულია და გამოცემულია მეთოდური მითიბებები „ბეტონისა და რკინაბეტონის დეფორმაციის და ბზარმდეგობის პროცესის შესწავლა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით“, რომელიც გამოიყენება

ლაბორატორიულ სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაოების ჩასატარებლად ბაკალავრებისთვის, მაგისტრანტებისთვის და დოქტორანტებისთვის.

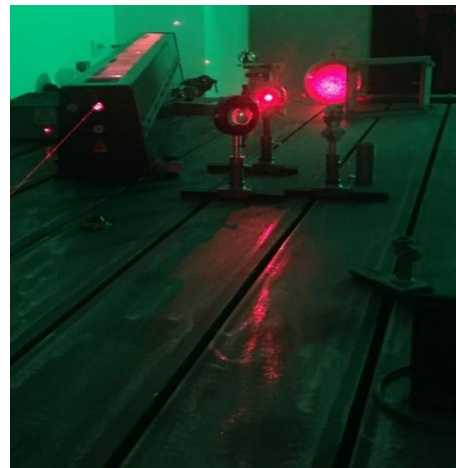
**ნაშრომის აპრობაცია და გამოქვეყნებული პუბლიკაციები** ნაშრომის ცალკეული შედეგები მოხსენიებულ იქნა სადოქტორო პროგრამით გათვალისწინებულ სამ კოლოქვიუმზე, ასევე კვლევის შედეგები მოხსენიებული იქნა ქ. კუალა ლუმპურში (მალაიზია) გამართულ საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე. ნაშრომის ძირითადი შედეგები სტატიის სახით გამოქვეყნებულია სტატიები მაღალრეინტიგულ რეფერირებად 4 ჟურნალში, ხოლო მოხსენიებული იქნა 1 საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე და ასევე გამოცემულია მეთოდური მითითებები.

**ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა** დისერტაცია შედგება შესავლის, ძირითადი ნაწილის, დასკვნების და გამოყენებული ლიტერატურისაგან. წინამდებარე ნაშრომში შედგება 141 გვერდისგან და გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხა მოიცავს 31 სამეცნიერო წყაროს.

**პირველი თავი** - მოიცავს თემის შესავალს და ლიტერატურულ მიმოხილვას **მეორე თავში** განხილული იქნა შესასწავლი ფიზიკური მოდელების ბეტონის რეალურ თვისებებთან მეტად მიახლოების მიზნით ფოტოდრეკადობაზე დაფუძნებული დრეკადობის კვლევის ოპტიკური მეთოდები და მათ ნაცვლად ჩვენ მიერ ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის გამოყენება. ჰოლოგრაფიაც, აგრეთვე, კვლევის ოპტიკურ მეთოდებს მიეკუთვნება, მაგრამ არ მოითხოვს მოდელური (ფოტოდრეკადი) მასალების გამოყენებას და ამიტომ მისი გამოყენება საკმაოდ მიმზიდველი ჩანს. განხილულია ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის ფართო გავრცელება სხვადასხვა დარგში: ის კომპოზიტური მასალების და მზა ნაკეთობების საიმედოობის შემოწმების საშუალებას იძლევა, მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის ფუნქციას ასრულებს. ჰოლოგრამა იწერს სინათლის ტალღების ფაზას - მახასიათებელს, რომელიც იცვლება ობიექტის ნებისმიერი გადაადგილებისას. ამიტომ მისი დახმარებით შეიძლება როგორც



სტატიკური, ისე დინამიკური ზემოქმედების პირობებში წარმოქმნილი დეფორმაციების აღმოჩენა და რაოდენობრივად შეფასება, ასევე შერჩეული იქნა ჩვენი მხრიდან შეკვლების უწყვეტი პროცესის ფიქსაციისთვის შემდეგი მეთოდიკა. პირველი ექსპონირების შემდეგ ჰოლოგრაფიული ფოტოფირფიტა რჩებოდა ჩარჩოში 1 საათით განმეორებითი გადაღებისთვის. მეორე ექსპონირების შემდეგ ფირფიტას ვიღებდით ჩარჩოდან და ვამჟღავნებდით გადაღების ციკლი მეორდებოდა. ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამების ჩაწერის ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს მოთხოვნას წარმოადგენს ინტერფერენციული ველის მაღალი სტაბილურობა, ამიტომ აუცილებელია ოპტიკური ხელსაწყოების, ვიბროდამცავი ოპტიკური მაგიდის მაქსიმალური სიხისტის უზრუნველყოფა. ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე ნაშრომის ავტორის ძალისხმევით მოხდა დაპროექტება და მშენებლობა სტაციონალური ოპტიკური მაგიდის სურ.1 და სურ.2.



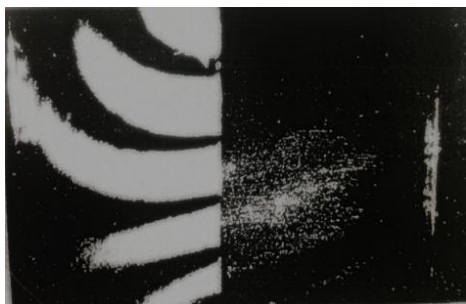
#### N1 და N2 სურათი ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის ლაბორატორიის საკვლევი სტენდი

ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის გამოყენებით მაღალი სიზუსტით განისაზღვრა შეკვრის ვადები ცემენტზე მომზადებული ნარევისთვის, აგრეთვე მოხდა სტრუქტურის ჩამოყალიბების პროცესის ვიზუალიზაცია, ამისათვის დამზადდა (კუბები: 10X10X10 სმ, რომლის ერთი გვერდის ზედაპირი გამჭვირვალეა, ამ ზედაპირს აქვს შუშის კედელი ამრეკლი ვერტიკალური ზოლით.

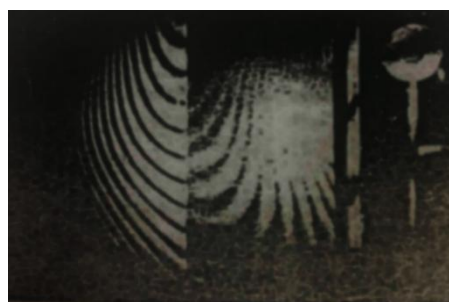
ცხრილი N1

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

როგორც ცხრილებიდან N1 ჩანს შეკვრის პროცესის დასაწყისი და მისი მიმდინარეობა დიდად არის დამოკიდებული წყალ-ცემენტის ფარდობაზე და ცემენტის მარკაზე.

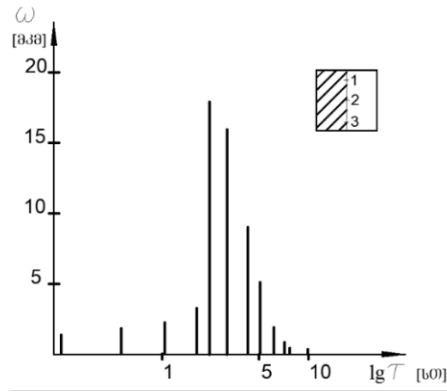


სურათი N3 ნიმუშის  
ხნოვანება 50 წთ



სურათი N4 ნიმუშის  
ხნოვანება 110 წთით

მოცემულია ნიმუშის ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამების ფოტოები სურ.3 და სურ.4, სადაც ნათლად ჩანს, რომ ნარევის შეკვრა იწყება ქვედა ფენიდან და დროთა განმავლობაში წაინაცვლებს მაღლივი ფენებისკენ, ამაზე მეტყველებს ინტერფერენციული ზოლები ფირფიტის გამჭვირვალე ნაწილში. ამ ფაქტის ახსნა შეიძლება იმით, რომ თავისუფალი წყალი, რომელიც არ შედის რეაქციაში ცემენტთან ვიბროდაყალიბების შედეგად ამოდის ნიმუშის ზედა ფენებში და შესაბამისად წყალცემენტის ფარდობა ნაკლებია ნიმუშის ქვედა ფენაში, რაც იწვევს სწორედ ამ ფენის შეკვრის პერიოდის უფრო სწრაფად დაწყებას.



სურათი N5 გადაადგილების ვექტორის ნორმალური კომპონენტის სიდიდის დამოკიდებულება ნარევის ხნოვანებაზე (წ/ც 0,46 M-400)

გრაფიკზე სურ.5 აშკარად ჩანს გამყარების პროცესის სამივე სტადია: პირველი სტადია ხასიათდება შეკლების მცირედი დეფორმაციებით, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ ქიმიური რეაქცია ცემენტსა და წყალს შორის ჯერ კიდევ არ არის დამთავრებული. მეორე სტადიაზე მთელი ცემენტის მასამ განიცადა ჰიდრატაცია - შეკლების დეფორმაცია მოცულობის მის მაქსიმალურ მნიშვნელობაზე. ამის შემდეგ, იწყება მესამე სტადია, ნარევი იკრებს სტრუქტურულ სიმტკიცეს, რომელიც ეწინააღმდეგება შეკლების დეფორმაციას და ეს უკანასკნელი მცირდება.

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

განხილულია ბეტონის დეფორმირებული მდგომარეობის შესწავლა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრით, რომელმაც ჯერ ვერ იპოვა ისეთი ფართო გამოყენება ბეტონმცოდნეობაში, როგორც სხვა შედარებით ერთგვაროვან კომპოზიტური მასალების და კონსტრუქციული ელემენტების კვლევაში. ამასთან, ჰოლოგრაფიის გამოყენება ბეტონის დეფორმირებული მდგომარეობის შესასწავლად საკმაოდ პერსპექტიულია. სხვა მეთოდებთან შედარებით მას აქვს უდავო უპირატესობა. მაგალითად, წინააღმდეგობის

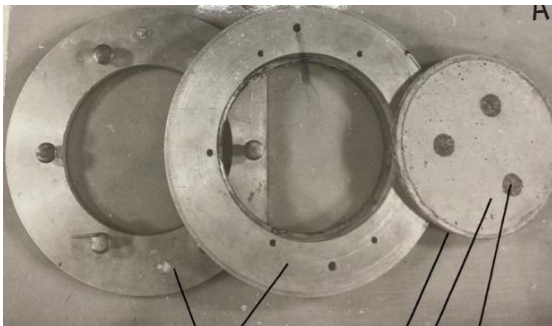
ელექტრონული სენსორებით (ტენზომეტრია) დეფორმაციების გაზომვის ჩვეულებრივად გამოყენებად მეთოდს აქვს რიგი ხარვეზის - ტენზორების-ტორების დაწებებისა დიდი მოცულობის სამუშაო, ზედაპირის მომზადების აუცილებლობა, სტრუქტურული არაერთგვაროვნების ძლიერი გავლენა და სხვ. ამას გარდა, წინააღმდეგობის სენსორების გამოყენება ყოველთვის შესაძლებელი არ არის.

კერძოდ, ადრეულ ასაკში ცემენტის ქვის დეფორმაციის კვლევისას, როცა ცემენტის ქვის ნიმუშები ტენიანია, ტენზომეტრიის მეთოდის გამოყენება პრაქტიკულად შეუძლებელია, რადგან არ ხერხდება სენსორების საიმედო ფიქსაცია ნიმუშის ზედაპირზე. ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდი კი დეფორმაციის გაზომვის საშუალებას იძლევა ნებისმიერი ტენიანობის დროს და ობიექტის ნებისმიერ წერტილში, ასევე შეიძლება ძაბვების კონცენტრაციის განსაზღვრა უკონტაქტოდ დიდი სიზუსტით, აგრეთვე მნიშვნელოვანია შეკვლების პროცესის გამოკვლევა გამყარების ადრეულ სტადიაზე როდესაც ხდება ბეტონისა და ცემენტის ქვის შეკვრის პროცესის დასრულება და სტრუქტურის ჩამოყალიბება, რაზეც არის დამოკიდებული ბეტონის კონსტრუქციების მდგრადობა და ხანგამძლეობა.

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

განხილულია ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით კონტრაქციული შეკვლების პროცესის გამოკვლევა, გამყარების ადრეულ

სტადიაზე აღნიშნულ პირობებს ყველაზე მეტად აკმაყოფილებდნენ თხელი ნიმუში - დისკები სურ.6, რომელთა გამოკვლევაც ჩატარდა. კვლევისთვის დამზადდა ნიმუშები წიდაპორტლანდცემენტისგან მარკით 400. ცემენტის ცომი დამზადდა წყალ-ცემენტის შეფარდებით 0,5, ექსპერიმენტის სერიაში ფორმაში ისხმებოდა წიდაპორტლანდცემენტის ცომი და ცემენტის ცომში იღებოდა სამი შემვსების მარცვალი - 20 მმ დიამეტრის. მოცემულია ინტერფეროგრამები, რომლებიც საშუალებას იძლევა ვიმსჯელოთ შეკვლების დეფორმაციის თანდათანობით განვითარებაზე, როცა შემვსების მარცვლებს საშუალება ჰქონდათ თავისუფლად მიჰყოლოდნენ მატრიცის დეფორმაციას, ხოლო როცა მარცვლები ხისტად იყო დამაგრებული და წინააღმდეგობას უწევდნენ მატრიცის გადაადგილებებს.



სურათი N6 ნიმუშისა და ჩარჩოს ხედი



სურათი N7 ნიმუშის ასაკი 10 სთ გრანიტის შემვსებები ჩაწყობილია მატრიცაში თავისუფალ მდგომარეობაში



სურათი N8 იგივე ნიმუშის ასაკი 16 სთ

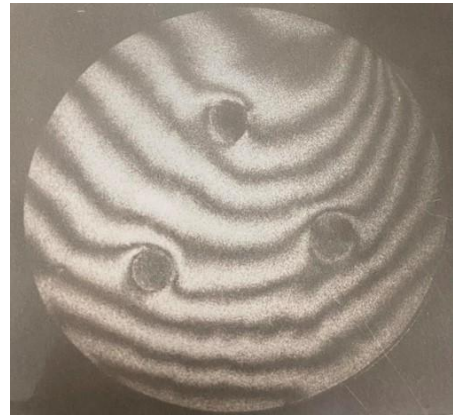


სურათი N9 იგივე ნიმუშის ასაკი 40 სთ





სურათი N10 იგივე ნიმუშის ასაკი 89 სთ



სურათი N11 იგივე ნიმუშის ასაკი 170 სთ

სთ



სურათი N12 გრანიტის შემვსევი ხისტად ჩამაგრებული ცემენტის მატრიცაში ასაკი 16 სთ



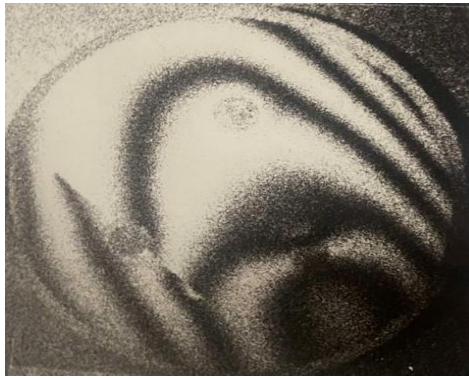
სურათი N13 იგივე ნიმუშის ასაკი 60 სთ



სურათი N14 იგივე ნიმუშის ასაკი 62 სთ



სურათი N15 იგივე ნიმუშის ასაკი 91სთ



სურათი N16 იგივე ნიმუშის ასაკი  
120სთ



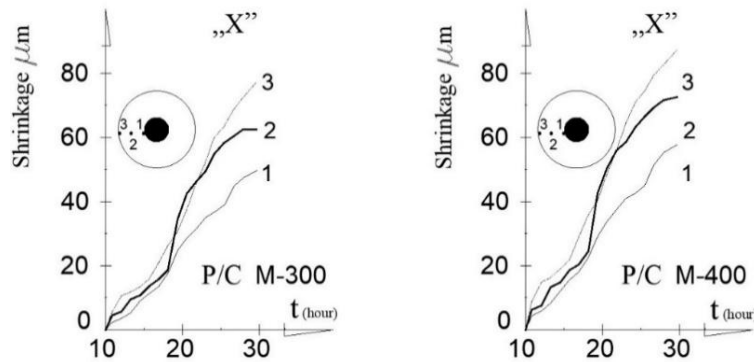
სურათი N17 იგივე ნიმუშის ასაკი  
489სთ

ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამებიდან შეიძლება დავასკვნათ, რომ როცა შემვსების მარცვლების გადაადგილება არ იყო შეზღუდული (სურ.7-სურ.11) და ისინი, „ცურავდნენ“ რა მატრიცაში, თავისუფლად შეეძლოთ მიჰყოლოდნენ ამ უკანასკნელის დეფორმაციებს და დაკვირვების პერიოდში (7 დღე-ღამეზე მეტი) ბზარები ნიმუშებში არ გამოჩენილა, ხოლო როცა მარცვლების გადაადგილების შესაძლებლობა შეზღუდული იყო (სურ.12-სურ.17) ნიმუშის დამზადებიდან მე-60 საათზე მასში შემვსების ერთ-ერთ მარცვალთან წარმოიშვა შეკლების ბზარი ნიმუშის 4-ჯერადი გამადიდებელი ლუპით დათვალიერებისას, ის ჯერ კიდევ არ იყო შესამჩნევი. ხოლო დამზადებიდან 489 საათზე მოხდა სრული რღვევა ვიზუალურად.

ასევე განხილული იქნა ცემენტის ქვის შეკლება ასაკოვან ასაკში ჩამოსხმული იქნა M-300 და M-400 მარკის ნიმუშები 28 დღის განმავლობაში ინახებოდა ნორმალურ პირობებში ამის შემდგომ ხდებოდა გადაადგილებებზე დაკვირვება სამ წერტილში ერთი უშუალოდ მსხვილი შემვსების სიახლოვეს, მეორე დისკის რადიუსის შუაში ხოლო მესამე დისკის ჩარჩოს სიახლოვეს.

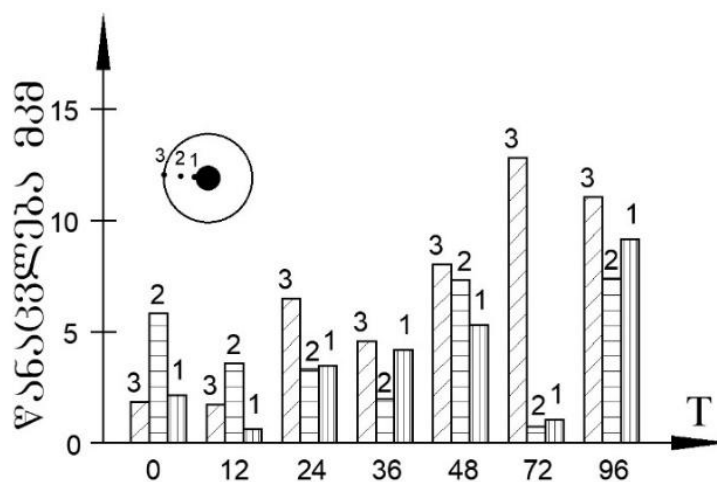
მიღებული შედეგებიდან გამომდინარე შეიძლება დავასკვნათ რომ წ/ც ფარდობას აქვს გავლენა შეკლების პროცესზე, ზემოთ მოცემული მრუდიდან (სურ.18) ნათლად ჩანს რომ საწყის ეტაპზე მიმდინარეობდა შედარებით

სწრაფად გადაადგილებები ორივე ნიმუშზე ხოლო გარკვეული დროის გასვლის შემდგომ M-300 ნიმუშის შეკლების პროცესი მინელდა ხოლო M-400 ნიმუშის შეკლების პროცესი გაგრძელდა შედარებით მეტი ხანი ვიდრე მეორე ნიმუში.



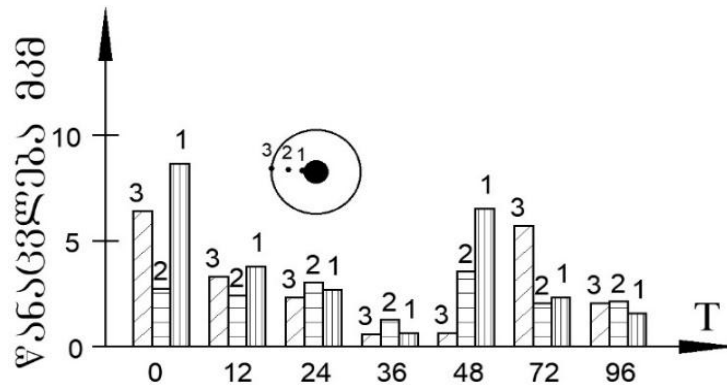
სურათი N18 ცემენტის ქვის შეკლების მრუდი ასაკოვან ასაკში

საკონტაქტო ურთიერთმოქმედების განსაკუთრებულობების გავლენის, ასევე შემდგომის მარცვლების სორბციული განსხვავების შეფასების მიზნით, ჩვენს მიერ გრანიტის მარცვლებიანი ნიმუშების გარდა, გადაღებული იყო ინტერფეროგრამები, როცა ცემენტის ქვაში ჩართული იყო კერამიტი (სურ.19) და ვულკანური წილის მარცვლები (სურ.20). ძირითადად ნიმუშები იდენტური იყო.



სურათი N19 ცემენტის ქვის ცალკეული წერილების გადაადგილებების დიაგრამა შემდგომი კერამიტი





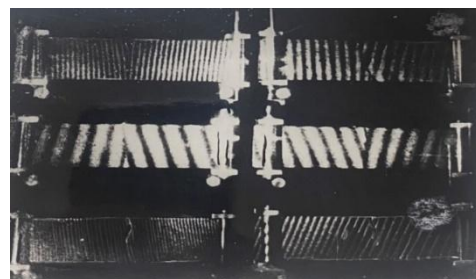
სურათი N20 ცემენტის ქვის ცალკეული წერტილების გადაადგილებების დიაგრამა შემვსები ვულკანური წიდა

როგორც შემვსების მარცვლების მიერ წყლის შეწოვის დაკვირვებებმა გვიჩვენა მათ წყალთან უშუალო კონტაქტის დროს, კერამიტი შედარებით ნელა ითვისებს წყალს საწყის ეტაპზე და შედარებით სწრაფად უფრო გვიან ვადებში. ვულკანური წიდის მარცვლები კი წყალს იწოვდნენ უფრო თანაბრად ან კიდევ უფრო ინტენსიურად საწყის ეტაპზე. აქედან გამომდინარე შეიძლება დავასკვნათ, რომ შემვსებს აქვს მნიშვნელობა ცემენტის ქვის შეკლების დეფორმაციის ხასიათზე.

გამოვიკვლიეთ რა ცემენტის მინერალური შემადგენლობა ბეტონის ბზარმდეგობაზე, ჩვენ მიერ მოხდა დაკვირვება და შეფასება ბზარმდეგობისა შეკლებისა და გარე მექანიკური დატვირთვებით ერთობლივი მოქმედების დროს (სურ.21 და სურ.22). ბზარების წარმოშობისა და განვითარების პროცესზე დაკვირვებისთვის გამოყენებული იყო ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის მეთოდი.



სურათი N21 ნიმუშების ინტერფეროგრამა დატვირთვიდან 2 საათის შემდეგ



სურათი N22 ნიმუშების ინტერფეროგრამა დატვირთვიდან 20 საათის შემდეგ

ყველაზე ბზარმდეგი აღმოჩნდა პორტლანდცემენტი (ცემენტი #1). დანამატის უმნიშვნელო რაოდენობაც კი (ცემენტის წონის 15%) ბზარმდეგობის მნიშვნელოვან დაქვეითებას იწვევდა (ცემენტი #3). შედარებით მაღალი ბზარმდეგობა გამოავლინა წიდაპორტლანდცემენტმა (ცემენტი #5). ყველაზე დაბალი ბზარმდეგობა აღმოაჩნდა პუცოლანის პორტლანდცემენტს (ცემენტი #6). ამრიგად, ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდის გამოყენება საშუალებას იძლევა, გამოვავლინოთ ბზარი მისი წარმოშობის გაცილებით ადრეულ სტადიაზე, ვიდრე სხვა ცნობილი მეთოდებით (ნიმუშებზე ვიზუალური დაკვირვება, როგორცაა ტენზომეტრების დახმარებით დეფორმაციის გაზომვა და ულტრაბგერის გამოყენება).

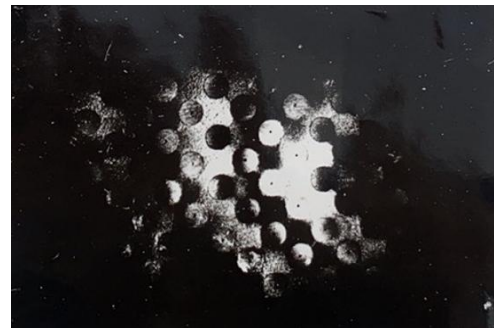
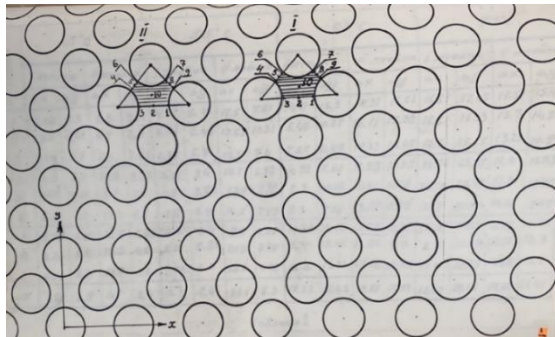
განხილულია ტემპერატურული ზემოქმედების დროს ბეტონის დეფორმაციის ბუნება, ჩამოსხმული იყო მოდელი (სურ.23) ქვიშაქვის ბეტონისაგან დურალუმინის მსხვილი შემვსების ჩართვებით. წვრილი შემვსების (ქვიშის) მაქსიმალური ზომაა - 5მმ. შემკვრელის სახით გამოვიყენეთ 400 მარკის წიდაპორტლანდცემენტი, დურალის მსხვილი შემვსები დიამეტრით - 20 მმ, 80 ცალის რაოდენობით. შეკლებითი ბზარების წარმოქმნის თავიდან ასაცილებლად, დაყალიბების შემდეგ მოდელი 28 დღე-ღამის განმავლობაში ნორმალური შენახვის პირობებში იმყოფებოდა.



სურათი N23 ბეტონის მოდელი მსხვილი შემვსებით

ექსპერიმენტის ჩატარების დროს, როცა ტემპერატურის ინტერვალი ექსპოზიციებს შორის აღემატებოდა 5<sup>0</sup>-ს, ინტერფეროგრამები არ რეგისტრირდებოდა, ამიტომ ჰოლოგრაფირებას ვაწარმოებდით

საფეხურებრივი მეთოდით, ტემპერატურებზე 42-45, 52-55, 62-65, და 67-70 C<sup>0</sup>. პირველი ექსპოზიციის წინ ნიმუშს ვაცხელებდით 42 C<sup>0</sup> ტემპერატურამდე, ხოლო 15 წუთის შემდეგ, რომელთა განმავლობაშიც ნიმუში ცხელდებოდა 45 C<sup>0</sup> ტემპერატურამდე, მეორე ექსპოზიციას იმავე ჰოლოგრაფიულ ფოტოფირფიტაზე ვახდენდით, რის შემდეგაც ფოტოფირფიტას ვიღებდით კასეტიდან, გავამჟღავნეთ და განვსაზღვრეთ წანაცვლებები (სურ.24). ასეთივე მეთოდიკა გამოვიყენეთ 55,65,70C<sup>0</sup> (სურ.25) ტემპერატურაზე. რაოდენობრივი შეფასების მისაღებად გადაადგილებები ცხრილი N2 განსაზღვრული იყო ორი საკვლევი უჯრედის 20 წერტილში.



სურათი N24 ცალკეული წერტილების გადაადგილების სქემა X და Y ღერძის გასწვრივ

სურათი N25 ჰოლოგრაფიული ინტერფეროგრამა მოდელის 45 C<sup>0</sup>

ცხრილი N2 ცალკეული წერტილების გადაადგილებები X და Y ღერძების გასწვრივ მიკრომეტრებში

წერტილებს	45C <sup>0</sup>				55C <sup>0</sup>				65C <sup>0</sup>				70C <sup>0</sup>			
	I უჯრედი		II უჯრედი		I უჯრედი		II უჯრედი		I უჯრედი		II უჯრედი		I უჯრედი		II უჯრედი	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
	,82	,3	,2	,0	,3	,7	6,5	,81	4,0	5,3	8,3	6,5	6,6	7,4	7,5	5,4
				1	7						1	2	1	5	1	2
	,67	,21	,4	,0	,3	,43	7,5	0,3	,48	0,2	8,1	5,3	6,6	6,3	5,3	4,3
					6		5	2		5	1	8	1	3		2
	,43	,7	,3	,6	,7	,7	3,5	,4	,85	1,4	7,4	4,4	2,2	5,5	3,2	0,9
				2	8					8	2	5	5	5	1	

	,0	,7	2,0	,31	,61	,4	0,7	,92	,92	,41	2,59	0,39	2,64	3,35	1,4	1,83
	,61	,0	,1	,4	,24	,25	3,0	,92	,3	0,58	0,31	1,46	6,58	8,48	2,31	1,93
	,0	,2	3,4	,5	,5	,7	4,5	,37	,3	,36	3,81	4,58	8,0	0,31	3,62	2,67
	,25	,0	2,5	,82	,81	,4	,6	,07	2,87	2,63	0,53	9,39	5,5	7,88	6,73	0,52
	,71	,4	3,0	,0	,0	,81	0,3	,40	5,4	5,46	1,37	8,7	,6	0,39	7,52	4,3
	,86	,7	1,7	,1	,08	,0	0,8	,72	5,8	3,31	5,58	3,43	1,0	0,49	7,93	6,2
0	,2	,9	,7	,4	,3	,4	1,1	,3	7,51	5,43	9,77	8,83	8,62	9,41	9,24	7,41

ინტერფეროგრამების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ჰოლოგრამის გადაღების დაწყებისთანავე ტემპერატურული ზემოქმედების დროს (43-45<sup>0</sup>) მოდელი არსებობდა ბზარები საკონტაქტო ზონებში მატრიცასა და შემვსების მარცვლებს შორის. ეს გარემოება აისახა შიგა ძაბვების განვითარების ხასიათზე, რომლებიც ცალკეულ შემთხვევებში ტემპერატურის ზრდასთან ერთად მცირდებოდა. შემცირება შეინიშნებოდა, სახელდობრ იმ წერტილებში, სადაც ინტერფეროგრამაზე მონიშნული იყო ბზარები.

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

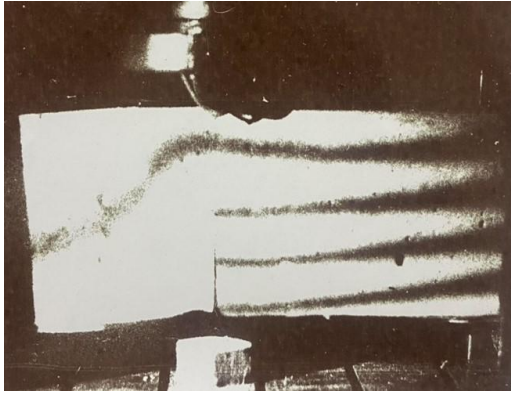
1C<sup>0</sup>-ით ტემპერატურის ზრდის შესაბამისი გადაადგილებები ძლიერ იცვლებოდნენ. ჩვენ მიერ დაფიქსირებული მაქსიმალური მნიშვნელობები უდრიდა 9-10 მიკრომეტრს. 9-10 წერტილების დიდი გადაადგილება განპირობებულია იმით, რომ ის აღმოჩნდა საკონტაქტო ბზარის ზონაში. ანალოგიური ადგილებში (წერტილებში 1,3,4,7) წანაცვლებები ნაკლები იყო.

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

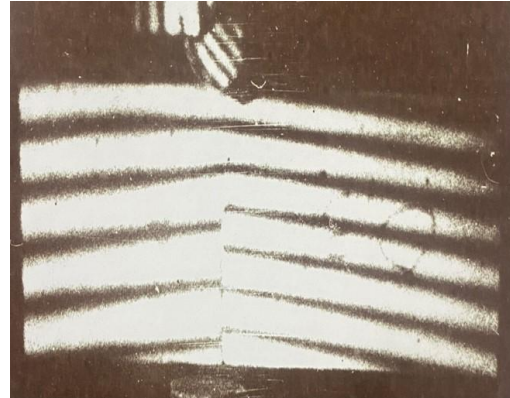
ჩატარდა კვლევა K ძაბვის ინტენსიურობის კოეფიციენტის დასადგენად რომელმაც საინჟინრო პრაქტიკაში ერთ-ერთი ძირითადი ადგილი დაიკავა დრეკადობის მოდულსა და პუასონის კოეფიციენტთან ერთად. იგი ითვლება მასალის მუდმივ სიდიდედ და ბზარმდეგობის ძირითად მახასიათებლად. K ერთადერთი პარამეტრია, რომლის მეშვეობითაც გამოითვლება დამაბუღ-დეფორმირებული მდგომარეობა ბზარის არეში. ერთი შეხედვით, ცემენტის ქვისათვის, რომელიც გაცილებით ერთგვაროვანი მასალაა, ეს სიდიდე უნივერსალური მახასიათებელი უნდა იყოს. ამ ეტაპზე ჩვენ მიერ ჩატარებული კვლევის მიზანია დავადგინოთ რამდენად გამოსადეგია  $K_{1c}$  (გამოსახავს ბზარების ურთიერთსაპირისპირო მიმართულებით დაშორებას) კრიტერიუმი ცემენტის ქვისათვის. დრეკადობის პარამეტრების განსაზღვრისათვის M-400 მარკის პორტლანდცემენტისაგან დამზადაა პრიზმის ფორმის 40X40X160 მმ ნიმუშები, წყალ-ცემენტის ფარდობა, შესაბამისად 0,3 ტოლი იყო. ნიმუშის ცენტრალურ ნაწილში გაუკეთდა ჭდე. ნიმუშის გამყარება ხდებოდა ტენიან

გარემოში 28 დღე ღამის განმავლობაში, რის შემდეგაც წარმოებდა მათი გამოცდა სამწერტილოვან ღუნვაზე (სურ.26 და სურ27).

დამაბუღობის ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტის გათვალისწინებული იყო ბეტონის ნიმუშის რღვევის წინა სტადიაზე ბზარის სიგრძე იზომებოდა უშუალოდ ინტერფერომეტრიული ზოლების გადაადგილების წყვეტის წერტილში. ჩვენ შემთხვევაში ინტენსიურობის კრიტიკული კოეფიციენტი (ბზარმდეგობის კოეფიციენტი შეადგენს  $K_{1c}=0,41$ )



სურათი N26 ნიმუშზე  
დატვირთვა 8,4  
ნიუტონის სიდიდით



სურათი N27 ნიმუშზე  
დატვირთვა 16,8  
ნიუტონის სიდიდით

#### ძირითადი დასკვნები:

1. ნაშრომი შესრულებულია ს.ს.ი.პ. შოთა რუსთაველის ფონდის საგრანტო პროექტ FT- 18 – 11671- ის ფარგლებში, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტზე, ნაშრომის ავტორის ძალისხმევით ორგანიზებულ ლაბორატორიაში ჩატარებული ლიტერატურული მიმოხილვის საფუძველზე, პირველად ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის მეთოდით მოხერხდა ხანგრძლივად (ათობით საათის განმავლობაში) მიმდინარე კონტრაქციული შეკლების პროცესის - ცემენტის ქვის დეფორმაციის კვლევის ჩატარება. ბეტონის დეფორმაციული მდგომარეობის ყველა ადრე არსებული კვლევა, რომელიც ჩატარებული იქნა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრის გამოყენებით იზლუდებოდა დროის მოკლე მონაკვეთში (რომელიც იზომებოდა წუთებით) მიმდინარე პროცესებით
2. განხილულია ბეტონის და რკინაბეტონის კვლევის თანამედროვე ურღვევი მეთოდები, მათი დადებითი და უარყოფითი მხარეები, ჩატარებულია სამეცნიერო პერიოდიკის მიმოხილვა, მოყვანილია ექსპერიმენტული მონაცემები.

3. ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრია იძლევა საშუალებას გამოკვლეული ოქნას არა ბეტონისა და რკინაბეტონის მოდელები არამედ რეალური ბეტონი და კონსტრუქციული ელემენტები.
4. ნაშრომში ნაჩვენებია, რომ ინტერფეროგრამების საშუალებით შეიძლება პროგნოზირება, ბეტონის შეკლების შედეგად ბზარწარმოქმნის ადგილის და შემდგომში მათი კინეტიკური განვითარების თვალის დევნება უკონტაქტოდ დიდი სიზუსტით.
5. ნაშრომში განხილულია ექსპერიმენტული მონაცემები ბეტონის შეკლებისა და ბზარმდებლობის ხანგრძლივი პროცესის კვლევისა ლაზერული ტექნიკის, კერძოდ ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის გამოყენებით. აღნიშნული თანამედროვე სრულყოფილი მეთოდი უაღრესად მნიშვნელოვანია ბზარწარმოქმნის, შეკლების ადრეულ და სხვადასხვა სტადიაზე დაკვირვებისათვის უკონტაქტოდ დიდი სიზუსტით (633 ნ.მ. ნანოტექნოლოგიური მეთოდი)
6. აღნიშნული მეთოდის საშუალებით შესაძლოა ხარისხობრივად და რაოდენობრივად შევადაროთ მყარი სხეულის დეფორმაციული მდგომარეობა და სხვადასხვა შედგენილობის ბეტონის შეკლების, ბზარწარმოქმნის და მისი განვითარების პროცესები. ექსპერიმენტის ხანგრძლივი დროით მიმდინარეობაში გამოიყენება ჰელიუმ-ნეონის უწყვეტი მოქმედების ლაზერი რომლის სიმძლავრეა (50 მვტ)
7. განხილულია მონაცემები ინტერფეროგრამების სახით, ცემენტის მატრიცასა და მასში ჩაწყობილი გრანიტის ქვის მსხვილი შემვსები თავისუფალ მდგომარეობაში (უწყვეტი დაკვირვება 170სთ განმავლობაში) მატრიცასა და მსხვილი შემვსების საკონტაქტო ზონაში ბზარები არ განვითარდა, შემვსები შეკვრის პროცესთან ერთად გადაადგილდებოდა.
8. განხილულია ანალოგიური ექსპერიმენტი ინტერფეროგრამების სახით (დაკვირვება 489 სთ) ცემენტის მატრიცასა და მასში ჩაწყობილი გრანიტის ქვის მსხვილი შემვსებები ხისტ მდგომარეობაში. დაკვირვების 60 სთ-ის



- შემდეგ რეალურ ბეტონის ნიმუშზე ვიზუალურად არ ჩანდა, ინტერფეროგრამაზე დაფიქსირებული ბზარის შემდგომი განვითარება და ბეტონის სრული რღვევა.
9. შესწავლილია ექვსი დასახელების ცემენტის ნიმუშის გამოცდა შედარებით ბზარმედეგობაზე ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის გამოყენებით, სადაც დადგინდა, რომ ყველაზე ბზარმედეგი ცემენტ-დულაბის ნიმუშია წიდაპორტლანდცემენტი.
10. ნაშრომში განხილულია რღვევის ანუ ბზარების განვითარების რღვევის მექანიკის საფუძველზე ჩატარებული ექსპერიმენტი, რომელიც მასალათა გამძლეობისაგან განსხვავებით, ბზარების შემცველი ელემენტების სიმტკიცის პირობებს სწავლობს, მოცემულია ბზარების კლასიფიკაცია, ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის გამოყენებით გამოთვლილია ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტი  $k_{ic} = 0,41$  მმ რომელიც წარმოადგენს ბზარმედეგობის კოეფიციენტს.
11. ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდის საშუალებით შესაძლებელია ხარისხობრივად და რაოდენობრივად შევაფასოთ მყარი სხეულის მდგომარეობა და სხვადასხვა შედგენილობის ბეტონის შეკვლების, ბზარწარმოქმნის და მისი განვითარების პროცესი. ეს თითქმის უნიკალური საშუალებაა ერთდროულად დავაკვირდეთ დეფორმირების ერთიან სურათს გამოსაკვლევი ობიექტის მთელ რეგისტრირებულ ზედაპირზე და იმავე დროს სურვილისამებრ, ნებისმიერ არჩეულ წერტილში გავზომოთ გადაადგილების ვექტორის სამივე კომპონენტი.
12. ლაბორატორიული სამუშაოების შესასრულებლად შეიქმნა მეთოდური მითიბები „ბეტონისა და რკინაბეტონის დეფორმაციის და ბზარმედეგობის პროცესების შესწავლა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით“ რომელიც გამოიყენება როგორც ბაკალავრებისთვის მაგისტრანტებისთვის და ყველა დაინტერესებული პირისთვის.



**დისერტაციის ძირითადი შინაარსი გამოქვეყნებულია შემდეგ  
ნაშრომებში:**

1. გ. დალაქიშვილი, კ. ხაზალია, ც. გიორგაძე, ო. საჯაია, გ. თურმანიძე, „ბეტონის დეფორმაციის გამოკვლევა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის გამოკვლევით“, სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი „ჰიდროინჟინერია“ N1-2 (27-28), 2019, თბილისი, საქართველო.
2. ზ. გვიშიანი, გ. დალაქიშვილი, კ. ხაზალია, ც. გიორგაძე, ო. საჯაია, გ. თურმანიძე, „ჰოლოგრაფიული ექსპერიმენტის ტექნიკა“, სამეცნიერო-ტექნიკური რეფერირებადი ჟურნალი „ენერჯია“ 4(96), 2020, თბილისი, საქართველო.
3. G. Turmanidze, „The Effect of Cement Composition on the Cracking Resistance“, The 5th international conference on materials engineering and nanotechnology, December 2021, Kuala Lumpur, Malaysia.
4. G. Dalakishvili, K. Khazalia, G. Turmanidze, O. Sajaia, „Monitoring and Diagnosis of the Shrinkage and Crack Formation Processes in Concrete using Holographic Interferometry“, საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემიის ჟურნალი „მომბე“, ტ 15, N4, 2021.
5. გ. დალაქიშვილი, კ. ხაზალია, გ. თურმანიძე, ო. საჯაია, „ბეტონისა და რკინაბეტონის დეფორმაციის და ბზარმდეგობის პროცესების შესწავლა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით“, მეთოდური მითითებები ლაბორატორიული სამუშაოების შესასრულებლად, საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2021, თბილისი, საქართველო.
6. გ. თურმანიძე, „ოპტიკური ჰოლოგრაფიის გამოყენება ბეტონის რღვევის მექანიკაში“, სამეცნიერო ტექნიკური რეფერირებადი ჟურნალი „ენერჯია“, 1(101),2022.

## რეზიუმე

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

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

გამოკვლეული იქნა ტემპერატურული ზემოქმედების დროს ბეტონის დეფორმაცია, ინტერფეროგრამების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ჰოლოგრამის გადაღების დაწყებისთანავე ტემპერატურული ზემოქმედების დროს (43-45<sup>0</sup>) მოდელი არსებობდა ბზარები საკონტაქტო ზონებში მატრიცასა და შემვსების მარცვლებს შორის. ეს გარემოება აისახა შიგა ძაბვების განვითარების ხასიათზე, რომლებიც ცალკეულ შემთხვევებში

ტემპერატურის ზრდასთან ერთად მცირდებოდა. შემცირება შეინიშნებოდა, სახელდობრ იმ წერტილებში, სადაც ინტერფეროგრამაზე მონიშნული იყო ბზარები.

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

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

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

რღვევის მექანიკის პარამეტრებიდან მნიშვნელოვანია  $K_1$ - ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტი, რომელმაც საინჟინრო პრაქტიკაში ერთ-ერთი ძირითადი ადგილი დაიკავა დრეკადობის მოდულსა და პუასონის კოეფიციენტთან ერთად. იგი ითვლება მასალის მუდმივ სიდიდედ და ბზარმდეგობის ძირითად მახასიათებლად.  $K_1$  ერთადერთი პარამეტრია, რომლის მეშვეობითაც გამოითვლება დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა ბზარის არეში.  $K_{1c}$  კოეფიციენტის განსაზღვრისათვის გამოვცადეთ ნიმუში, რომლითაც დადგინდა, რომ ამ ნიმუშისათვის ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტი შეადგენს  $K_{1c}=0,41$  რომელიც წარმოადგენს ბზარმდეგობის კოეფიციენტს.  $K_{1c}$ -ს უშუალო გაზომვებმა ცხადყო, ჩვენ მიერ არჩეული წრფივი მოდელი მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული წყალ-ცემენტის ფარდობაზე.

ამდენად ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით მასალების თვისებების შესწავლა მისი გამყარების საწყისი სტადიიდან და შემდგომში რღვევის მექანიკის კრიტერიუმებზე დაყრდნობით მასალის მექანიკური პარამეტრების დადგენა, სტრუქტურის გათვალისწინებით და თანამედროვე ფიზიკური მეთოდების გამოყენებით პერსპექტიულია და ვიმედოვნებთ, რომ შემდგომში კვლევა საშუალებას მოგვცემს, უფრო ღრმად ჩავწვდეთ აღნიშნულ საკითხებს და კვლევის საფუძველზე გამოქვეყნებულია მეთოდური მითითებები ლაბორატორიული სამუშაოების შესასრულებლად „ბეტონისა და რკინაბეტონის დეფორმაციის და ბზარმდეგობის პროცესების შესწავლა ჰოლოგრაფიული ინტერფერომეტრიის მეთოდით“ ლაბორატორიული და კვლევითი სამუშაოების შესასრულებლად ბაკალავრების, მაგისტრანტების, დოქტორანტების და სხვა დაინტერესებული სამშენებლო პროფილის ინჟინერ-ტექნიკური პერსონალისათვის.

## Summary

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

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

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

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

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

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

Using holographic interferometry, both the numerical and visual information of the current process was recorded not on the research models, but directly on the

concrete structural element with great accuracy, without contact, on which the strength and durability of concrete and reinforced concrete structures depend.

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

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

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

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