

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ლევონტინა გალდავა

სტატისტიკური ციკლური დატვირთების და ბეტონის ასაკის გავლენა არსებული გრავიტაციული
კაშხლების სიმტკიცეზე

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარმოდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი

2014 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
სამშენებლო ფაკულტეტის ჰიდროსაინჟინრო დეპარტამენტში

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: პროფესორი არჩილ მოწონელიძე
პროფესორი ტარიელ კვიციანი

რეცენზენტები: სტუ-ს პროფესორი მირიან ყალაბეგიშვილი
ტ.მ.კ. პაატა ტულუში

დაცვა შედგება 2014 წლის 27 ივნის, 15⁰⁰ სთ-ზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის
სასწავლო, სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორიის აუდიტორიაში
მისამართი: თბილისი 0175, კოსტავას 68^ბ, პირველი კორპუსი, მე-3 სართული

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება

სტუ-ს ბიბლიოთეკასა და სტუ-ს ვებ-გვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს თავჯდომარე

სწავლული მდივანი:

პროფესორი ზ. გედენიძე

პროფესორი დ. ტაბატაძე

ნაშრომის საერთო დახასიათება

ნაშრომის აქტუალობა. მე-19 საუკუნის ბოლოდან დღემდე მსოფლიოში სხვადასხვა ტიპის ათასობით ბეტონის კაშხალია აგებული. მათ შორის გრავიტაციულ კაშხლებს დომინანტური პოზიცია უჭირავთ. საქართველოშიც არის რამოდენიმე ბეტონის გრავიტაციული კაშხალი აგებული, რომელთაგანაც ყველაზე მაღალია გუმათი-2 ჰესის კაშხალი. აღნიშნულ კაშხლებს დღემდე განსაკუთრებული პრობლემები სიმტკიცისა და მდგრადობის მხრივ არ შექმნიათ, თუმცა მრავალწლიანი ექსპლუატაციის პერიოდში ზოგიერთ მათგანში თავი იჩინა ისეთმა პრობლემებმა, რომლებიც ბეტონში მიმდინარე ქიმიურ პროცესებს უკავშირდება. ასეთებს მიეკუთვნება ე.წ. ტუტე-შემავსებლების რეაქცია (AAR) და ტუტე-სილიკას რეაქცია (ASR), რომლებიც იწვევენ ბეტონის ლოკალურ ზრდას მოცულობაში, რასაც, თავის მხრივ, თან სდევს მისი დაშლა.

გარდა აღნიშნული პრობლემისა, ექსპლუატაციაში დიდი ხნით მყოფ ბეტონის კაშხლებს გააჩნიათ სხვა, უფრო მნიშვნელოვანი პრობლემა. საქმე ეხება მათ ე.წ. “ექსპლუატაციურ გადაღლას”, რომელიც პირდაპირ კავშირშია ექსპლუატაციის პერიოდში მათზე მოქმედ გარე გეგმიურ და გაუთვალისწინებელ დატვირთვებთან. გეგმიურ დატვირთვებს მიეკუთვნება გარკვეული კანონზომიერებით ცვლადი ჰიდროსტატიკური დაწნევა, ხოლო გაუთვალისწინებლებს – სეისმური დატვირთვები, არანორმატული ფილტრაციული დატვირთვები და ა.შ. მრავალი ათეული წლის განმავლობაში ასეთი გარეგანი დატვირთვები იწვევენ ბეტონის გადაღლას, რაც პირდაპირ კავშირშია მისი მექანიკური მახასიათებლების ცვლილებასთან. გარდა ამისა, როგორც ნატურული დაკვირვებები და ლაბორატორიული ექსპერიმენტები ადასტურებენ, ბეტონის მექანიკური მახასიათებლები იცვლებიან დროთა განმავლობაში. ზემოდმოყვანილი ორივე ეს ფაქტორი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს კაშხლების არსებულ დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე და ამ საკითხის შემდგომი შესწავლა აუცილებელია. პრობლემის კომპლექსურად შესწავლა დაიწყო ჯერ კიდევ 1990-ანი წლების ბოლოდან [1] და დღემდე აქტიურად გრძელდება. საკითხის მნიშვნელობა

იმაშიც გამოიხატება, რომ არსებული კაშხლების რეალური დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის დადგენით შესაძლებელი ხდება მათი სამომავლო საექსპლუატაციო რეზერვების დადგენა, რაც პირდაპირ კავშირშია როგორც ეკონომიკურ რენტაბელობასთან, ასევე კონსტრუქციულ უსაფრთხოებასთან.

სამუშაოს მიზანი:

- 1) დიდი ხნის განმავლობაში ექსპლუატაციაში მყოფი და “გადაღლილი” ბეტონის გრავიტაციული კაშხლების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ანგარიში და ანალიზი ნელი სტატიკური ციკლური დატვირთვების (წყალსაცავის ავსება-დაცლა) და ბეტონის ასაკის (ეიჯინგი) გათვალისწინებით;
- 2) ანალიზის შედეგად კაშხლების სიმტკიცის რეზერვების დადგენა მათი მომავალი უსაფრთხო საექსპლუატაციო პერიოდის დადგენის მიზნით.

აღნიშნული მიზნის მისაღწევად დასმულია და გადაწყვეტილია შემდეგი ამოცანები:

- ბეტონის გრავიტაციული კაშხლების რეტროსპექტული საანგარიშო სქემისა და ანგარიშის მიმდევრობის დაზუსტება;
- ბეტონის არაწრფივი დრეკადი რღვევის განმსაზღვრელი მოდელის შერჩევა ბრტყელი დეფორმაციის პირობებისათვის;
- საკონტაქტო ზონის განმსაზღვრელი მოდელის შერჩევა;
- კაშხლის არსებული მდგომარეობის ანგარიში რეტროსპექტული ანალიზის შედეგად ნაგებობისა და მასალის მოდიფიცირებული მოდელის გათვალისწინებით;
- ექსპლუატაციაში მყოფი რეალური ბეტონის გრავიტაციული კაშხლის ანგარიში.

სამუშაოს მეცნიერულ სიახლე:

- კაშხლის საანგარიშო მეთოდიკის რეალიზების თანმიმდევრობა: რეტროსპექტული ანგარიში → არსებული მდგომარეობის ანალიზი;
- კაშხლისა და ფუძის საკონტაქტო ზედაპირისა და კაშხლის ტანის ფენებშორისი სიბრტყეების (ინტერფეისები) მუშაობის მოდელირება;
- ნელი სტატიკური ციკლური დატვირთვების გავლენა გრავიტაციული კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე;

- ბეტონის ასაკის გავლენა გრავიტაციული კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე;
- ციკლური დატვირთვებისა გავლენა ინტერფეისებზე;
- ბეტონის ასაკის გავლენა ინტერფეისებზე.

ძირითადი შედეგების საიმედოობა: განპირობებულია თეორიული (სასრული ელემენტების მეთოდი) და ჩატარებული რიცხვითი ექსპერიმენტების აპრობირებული და დასაბუთებული მიდგომით.

ნაშრომის აპრობაცია: დოქტორანტურის დამტკიცებული პროგრამით გათვალისწინებული პირველი მეორე სემინარები; 2014 წლის მაისში ჩატარებული სტუდენტთა საერთაშორისო კონფერენცია;

პუბლიკაციები: ორი სტატია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომათა კრებულში და ერთი სტატია – ჟურნალ “ენერჯია“-ში.

სამუშაოს მოცულობა და სტრუქტურა. სადისერტაციო ნაშრომი წარმოდგენილია . . . გვერდზე (მათ შორის . . . ცხრილი, . . . ნახაზი და . . . ფოტოა). იგი შედგება შესავლის, ოთხი თავის, დასკვნებისა და ციტირებული ლიტერატურისაგან (. . . დასახელების, მათ შორის . . . – უცხო ენაზე).

ნაშრომის შინაარსი

შესავალში აღწერილია პრობლემის მოკლე ისტორია, ნაშრომის საერთო დახასიათება და პრობლემის აქტუალობა. მითითებულია, რომ მაღალი ბეტონის კაშხლების ფაქტიური ისტორია დაიწყო 221 მ სიმაღლის ჰუგერის თაღოვან-გრავიტაციული კაშხლის აგებით მდ. კოლორადოზე (აშშ). ამ თაღოვან-გრავიტაციული კაშხლის მშენებლობა დაიწყო 1932, ხოლო დასრულდა 1936 წელს. ამის შემდეგ, მსოფლიოში სხვადასხვა ტიპის ათასობით ბეტონის კაშხალი აიგო, მათ შორის საქართველოშიც. ბეტონის კაშხლების სიმტკიცის პრობლემების თეორიულ შესწავლაში, სხვებთან ერთად, დიდი ღვაწლი მიუძღვის ქართველ მეცნიერებსაც, მათ შორის განსაკუთრებული აღნიშვნის ღირსია: ა. ლოსაბერიძე, ნ. მოწონელიძე, ი. დუდუშაური, კ. ხუბერიანი, ზ. გვედნიძე, მ. ყალაბეგიშვილი, ბ. აბულაძე და სხვ.

მიუხედავად დიდი გამოცდილებისა, ინჟინრებისთვის დღესაც არის დიად დარჩენილი საკითხები, რომლებიც ამ კაშხლების მუშაობას უკავშირდება და მოითხოვს გადაწყვეტას, რათა მოხდეს მათი სრული საექსპლუატაციო პოტენციალის დადგენა.

კომპიუტერული ტექნოლოგიების სწრაფმა განვითარებამ მე-20 საუკუნის 60-იანი წლებიდან გამოიწვია ბეტონის კაშხლების სიმტკიცის ანგარიშებისადმი მიდგომებში თვისობრივი ნახტომი. წინ წამოიწია და თანდათანობით დომინანტური პოზიციები დაიჭირა სასრული ელემენტების მეთოდმა (სემ), რომელიც მათემატიკურ რიცხვით მეთოდებს მიეკუთვნება (ო. ზინკევიჩი, რ. კლაფი, ე. უილსონი, კ. ბატე, ვ. ლიამ ფინი და სხვები საზღვარგარეთ, ა. მოწონელიძე, მ. ყალაბეგიშვილი, ბ. აბულაძე და სხვები საქართველოში)

სადისერტაციო ნაშრომი ეხება არსებული და “გადაღლილი” ბეტონის გრავიტაციული კაშხლების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ანგარიშს ორი მნიშვნელოვანი ფაქტორის – ბეტონის ასაკისა (ეიჯინგი) და ნელი სტატიკური ციკლური დატვირთვების, გათვალისწინებით. ამ უკანასკნელში იგულისხმება წყალსაცავის აგება-დაცლის ციკლები, რომელთა რაოდენობაც მისი რეგულირების რეჟიმზეა დამოკიდებული. ამ ფაქტორების გათვალისწინება ნაგებობის სიმტკიცის რესურსების დადგენის საშუალებას იძლევა.

პირველი თავი მიმოხილვითი ხასიათისა და ეძღვნება გრავიტაციული კაშხლების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის საანგარიშო მეთოდების მოკლე აღწერას. კერძოდ, განხილულია:

- 1) *კლასიკური ანალიზური მეთოდები* – მასალათა გამძლების მეთოდი (მისი სხვა დასახელებებია: ელემენტარული მეთოდი, გრავიტაციული მეთოდი) და დრეკადობის თეორიის მეთოდი. აღნიშნულია, რომ მათი საიმედობისა და სიმარტივის მიუხედავად, მათ არ შეუძლიათ გაითვალისწინონ ფუძის გავლენა კაშხლის ტანში დაძაბულ დეფორმირებულ მდგომარეობაზე.
- 2) *საკონტაქტო ამოცანები* – კოჭური და ნახევრადანალიზური მეთოდები. კოჭური მეთოდი, რომელიც მიეკუთვნება ე.წ. საკონტაქტო ამოცანების კლასს, გარკვეულწილად ასწორებს ზემოდაღნიშნულ ხარვეზს და იძლევა შესაძლებლობას განისაზღვროს გადაადგილებები, დეფორმაციები და ძაბვები კაშხლისა და კლდოვანი ფუძის საკონტაქტო ზედაპირზე. ნახევრადანალიზური

მეთოდის არსი მდგომარეობს იმაში, რომ საანგარიშო სქემიდან “კაშხალი-ფუქე” ვარდება ფუქე და მისი გავლენა კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე იცვლება გარკვეული კანონით განაწილებული ძაბვებით, რომლებიც კაშხლის ძირში მიიღება როგორც სასაზღვრო პირობები და ნაგებობა იანგარიშება სასრული ელემენტების მეთოდით. ამოცანა ორ ეტაპად იხსნება. პირველ ეტაპზე კოჭური მეთოდით იანგარიშება ნორმალური ძაბვები საკონტაქტო ზედაპირზე, ხოლო მეორე ეტაპზე იანგარიშება უშუალოდ კაშხალი სასრული ელემენტების მეთოდით.

3) *სასრული ელემენტების მეთოდი* – მოყვანილია გრავიტაციული კაშხლების სიმტკიცეზე ანგარიში ჰორიზონტალური შრეებით თანდათანობითი აგების გათვალისწინებით (ა. მოწონელიძე, მ. ყალაბეგიშვილი). მითითებულია, რომ სასრული ელემენტების მეთოდის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანისი უპირატესობა გამოიხატება იმაში, რომ იტერაციული ციკლების საშუალებით შესაძლებელია მასალების მექანიკური მახასიათებლების ცვლილებების გათვალისწინება დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობის მიხედვით. ფაქტიურად, ამ შემთხვევაში, საანგარიშო სისტემა განიხილება როგორც არაწრფივი დრეკადი არე. სემ-ის ამ უპირატესობაზე დაყრდნობით შესაძლებელია კაშხალი გაანგარიშებული იქნას მისი თანდათანობითი, ჰორიზონტალურ შრეებად აგების, ანუ მშენებლობის გრაფიკის და პროცესის მხედველობაში მიღებით. ანგარიშებისადმი ასეთი მიდგომა საშუალებას იძლევა გათვალისწინებული იქნას აგების რეალური პროცესი და მისი გავლენა დასრულებული კაშხლის ჩამოყალიბებულ დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე. გარდა ამისა, ეს მიდგომა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია დატკეპნილბეტონიანი კაშხლების გაანგარიშებისას, რადგან ის სრულად შეესაბამება ამ ტიპის კაშხლების ფენობრივ დატკეპვნის სქემას.

4) *მდგრადობისა და სიმტკიცის ანგარიში კატასტროფების თეორიის მეთოდით* - ტრადიციული, დეტერმინისტული მიდგომის თანახმად, იმისათვის, რომ ნაგებობებში დავინახოთ მიმდინარე პროცესები, საჭიროა პირველი ან მეორე რიგის დიფერენციალური განტოლებების სისტემების ამოხსნა. მიუხედავად ამისა, დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ცვლილებების დინამიკური პროცესები ხშირად ნახტომისებურად ვითარდება. ნახტომები კი ხდება ერთი

თვისობრივი მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლის დროს. მაგალითად, კაშხლის მდგრადი მდგომარეობიდან მდგრადობის დაკარგვა, სტაბილური დაძაბული მდგომარეობიდან რღვევის ფაზაში გადასვლა და ა.შ. თვისობრივი მდგომარეობის ამ უეცარ ცვლილებებს კარგად აღწერს მათემატიკური მოდელირების ერთ-ერთი საინტერესო ფორმა – კატასტროფების თეორია. მოყვანილია კონკრეტული მაგალითი - გრავიტაციული კაშხლის მდგრადობის ნახტომისებური დაკარგვის ანგარიში ჰიდროსტატიკური დაწნევისა და სეისმური ზემოქმედების შემთხვევაში (ა.მწონელიძე, პ. ჯოხაძე).

მეორე თავი ეძღვნება არსებული ბეტონის კაშხლების კომპლექსური რეტროსპექტული ანგარიშის მეთოდებს. არსებული და დიდი ხნის ექსპლუატაციაში მყოფი ბეტონის კაშხლების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ანგარიშის დროს მხედველობაში უნდა იქნას მიღებული მისი ექსპლოატაციის ისტორია.

შემოთავაზებული მეთოდის შედგება შემდეგი ეტაპებისგან:

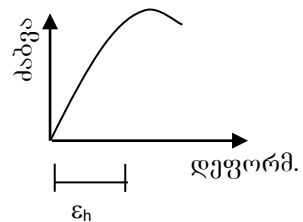
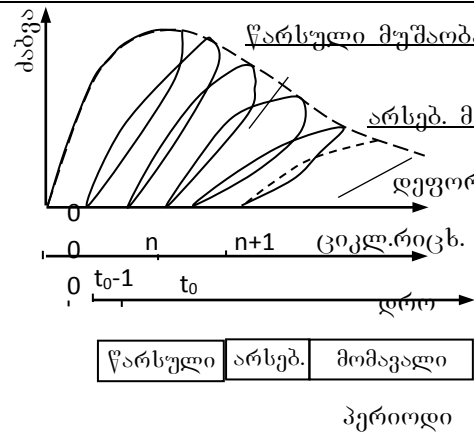
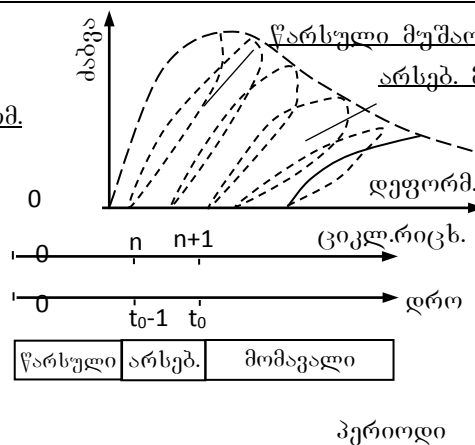
- ა) ბეტონის არაწრფივი დრეკადი რღვევის განმსაზღვრელი მოდელის შერჩევა ბრტყელი დეფორმაციის პირობებისათვის;
- ბ) საკონტაქტო ზონის განმსაზღვრელი მოდელის შერჩევა;
- გ) კაშხლის არსებული მდგომარეობის ანგარიში რეტროსპექტული ანალიზის შედეგად ნაგებობისა და მასალის მოდიფიცირებული მოდელის გათვალისწინებით (მაგ. ბზარის გაჩენა);

მეთოდის რეალიზების თანმიმდევრობა მოცემულია ცხრილ 2.1 – ში. გრავიტაციული კაშხლის მუშაობის შეფასება უნდა მოხდეს ბრტყელ დეფორმაციათა ამოცანების ფარგლებში.

ჩვენს მიერ წარმოდგენილი კაშხლის კონსტიტუციური მოდელი ეყრდნობა ჰიპოდრეკად (არაწრფივი დრეკადი რღვევა) ფორმულირებას. ეს მოდელი კარგად აღწერს მიმდევრობითად შეუქცევად ძაბვა-დეფორმაციის დამოკიდებულებას.

ამ მიდგომის მთავარი უპირატესობა გამოიხატება იმაში, რომ ის მარტივად მიესადაგება რიცხვით ანალიზს და ანალიზისთვის აუცილებელი მონაცემები თავისუფლად შეიძლება მივიღოთ ბეტონის ნიმუშის ერთდერძა კუმშვაზე გამოცდიდან. აღნიშნულ მოდელს შეუძლია გაითვალისწინოს ძაბვა-დეფორმაციების დამოკიდებულება პიკურ ძაბვებამდეც კი, ანუ გაითვალისწინოს პლასტიკური

ცხრილი 2.1 მეთოდის რეალიზების თანმიმდევრობა

დეფორმაციის სახეობა	რეტროსპექტული ანალიზი	არსებული მდგომარეობის ანალიზი
ბეტონი ბრტყელი დეფორმაციის პირობებში	<p>1. ეტაპი R-1⁽¹⁾</p> <p>საწყისი მონაც.: ბეტონის და ინტერფეისების სიხისტე და სიმტკიცე</p> <p>ანალიზის მეთოდი: ბეტონის არაწრფ. დრეკადი რღვევის მოდელი. რღვევის მოდელი ინტერფეისისათვის</p>  <p>შედეგი: კაშხლის საწყისი დღმ - $(\sigma, \epsilon)_{Initial}$.</p>	<p>5. ეტაპი P-2⁽²⁾</p> <p>საწყისი მონაც.: ბეტონის მოდიფიცირებული სიხისტე და სიმტკიცე (ეტაპიდან R-4); კაშხლის მოდიფიცირებული დღმ - $(\sigma, \epsilon)_{Modified}$ (ეტაპიდან P-1).</p> <p>შედეგი: ბეტონის მოდიფიცირებული სიხისტე და სიმტკიცე; კაშხლის მოდიფიცირებული დღმ - $(\sigma, \epsilon)_{Modified}$.</p>
	 <p>ანალიზის ეტაპი</p>	 <p>ანალიზის ეტაპი</p>
<p>⁽¹⁾ R = რეტროსპექტული ანალიზი; ⁽²⁾ P = არსებული მდგომარეობის ანალიზი;</p>		

მოცულობითი ზრდა კუმშვის დროს (დილატანსია), რომელიც დამახასიათებელია ბეტონისთვის რღვევის წინა ეტაპზე.

კონსტიტუციური მოდელი იყენებს ბეტონის რღვევის კრიტერიუმებს ბრტყელი დეფორმაციების და ბრტყელი დაძაბული მდგომარეობის ამოცანებისთვის.

შემოთავაზებული მოდელი ბეტონის ორღერძოვან დაბვა-დეფორმაციების დამოკიდებულებას ერთღერძა დაბვა-დეფორმაციების დამოკიდებულებების საშუალებით. ამ მიდგომის მიხედვით დეფორმაციის ნაზრდის სიდიდე თითოეული მთავარი მიმართულებისათვის იანგარიშება მთავარი დაბვის ნაზრდის მიხედვით იმავე მიმართულებით.

თუ გავითვალისწინებთ იმას, რომ ბრტყელი დეფორმაციის პირობებში ბეტონის გამოცდის მონაცემები პრაქტიკურად არ არსებობს, ზოგიერთი იყენებს ბეტონის სამღერძა გამოცდის მონაცემებს და დაჰყავს ის ორღერძა კუმშვაზე. ჩვენ ვიყენებთ რღვევის ოთხპარამეტრიან კრიტერიუმს, რომელიც შემდეგნაირად გამოისახება:

$$a \frac{J_{2p}}{\sigma_c^2} - b \frac{\sqrt{J_{2p}}}{\sigma_c} - c \frac{\sigma_{1p}}{\sigma_c} - d \frac{I_{1p}}{\sigma_c} - 1 = 0 \quad (2.1)$$

სადაც

$$I_{1p} = \sigma_{1p} + \sigma_{2p} + \sigma_{3p} \quad (2.2)$$

$$J_{2p} = \frac{1}{6} \left[(\sigma_{1p} - \sigma_{2p})^2 + (\sigma_{2p} - \sigma_{3p})^2 + (\sigma_{3p} - \sigma_{1p})^2 \right] \quad (2.3)$$

ამ გამოსახულებებში $\sigma_{1p} \geq \sigma_{2p} \geq \sigma_{3p}$ არიან პიკური მდგომარეობის შესაბამისი მთავარი დაბვები, σ_c - ბეტონის ერთღერძა სიმტკიცე კუმშვაზე და a, b, c, d პარამეტრები, რომლებიც განისაზღვრებიან ექსპერიმენტალურად.

არაწრფივობის ინდექსი, რომელიც ზემოდ არის აღწერილი, მიყვანილია მოცულობითი ამოცანების კლასებისთვის შემდეგი ფორმით:

$$\beta = \frac{\sigma_i}{\sigma_{ip}} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2.4)$$

სადაც σ_p ($i=1,2,3$) არის პიკური ძაბვის ვექტორის შესაბამისი კომპონენტები. ზოგადი დამოკიდებულება მკვეთი ძაბვა-დეფორმაციების დამოკიდებულებების ტრანსვერსალურად იზოტროპული (ორთოტროპული) მასალებისათვის მოავარ ძაბვებში ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I & -\nu_2 & -\nu_1 \\ E_1 & E_2 & E_1 \\ -\nu_2 & I & -\nu_2 \\ E_2 & E_2 & E_2 \\ -\nu_1 & -\nu_2 & I \\ E_1 & E_2 & E_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

ბრტყელი დეფორმაციების ამოცანებისთვის ამ გამოსახულებაში $\varepsilon_3=0$. ამ შემთხვევაში (2.5) განტოლების დიფერენციალური ფორმა აღწერს მსებ ძაბვა-დეფორმაციების დამოკიდებულებას ბრტყელი დეფორმაციებისთვის. ამ შემთხვევაში ჩაითვლება, რომ მასალის მექანიკური მახასიათებლები E_i და ν_i ($i=1,2$) ჩაინაცვლებიან შესაბამისი E_{ti} and ν_{ti} ($i=1,2$) მნიშვნელობებით. განტოლება (2.4)-დან განისაზღვრება σ_{ip}

$$\sigma_{ip} = \frac{\sigma_i}{\beta} \quad (i = 1,2,3) \quad (2.6)$$

თუ ჩავსვავთ (2.6) გამოსახულებას (2.1)-ში მივიღებთ:

$$a \frac{J_2}{\beta^2 \sigma_c^2} - b \frac{\sqrt{J_2}}{\beta \sigma_c} - c \frac{\sigma_1}{\beta \sigma_c} - d \frac{I_1}{\beta \sigma_c} - 1 = 0 \quad (2.7)$$

საიდანაც შეიძლება მივიღოთ შემდეგი გამოსახულება β -ს განსაზღვრისათვის:

$$\beta^2 + \frac{b\sqrt{J_2} + c\sigma_1 + dI_1}{\sigma_c} - a \frac{J_2}{\sigma_c^2} = 0 \quad (2.8)$$

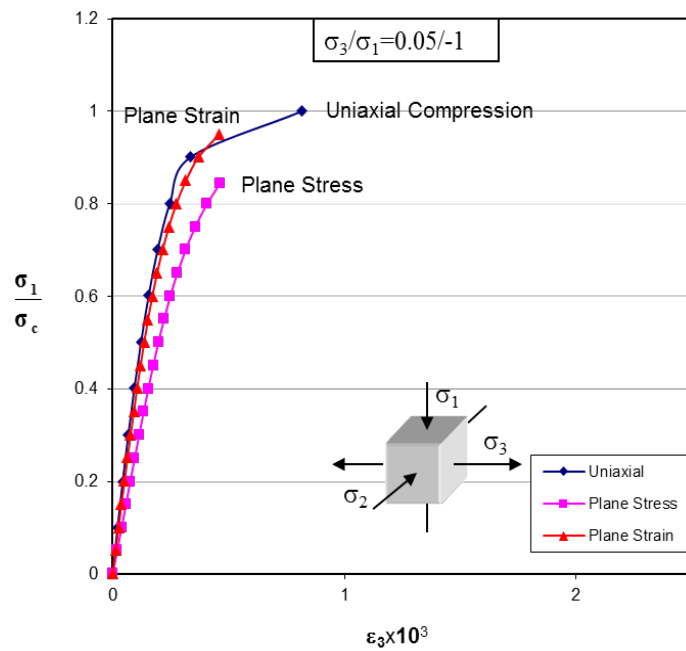
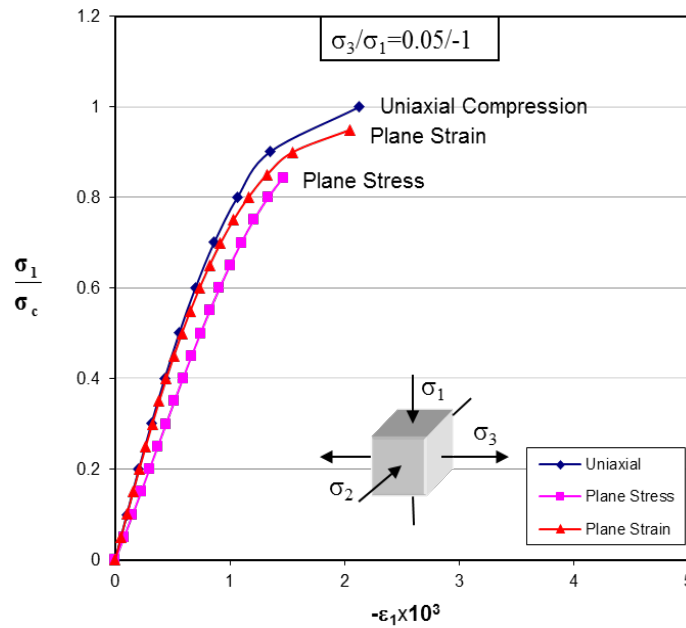
• ანალიზის შედეგები

ანალიზი დაიწყო ძაბვების კუმშვა-კუმშვის ფორმით, როდესაც $\alpha = \sigma_3/\sigma_1 = 0.05$. ამ შემთხვევაში ბეტონის ძაბვა-დეფორმაციის მრუდი ბრტყელი დეფორმაციის შემთხვევაში ძალიან ახლოსაა ერთღერძიან კუმშვის დიაგრამასთან, თუმცა

სიმტკიცე კუმშვაზე მნიშვნელოვნად იზრდება ბრტყელი დეფორმაციის შემთხვევაში, მაშინაც კი როდესაც α -ს მნიშვნელობა დაბალია. კერძოდ, სიმტკიცე კუმშვაზე თითქმის ორჯერ მეტია ერთდერძა კუმშვის შესაბამის სიმტკიცეზე კუმშვაზე. α -ს მნიშვნელობის გაზრდის შედეგად $\alpha=0.10$ და $\alpha=0.15$, სიდიდემდე სიმტკიცე კუმშვაზე მნიშვნელოვნად იზრდება. ანალიზის დროს ჩვენ უფრო მეტად არ გაგვიზრდია α -ს მნიშვნელობა, რადგან გრავიტაციული კაშხლებისთვის ის იმყოფება $0 - 0,2$ -ის ფარგლებში ($0.00 \leq \alpha \leq 0.20$).

უფრო მნიშვნელოვანი აღმოჩნდა გაჭიმვა-კუმშვის ფორმა, რადგან ასეთი ზონები შეიძლება გაჩნდეს გრავიტაციული კაშხლის სადაწნეო წახნაგზე. ნახ. 2.1 – დან ჩანს, რომ, როდესაც $\alpha=-0.05$, ბეტონის სიმტკიცე კუმშვაზე ბრტყელი დეფორმაციის პირობებში უფრო მაღალია, ვიდრე ბრტყელი დაძაბული მდგომარეობის დროს, თუმცა უფრო ნაკლებია ვიდრე ერთდერძა კუმშვის შემთხვევაში. შემდეგმა კვლევებმა აჩვენა, რომ ბეტონის სიმტკიცე კუმშვაზე ბრტყელი დეფორმაციის პირობებში მცირდება α -ს მნიშვნელობის გაზრდით. მაგალითად, როდესაც $\alpha=-0.10$, ბეტონის სიმტკიცე კუმშვაზე ბრტყელი დეფორმაციის პირობებში თითქმის ტოლია ანალოგიური სიდიდეზე ბრტყელი დაძაბული მდგომარეობის დროს. როდესაც $\alpha=-0.15$, ბეტონის სიმტკიცე კუმშვაზე ბრტყელი დეფორმაციის პირობებში ნაკლებია ანალოგიური სიდიდეზე ბრტყელი დაძაბული მდგომარეობის დროს.

ანალიზიდან გამომდინარე დგინდება, რომ ბრტყელი დეფორმაცია აუარესებს ბეტონის მუშაობას გაჭიმვა-კუმშვის ზონაში გრავიტაციული კაშხლის სადაწნეო წახნაგის სიახლოვეს, სადაც მოსალოდნელია გამჭიმავი ბზარების წარმოშობა და გავრცელება კაშხლის ტანში. აქედან გამომდინარე, აუცილებელია გრავიტაციული კაშხლების ანგარიში ბრტყელი დეფორმაციების პირობებში, რათა მოხდეს ბზარის შესაძლო წარმოშობის სწორი განსაზღვრა.



ნახ. 2.2 ერთღერძა კუმშვის, ბრტყელი დაძაბული და ბრტყელი დეფორმაციების პირობებში მიღებული შედეგების ურთიერთშედარება გაჭიმვა-კუმშვის ფარგლებში, როდესაც $\alpha = \sigma_3/\sigma_1 = -0.05$

კონსტიტუციური მოდელი ინტერფეისებისათვის (საკონტაქტო ზედაპირებისათვის). ფუძის გავლენას შესწავლას კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს, რადგანაც

ეს გაელენა ვრცელდება ფუძიდან კაშხლის სიმაღლის თითქმის ერთ მესამედზე. კლასიკურ სასრული ელემენტების ანგარიშში ფუძე და კაშხალი ერთიან საანგარიშო სისტემაში განიხილება. ეს მოდელი არც ისე ზუსტად აღწერს იმ პროცესებს, რომლებიც საკონტაქტო ზედაპირზე ხდება, ანუ არ ხდება საკონტაქტო ზედაპირზე ურთიერგადაადგილებების დაფიქსირება, რადგან ეს კონტაქტი ხისტად ჩამაგრებული სქემის ტოლფასია. ამ პრობლემის გადასაჭრელად საჭიროა დამოდელირდეს უშუალოდ ინტერფეისი. ამისათვის გამოიყენება სპეციალური საკონტაქტო ელემენტები, რომლებიც, ანალოგიური ელემენტები შეიძლება გამოყენებული იქნას არა მარტო კაშხლისა და ფუძის საკონტაქტო ზედაპირზე, არამედ კაშხლის ფენებს შორის კონტაქტის დასამოდელირებლად.

ზოგადად, ინტერფეისის მუშაობა მისი მოსახლვრე მასალების თვისებებზეა დამოკიდებული. ინტერფეისის მუშაობა არაწრფივია, ამიტომ აუცილებელია ისეთი მოდელის დამუშავება, რომელიც ამ არაწრფივობას აღწერს.

კონსტიტუციური დამოკიდებულება ინტერფეისებისათვის ეფუძნება ჰიპოდრეკად (არაწრფივი დრეკადი რღვევა) მოდელს. ამ მიდგომის საშუალებით შესაძლებელია ძვრის ცდებიდან მიღებული მხები ძაბვების – ფარდობითი გადაადგილებების მრუდის სიმუღირება პიკურ მხებ ძაბვებამდეც კი, რომლის დროსაც წარმოიშობა დილატანსიის ეფექტი კვანძებს შორის.

ინტერფეისის ელემენტების არაწრფივი დამოკიდებულება შეიძლება ჩაიწეროს დიფერენციალური ფორმით:

$$\begin{bmatrix} \partial \sigma_t \\ \partial \sigma_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_s^t & 0 \\ 0 & k_n^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial q_t \\ \partial q_n \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

სადაც k_s^t და k_n^t არის ინტერფეისის სიხისტის მატრიცის მძვრელი და ნორმალური კომპონენტები და მათი მნიშვნელობები ზოგადად დამოკიდებულია არსებულ ძაბვით მდგომარეობაზე.

ძვრის მოდული ძაბვითი მდგომარეობის ნებისმიერ საფეხურზე (τ, σ_n) ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$k_s^t = \frac{2k_s^s \left(\frac{k_s^s}{k_s^c} - A_I \right)}{A} \quad (2.10)$$

სადაც

$$k_s^s = k_s^c (A_1 + \sqrt{A_1^2 - \beta^2}) \quad (2.11)$$

$$k_s^c = \frac{k_s^0}{A} \quad (2.13)$$

$$A_1 = \frac{A - \beta(A - 2)}{2} \quad (2.14)$$

ამ განტოლებებში შემავალი მხები ძაბვის პარამეტრი β_τ ანალოგიურია არაწრფივობის β პარამეტრის და ის შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$\beta_\tau = \frac{\tau}{\tau_c} \quad (2.15)$$

სადაც τ_c არის ინტერფეისის სიმტკიცე ძვრაზე. მოდელის უცნობი სიდიდეები, რომლებიც უნდა განისაზღვრონ, არიან: ძვრის სიხისტის საწყისი კოეფიციენტი k_s^0 , ინტერფეისის სიმტკიცე ძვრაზე τ_c და უგანზომილებო პარამეტრიც A , რომელიც ერთმანეთთან აკავშირებს საწყის ძვრის სიხისტეს და ძვრის სიხისტის მკვეთ მნიშვნელობას რღვევის მომენტში. ყველა ეს პარამეტრი დამოკიდებულია ნორმალ ძაბვებზე და შეიძლება განზოგადდენ ინტერფეისში ნორმალური ძაბვების მნიშვნელობებთან შესაბამისობაში,

ნორმალური ძაბვა-დეფორმაციების დამოკიდებულება არაწრფივია. მიუხედავად ამისა, უშვებენ, რომ ეს დამოკიდებულება ზღვრულ მკუმშავ და გამჭიმავ რღვევებს შორის არის წრფივი, ე.ი. ნორმალური სიხისტე ითვლება მუდმივ სიდიდედ: $k_n = const.$ დაშვებულია, რომ ინტერფეისებს კაშხალსა და ფუქეს შორის, აგრეთვე კაშხლის დაგებულ ფენებს შორის, შეუძლია მიიღონ გარკვეული სიდიდის გამჭიმავი ძაბვები. მაგალითად, Upper Stillwater-ის დატკეპნილბეტონიანი გრავიტაციული კაშხალი დაპროექტებული იყო 1,24 მპა სიდიდის მინიმალურ სიმტკიცეზე გაჭიმვაზე ბეტონის ფენებს შორის.

გამჭიმავი ძაბვა გავლენას ახდენს ინტერფეისის წერტილების ურთიერთ ფარდობით გადაადგილებებზე, როდესაც სიმტკიცე გაჭიმვაზე ინტერფეისში

მიადწევს თავის ზღვრულ მნიშვნელობას, ე.ი. როდესაც $|\sigma_n| \geq |\sigma'_n|$. ამის შემდეგ ინტერფეისს აღარ შეუძლია წინააღმდეგობა გაუწიოს გამჭიმავ ძაბვებს და ის გაიხსნება, ე.ი. ძაბვები დაეცემა ნულამდე. ძვრაზე და ნორმალური სიხისტის კოეფიციენტების საწყისი მნიშვნელობები უახლოვდება ნულს. ძაბვები გადანაწილდება გაუხსნელ კონტაქტებში. იგივე პრინციპი ვრცელდება კუმშვის ზონებშიც.

ინტერფეისის ზემოდ აღწერილი მოდელის ბაზაზე მიღებული შედეგები შედარებული იქნა ნატურაში ძვრაზე ხიურუნის მიერ ჩატარებული ცდების შედეგებს (1981) ბეტონსა და კლდეს შორის. თეორიული და ექსპერიმენტული შედეგების შედარების შედეგად დადგინდა, რომ ამ ორ მრუდს შორის გარკვეული სხვაობა გამოწვეული იყო ინტერფეისში ძვრაზე სიმტკიცის თეორიულ და რეალურ სიდიდეებს შორის სხვაობით. მიუხედავად ამისა, შეიძლება დავასკვნათ, რომ (2.10 – 2.11) გამოსახულებები კარგად აღწერენ მხები ძაბვები-ფარდობითი გადაადგილებების რეალურ (ნატურალ) მრუდს. ანალიზის შემდეგ ეტაპებზე მოხდა თეორიული მრუდებისთვის A პარამეტრის ცვლადი მნიშვნელობების აღება.

გარკვეული სხვაობა თეორიულ და ექსპერიმენტულ მრუდებს შორის, რომელიც გამოწვეული იყო ძვრაზე სიმტკიცის თეორიულ და რეალურ სიდიდეებს შორის სხვაობით, დაფიქსირდა იმ შემთხვევისთვის, როდესაც $\sigma_n = 3.08$ კგ/სმ² და $\sigma_n = 8.01$ კგ/სმ², მაშინ, როდესაც საკმაოდ კარგი კორელაცია დაფიქსირდა იმ შემთხვევისთვის, როდესაც $\sigma_n = 11.89$ კგ/სმ².

როგორც გვიჩვენებს ბეტონის კაშხლებზე მრავალწლიანი ნატურული დაკვირვებების, ასევე ლაბორატორული ექსპერიმენტების შედეგები, ბეტონის ცოცვადობის თვისებას და დაღლილობას მნიშვნელოვანი გავლენა აქვს თვით ნაგებობის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე. იმისათვის, რომ საანგარიშო მეთოდის კაში გათვალისწინებული იქნას ბეტონის ცოცვადობის პროცესი, საჭიროა ვიცოდეთ საანგარიშო სისტემის (კაშხალი – ფუძე) საწყისი დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა და მასალის საწყისი მექანიკური მახასიათებლები. ანგარიშები ტარდება სამ ეტაპად: *ეტაპი 1* – იანგარიშება სისტემა “კაშხალი – ფუძის” საწყისი დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობა; *ეტაპი 2* – სისტემა “კაშხალი – ფუძე” იანგარიშება იმ პერიოდისთვის, როდესაც კაშხალის ბეტონის

სიმტკიცე მიღწევს თავის პიკურ მნიშვნელობას. ეს, უმრავლეს შემთხვევაში, ხდება ბეტონის ჩასხმიდან 8-10 წლის შემდეგ. მიღებულია, რომ ამ დროისათვის ბეტონში ცოცვადობის პროცესი დამთავრებულია. თუ კაშხლის ტანში წარმოიშობა ბზარები, საჭიროა ჩატარდეს ანგარიშები ბზარწარმოქმნისა და ცოცვადობის პროცესის მხედველობაში მიღებით; **ეტაპი 3** – იანგარიშება სისტემის არსებული (ან მომავალი) დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა. ბეტონის მექანიკური მახასიათებლები ზუსტდება დატვირთვა-განტვირთვის n ციკლების და ექსპლუატაციის t პერიოდის გათვალისწინებით. იმ შემთხვევაში თუ აღმოჩნდა ბზარები, მაშინ ჩაითვლება, რომ ცოცვადობის პროცესი გრძელდება ბზარის წვეროებში.

მესამე თავი ეძღვნება ნელი სტატიკური ციკლური დატვირთვებისა და ბეტონის ასაკის გავლენის შესწავლას გრავიტაციული კაშხლების დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე.

გარდა ძირითადი შეთანწყობისა და შესაძლო განსაკუთრებული შეთანწყობის ძალებისა, არსებული კაშხლების დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე შესამჩნევ გავლენას ახდენს ნაგებობის ასაკი და ჰიდროსტატიკური დაწნევის სიდიდის პერიოდული ცვლილება ნაგებობის ექსპლუატაციის ისტორიის განმავლობაში. ამ უკანასკნელში იგულისხმება წყალსაცავის რეგულირების გრაფიკი, რომლის მიხედვითაც წყალსაცავი გარკვეული პერიოდულობით ივსება და იცლება. ბუნებრივია ეს პრობლემა დგას მარეგულირებელი წყალსაცავების შემთხვევაში. ჰიდროსტატიკური დაწნევის ცვლილების გავლენა კაშხლების მუშაობაზე მით უფრო შესამჩნევია, რაც უფრო მაღალია კაშხალი.

ქვემოთ მოყვანილია ბრტყელი დეფორმაციის პირობებში ბეტონის განმსაზღვრელი მოდელის მოდიფიცირების სქემა, რომლის შედეგად შესაძლებელია გათვალისწინებული იქნას ნელი სტატიკური ციკლური დატვირთვების და ბეტონის ასაკის (ეიჯინგი) გავლენა გრავიტაციული კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე. ყურადღება ძირითადად გამახვილებულია ბეტონის მექანიკური მახასიათებლების მნიშვნელობების დამოკიდებულებაზე ზემოდ აღნიშნულ პროცესებზე.

ეს მიდგომა საშუალებას იძლევა მხედველობაში მივიღოთ ბეტონის სიმტკიცის შემცირების ეფექტი (დადლილობა) ციკლური დატვირთვების დროს, აგრეთვე

ასაკის ეფექტი ბეტონის სიმტკიცეზე. კონკრეტულად, ბეტონის სიმტკიცე ერთდერძა კუმშვის დროს σ_c 2.1 და მისგან გამომდინარე განტოლებებში შეიძლება შეიცვალოს ბეტონის სიმტკიცით, რომელიც მოდიფიცირებულია დატვირთვა-განტვირთვის n ციკლებისა და კაშხლის ექსპლუატაციის t პერიოდის გათვალისწინებით:

$$\sigma_c = \sigma_c(n, t) \quad (3.1)$$

ფარდობითი ε_c დეფორმაციის მნიშვნელობა, რომელიც შეესაბამება ბეტონის მაქსიმალურ ნორმალურ მკუმშავ ძაბვას, შეიძლება მოდიფიცირდეს დატვირთვა-განტვირთვის n ციკლებისა და კაშხლის ექსპლუატაციის პერიოდის t შესაბამისად:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_c(n, t) \quad (3.2)$$

ცნობილია აგრეთვე, რომ ციკლური დატვირთვა იწვევს ბეტონის სიხისტის შემცირებას. ამავე დროს, დროთა განმავლობაში დრეკადობის მოდული იზრდება. ეს ორი ეფექტი მიიღება მხედველობაში შემოთავაზებულ მიდგომაში ბეტონის საწყისი დრეკადობის მოდულის მოდიფიცირებით დატვირთვა-განტვირთვის n ციკლების კაშხლის ექსპლუატაციის პერიოდის t შესაბამისად:

$$E_0 = E_0(n, t) \quad (3.3)$$

ციკლური დატვირთვა იწვევს ნაგებობის მნიშვნელოვან არაწრფივ მუშაობას და მასალის მექანიკური მახასიათებლების საგრძნობ ცვლილებას. შედეგად ვღებულობთ იმას, რომ დატვირთვა-განტვირთვის (წყალსაცავის ავსება-წყალსაცავის დაცლა) ციკლების რიცხვის გაზრდის შედეგად საგრძნობლად მცირდება ბეტონის მექანიკური მახასიათებელი – დრეკადობის მოდული.

ვეყრდნობით იმ ემპირიკულ დამოკიდებულებებს, რომლებიც მიღებული იყო ექსპერიმენტული კვლევების შედეგად და გამოქვეყნებულია ოსიძისა და ხოფერიას მიერ (1987). ექსპერიმენტები ჩატარდა ენგურის თაღოვანი კაშხლიდან ამოღებულ ბეტონის ნიმუშებზე, რომლებიც პერიოდულად იტვირთებოდა და განიტვირთებოდა ნელი ციკლური მკუმშავი დატვირთვებით. ცდების შედეგების ინტერპოლირების შემდეგ შედგა ქვემოთ მოყვანილი დამოკიდებულებები, რომლებიც აღწერენ ბეტონის მახასიათებლების გაუარესების პროცესს დატვირთვა-განტვირთვის ციკლებთან დამოკიდებულებაში.

$$\begin{aligned}
\sigma_c(n) &= (1 - a_\sigma^n \lg n) \sigma_c \\
E_0(n) &= (1 - a_E^n \lg n) E_0 \\
\varepsilon_c(n) &= (1 - a_\varepsilon^n \lg n) \varepsilon_c
\end{aligned}
\tag{3.4}$$

სადაც a_σ^n, a_E^n და a_ε^n პარამეტრები აღწერენ ბეტონის მახასიათებლების გაუარესების პროცესს ციკლური დატვირთვების დროს. n არის დატვირთვა-განტვირთვის ციკლების რაოდენობა, რომელიც შეესაბამება კაშხლის ექსპლუატაციის პერიოდში წყალსაცავის აგება-დაცლის ციკლების რაოდენობას.

გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ ზემოდ მოყვანილი პარამეტრების მნიშვნელობები შეიძლება იცვლებოდეს გარკვეულ ფარგლებში ბეტონის სხვადასხვა კლასისათვის და მათი კონკრეტული მნიშვნელობები შეიძლება მიღებული იქნას მხოლოდ ბეტონის ნიმუშების ციკლურ დატვირთვებზე გამოცდის შედეგად. კონკრეტულად, ხსენებული პარამეტრების მნიშვნელობები იცვლება შემდეგ დიაპაზონებში:

$$\begin{aligned}
0,05 &\leq a_\sigma^n \leq 0,25 \\
0,10 &\leq a_E^n \leq 0,30 \\
0,10 &\leq a_\varepsilon^n \leq 0,30
\end{aligned}
\tag{3.5}$$

საინტერესოა აღინიშნოს, რომ მასალის პარამეტრების გაუარესების მაჩვენებელი და ბეტონის სიმტკიცე პირდაპირ დამოკიდებულია ძაბვით მდგომარეობაზე, ე.ი. ბეტონის ნიმუშის დატვირთვის სიდიდეზე. მაგალითად, ბეტონის ნიმუშის დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობა შემცირდა 51,5% -ით (39780-დან 19300 მპა-დე) 150 დატვირთვა-განტვირთვის ციკლის მოდების შემდეგ, როდესაც მოდებული ძალისგან გამოწვეული ძაბვა ტოლი იყო 0.2 σ_c -ის, სადაც σ_c არის ბეტონის სიმტკიცე ერთდერძა კუმშვის დროს.

როდესაც მოდებული ძალისგან გამოწვეული ძაბვა ტოლი იყო 0.5 σ_c -ის ბეტონის ნიმუშის დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობა შემცირდა 29,3% -ით (33390-დან 23620 მპა-დე) 150 დატვირთვა-განტვირთვის ციკლის მოდების შემდეგ და როდესაც მოდებული ძალისგან გამოწვეული ძაბვა ტოლი იყო 0.8 σ_c -ის ბეტონის ნიმუშის დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობა შემცირდა 20,9% -ით (28390-დან 22500 მპა-დე) იგივე რაოდენობის დატვირთვა-განტვირთვის ციკლის მოდების შემდეგ.

ნაშრომში გამოყენებულია ზემოდ მოყვანილი კოეფიციენტების გასაშუალოებული მნიშვნელობები, რომლების კარგად აღწერენ ნაგებობის რეალურ მუშაობას ციკლური დატვირთვების დროს.

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ მასალის მახასიათებლების და ბეტონის სიმტკიცის გაუარესების ხარისხი სტატიკური ციკლური დატვირთვების დროს დამოკიდებულია აგრეთვე გამოსაცდელი ბეტონის ნიმუშის ასაკზე. მაგალითად, 28 დღის ასაკის ბეტონის ნიმუშის დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობა შემცირდა 51,5%-ით (39780-დან 19300 მპა-დე) 150 დატვირთვა-განტვირთვის ციკლის მოდების შემდეგ და როდესაც მოდებული ძალისგან გამოწვეული ძაბვა ტოლი იყო 0.2 σ_c –ის. ამავე დროს, 365 დღის (1 წელიწადი) ასაკის ბეტონის ნიმუშის დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობა შემცირდა 49,0%-ით (39830-დან 21750 მპა-დე) 150 დატვირთვა-განტვირთვის ციკლის მოდების შემდეგ და როდესაც მოდებული ძალისგან გამოწვეული ძაბვა ტოლი იყო 0.2 σ_c –ის. 1825 დღის (5 წელიწადი) ასაკის ბეტონის ნიმუშის დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობა შემცირდა 42,0%-ით (42460-დან 20310 მპა-დე) იგივე რაოდენობის დატვირთვა-განტვირთვის ციკლის მოდების შემდეგ და როდესაც მოდებული ძალისგან გამოწვეული ძაბვა ტოლი იყო 0.2 σ_c –ის. ეს მონაცემები მიუთითებს სხვაობა არ არის მნიშვნელოვანი და პრაქტიკული მიზნებისათვის ეს შეიძლება იგნორირებული იყოს.

ანალოგიური მიდგომა იქნა გამოყენებული ბეტონის ასაკის გავლენის შესასწავლად გრავიტაციული კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე. ბეტონის მექანიკური მახასიათებლების დროში ცვლილების დასადგენად კვლავ გამოყენებული იქნა ლოგარითმული ფუნქცია. ეს დამოკიდებულებები შეიძლება შემდეგნაირად ჩაიწეროს:

$$\begin{aligned} \sigma_c(t) &= (1 + a'_\sigma \lg t) \sigma_c \\ E_0(t) &= (1 + a'_E \lg t) E_0 \\ \varepsilon_c(t) &= (1 + a'_\varepsilon \lg t) \varepsilon_c \end{aligned} \tag{3.6}$$

სადაც a'_σ, a'_E და a'_ε პარამეტრები აღწერენ ბეტონის მახასიათებლების ცვლილების პროცესს ბეტონის ასაკთან დამოკიდებულებაში. t არის წლების რაოდენობა, რომელიც შეესაბამება კაშხლის ექსპლუატაციის პერიოდს.

ზემოთ მოყვანილი პარამეტრების მნიშვნელობები შეიძლება იცვლებოდეს გარკვეულ ფარგლებში ბეტონის სხვადასხვა კლასისათვის და მათი კონკრეტული მნიშვნელობები შეიძლება მიღებული იქნას მხოლოდ არსებული ნაგებობიდან სხვადასხვა ასაკის ბეტონის ნიმუშების გამოცდის შედეგად. კონკრეტულად, ხსენებული პარამეტრების მნიშვნელობები იცვლება შემდეგ დიაპაზონებში:

$$\begin{aligned} 0,05 &\leq a'_\sigma \leq 0,15 \\ 0,05 &\leq a'_E \leq 0,15 \\ 0,05 &\leq a'_\epsilon \leq 0,10 \end{aligned} \quad (3.7)$$

კარგად ჩანს, რომ a'_σ, a'_E და a'_ϵ პარამეტრების მნიშვნელობები ზოგადად ნაკლებია a''_σ, a''_E და a''_ϵ - მნიშვნელობებზე. ეს მიუთითებს იმაზე, რომ ასაკის გავლენა ბეტონის ძაბვა-დეფორმაციების მრუდზე უფრო ნაკლებია, ვიდრე ციკლური დატვირთვების. მიუხედავად ამისა, აღსანიშნავია, რომ შესაძლებელია არსებობდეს ექსპლუატაციის წლების და ციკლების რაოდენობის სხვადასხვა კომბინაციები. მაგალითად, ექსპლუატაციის პერიოდში წყალსაცავი იცვლება და ივსება წელიწადში ერთხე, მაშინ ციკლების რაოდენობა ემთხვევა ექსპლუატაციის წლების რაოდენობას ($n=t$), მაგრამ, თუ ციკლი წელიწადში ორჯერ ხდება, მაშინ ციკლების რაოდენობა ექსპლუატაციის წლებზე ორჯერ მეტია ($n=2t$).

ბეტონის ზემოთ მოყვანილი მექანიკური მახასიათებლები შეყვანილია (2.1) განტოლებაში ციკლური დატვირთვებისა და ასაკის გავლენის შესასწავლად.

სტატიკური ციკლური დატვირთვების შედეგად ინტერფეისებში ძვრის სიმტკიცის ვარდნა შეიძლება გათვალისწინებული იქნას c შეჭიდულობის სიდიდის მოდიფიცირებით ძირითად გამოსახულებაში. ძვრის სიმტკიცის ვარდნა დატვირთვა-განტვირთვის n ციკლებთან დამოკიდებულებებში შეიძლება განისაზღვროს შემდეგი ემპირიკული დამოკიდებულებიდან:

$$\tau_c = c(1 - a''_r \lg n) + \sigma_n \tan \phi \quad (3.8)$$

სადაც:

a_τ^n - პარამეტრი, რომელიც აღწერს შეჭიდულობის სიდიდის ვარდნას სტატიკური ციკლური დატვირთების დროს;

ზემოდ ნახსენები კოეფიციენტები იცვლება შემდეგ ფარგლებში:

$$\begin{aligned} 0,10 &\leq a_\tau^n \leq 0,25 \\ 0,15 &\leq a_k^n \leq 0,30 \end{aligned} \quad (3.9)$$

ბეტონის ასაკი გათვალისწინებული იქნა ანალოგიური გზით. კერძოდ, ნულოვან ნორმალურ ძაბვასთან ასოცირებული საწყისი ძვრის სიხისტის სიდიდის ვარდნის განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით:

$$(k_s^0)^{\sigma_n=0} = (1 + a_k^t \lg t)(k_s^0)^{\sigma_n=0} \quad (3.10)$$

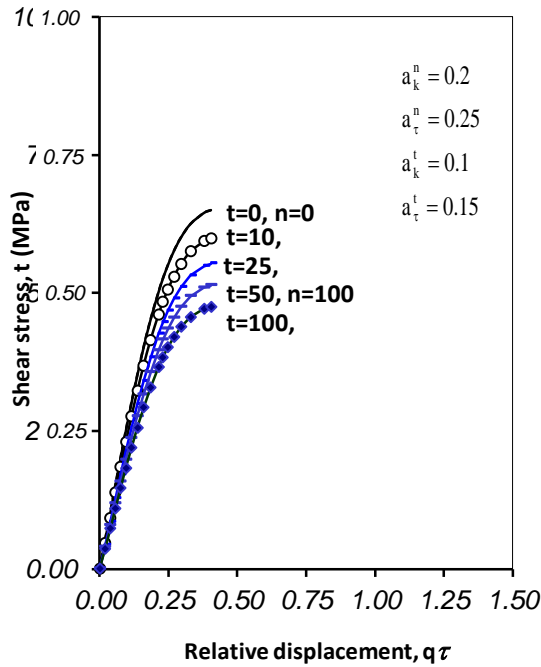
ინტერფეისებში ძვრის სიმტკიცეზე ასაკის გავლენა განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$\tau_c = c(1 + a_t^t \lg t) + \sigma_n \tan \phi \quad (3.11)$$

შესაბამისი კოეფიციენტების მნიშვნელობები იცვლება შემდეგ ფარგლებში:

$$\begin{aligned} 0,05 &\leq a_t^t \leq 0,15 \\ 0,10 &\leq a_k^t \leq 0,20 \end{aligned} \quad (3.12)$$

ანგარიშების ერთ-ერთი შედეგი მოცემულია ნახ. 3.1-ზე. ცხადად ჩანს, რომ ციკლური დატვირთვები იწვევენ საკონტაქტო კავშირების მასალის მახასიათებლების მნიშვნელოვან ვარდნას.

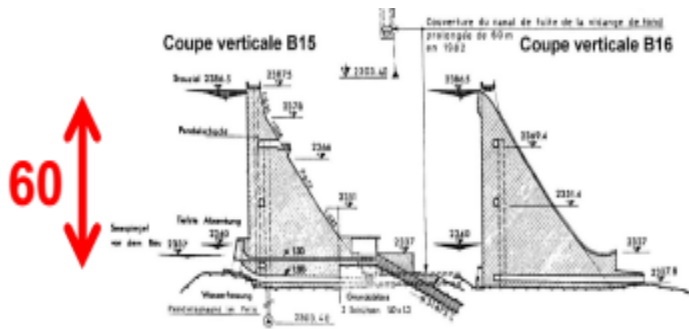


$Sr=3.08$
 kg/sm^2
 $c=3.1 kg/sm^2$
 $tan\phi=1.1$
 $kSO=230.0$
 kg/cm^3
 $a=10.0$

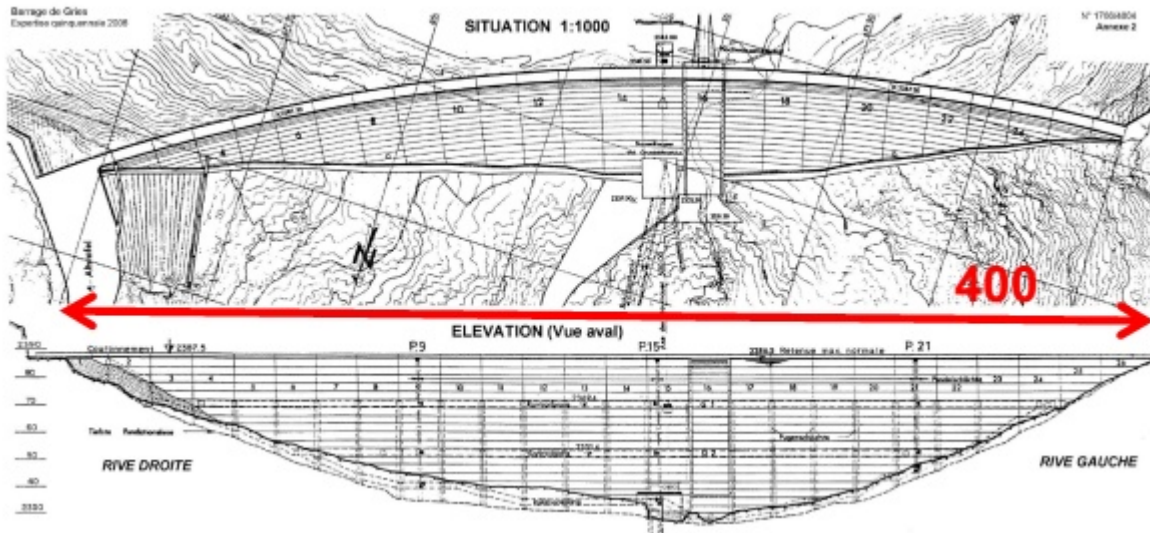
$$A = \frac{1}{3} \left(\frac{\sigma_n}{c + \sigma_n \tan \phi} \right)^2 + \frac{2}{3} \left(\frac{\sigma_n}{c + \sigma_n \tan \phi} \right) + \frac{4}{3}$$

ნახ. 3.1 ბეტონსა და კლდეს შორის ინტერფეისში მხები ძაბვა-ფარდობითი გადაადგილების მრუდები ცვალებადი A პარამეტრის შემთხვევებში n დატვირთვა-განტვირთვის ციკლების რაოდენობასთან და t ბეტონის ასაკთან კავშირში

მეოთხე თავში წარმოდგენილია ექსპლუატაციაში მყოფი გრესის (შვეიცარია) გრავიტაციული კაშხლის რეტროსპექტული ანგარიშის შედეგები წინა თავებში აღწერილი მიდგომით. კაშხალი მდებარეობს ობერგომის კანტონში (ნახ. 4.1 და 4.2). კაშხლის მშენებლობა დამთავრდა 1965 წელს და ის თითქმის 50 წელი ექსპლუატაციაშია.



ნახ. 4.1 გრესის კაშხლის და განივი ჭრილები



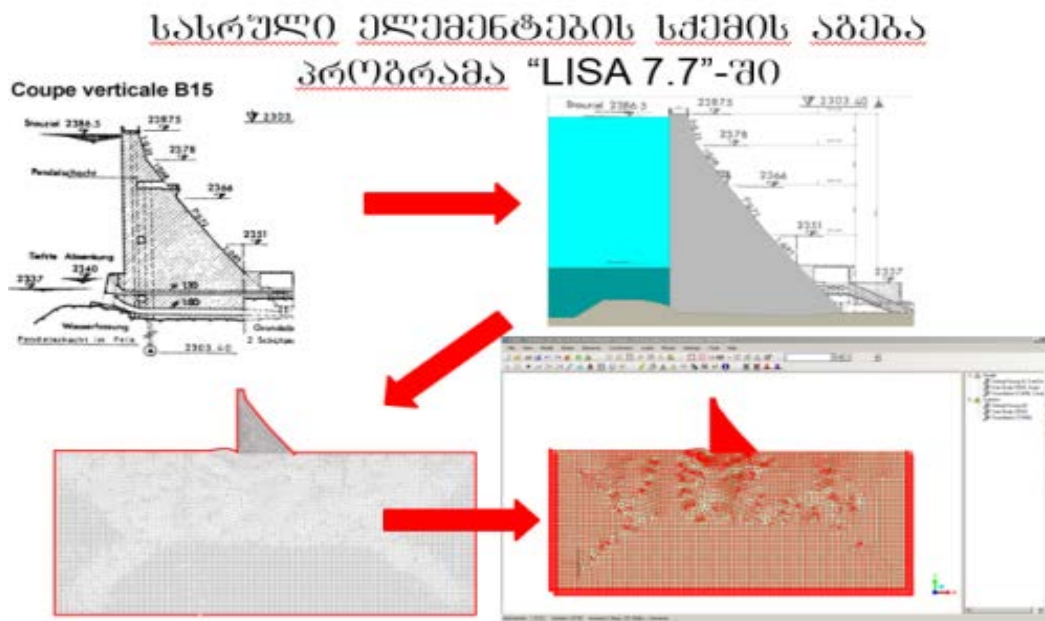
ნახ. 4.2 გრესის კაშხლის გეგმა და ხედი ქვედა ბიევიდან (ბლოკების ნუმერაციით)

კაშხლის სიმაღლეა 60 მ, თხემის სიგრძე - 400 მ, სიგანე 5 მ. კაშხლის სიგანე ფუძესთან დაახლოებით 50 მ-ია.

გრესის კაშხალი ქმნის სეზონური რეგულირების წყალსაცავს, რომლის სრული მოცულობა შეადგენს 18.6 მლნ. მ³, ხოლო სარკის ზედაპირის ფართობი – 0.5 კმ². წყალსაცავის აგება-დაცლა წელიწადში ერთხელ ხდება. ჩვენს ხელთ არსებული მონაცემების მიხედვით, აგება-დაცლის ციკლების რაოდენობა $n = 48$. კაშხლის ბეტონის საწყისი (საპროექტო) ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლებია:

დრეკადობის მოდული $E_s = 2,0 \cdot 10^4$ მპა, პუასონის კოეფიციენტი $\nu = 0,2$ და სიმკვრივე $\gamma = 2,55$ ტ/მ³.

დამუშავებულ მეთოდიკაზე დაყრდნობით სისტემა “გრეისის კაშხალი – ფუძე – წყალსაცავის” ანგარიში ჩატარდა პროგრამა LISA 7.7 და LISA 8.0.0. – ის გამოყენებით. საანგარიშო სქემაში სამკუთხა ელემენტების რაოდენობა არის 17022, ხოლო კვანძების – 8790. საანგარიშო სქემა მოცემულია ნახ. 4.3 – ზე.



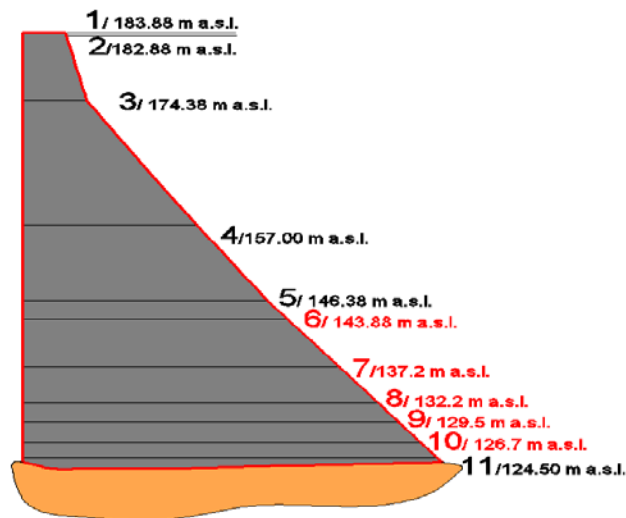
ნახ. 4.3 სისტემა “გრეისის კაშხალი – ფუძე – წყალსაცავის” საანგარიშო სქემა სასრული ელემენტების მეთოდით

ჩატარდა სისტემის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ანგარიში შემდეგი საანგარიშო შემთხვევებისათვის: დაანგარიშებულ იქნა შემდეგი შემთხვევები:

- სისტემაზე მოქმედებს მხოლოდ კაშხლის საკუთარი წონა;
- სისტემაზე მოქმედებს საკუთარი წონა და ჰიდროსტატიკური დატვირთვა კაშხლის სადაწნეო წახნაგზე;

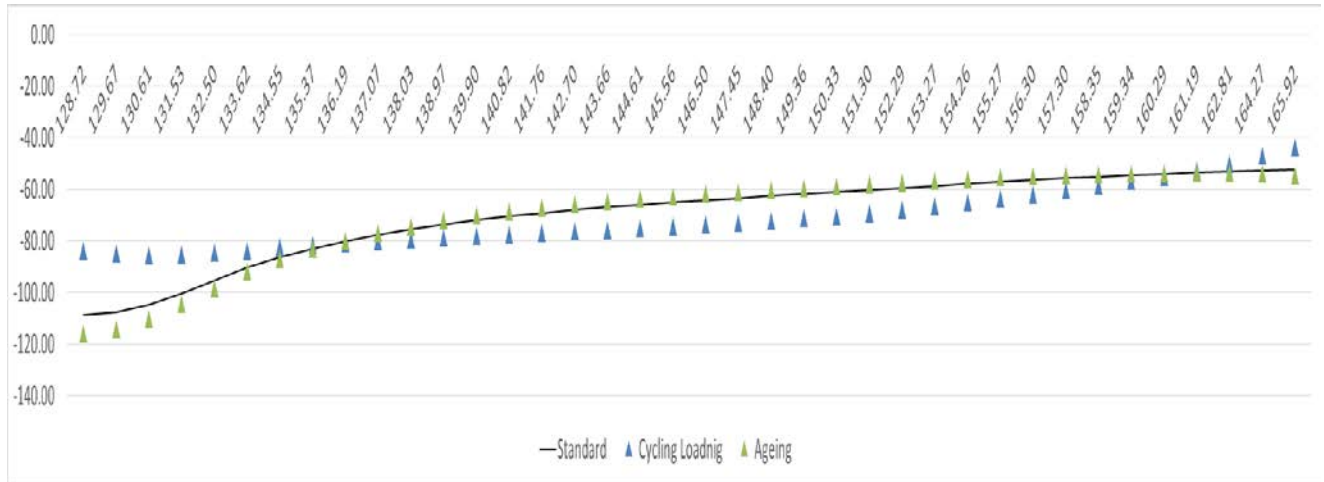
- სისტემაზე მოქმედებს საკუთარიწონა, ჰიდროსტატიკური დაწნევაკაშხალზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფუძეზე;
- სისტემაზე მოქმედებს საკუთარიწონა, ჰიდროსტატიკური დაწნევა კაშხალზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფუძეზე – ბეტონის ახალი მექანიკური მახასიათებელით (დრეკადობის მოდული), რომელიც ითვალისწინებს ციკლური დატვირთვების გავლენას ბეტონის თვისებებზე;
- სისტემაზე მოქმედებს საკუთარიწონა, ჰიდროსტატიკური დაწნევა კაშხალზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფუძეზე – ბეტონის ახალი მექანიკური მახასიათებელით (დრეკადობის მოდული), რომელიც ითვალისწინებს ასაკის გავლენას ბეტონის თვისებებზე;

ნახ. 4.4 – ზე მოყვანილია ის ჰორიზონტალური კვეთები, რომლებშიც გაანალიზდა კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა.

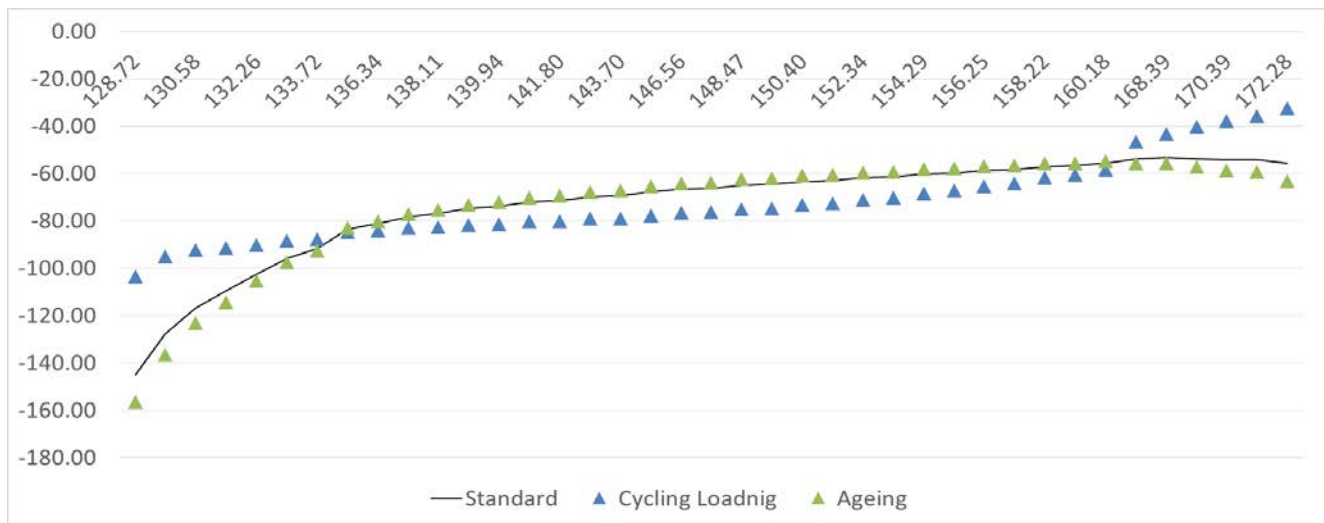


ნახ. 4.4 ჰორიზონტალური კვეთები, რომლებშიც გაანალიზდა კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა

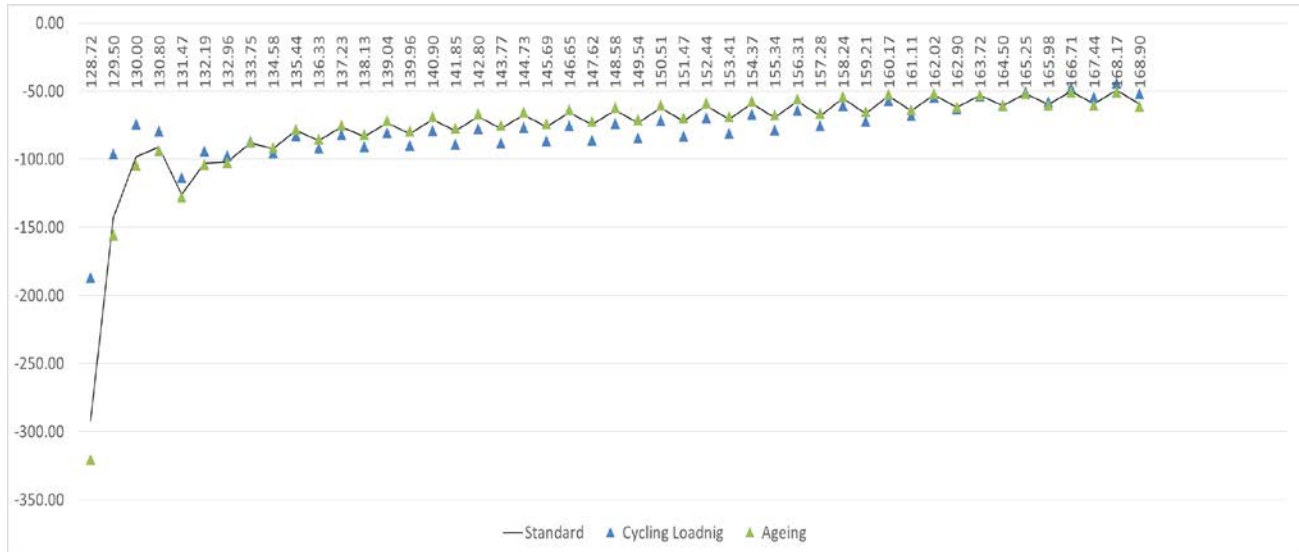
ნახ. 4.5, ნახ. 4.6 და 4.7 – ზე მოცემულია კაშხლისა ქვედა სამ ჰორიზონტალურ კვეთში σ_y ვერტიკალური ნორმალური ძაბვების განაწილების ეპიურები ურთიერთ შედარების მიზნით.



ნახ. 4.5 კაშხლის მე-9 პორიზონტალურ კვეთში σ_y ვერტიკალური ნორმალური ძაბვების განაწილების ეპიურები: უწყვეტი ხაზი – საპროექტო (საწყისი) ვარიანტი, ცისფერი სამკუთხედი – 48 ციკლური დატვირთვის გათვალისწინებით, მწვანე სამკუთხედი – ბეტონის 48-წლიანი ასაკის გათვალისწინებით.



ნახ. 4.6 კაშხლის მე-10 პორიზონტალურ კვეთში σ_y ვერტიკალური ნორმალური ძაბვების განაწილების ეპიურები: უწყვეტი ხაზი – საპროექტო (საწყისი) ვარიანტი, ცისფერი სამკუთხედი – 48 ციკლური დატვირთვის გათვალისწინებით, მწვანე სამკუთხედი – ბეტონის 48-წლიანი ასაკის გათვალისწინებით.



ნახ. 4.6 კაშხლის მე-11 ჰორიზონტალურ კვეთში (ინტერფეისში) σ_y ვერტიკალური ნორმალური ძაბვების განაწილების ეპიურები: უწყვეტი ხაზი – საპროექტო (საწყისი) ვარიანტი, ცისფერი სამკუთხედი – 48 ციკლური დატვირთვის გათვალისწინებით, მწვანე სამკუთხედი – ბეტონის 48-წლიანი ასაკის გათვალისწინებით.

ანგარიშების შედეგად დაფიქსირდა საკმაოდ დიდი სხვაობა ძაბვების მნიშვნელობებში შემდეგი ორი: ფუძეზე წყალსაცავის ვერტიკალური დაწნევის გათვალისწინებისა და არგაითვალისწინების შემთხვევებში. გარდა ამისა, გამოიკვეთა ნელი სტატიკური ციკლებისა და ასაკის მნიშვნელოვანი გავლენა კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე, განსაკუთრებით კაშხლის ქვედა მესამედში, რაც მიუთითებს იმაზე, რომ არსებული, ექსპლუატაციაში მყოფი, კაშხლების ანგარიში აუცილებლად უნდა ჩატარდეს ამ ორი ფაქტორის გათვალისწინებით. ეს იძლევა მათი საექსპლუატაციო რეზერვების დადგენის საშუალებას.

დასკვნები

1. დაზუსტდა არსებული და დიდი ხნის განმავლობაში ექსპლუატაციაში მყოფი გრავიტაციული კაშხლების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის საანგარიშო მეთოდის წყალსაცავის რეგულირებისგან გამოწვეული ცვლადი

ჰიდროსტატიკური დაწნევის (სტატიკური ციკლური დატვირთვა) გათვალისწინებით;

2. დამაშავდა ბრტყელი დეფორმაციის პირობებში ბეტონის განმსაზღვრელი მოდელის მოდიფიცირების სქემა, რომლის გამოყენებით შესაძლებელია გათვალისწინებული იქნას ნელი სტატიკური ციკლური დატვირთვების და ბეტონის ასაკის (ეიჯინგი) გავლენა გრავიტაციული კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე;
3. უფრო დეტალურად დამუშავდა ექსპლუატაციაში მყოფი გრავიტაციული კაშხლების სიმტკიცის ანალიზის მეთოდოლოგია ბეტონის ასაკის გათვალისწინებით;
4. დამუშავდა დიდი ხნის განმავლობაში ექსპლუატაციაში მყოფი გრავიტაციული კაშხლების და ფუძის საკონტაქტო ზედაპირის (ინტერფეისი) დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის საანგარიშო მეთოდოლოგია წყალსაცავის რეგულირებისგან გამოწვეული ცვლადი ჰიდროსტატიკური დაწნევის (სტატიკური ციკლური დატვირთვა) გათვალისწინებით;
5. დამუშავდა ექსპლუატაციაში მყოფი გრავიტაციული კაშხლების და ფუძის საკონტაქტო ზედაპირის (ინტერფეისი) სიმტკიცის ანალიზის მეთოდოლოგია ბეტონის ასაკის გათვალისწინებით;
6. სასრული ელემენტების მეთოდით სისტემა “კაშხალი – ფუძე” –ს საანგარიშო სქემაში გათვალისწინებულია ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფუძეზე;
7. დამუშავებულ მეთოდოლოგიით ჩატარდა სისტემა “გრეისის კაშხალი – ფუძე – წყალსაცავის” დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ანგარიში პროგრამა LISA 7.7 და LISA 8.0.0. – ის გამოყენებით.
8. კონკრეტული ობიექტის ანგარიშებმა აჩვენა ბეტონის ასაკის და ნელი სტატიკური დაწნევის მნიშვნელოვანი გავლენა კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობაზე;
9. ანგარიშებმა აჩვენა წყალსაცავის ფსკერზე ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დატვირთვის მნიშვნელოვანი გავლენა კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობაზე.

დისერტაციის ძირითადი შინაარსი გამოქვეყნებულია შემდეგ შრომებში:

1. Motsonelidze, A., Galdava, L. Effect of Slow Static Cyclic Loading on the Strength of Gravity Dam, saqarTvelos teqnikuri universitetis Sromebi, #2(492), 2014, gv. 21-24
2. Motsonelidze, A., Galdava, L. Effect of Static Cyclic Loading and Ageing of Concrete on the Strength of Gravity Dam, Jurnal "energia" #.2(70), 2014, ISSN 1512-0120
3. გალდავა, ლ. ბეტონის გრავიტაციული კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა წყალსაცავის ფსკერზე ჰიდროსტატიკური დაწნევის გათვალისწინებით, saqarTvelos teqnikuri universitetis Sromebi, #2(492), 2014, gv. 21-24

Effect of Static Cyclic Loading and Ageing of Concrete on the Strength of Existing Gravity Dams

Abstract

A technique for complex static retrospective analysis of old concrete gravity dams is presented, in which an attempt is made to match as closely as possible the material model of a dam with its actual operation history. The proposed technique consists of: a) A hypoelastic (Nonlinear-Elastic Fracture) constitutive model for concrete in the Plane Strain condition; b) Constitutive model for interfaces; c) Cyclic-induced degradation of stiffness and strength for concrete (fatigue of concrete) and aging-induced change of stiffness and strength for concrete (aging of concrete); d) Analysis of the present state of the dam taking into account the modified material and structural (e.g. crack occurrence) model, obtained as a result of performing the retrospective analysis;

For the analysis of gravity dams, constitutive relationship for concrete subject to a plane strain condition is used. It is based on the hypoelastic (nonlinear-elastic fracture) formulation, which approximates a path-dependent irreversible stress-strain relationship. This constitutive model for concrete in plane strain condition is modified in order to take into account the effect of material fatigue under slow static cyclic loading and the effect of ageing of concrete. Particular emphasis is placed on material response, simulating a realistic behavior of a dam under actual operating conditions. This approach allows us to account for the effect of the degradation of concrete strength (fatigue) under cyclic loading and also for the effect of ageing of concrete. To this end, the value of uniaxial compressive strength of concrete σ_c in the constitutive model can be substituted by the

value of the strength of concrete which has been appropriately modified in accordance with the number of loading/unloading cycle n and the time-period of the operation of a dam t : $\sigma_c = \sigma_c(n, t)$.

Cycling loading exhibits significant nonlinear behavior and drastic changes in material properties of concrete. The result is a considerable degradation of material properties of concrete as the number of applied loading/unloading cycles increases. In the present work, the empirical relationships based on the experimental findings on cyclic behavior reported elsewhere (Osidze & Khoperia 1987) are adopted. Following the tests carried out on the concrete specimens of Enguri arch dam, which were subjected to slow static cyclic compressive loading, the following relationships were established to define the degradation of the material properties of concrete in relation to loading/unloading cycles:

$$\begin{aligned}\sigma_c(n) &= (1 - a_\sigma^n \lg n) \sigma_c \\ E_0(n) &= (1 - a_E^n \lg n) E_0 \\ \varepsilon_c(n) &= (1 - a_\varepsilon^n \lg n) \varepsilon_c\end{aligned}$$

where parameters a_σ^n , a_E^n and a_ε^n define the degradation of the material properties of concrete under slow static cyclic loading; and n is the number of loading/unloading cycles in accordance with the operation history of a gravity dam (it corresponds to the number of discharges/filling up cycles of the reservoir during the operation of the dam).

The specific values of these parameters may only be determined by carrying out cyclic tests on concrete specimens.

It is also interesting to note that, in general, the rate of degradation of material parameters and the strength of concrete under static cyclic loading primarily depends on the level of stresses (i.e. the level of loading imposed on the specimen). For example, in tests, the value of modulus of elasticity for a concrete specimen was found to have been reduced by 51.5% (from 39780 MPa to 19300 MPa) after applying 150 loading/unloading cycles when the level of applied stresses was equal to $0.2 \sigma_c$, where σ_c is the uniaxial compressive strength of concrete. When subjected to the same number of loading/unloading cycles (i.e. 150), with the level of applied stresses set equal to $0.5 \sigma_c$ and $0.8 \sigma_c$, the corresponding values of moduli of elasticity for the concrete specimen were found to have been reduced by 29.3% (from 33390 MPa to 23620 MPa), and 20.9% (from 28390 MPa to 22500 MPa), respectively (Osidze & Khoperia 1987). In the present work, average values of the above-defined coefficients (which seem to provide reasonable approximation of an actual behavior of concrete under cyclic loading) were adopted, although, it should be noted that, in general, it is,

indeed, possible to define the relationship between the parameters a_{σ}^n , a_E^n , a_{ε}^n and the level of stresses.

Another point, which needs a mention, is that the rate of degradation of material parameters and the strength of concrete under slow static cyclic loading also depends on the age of the test specimen. For example, the value of modulus of elasticity for a 28 days old concrete specimen was found to have been reduced by 51.5% (from 39780 MPa to 19300 MPa) after applying 150 loading/unloading cycles when the level of applied stresses was equal to $0.2\sigma_c$, while the value of modulus of elasticity for the corresponding 365 days (1 year) and 1825 days (five year) old concrete specimens (subjected to the same levels of applied stresses $0.2\sigma_c$) were found to have been reduced by 49.0% (from 39830 MPa to 21750 MPa) and 42.0% (from 42460 MPa to 20310 MPa), respectively, after applying the same number of loading/unloading cycles (i.e. 150) to each specimen. These figures, however, suggest that such differences are not practically significant and may reasonably be ignored.

The same approach can be used to describe the change in material properties of concrete due to ageing of the material.