

მშენებლობის ინჟინერია

მაღალი სიმტკიცის ბეტონის ღაბაბულ-დეფორმირებადი მდგომარეობის გამოკვლევა სამსახურატაციო პირობების გათვალისწინებით

თემურ თურმანიძე

e-mail: temur.turmanidze@bsu.edu.ge

ბათუმის შოთა რუსთაველის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

აბსტრაქტი: ნაშრომში ექსპერიმენტულ-თეორიული კვლევის საფუძველზე შეფასებულია მონო-ლითურ მშენებლობაში გამოყენებული მაღალი სიმტკიცის ბეტონის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა, შესწავლილია ბეტონის ძაბვებსა და დეფორმაციებს შორის დამოკიდებულება მისი სიმტკიცის, ასაკის, გამყარების პირობებსა და დატვირთვის სიჩქარის გათვალისწინებით. შემოთავაზებულია თვისობრივად ახალი ანალიზური დამოკიდებულებები საექსპლუატაციო პირობებში მოქმედი ძირითადი ფაქტორების გათვალისწინებით.

ჩატარებული ექსპერიმენტულ-თეორიული კვლევის შედეგებით დადგენილია, რომ მაღალი სიმტკიცის ბეტონისათვის მიღებული დამოკიდებულებები მნიშვნელოვნად არ განსხვავდება ჩვეულებრივი მძიმე ბეტონისათვის მიღებული შედეგებისაგან, ხოლო მსუბუქი ბეტონისათვის დამოკიდებულებები მნიშვნელოვნად განსხვავებულია. ამავე დროს, ერთნაირი ტემპერატურისა და ტენიანობის პირობებში გამყარებისას მაღალი სიმტკიცის ბეტონის ზღვრული დეფორმაცია იზრდება ბეტონის კლასის გადიდებით. გარემოს ტენიანობის შემცირებით, რომელშიც მყარდება ბეტონი, ზღვრული დეფორმაციის სიდიდე მცირდება.

აღნიშნული გამოკვლევების მნიშვნელოვანი შედეგი არის ის, რომ მაღალი სიმტკიცის ბეტონისა და რკინაბეტონის კონსტრუქციების ექსპლუატაციის დროს შესაძლებელია შევავსოთ დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ხარისხი და განვსაზღვროთ წინასწარ მოცემული დეფორმაციის შესაბამისი ძაბვა. აღნიშნული დამოკიდებულება მიყვანილია იმ სტადიამდე, რომ შესაძლებელია განხორციელდეს კონკრეტული საინჟინრო ამოცანების რეალიზაცია. მიღებული დამოკიდებულებების საფუძველზე შესაძლებელია გადაწყდეს შეზღუდული ამოცანა - განვსაზღვროთ წინასწარ მოცემული ძაბვის შესაბამისი დეფორმაცია. მიღებული დამოკიდებულებების პრაქტიკული მნიშვნელობის თვალსაჩინოების მიზნით განხილულია რიცხობრივი მაგალითი.

საკვანძო სიტყვები: მაღალი სიმტკიცის ბეტონი, ძაბვები და დეფორმაციები, დატვირთვის სიჩქარე, ბეტონის ასაკი, გამყარების პირობები.

ბოლო პერიოდში საინჟინრო საქმეში ხშირად გამოიყენება მაღალი კლასის ბეტონი, რომელთა ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების შეფასებისათვის ცალსახად მნიშვნელოვანია ბეტონის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის შესწავლა საექსპლუატაციო პირობებში მოქმედი ფაქტორების გათვალისწინებით. აღნიშნული სახის გამოკვლევები ჩვენს მიერ უკვე ჩატარებულია ჩვეულებრივი მძიმე ბეტონისა და მსუბუქი ბეტონისათვის, ხოლო თანამედროვე მშენებლობაში გამოყენებული მაღალი სიმტკიცის ბეტონისათვის საჭიროებს დამატებით შესწავლას. ამავე დროს, ახალი ეფექტური მასალებისა და კონსტრუქციების განვითარების მიუხედავად ბეტონი და რკინაბეტონი მშენებლობის პრაქტიკაში დამკვიდრდა როგორც ძირითადი კონსტრუქციული საშენი მასალა. შესაბამისად, ბეტონისა და რკინაბეტონის თვისებები უნდა

თეორეტიკული მოდელი

შეესაბამებოდა მშენებლობისა და ექსპლუატაციის პირობებს, რათა უზრუნველყოფილი იქნას კონსტრუქციის საიმედოობა და ხანგამძლეობა ისე, რომ სრულად იყოს გამოყენებული მათი შესაძლებლობები.

მაღალი სიმტკიცის ბეტონისა და რკინაბეტონის კონსტრუქციები ექსპლუატაციის დროს ხშირად მუშაობენ შეზღუდული დეფორმირების პირობებში. ამავე დროს სხვადასხვა გარემოს ტენიანობა, კონსტრუქციის ასაკი და დატვირთვის სიჩქარე.

გამოკვლევით ხასიათის ნაშრომებში და მოქმედ ნორმატიულ დოკუმენტებში არ არის დასრულებული რეკომენდაციები მაღალი კლასის ბეტონის (B 40 და მეტი) ფიზიკურ-მექანიკურ მახასიათებლებზე ზემოთ ჩამოთვლილი ფაქტორების ერთდროული გავლენის შესახებ, შესაბამისად ბეტონის ძაბვებსა და დეფორმაციებს შორის დამოკიდებულების შესწავლა რამდენიმე ფაქტორის გათვალისწინებით წარმოადგენს ბეტონისა და რკინაბეტონის თეორიის ერთ-ერთ აქტუალურ პრობლემას.

ბეტონისა და რკინაბეტონის კონსტრუქციების დატვირთვის ქვეშ მუშაობის კანონზომიერება განისაზღვრება მრავალი ფაქტორით. მათგან ყველაზე მნიშვნელოვანია: დატვირთვის სიჩქარე, ბეტონის ასაკი, ტენიანობის პირობები და გარემოს ტემპერატურა. ამიტომ, საექსპლუატაციო პირობებში ბეტონის დამატულ-დეფორმირებული მდგომარეობის შესაფასებლად საჭიროა დატვირთვის მთელ დიაპაზონზე $\varepsilon=0$ -დან ($\sigma=0$ -ის შესაბამისი) ε_{lim} -მდე ($\sigma=R$ -ის შესაბამისი) ცნობილი იყოს $\sigma(\varepsilon)$ დამოკიდებულება. ასეთი დამოკიდებულება ფარდობით სიდიდეებში გამოისახება შემდეგი სახით: [1-8, 15, 18]

$$\frac{\sigma}{R_0} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{lim}} \right)^c \quad (1)$$

გრაფიკულად აღნიშნული დამოკიდებულებები გამოისახება დეფორმაციის დიაგრამის მრუდებით, ხოლო ანალიზურად მეორე ან მესამე ხარისხის პარაბოლური ფუნქციებით. ნაშრომში [24] მსუბუქი ბეტონისათვის მოცემულია შემდეგი სახის ექსპერიმენტულ-თეორიული განზოგადოებული ფორმულა

$$\frac{\sigma}{R} = 1,48 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{lim}} - 0,64 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{lim}} \right)^2 + 0,16 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{lim}} \right)^3$$

რომელიც მართებულია $0 < \varepsilon < \varepsilon_{lim}$ საზღვრებში მსუბუქი ბეტონებისათვის დამახასიათებელ R -ის და ε_{lim} -ის ყველა მნიშვნელობისათვის.

მოცემული შემადგენლობის ბეტონის სიმტკიცის დამოკიდებულება აღნიშნული ფაქტორებისგან ჰაერის დადებითი ტემპერატურის დროს ზოგადი სახით შეიძლება გამოსახული იქნას ფორმულით [9-16, 18, 23]

$$R = \Phi(R_0, v, t, W) \quad (2)$$

სადაც R_0 მოცემული შემადგენლობის ბეტონის სიმტკიცეა სტანდარტულ პირობებში გამყარებისა და გამოცდის დროს. $v=v_0=0,25$ მკა/წმ $t=t_0=28$ დღე; $W=1,0$.

თუ ბეტონის R სიმტკიცე განსაზღვრულია ფაქტორების არასტანდარტული მნიშვნელობების დროს, არამედ ნებისმიერი, ოღონდ მათი ცნობილი სიდიდეებისას მაშინ (2)-დან

$$R_0 = R F(v, t, W) \quad (3)$$

ძირითადი (1) დამოკიდებულების გამოკვლევის პირველ საფეხურზე შესწავლილია (3) დამოკიდებულების აღწერი ფუნქცია, რისთვისაც მრავალფაქტორიანი ფუნქცია შეცვლილ იქნა ამ ცვლადების ერთ ფაქტორიანი ფუნქციების ნამრავლით ე. ი.

$$F(v, t, W) = f_1(v) \cdot f_2(t) \cdot f_3(W) \quad (4)$$

$f_1(u)$ დამოკიდებულება აღწერს ბეტონის R_V სიმტკიცეს დატვირთვის ნებისმიერი V სიჩქარის დროს. $f_1(u)$ -სათვის შეიძლება გამოგვეყენებინა დამოკიდებულება [25]

$$R_V = 0,1R_n \left(10 + \lg \frac{V}{V_n} \right) = R_n \left(1 + 0,1 \lg \frac{V}{V_n} \right)$$

ანალიზმა გვიჩვენა, რომ $\lg V/V_n$ -ის წინ ემპირიული კოეფიციენტი 0,1 მიღებულია ერთი და იგივე ყველა სახისა და კლასის ბეტონებისათვის. ამასთან $R_V(\lg V)$ დამოკიდებულების გრაფიკული ანალიზი გვიჩვენებს, რომ იგი განსხვავებულია მძიმე და მსუბუქი ბეტონებისათვის და დამოკიდებულია ბეტონის სიმტკიცეზე.

ბეტონის სიმტკიცის $f_2(t)$ დამოკიდებულება მის ასაკზე მიახლოებით აღიწერება კლასიკური ფორმულით

$$R_t = R_{28} \frac{\lg t}{\lg 28}$$

აღნიშნული ფორმულა იძლევა შედარებით დამაკმაყოფილებელ შედეგებს მძიმე ბეტონებისათვის W ფარდობითი ტენიანობის დროს, რომელიც ახლოა 1-თან. აღვნიშნოთ ბეტონის სიმტკიცის დროში ზრდის კოეფიციენტს β_t -თი მივიღებთ

$$\beta_t = \frac{R_t}{R_{28}} = \frac{\lg t}{\lg 28} \approx 0,7 \lg t$$

ეს დამოკიდებულება არ ითვალისწინებს ცემენტის სახეობასა და მის აქტივობას, ბეტონის დამზადების პირობებს აგრეთვე სხვა ფაქტორებს რადგან არ შეიცავს ბეტონის თვისებების დამახასიათებელ არც ერთ პარამეტრს. გარდა ამისა აღნიშნული დამოკიდებულების მიხედვით ბეტონის სიმტკიცე დროში იზრდება განუსაზღვრელად და მისი ზრდის სიჩქარე როცა $t > 0$ უსასრულოდ დიდია რადგან

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{d\beta_t}{dt} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{0,7 \ln 10}{t} = \infty$$

ბეტონის ევროპული კომიტეტის MC-90 მოდელების კოდექსის წინადადებების მიხედვით დროის მიხედვით ბეტონის სიმტკიცის ზრდის კოეფიციენტის განსაზღვრისათვის შემოთავაზებულია დამოკიდებულება

$$\beta_t = \exp \left[S \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right]$$

სადაც S კოეფიციენტია, რომელიც დამოკიდებულია ცემენტის სახეობაზე. სწრაფმყარებადი და მაღალი მარკის (RS) ცემენტებისათვის $S = 0,2$; ნორმალური და სწრაფმყარებადი (NuR) ცემენტისათვის $S = 0,25$; ნელა (SL) გამყარებადი ცემენტებისათვის $S = 0,33$. რეალურ პირობებში ბეტონის ტემპერატურულ-ტენიანი რეჟიმი სისტემატურად იცვლება, ამიტომ აღნიშნული დამოკიდებულება წარმოადგენს მრავალფაქტორიანს [1-7, 14, 17, 21-25].

ბეტონის სიმტკიცის ზრდის კინეტიკის საანგარიშო დამოკიდებულებები გარემოს ტენიანობისაგან არ არსებობს. მაგრამ ცნობილია, რომ რაც დაბალია W მით უფრო ნელა მიმდინარეობს ბეტონის სიმტკიცის ზრდა ჰაერზე მშრალ გარემოში. როცა $W < 0,5$ ბეტონის სიმტკიცე 28 დღის შემდეგ თითქმის არ იზრდება ცემენტის ჰიდრატაციის პროცესის შენელების ან მთლიანი შეწყვეტის გამო, ხოლო ზოგიერთ შემთხვევაში მცირდება შეკლების შინაგანი ძაბვების განვითარების გამო [26].

ნიმუშების ზომების გავლენა (მასშტაბის ფაქტორი) ნაშრომში არ განიხილება და ნიმუშის ზომები ყველა სერიაში ერთნაირია.

თეორეტიკული მოსაზრებები

$f_1(u)$ დამოკიდებულების განსაზღვრავად ექსპერიმენტული მონაცემების საფუძველზე ავსებთ $R(lgu)$ დამოკიდებულების სამუშაო გრაფიკები, რომლებშიც ბეტონის სიმტკიცე იცვლებოდა 9,5-დან 62 მპა-მდე, ხოლო დატვირთვის სიჩქარე 0,00025 მპა/წმ-დან ($lgu=-3,6$) 1330 მპა/წმ-მდე ($lgu=3,11$), ე. ი. პრაქტიკაში არსებულ საკმაოდ ფართო დიაპაზონისათვის [1, 14, 17]. ეს დამოკიდებულებები წრფივია, მაგრამ არ არიან პარალელურები. სხვადასხვა ნაშრომებში შემოთავაზებული 0,1 მუდმივი კოეფიციენტისაგან განსხვავებით გრაფიკების დახრის α კუთხე სხვადასხვაა [4-8, 12-18]. ბეტონის კლასის გადიდებისას იგი იზრდება. გრაფიკებზე ყველა შემადგენლობის ბეტონისათვის შეიძლება განისაზღვროს მისი სიმტკიცე R_0 , რომელიც შეესაბამება დატვირთვის სტანდარტულ სიჩქარეს $u_0=0,25$ მპა/წმ სიჩქარეს. იგი ტოლია ორდინატისა $lgu_0=-0,6$ აბსცისის დროს. ამ გრაფიკების ანალიზიდან შეიძლება დავწეროთ:

$$R = R_0 + (lgu - lgu_0)tg\alpha \quad (5)$$

$tg\alpha$ -ს მნიშვნელობა დამოკიდებულია R -ზე და lgu -ზე. ამისათვის სიჩქარის სამი მნიშვნელობისათვის ვაგებთ $lg(u/u_0)$ სიდიდეებში გამოსახულ სამ სხვადასხვა სამუშაო გრაფიკს $tg\alpha(R)$ [4,18]. ვღებულობთ სამ წრფეს დახრის სხვადასხვა β კუთხით, რომლის სიდიდე დამოკიდებულია $lg(u/u_0)$ -ზე. სამივე გრაფიკიდან განვსაზღვროთ $tg\beta = tg\alpha/R$ სიდიდე და ავსებთ $tg\beta(lg(u/u_0))$ დამოკიდებულების სამუშაო გრაფიკი სამი წერტილით, რომელიც შეესაბამება $lg(u/u_0)$ -ის სამ მნიშვნელობას მიღებული წრფე აღიწერება განტოლებით $tg\beta = A_1 - a_1 \cdot lg \frac{u}{u_0}$, მაშინ

$$tg\alpha = R(A_1 - a_1 \cdot lg \frac{u}{u_0}) \quad (6)$$

შევიტანოთ $tg\alpha$ -ს მნიშვნელობა (5) -ში მივიღებთ

$$R = \frac{R_0}{1 - (A_1 - a_1 \cdot lg \frac{u}{u_0}) \cdot lg \frac{u}{u_0}} \quad (7)$$

(4) ფორმულაში დარჩენილი $f_2(t)$ და $f_3(w)$ ფუნქციები ურთიერთდაკავშირებულია: ცნობილია, რომ ბეტონის სიმტკიცის ზრდის კინეტიკა დროში მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია გარემოს w ტენიანობაზე. ბეტონის დროში სიმტკიცის ზრდის კინეტიკის კომპლექსური დამოკიდებულება გარემოს w ტენიანობის რიცხობრივი მახასიათებლის გათვალისწინებით შერჩეულ იქნა ექსპერიმენტული მონაცემების ანალიზის საფუძველზე მაპრობირებელი ფუნქციის სახით [4-7, 18]

$$R_t = R_{28} \frac{(lgt)^{mw}}{lg28} \quad (8)$$

ამრიგად u , t და w არგუმენტებისათვის მივიღეთ შემდეგი ფუნქციები

$$f_1(u) = 1 - (A_1 - a_1 \cdot lg \frac{u}{u_0}) \cdot lg \frac{u}{u_0} \quad (9)$$

$$\varphi(t, w) = \frac{(lgt)^{mw}}{lg28} \quad (10)$$

საბოლოოდ (1) ფორმულაში შემავალი $R_0 = RF(u, t, w) = R f_1(u) \varphi(t, w)$ სიდიდე გაშლილი სახით გამოისახება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$R_0 = R \left[1 - (A_1 - a_1 \cdot lg \frac{u}{u_0}) \cdot lg \frac{u}{u_0} \right] \cdot \frac{(lgt)^{mw}}{lg28} \quad (11)$$

A_1 , a_1 და m კოეფიციენტები განისაზღვრება ექსპერიმენტული მონაცემების დამუშავების საფუძველზე $A_1=0,098$, $a_1=0,00535$, $m=1$.

ძირითადი (1) დამოკიდებულების გამოკვლევის მეორე ეტაპზე განხილული ექსპერიმენტული მონაცემებიდან ბეტონის რამდენიმე შემადგენლობისათვის ავსებთ $\sigma(\varepsilon)$ დამოკიდებულების სამუშაო გრაფიკები დატვირთვის სხვადასხვა სიჩქარის დროს [4, 18]. ამ ბეტონების მახასიათებლები და გამოცდის პირობები მოცემულია ცხრილი 1-ში.

ცხრილი 1.

შემადგენ- ლობის №	ექსპერიმენ- ტის №	R ₀ მპა	u მპა/წმ	R მპა	w	$\varepsilon_{lim} 10^{-5}$
1	1-1	58,8	1,55	62,0	0,85	280
	1-2	58,8	136,0	73,5	0,85	275
	1-3	58,8	980,0	78,0	0,85	275
2	2-1	44,3	0,29	44,0	0,85	240
	2-2	44,3	65,0	54,5	0,85	250
3	3-1	29,6	0,425	28,0	0,85	200
	3-2	29,6	128,0	36,0	0,85	190
4	4-1	20,5	0,00087	14,2	0,5	120
	4-2	20,5	0,036	15,0	0,5	115

ბეტონის დეფორმაციის მრუდები მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია დატვირთვის მოდების სიჩქარეზე, მაგრამ ზღვრული დეფორმაცია ε_{lim} პრაქტიკულად ერთნაირია R-ის ყველა მნიშვნელობისათვის, ე. ი. არ არის დამოკიდებული დატვირთვის u სიჩქარეზე. სიჩქარის ზრდისას ეს მუდმივი ε_{lim} სიდიდე მიიღწევა მაღალი დატვირთვის (მაბვის $\sigma=R$) დროს და პირიქით დატვირთვის სიჩქარის შემცირებისას მრღვევი დატვირთვა მცირდება, როგორც ჩანს უახლოვდება ბეტონის ხანგრძლივი სიმტკიცის სიდიდეს [1, 4, 5, 6, 7, 18]. ამასთან, რაც მეტია ერთნაირ ტენიან გარემოს პირობებში გამყარებული ბეტონის სიმტკიცე (მისი R₀ სიდიდით შეფასებული) მით მეტია ზღვრული ε_{lim} დეფორმაცია. გარემოს ტენიანობის შემცირებით, რომელშიც მყარდება ბეტონი ε_{lim} სიდიდე მცირდება. შესაბამისად ε_{lim} - ის დამოკიდებულებას ბეტონის სიმტკიცეზე ვეძებთ ε (R₀) ფუნქციის სახით, ცალ-ცალკე სხვადასხვა w-ს მნიშვნელობების ჯგუფებისათვის. ამ დამოკიდებულების აღმწერი მაპრობირებელი ფუნქციის სახის განსაზღვრისათვის არსებული ექსპერიმენტული მონაცემის საფუძველზე ავაგეთ სამუშაო გრაფიკები. ეს გრაფიკები წარმოადგენენ წრფეს და აღიწერებიან შემდეგი სახის განტოლებებით:

$$\varepsilon_{lim}=(A_2+a_2R_0)10^{-5} \quad (12)$$

როგორც აღვნიშნეთ ε_{lim} სიდიდე წარმოადგენს ორი არგუმენტის ფუნქციას

$$\varepsilon_{lim}=f(R_0,w) \quad (13)$$

ამ დამოკიდებულების მაპრობირებელი ფუნქციის სახე შესრულდა შემდეგი მეთოდით. (12) ფორმულით w -ს სამივე მნიშვნელობების შესაბამისი R₀-ისათვის (მიღებული A₂ და a₂ კოეფიციენტების მიახლოებითი მნიშვნელობების გამოყენებით) გამოვთვალეთ ფარდობა:

$$i = \frac{\varepsilon_{lim,w}}{\varepsilon_{lim,w=1}} \quad (14)$$

სადაც $\varepsilon_{lim,w}$ - ბეტონის ზღვრული დეფორმაციაა მოცემული w ტენიანობის დროს ხოლო $\varepsilon_{lim,w=1}$ როცა w=1 გამოთვლის შედეგები მოცემულია ცხრილში 2.

ცხრილი 2

R ₀ , მპა	w=0,5		w=0,85		w=1,0	
	$\varepsilon_{lim} 10^{-5}$	ε	$\varepsilon_{lim} 10^{-5}$	ε	$\varepsilon_{lim} 10^{-5}$	ε
20	115	0,435	185	0,70	264	1
40	157	0,48	240	0,73	328	1
60	200	0,51	294	0,75	392	1

თეორეტიკული მონაცემები

ცხრილის 2-ის მონაცემების საფუძველზე ვაგებთ $i(w)$ დამოკიდებულების გრაფიკებს [4, 18]. მიღებული მრუდებისათვის შერჩეულია ფუნქცია

$$i = 1 - k(1 - w)^{\alpha} \quad (15)$$

განვსაზღვროთ k კოეფიციენტისა და α ხარისხის მაჩვენებლის მნიშვნელობა. (15)-დან გვაქვს როცა $w=0$, $k=1-i_0$ სადაც i_0 i -ის მნიშვნელობაა $w=0$ დროს. k კოეფიციენტის მნიშვნელობა ყველა მრუდისათვის მუდმივია და არ არის დამოკიდებული w -ზე. იგი დამოკიდებულია R_0 -ზე. ვაგებთ $k(R_0)$ დამოკიდებულების გრაფიკს. მიღებული წრფის განტოლებაა

$$k = A_3 - a_3 R_0 \quad (16)$$

ამ წრფის კოეფიციენტების მნიშვნელობები განსაზღვრეთ გრაფიკულად და პირველი მიახლოებისას მივიღეთ $A_3 = 0,8$; $a_3 = 0,003$; ბეტონის სიმტკიცის ცალკეული მნიშვნელობებისათვის (16) ფორმულით გამოვთვალოთ კოეფიციენტის შემდეგი მნიშვნელობები $R_0=20$ მპა, $k=0,70$; $R_0=40$ მპა, $k=0,65$; $R_0=60$ მპა, $k=0,6$.

ხარისხის α მაჩვენებლის სიდიდის განსაზღვრისთვის გავალოგარიტმოთ (15) ფორმულა საიდანაც

$$\alpha = \frac{\lg(1-i) - \lg k}{\lg(1-w)} \quad (17)$$

ცხრილში 3. მოცემულია α -ს მნიშვნელობების გამოთვლა. პირველი მიახლოებისას ვღებულობთ $\alpha=0,5$. (15) ფორმულის გათვალისწინებით მივიღებთ

$$\varepsilon_{lim} = \varepsilon_{lim,1} [1 - k(1 - w)^{\alpha}] \quad (18)$$

(12) და (15) ფორმულების გათვალისწინებით მივიღებთ გაშლილი სახით ორფაქტორიანი დამოკიდებულების აღმწერ მათემატიკურ ფუნქციის შემდეგ გამოსახულებას

$$\varepsilon_{lim} = (A_2 + a_2 R_0) [1 - (A_3 - a_3 R_0)(1 - w)^{\alpha}] \quad (19)$$

(19) ფორმულის კოეფიციენტებისათვის მნიშვნელობებისათვის მივიღეთ: $A_2=191,174$ $a_2=3,513$ $A_3 = 0,759$ $a_3 = 0,0023$ $\alpha=0,392$.

ცხრილი 3

R_0	k	$\lg k$	w	$1 - w$	$\lg(1 - w)$	i ცხ.2-დან	$1 - i$	$\lg(1 - i)$	α
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0,70	-0,155	0,5	0,5	-0,3	0,435	0,565	-0,248	0,31
20	0,70	-0,155	0,85	0,15	-0,824	0,70	0,30	0,523	0,44
40	0,65	-0,187	0,5	0,5	-0,3	0,48	0,52	0,293	0,35
40	0,65	-0,187	0,85	0,15	0,824	0,73	0,27	0,569	0,45
60	0,60	-0,222	0,5	0,5	0,3	0,51	0,49	0,31	0,31
60	0,60	-0,222	0,85	0,15	0,824	0,75	0,25	0,60	0,45

(1) ფუნქციის გამოკვლევის შემდგომ ეტაპზე განვსაზღვრეთ ხარისხის C მაჩვენებლის სტრუქტურა და რიცხობრივი მნიშვნელობები. რისთვისაც განხილული ოთხი შემადგენლობის ექსპერიმენტული მონაცემების საფუძველზე ვაგებთ $\sigma/R_0=f(\varepsilon/\varepsilon_{lim})$ გრაფიკებს. (1) ძირითადი დამოკიდებულებიდან განვსაზღვროთ C .

$$C = \frac{\lg \frac{\sigma}{R_0}}{\lg \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{lim}}} \quad (20)$$

C სიდიდის გამოთვლის შედეგები მოცემულია ცხრილში 4

ცხრილი 4

შემაღ. №	R ₀ მპა	ε _{lim} 10 ⁻⁵	σ/R ₀	lg $\frac{\sigma}{R_0}$	ε 10 ⁻⁵	$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{lim}}$	lg $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{lim}}$	$C = \frac{\lg \frac{\sigma}{R_0}}{\lg \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{lim}}}$
1	58,82	280	0,2	-0,70	50	0,178	-0,75	0,935
			0,4	-0,40	100	0,356	-0,45	0,89
			0,6	-0,22	150	0,535	-0,272	0,815
			0,8	-0,10	200	0,715	-0,146	0,76
			1,0	0	280	1	0	-----
2	44,28	245	0,2	-0,70	40	0,163	-0,788	0,89
			0,4	-0,40	80	0,326	-0,487	0,82
			0,6	-0,22	120	0,490	-0,31	0,716
			0,8	-0,10	170	0,695	-0,158	0,633
			1,0	0	245	1	0	-----
3	29,6	190	0,2	-0,70	25	0,131	-0,883	0,79
			0,4	-0,40	50	0,262	-0,582	0,688
			0,6	-0,22	80	0,421	-0,376	0,59
			0,8	-0,10	120	0,632	-0,20	0,50
			1,0	0	190	1	0	-----
4	20,5	120	0,2	-0,70	11	0,092	-1,036	0,685
			0,4	-0,40	23	0,192	-0,717	0,557
			0,6	-0,22	43	0,360	-0,444	0,50
			0,8	-0,10	67	0,558	-0,253	0,395
			1,0	0	120	1	0	-----

ცხრილი 4-ის მიხედვით ვაგებთ $c(\varepsilon/\varepsilon_{lim})$ დამოკიდებულების გრაფიკს, რომელიც წარმოადგენს წრფეს. მისი განტოლება ზოგადი სახით შემდეგი სახისაა:

$$C = A_4 - a_4 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{lim}} \quad (21)$$

კოეფიციენტები A_4 და a_4 თავის მხრივ წარმოადგენენ R_0 -ის ფუნქციებს. $A_4 = f_1(R_0)$ $a_4 = f_2(R_0)$ ამ დამოკიდებულების განსაზღვრისთვის ვპოულობთ მნიშვნელობებს: $A_4 = C$ (როცა $\varepsilon/\varepsilon_{lim} = 0$) და $a_4 = C: \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{lim}}$ (წრფეების დახრის კუთხის ტანგენსი), ცხრ. 5-ში მოცემულია ამ კოეფიციენტების მიღებული მნიშვნელობები

ცხრილი 5

შემაღენლობა №	A_4	$a_4 = C: \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{lim}}$
1	0,98	0,26
2	0,94	0,36
3	0,85	0,41
4	0,80	0,50

ცხრ. 5 მონაცემების მიხედვით ვაგებთ $A_4(R_0)$, $a_4(R_0)$ დამოკიდებულების გრაფიკებს. მიღებული განტოლებები ზოგადი სახით ჩაიწერება:

$$A_4 = A_5 + a_5 R_0 \quad a_4 = A_6 - a_6 R_0$$

ამ კოეფიციენტების დაზუსტების მიზნით გამოვიყენეთ ექსპერიმენტული მონაცემების მნიშვნელობები, ძირითადი განტოლება და მათი მაპრობირებელი დამოკიდებულება. საბოლოო მივიღეთ, რომ $A_5 = 0,72$; $a_5 = 0,006$; $A_6 = 0,6$; $a_6 = 0,0024$;

თეორეტიკული მონაცემები

ამრიგად, ძირითადი დამოკიდებულებების წევრებისათვის მივიღეთ მაპრობირებელი ფუნქციები შემდეგი სახით.

$$R_0 = R \left[1 - (0,098 - 0,0053 \lg \frac{V}{V_0}) \lg \frac{V}{V_0} \right] \frac{\lg 28}{(\lg t)^w}$$

$$\varepsilon_{lim} = (191,174 + 3,513R_0)[1 - (0,0023R_0)(1 - W)^{0,392}]10^{-5} \quad (22)$$

$$C = (0,563 + 0,006R_0) - (-0,494 + 0,0024R_0) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{lim}}$$

მიღებული დამოკიდებულებების სიზუსტის შეფასებისათვის ათეული მაღალი სიმტკიცის ბეტონის შემადგენლობისათვის შევადარეთ σ/R ექსპერიმენტული სიდიდეები (1) ფორმულით გამოთვლილ მნიშვნელობებს. განსხვავება σ/R -ის ექსპერიმენტულ და თეორიულ მნიშვნელობებს შორის ცალკეული ექსპერიმენტების უმეტეს შემთხვევებში არ აღემატება 10%-ს, ხოლო მთლიანად ბეტონის შემადგენლობის მიხედვით ახლოა ნულთან.

შემოთავაზებული დამოკიდებულებების საფუძველზე დადგენილია, რომ ერთნაირი ტემპერატურისა და ტენიანობის პირობებში გამყარებისას მძიმე ბეტონის ზღვრული დეფორმაცია იზრდება ბეტონის კლასის გადიდებით. გარემოს ტენიანობის შემცირებით, რომელშიც მყარდება ბეტონი, მისი ზღვრული დეფორმაციის სიდიდე მცირდება.

აღნიშნული დამოკიდებულებების მნიშვნელოვანი შედეგი არის ის, რომ ბეტონისა და რკინაბეტონის ექსპლუატაციის დროს შესაძლებელია განვსაზღვროთ წინასწარ მოცემული დეფორმაციის შესაბამისი ძაბვა. აღნიშნული დამოკიდებულებები მიყვანილია იმ სტადიამდე, რომ შესაძლებელია განხორციელდეს კონკრეტული საინჟინრო ამოცანების რეალიზაცია. მიღებული დამოკიდებულებების საფუძველზე შესაძლებელია გადაწყდეს შებენიური ამოცანაც განვსაზღვროთ წინასწარ მოცემული ძაბვის შესაბამისი დეფორმაცია.

მიღებული დამოკიდებულებების პრაქტიკული მნიშვნელობის თვალსაჩინოების მიზნით განვიხილოთ რიცხობრივი მაგალითი.

მაგალითი: მოცემულია მრავალსართულიანი (მრავალბინიანი) რკინაბეტონის კონსტრუქცია. ბეტონის კლასი B30. კონსტრუქციის საკუთარი წონისაგან გამოწვეული კუმშვის ფარდობითი დეფორმაცია ქვედა დგარში მშენებლობის ბოლოს არ უნდა აღემატებოდეს $\varepsilon = 60 \cdot 10^{-5}$ მნიშვნელობას. მშენებლობის ხანგრძლივობა $T = 30$ დღე. ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა $W = 0,70$. ჰაერის ტემპერატურა დადებითი. საჭიროა განვსაზღვროთ ბეტონის დგარში მკუმშავი σ_1 ძაბვის დასაშვები სიდიდე, რომელიც მშენებლობის ბოლოსათვის შეესაბამება აღნიშნულ დასაშვებ დეფორმაციას.

ამოხსნა: თუ ჩავთვლით, რომ ბეტონის კლასი განსაზღვრულია მიღებული სტანდარტული პირობების დროს: $t = 28$ დღე, $V = 0,25$ მჰა/წმ, მაშინ ბეტონის საანგარიშო წინაღობა (პრიზმული სიმტკიცე) მეორე ჯგუფის ზღვრული მდგომარეობისათვის (ანგარიში დეფორმაციებზე) სნწ 2.03.01-84-ის თანახმად B30 კლასის ბეტონისათვის ტოლია 22 მჰა. ნაშრომში მიღებული აღნიშვნების თანახმად იგი შეესაბამება $R_0 = 22$ მჰა. განვსაზღვროთ (1) ფორმულის წევრების მნიშვნელობები (22) ფორმულის მიხედვით

$$\varepsilon_{lim} = (191,174 + 3,513R_0)[1 - (0,0023R_0)(1 - W)^{0,392}] \cdot 10^{-5} = 254 \cdot 10^{-5}$$

$$C = (0,563 + 0,006R_0) - (-0,494 + 0,0024R_0) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{lim}} = 0,799$$

ამ ფორმულაში

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{lim}} = \frac{60 \cdot 10^{-5}}{254 \cdot 10^{-5}} = 0,236$$

ფორმულის (1) მიხედვით

$$\frac{\sigma}{R_0} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{lim}} \right)^c = 0,236^{0,799} = 0,315$$

მშენებლობის დასასრულს ბეტონის ასაკში $t = 30 + 28 = 58$ დღე, მოცემული ჰაერის ტენიანობის დროს $W = 0,70$ და დატვირთვის V სიჩქარისას ბეტონის ფაქტიურ R სიმტკიცეს ვსაზღვრავთ (22) ფორმულის მიხედვით. ამ ფორმულაში $R_0 = 22$ მპა-ის შესაბამისი ძაბვები ბეტონში, როცა

$$\frac{\sigma}{R_0} = 0,315$$

ტოლია $\sigma = 0,315 \cdot R_0 = 0,49 \cdot 22 = 6,93$ მპა

დატვირთვის ხანგრძლივობა $T = 30 \cdot 24 \cdot 3600 = 2,592 \cdot 10^6$ წმ

დატვირთვის სიჩქარე

$$V = \frac{\sigma}{T} = \frac{6,93}{2,592 \cdot 10^6} = 2,674 \cdot 10^{-6} \text{ მპა/წმ}$$

$$V_0 = 0,25 \text{ მპა/წმ}$$

$$\lg \frac{V}{V_0} = \lg \frac{2,674 \cdot 10^{-6}}{0,25} = \lg (1,069 \cdot 10^{-5}) = -4,971$$

$$(\lg t)^W = (\lg 58)^{0,70} = 1,49 \quad \lg 28 = 1,44$$

(22) ფორმულიდან განვსაზღვროთ R -ის სიდიდე

$$R = \frac{R_0}{1 - (0,098 + 0,0053 \lg \frac{V}{V_0}) \cdot \lg \frac{V}{V_0}} \cdot \frac{(\lg t)^W}{\lg 28} \cdot \frac{22}{1 - (0,0098 + 0,0053 \cdot 4,971)(-4,971)} \cdot \frac{1,49}{1,44} = 19,3 \text{ მპა}$$

მოცემული $\varepsilon = 60 \cdot 10^{-5}$ დასაშვები დეფორმაციის შესაბამისი ძაბვა ბეტონში განისაზღვრება პირობიდან

$$\frac{\sigma}{R_0} = \frac{\sigma_1}{R} = 0,315$$

საიდანაც $\sigma_1 = 0,49R = 0,315 \cdot 19,3 = 6,08$ მპა.

*CONSTRUCTION ENGINEERING***INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF HIGH-STRENGTH CONCRETE CONSIDERING OPERATIONAL CONDITIONS****TEMUR TURMANIDZE***e-mail: temur.turmanidze@bsu.edu.ge**Batumi Shota Rustaveli State University*

ABSTRACT: The paper evaluates the stress-strain state of high-strength concrete used in monolithic construction based on experimental-theoretical research, the relationship between stresses and deformations of concrete has been studied, taking into account its strength, age, curing conditions, and loading rate. Qualitatively new analytical relationships are proposed, taking into account the main factors operating under operational conditions.

The results of the conducted experimental-theoretical research have established that the relationships obtained for high-strength concrete do not differ significantly from the results obtained for conventional heavy concrete, for lightweight concrete, the attitudes are significantly different. At the same time, the ultimate deformation of high-strength concrete during hardening under the same temperature and humidity conditions increases with increasing concrete grade. By reducing the humidity of the environment in which concrete is curing, the magnitude of the ultimate deformation decreases.

An important result of these studies is that it is possible to assess the quality of the stress-strain state during the operation of high-strength concrete and reinforced concrete structures and determine the stress corresponding to a given deformation.

This approach has been brought to the stage where it is possible to implement specific engineering tasks. Based on the obtained relationship, it is possible to solve the inverse problem - to determine the deformation corresponding to a given stress.

A numerical example is discussed to illustrate the practical significance of the obtained relationships.

Keywords: high-strength concrete, stresses and deformations, loading rate, concrete age, curing conditions.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Neville A. M. (2011) Properties of concrete, 346. England, London.
2. Lermi R. (2007) Problemy tekhnologii betona, 296. France, Paris.
3. Бегр О. Я., Шербаков Е. Н., Писанко Г. Н., (2012) Высокопрочный Бетон, 208 стр. Москва.
4. Temur Turmanidze, Zurab megrelishvili, David Chkhaidze "Studying the Relationship between Concrete Stresses and Deformations, Taking into Account its Strength, Age, Hardening Conditions and Loading Speed" Bulletin of the Georgian national academy of sciences, vol. 17, no. 2, 2023
5. Т. О. Турманидзе, Г. Н. Путкарадзе „Исследование зависимости между напряжением и деформацией с позиций адсорбционной теории“. Материалы XXVII Международной научно-практической конференций стр. 241-242. Международный университет МИТСО г. Гомель, республика Беларусь 2023г

6. T. Turmanidze, GONSTRUCTION ENGINEERING “Influence of loading rate on the strength of monolithic concrete, taking into account the age of the structure and during hardening” “Transactions” of the Adjara Autonomous Republic Regional Scientific Centre of the Georgian National Academy of Sciences, Vol. VIII. pp. 60-65, Batumi 2022;
7. Турманидзе Т. О. “Влияние скорости нагружения на прочность бетона с учетом возраста конструкций и среды твердения” Вестник научных конференции №2-2(78) с. 73-77, Россия, г. Тамбов 2022.
8. Турманидзе Темур, “Математическая модель зависимости между напряжением и деформацией бетона с учетом факторов действующих эксплуатационных условий” Materials of the VIII International Scientific and practical Conference “Development of accounting, audit and taxation in the conditions of innovative transformation of socio-economic systems” p. 341-345 Kropyvnytskyi, Ukraine, 2020.
9. Turmanidze T. O. Strength of concrete from the positions of adsorption and its computer software. Materials of the XXXI International Conference 127-128 Lankaran-Baku, Republic of Azerbaijan. 2018
10. Turmanidze T. O. Investigation of the relationship between tension and deformation of concrete considering the factors of operating conditions and its computer software. Materials of the VI International Scientific Conference MMOTI 225-228. Moldova, Chişinău 2018
11. T. Turmanidze “Long-term strength of concrete from the positions of adsorption theories of creep of solids and its computer software” Science IS THE EARTH OF EDUCATION. Materials of the XXVI International Scientific Conference. Ukraine, Zaporozhye 2017;
12. Turmanidze T. Mathematikal model of dependence between pressure and deformation of concrete and its computer software. Materials of XXXII international conference PROBLEMS OF DECISION MAKING UNDER UNCER-TAINTIES (PDMU-2018). p. 27-31, 2018, Prague, Czech Republic;
13. Temur Turmanidze, Teimuraz Jojua “Study of the ultimate strength of concrete in tension from the standpoint of the adsorption theory of the nature of creep of solid bodies” Modern Challenges and Achievements in Information and Communication Technologies IV International Scientific–Practical Conference - TRANSACTIONS p.182-186. 2025 Batumi;
14. Турманидзе Т.О. “Длительная прочность бетона с позиций адсорбционной теорий ползучести твердых тел” //Вестник научных конференций “Современное общество, образование и наука”. № 4-1(32). Стр. 110-114. Россия, г. Тамбов 2018;
15. Турманидзе Т.О. “Исследование зависимости между напряжением и деформацией бетона с учетом факторов действующих эксплуатационных условиях” //Вестник научных конференций “Актуальные вопросы образования и науки” № 1-1(29). Стр. 105-107. Россия, г. Тамбов 2018;
16. Турманидзе Т., Дидманидзе И. Математическая модель для прогнозирования длительной прочности бетона //Международный технико-экономический журнал. М. 2010. – №. 1. Стр. 43-45. Россия, Москва 2010;
17. Т. Турманидзе, И. Дидманидзе “Математическая модель прогнозирования прочности бетона”. Материалы II Всеукраинской научно-практической конференций. С 40 Системный Анализ. Информатика. Управления”. (САИУ-2011), p. 250. Запорожье, Украина, 2011г.
18. Турманидзе Т. О. “Комплексное влияние эксплуатационных условий на физико-механические характеристики бетона” Автореферат диссертации. Тбилиси 1996г. 35с.
19. Турманидзе Т. О., Дидманидзе И. Ш. Математическая модель для прогнозирования длительной прочности бетона //Международный технико-экономический журнал. Россия, Москва 2010г. – №. 1. с. 43-45.
20. Т. Турманидзе, Г. Путкарадзе “Математическая модель комплексного влияния эксплуатационных условий на прочность бетона.” 13th International conference THEORETIKAL AND APPLIED ASPECT OF PROGRAM SYSTEMS DEVELOPMENT. TAAPSD 2016. Proceeding. p. 309-301. Ukraine Kiev. 2016;

21. Т. Турманидзе, Г. Путкарадзе “Математическая модель определения прочности бетона“ Материалы XII Международной научно-практической конференций “Теоретические и прикладные аспекты построения программных систем“ Украина, Киев, 2015; с. 213-214.
22. Т. Турманидзе, Г. Путкарадзе, И. Дидманидзе “Исследование зависимости между напряжением и деформацией бетона с учетом факторов действующих эксплуатационных условиях и его программное обеспечение” Материалы III международной научно-практической интернет-конференций Запорожье, Украина 2013. с. 288-290.
23. Гвоздев А. А. Яшин А. Б. и др. “Прочность, структурные изменения и деформации бетона” Стройиздат М. 1978. 299с.
24. Пирадов А. Б. “Конструктивные свойства легкого бетона и железобетона”. М., Стройиздат 1973. 133с.
25. Квирикадзе О.П. О зависимости между деформациями и скоростью нагружения. – Тбилиси: Изд-во АН ГССР, 1962. – 125 с.
26. Вербецкий Г. П. “Прочность и долговечность в водной среде”. М., Стройиздат 1976. 128с.