TESTIRANJE FENOMENA PUZANJA MEKE STIJENE

TESTING OF CREEP PHENOMENA ON SOFT ROCK

Zvonko TOMANOVIĆ

ORIGINALNI NAUČNI RAD
ORIGINAL SCIENTIFIC PAPER
UDK: 624.131.54

1 UVOD

Test puzanja, po definiciji, karakteriše konstantno opterećenje pod kojim se materijal s vremenom deformiše. Uobičajeno je da se testovi puzanja sprovode povećanjem ili smanjenjem opterećenja na uzorak u inkrementima. Nakon svakog inkrementa, zadržava se konstantno opterećenje u toku odabranog intervala. Opterećivanje ili rasterećenje uzorka do određenog naponskog nivoa i održavanje konstantnog opterećenja u toku ovako dugog intervala, zahtijeva posebne uređaje prilagođene vrsti materijala koji se ispituje, veličini uzoraka i naponskom stanju (jednoaksijalno, biaksijalno ili triaksijalno) koje se održava na uzorku. Za sprovođenje testa jednoaksijalnog puzanja, odnosno za održavanje konstantnog opterećenja – napona na uzorcima, u toku relativno kratke istorije ovog testa, korišćeno je više različitih uređaja baziranih na polugama i okačenom teretu. U posljednje dvije decenije, konstruisani su i servo-uređaji za konvencionalne triaksijalne testove puzanja na standardnim cilindričnim uzorcima stijene.

Dug period testiranja i zahtjev da se naponsko stanje održi konstantnim, uz relativno mala odstupanja u toku dugog perioda koji se nekada mjeri i godinama, veoma komplikuje uređaje koji treba da odgovore tom zadatku. Pored navedenog, potrebno je obezbijediti pouzdano mjerenje relativno malih deformacija – sve od trenutka opterećivanja, pa do završetka testa. Pritom, treba imati u vidu da ukupna deformacija meke stijene može biti uzrokovana promjenom napona, vremenski zavisnim deformacijama (puzanje), promjenom temperature, promjenom vlage u stijeni, promjenom vlažnosti u vazduhu i slično.

1 INTRODUCTION

Creep test by definition represents a deformation of material with time under a constant stress. Commonly, creep tests are performed by incrementally increasing or decreasing the load on the specimen. After each increment, the constant load is maintained for a defined time interval. Application of stress or strain relief of specimen and maintaining constant load over this long time interval requires use of special devices that correspond to the type of tested material, specimen size and stress state (uniaxial, biaxial or three-axial) maintained in the specimen. In its quite short history, various dead weight and lever arm testing devices have been used for the purposes of uniaxial creep tests that are for maintaining constant stress state within the specimen. In the last two decades servo-hydraulic equipment has been designed for the conventional three-axial creep tests of standard cylindrical rock specimens.

The long time interval needed as well as the requirement for maintaining the constant stress state with relatively small variations over the long time interval which, sometimes can be measured by years, significantly complicate the devices that should response to this task. Additionally, it is necessary to enable reliable measuring of relatively small deformations from the moment the load is applied up to the test completion. Here it should be noted that total deformation of soft rock can be caused by stress changes, time-dependent deformations (creep), temperature changes, moisture changes, air humidity changes etc.

In addition to the above mentioned a change in the rock moisture content alone, without any changes in

Prof. dr Zvonko Tomanović, Građevinski fakultet,
Univerzitet Crne Gore, Cetinjski put bb, 81000 Podgorica,
Crna Gora, e-mail: zvonko@ac.me

Prof. dr Zvonko Tomanovic, Faculty of Civil Engineering,
University of Montenegro, Cetinjski put bb, 81000
Podgorica, Montenegro, e-mail: zvonko@ac.me

Pored navedenog, samo promjena vlažnosti stijene bez promjene napona ili temperature, može biti uzrok deformacija puzanja. Ovaj efekt, u literaturi poznat kao „hidraulično omekšanje“, među prvim uočili su Griggs i Blacic (1965) i Griggs (1967). Efekte vlažnosti vazduha oko uzoraka kamene soli pri testu puzanja izučavali su Hunsche i Shulze (1996). Ustanovljen je veliki uticaj na puzanje kamene soli, kada se vlažnost vazduha kreće u granicama od 0% do 65%. Dosad, u literaturi nije dokazano da vlažnost u vazduhu značajno utiče na puzanje drugih vrsta stijena (*sistematizovano kod: Cristescu, [4]*). Aparatura i procedure koje se sprovode u toku testiranja, treba da omoguće da se ukupna vremenska deformacija, koja je posljedica prethodne naponske promjene, razdvoji od ostalih komponenti vremenskih deformacija koje se razvijaju u stijeni u toku vremena (skupljanje zbog gubitka vlage, temperaturne dilatacije itd.).

Puzanje u stijeni počinje značajnije da se proučava početkom šezdesetih godina XX stoleća, nakon pionirskih radova Michelson-a (1917) koji je izvodio testove torzije na stijeni (po uzoru na ispitivanje metala). Početak istraživanja puzanja stijena karakterišu problemi u vezi s tehnikom izvođenja i interpretacijom rezultata testa. Testove puzanja pri jednoosijalnoj kompresiji izvodilo je više istraživača, na primer Evans i Wood (1937), na granitu, mermeru i soli. Nichihara (1958), Hardy (1959, 1966) i Price (1964) istraživali su puzanje sedimentnih stijena (*sistematizovano kod: Jaeger et al., [7]*).

Šezdesetih i sedamdesetih godina prošlog vijeka, značajan broj testova izveden je u BGR-u u Hanoveru, u Njemačkoj (BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe – Savezni zavod za geonauku i sirovine), na kamenoj soli pri jednoosijalnom i triaksijalnom stanju napona. Gimm (1968), Dreyer (1974) i Baar (1977) izveli su većinu testova puzanja stijenske mase „in situ“ u rudnicima kamene soli. Na osnovu rezultata mjerenja konvergencije u hodnicima rudnika kamene soli, reološki zakoni ponašanja kamene soli bili su predmet izučavanja Hoeffler-a (1958), Schuppe-a (1961), Potts-a i Hendley-a (1965) – *sistematizovano kod: Langer, [8]*. Laporci i laporovite stijene se u literaturi, kao predmet izučavanja vremenski zavisnih deformacija – puzanja, pojavljuju sporadično. Cristescu prikazuje rezultate jednoosijalnog testa puzanja na glinovitom laporcu u trajanju od 7–8 dana [4]. Bergues i Tomanović izučavali su puzanje tvrdih laporaca [1], [14] i [15].

Istraživanja vremenski zavisnih deformacija stijena (puzanje) praktičnu primjenu imaju pri analizi različitih naponsko-deformacijskih fenomena u stijenskoj masi, ali je najčešća pri analizi stabilnosti i deformacija oko tunelskih otvora. Mjerenjem konvergencije radijalnih deformacija konture tunelskog otvora, s jedne strane, ocjenjuje se stepen uspostavljenog balansa između sila u stijenskoj masi i podgradnoj konstrukciji, a s druge strane – prethodnim analizama procjenjuju se ukupne vremenske deformacije koje će se desiti oko tunelskog otvora ([2], [3], [13], [10], [11], [12]).

stress and temperature, can be a cause of the creep deformation. This effect, known as hydraulic weakening in literature, was among first ones identified by Griggs and Blacic (1965) and Griggs (1967). Effects of air humidity on the rock salt specimens at creep test were studied by Hunsche and Shulze (1996). A significant impact on the rock salt creep was identified in case when air humidity varied within range of 0-65%. The up to date literature records no proof of any significant impact of air humidity on the creep behaviour of other rocks (systematised at: Cristescu [4]). Apparatus and procedures used in the course of testing should enable separation of total time-dependent deformation, which results from the stress change from other components of time-dependent deformations which may occur within the rock over time (shrinkage due to moisture change, temperature change etc.).

In the early 60s, more consideration was given to the studying of a rock creep following the pioneering works of Michelson (1917), who carried out torsion tests of rock (by example of metal testing). The beginnings of the rock creep studies are marked by problems related to the testing technique interpretation of test results. Uniaxial compression creep tests were carried out on granite, marble and salt by many researchers such as Evans and Wood (1937). Nichihara (1958), Hardy (1959, 1966) and Price (1964) studied creep behaviour of sediment rocks (*systematised at: J. C. Jaeger et al., [7]*).

In the 60s and 70s of the last century, a great number of uniaxial and three-axial compression tests of rock salt was carried out at the BGR (BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe – Federal Institute for Geosciences and Natural Resources) Gimm (1968), Dreyer (1974) and Baar (1977) carried most of the creep tests of rock mass in situ in the rock salt mines. Based on the results of convergence measurements in the corridors of the rock salt mine, rheological behaviour of soft rock became a subject of research performed by Hoeffler (1958), Schuppe (1961), Potts and Hendley (1965), (systematised at: Langer, [8]). The literature records only sporadic occurrences of the marl and marlstone in terms of studying of the time-dependent deformations (creep). Cristescu (1993) has presented results of the uniaxial compression creep test of clayish marl carried out over the time interval of 7-8 days [4]. Bergues and Tomanovich studied creep behaviour of hard marls [1], [14] and [15].

Research of time-dependent rock deformations (creep) finds its practical application in analysis of different strain-dependent deformation phenomena in rock mass, yet it is mostly applied for the purposes of analysis of stability and deformations in the rock around the tunnel opening. Measurement of convergence of radial deformations of the tunnel opening contour enables to assess the achieved balance degree between the forces in rock mass and support system on one side, while on the other side, preliminary analyses are used to estimate total time-dependent deformations that may occur in the rock around the tunnel opening ([2], [3], [13], [10], [11], and [12]).

2 UREĐAJI ZA ODRŽAVANJE KONSTANTNOG NAPONSKOG STANJA PRI TESTOVIMA PUZANJA NA MEKOJ STIJENI

Za test puzanja, odnosno održavanje konstantnog opterećenja, do danas su korišćene dvije dominantne vrste uređaja: ramovi s primjenom poluga sa okačenim („mrtvim“) teretom i uređaji s hidrauličkim servo-kontrolisanim silama. Prednost uređaja s „mrtvim“ teretom jeste to što su jednostavne konstrukcije i pouzdani u toku dugog perioda, a prednost hidrauličkih sistema je što su malih gabarita. Za jedan broj testiranja korišćeni su i nešto manje pouzdani uređaji koji su zahtijevali manuelnu korekciju sile u toku vremena (dotezanjem matice i/ili opruge).

Poseban problem pri testu puzanja predstavlja konstruisanje ramova za održavanje konstantnog naponskog stanja na modelima, kao što su modeli kojima se simulira tunelski iskop pri dvoosnom stanju napona. Za realizaciju eksperimentalnog laboratorijskog istraživanja puzanja laporca koji se prezentuje u ovom radu, korišćeni su posebno konstruisane nestandardne aparature i uređaji za održavanje konstantnog naponskog stanja (prema nacrtima autora ovog rada). Za pojedine segmente istraživanja korišćena je i standardna laboratorijska oprema kao što su: laboratorijske prese, mjerači sile, deformetri i tako dalje. U nastavku teksta, opisuju se uređaji i instrumenti korišćeni za test puzanja laporca pri jednoosijalnom i biaksijalnom stanju napona.

2.1 Uređaj sa okačenim („mrtvim“) teretom za jednoosijalno opterećivanje

Za održavanje konstantnog opterećenja na jednoosijalnim prizmatičnim uzorcima laporca dimezija 15x15x40 cm korišćen je uređaj s dvostrukom polugom, kapaciteta 750 kN (slika 1 i slika 2). Okačeni teret na kraju poluge 2 prenosi se na polugu 1 i aplicira na uzorak kao sila pritiska. Zavisno od položaja uzorka duž poluge 1, težina tega multiplicira se od 10 do 150 puta. Za ispitivanje uzoraka laporca poprečnog presjeka 15x15 cm i jednoosijalne čvrstoće oko 8.8 MPa, optimalan položaj uzoraka je pri multipliciranju „mrtvog“ opterećenja za oko 100 puta.

Važna faza pri postavljanju testa puzanja jeste i centrisanje opterećenja. Neophodno je da se opterećenje na uzorak nanese što ravnomjernije, tako da početna deformacija uzorka indukuje minimalne inklinacije poprečnog presjeka. Postojala su četiri zavrtnja omogućavala su da se uzorak podiže naviše, kako bi se zatvorili svi zazorci između pojedinih dijelova poluga i rama i mjerača sile (vidi sliku 2.b) i obezbijedile približno iste deformacije na sve četiri strane prizmatičnih uzoraka.

Svaki uređaj od šest uređaja za jednoosijalne testove puzanja opremljen je prstenastim mjeračem sile kapaciteta 250 kN, posebno konstruisanim i proizvedenim za ovo eksperimentalno istraživanje puzanja laporca. Opterećenje na uzorak aplicirano je odozgo preko prstenastog mjerača sile, koji je istovremeno poslužio i kao zglobov (slika 1 i 2.a). Na taj način, efekti dodatne ekscentričnosti opterećenja, uzrokovane rotacijom poluge 1 u toku spuštanja „mrtvog“ tereta, svedeni su na zanemarljive vrijednosti.

2 DEVICES FOR MAINTAINING CONSTANT STRESS STATE AT CREEP TESTING OF SOFT ROCK

For the creep test, that is for maintaining the constant load, two dominant device types have been used up to date - lever arm system in dead weight creep frame and hydraulic servo control compression testing device. The advantage of the dead weight creep test device is its simple structure and reliability over a long time period, while the advantage of hydraulic system lies in its small overall size. For a certain number of tests devices of somewhat lower level of reliability have been used, requiring adjustments of compression in the course of time (additional nut and/or lever tensioning).

Particular issue at creep test arises with a view to the design of frames for maintaining of the constant stress state in models, such as the model for simulation of tunnel excavation at biaxial stress state. A specially designed non-standard apparatus and devices for maintaining stress state made by the author of this paper have been used for the purpose of experimental laboratory testing of the marl creep presented in this paper. Certain segments of the research involved the use of standard laboratory equipment as well - laboratory presses, dynamometers, deformeters etc. The text below describes devices and instruments that have been used for the creep test of marl at uniaxial and biaxial stress state.

2.1 Device with hanged (dead) weight for uniaxial compression

For maintaining the constant load on uniaxial prismatic marl specimens of 15x15x40cm in size, the two-lever arm device has been used, with capacity of 750kN, Figure 1 and Figure 2. Weight hanged at the end of the lever arm 2 is transmitted to lever arm 1 and then applied to the specimen acting as a compression. Depending on the position of the specimen along the lever arm 1, the weight is multiplied by 10 to 150 times. For testing of marl specimen of average section 15x15cm and uniaxial compression strength of approximately 8.8 MPa, an optimum position of the specimen is achieved when dead weight is multiplied by approximately 100 times.

An important phase in setting-up the creep test is centring the weight. It is required to apply the load onto the specimen as evenly as possible so to enable the initial deformation of the specimen to induce minimum inclinations of the cross section. Stands with four bolts provided for lifting the specimen upwards in order to close all the gaps between certain lever arms and frame and dynamometer (see Figure 2.b) and enable approximately even deformations at all four sides of prismatic specimen.

Each of the six used devices for uniaxial compression creep tests is equipped with ring dynamometer with capacity of 250kN which was specially designed and constructed for the purposes of this experimental research of the marl creep behaviour. The load was applied to the top of the specimen by means of ring dynamometer which at the same time served as a hinge (Figure 1 and Figure 2.a). In this way, the effects of the additional eccentricity of the loading, caused by rotation of lever arm 1 during lowering of the dead weight, have been reduced to negligible values.

Slika 1. Dispoziciona šema uređaja (rama) za jednoosijalno opterećivanje
Figure 1. Layout of device (frame) for uniaxial compression

Slika 2. Uređaji za: a) jednoosijalno opterećivanje; b) dvoosno opterećivanje
Figure 2. Devices for: a) uniaxial compression; b) biaxial compression

2.2 Uređaj sa okačenim („mrtvim”) teretom za biaksijalno opterećivanje

Za održavanje konstantnog opterećenja na pločastim biaksijalno opterećenim uzorcima dimenzija 60x60x10 cm korišten je uređaj s dvostrukom polugom, kapaciteta 1500 kN (slika 2b i slika 3), istog sistema prenošenja vertikalnih sila, kao i uređaj korišten za jednoosijalno opterećivanje. Trapezasti čelični elementi postavljeni su

2.2 Device with hanged (dead) weight for biaxial compression

For maintaining the constant load on biaxial plate specimens of 60x60x10cm in size, the two-lever arm device has been used, with capacity of 1500kN, Figure 2b and Figure 3, with the same system for transmission of vertical load as used in case of the device for uniaxial compression. Trapeze-shaped steel elements were placed

između rama i uzorka da bi se obezbijedilo ravnomjerno prenošenje opterećenja s rama na uzorke širine 60 cm i debljine 10 cm.

Za apliciranje horizontalnog opterećenja na pločast uzorak, korišćen je sekundarni zatvoreni ram zglobovno oslonjen na postolje osnovnog uređaja za vertikalno opterećivanje i dvije hidrauličke prese povezane međusobno kao spojeni sudovi. Jedna presa postavljena je vertikalno između mjerača sile i prelaznog vertikalnog čeličnog trapezastog elementa (slika 3, presjek B-B), tako da prima vertikalno opterećenje i generiše pritisak u ulju (nanošena je aktivna sila na klip prese). Druga presa postavljena je horizontalno u zatvorenom sekundarnom ramu, tako da klip prese vrši pritisak na prelazni horizontalni trapezasti čelični element (kao što je prikazano na slikama 3 i 4. b). Ovaj jednostavan hidraulički sistem, bez servo-kontrole, primijenjen za nanošenje horizontalnog pritiska, nema gubitka sile u toku vremena.

between the frame and the specimen to enable even transmission of load from frame to the specimens of 60cm in width and 10 cm in thickness.

Application of horizontal load on the plate specimen involved the use of a secondary closed frame hinge supported against the stand of the main device for vertical loading and two hydraulic presses interconnected following the law of connecting tanks. One press was placed vertically between the dynamometer and transitional vertical trapeze-shaped steel element (Figure 3, section B-B), so to transmit the vertical load and generate oil pressure (active load was applied to the press cylinder). The second press was placed horizontally in the secondary frame, with the press cylinder generating pressure onto the horizontal trapeze-shaped steel element, as illustrated in Figure 3 and Figure 4b. This simple hydraulic system without servo control that was used for application of horizontal compression has no loss of force over the time.

Slika 3. Dispoziciona šema uređaja za biaksijalno opterećivanje
Figure 3. Layout of device for biaxial compression

Slika 4. a) Ram za jednoaksijalno opterećivanje pločastih uzoraka; b) Aparatura za biaksijalno opterećivanje; pločast uzorak PL-15, prva faza testa (odnos $Ph/Pv=1.0$)

Figure 4. a) Frame for uniaxial compression of plate specimens; b) Apparatus for biaxial compression; plate specimen PL-15, Phase 1 of test (ratio $Ph/Pv=1.0$)

Primjenom presa u paru, s različitim površinama klipova, moguće je aplicirati različite odnose horizontalne i vertikalne sile. Pritom, u toku vremena konstantnim se održavaju aplicirane sile i njihov međusobni odnos. U ovom eksperimentu korišćena su tri seta presa sa odnosom površina klipa horizontalne – bočne prese prema površini klipa vertikalne prese: 0.3, 0.5 i 1.0. Svaki uređaj od šest uređaja za testove na pločastim uzorcima opremljen je prstenastim mjerачem sile kapaciteta 350 kN. Na kontaktu između čelične konstrukcije, tj. prelaznih trapezastih elemenata i uzoraka postavljena je dvostruka folija od teflona radi eliminisanja kontaktnog trenja. Za jednoaksijalno opterećivanje pločastih uzoraka, korišćen je ram za nanošenje i održavanje vertikalnog opterećenja prikazan na slici 4. a (na fotografiji pločasti uzorak, PL-12).

Using pair of presses with different cylinder surfaces, different ratios of horizontal and vertical load can be applied. Here, the applied loads and load ratio are maintained constant over the time. This experiment involved use of three sets of presses with the ratio of cylinder surface of the horizontal-lateral press to the cylinder surface of the vertical press: 0.3, 0.5 and 1.0. Each of the six used devices for creep tests of plate specimens is equipped with ring dynamometer with capacity of 350KN. At the contact point between the steel structure, i.e. transitional trapeze-shaped elements and specimens, a double teflon liner was placed to eliminate any contact friction. Frame for applying and maintaining the vertical load illustrated in Figure 4.a (photo of plate specimen PL-12) was used for uniaxial compression of plate specimens.

2.3 Uređaj za triaksijalno opterećivanje

Konvencionalni test triaksijalne kompresije, pri kontrolisanim silama (pritiscima), sproveden je u aparaturi u kojoj su aksijalna sila i bočni pritisak aplicirani uz primjenu dva uređaja s dvostrukom polugom (konstruisano prema nacrtima autora ovog rada [slika 5]). Hook-ova triaksijalna ćelija postavljena je u jedan ram za opterećivanje kojim je nanošena aksijalna sila na uzorak (desni ram na slici 5). U drugi ram za opterećivanje postavljena je obična hidraulična presa koja je fleksibilnim crijevom povezana s triaksijalnom ćelijom (spojeni sudovi). Apliciranjem sile na klip prese, indukovao je željeni pritisak u ulju, odnosno bočni pritisak u triaksijalnoj ćeliji. Drugi izvod za ulje na triaksijalnoj ćeliji korišćen je za priključenje ćelije za mjerenje pritiska.

2.3 Three-axial loading device

A conventional strain-controlled three-axial compression test, is conducted in the apparatus applying axial load and lateral strain by means of two double-lever devices designed by the author of this paper, Figure.5. Hook's three-axial load cell is placed in one load frame that is used to apply axial load on the specimen (right frame in Figure 5). A standard hydraulic press is placed in the second load frame, connected to the three-axial cell by a flexible tube (interconnected tanks). Application of the load on the press cylinder induces the preferred oil compression, i.e. the lateral strain in the three-axial cell. The second oil outlet on the three-axial cell is used to connect the compression measuring cell.

Axial load and lateral strain are controlled manually

Aksijalna sila i bočni pritisak manuelno su kontrolisani dodavanjem tegova, a na osnovu mjerenja sile i pritiska primjenom ćelije za mjerenje sile i ćelije za mjerenje pritiska uz očitavanje na „mjernom mostu“. Primijenjena aparatura pokazala je lako održavanje konstantnog bočnog pritiska u toku testa i jednostavno rukovanje pri testu s kontrolisanim silama. Takođe, aparatura omogućava jednostavno izvođenje testova puzanja u konvencionalnoj triaksijalnoj ćeliji.

by adding weight and based on measurements of the load and strain by means of the compression measuring cell and reading of results on the "measuring bridge". The applied apparatus proved to provide the easy maintaining of the constant lateral strain during the test and that it is simple to operate in case of the strain-controlled test. Moreover, the apparatus enables simple performance of the creep tests in the conventional three-axial cell.

Slika 5. Aparatura za triaksijalni test
Figure 5. Three-axial compression test apparatus

3 MJERENJE SILE I DEFORMACIJE

Instrumenti i uređaji za test puzanja moraju da zadovolje dva osnovna uslova: a) održavanje konstantnog opterećenja u toku izvođenja testa; b) instrumenti za mjerenje deformacija treba da imaju mogućnost mjerenja deformacije od početka testa do nekog vremena t (nekoliko dana, mjeseci ili godina).

3.1 Mjerenje sile

Mjerenje sile pri nanošenju opterećenja na uzorke pri kratkotrajnim testiranjima (ili testovima puzanja u trajanju od nekoliko sedmica) i mjerenje sile za testove puzanja koji traju nekoliko mjeseci ili godina zahtijevaju potpuno različitu mjernu tehniku. Tako je pri kratkotrajnim testovima moguće koristiti standardne električne mjerače sile. Međutim, pri dugotrajnim testovima puzanja, mehanički mjerači sile imaju značajne prednosti u poređenju sa električnim, u pogledu kompleksnosti opreme, sistema za održavanje stalnog električnog napona, opreme za akviziciju podataka i cijene.

3 MEASUREMENT OF FORCE AND DEFORMATION

Instruments and devices for creep test should meet two basic requirements: a) maintaining constant load while the creep test is carried out; b) instruments for deformation measurement should provide deformation measurements from the commencement of the test to time t (several days, months or years).

3.1 Force measurement

Force measurement of load application on specimens at short-time tests (or creep tests with the duration of several weeks) and measurement of force for creep tests the duration of which is several months or years require completely different measurement technique. For the short-time tests standard electronic dynamometers can be used. However in the case of long-time creep tests, the mechanical dynamometers are far more suitable compared to the electronic dynamometers in terms of the complexity of equipment, system for maintaining constant electrical tension, data acquisition equipment and costs.

Za mjerenje sile koja se aplicira na uzorak i njenu kontrolu u toku testa puzanja, pri eksperimentalnom istraživanju puzanja laporca, konstruisani su prstenasti mjerači sile (prema nacrtima autora ovog rada). Mjerač sile sastoji se od čeličnog prstena, komparatera tačnosti 1/1000 mm i postolja (kako je prikazano na slici 6). Mjerači sile kapaciteta 250 kN korišćeni su za mjerenje sile jednoaksijalno opterećenih prizmatičnih uzoraka, a kapaciteta 350 kN korišćeni su za mjerenje sile kod pločastih biaksijalno opterećenih uzoraka. Različiti kapaciteti mjerača sile postignuti su povećanjem širine prstena, koja je iznosila 60 ili 80 mm.

Svaki mjerač sile testiran je u laboratorijskoj presi i definisan je koeficijent proporcionalnosti između ugiba prstena i na prsten aplicirane sile. Veza ugib–sila jeste linearna: $F=k \cdot u$, gdje je: F – vertikalna sila, u – vertikalni ugib prstena. Koeficijent proporcionalnosti k određen je metodom najmanjih kvadrata za svaki proizvedeni mjerač sile i kretao se u granicama od 462.00 do 491.04.

Test puzanja trajao je više od jedne godine, uz varijaciju temperature od 10°C do 32°C. Radi toga, izvršena je provjera uticaja promjene temperature na tačnost instrumenta. U opsegu temperature od 10°C do 40°C, ustanovljena je greška uzrokovana temperaturnim promjenama manja od 0.2%, a ukupna greška mjerenja u toku jedne godine je ispod prihvatljive granice od 1% za ovu vrstu testa [4]. Mehanički instrument obezbijedio je mjerenje sile u toku nanošenja opterećenja u inkrementima, ali i kontrolu sile u toku testa puzanja, u trajanju duže od jedne godine, na vrlo jednostavan i pouzdan način. Nakon završetka testa, kazaljka komparatera, ugrađenog u mjerač sile, vratila se na nulu – što je siguran pokazatelj da je mjerni prsten u toku čitavog testa bio elastično opterećen.

For measurement of the force that is applied to the specimen and control of such force during the creep test, in the course of experimental research of the marl creep behaviour, the ring dynamometers have been designed by the author of this paper. The dynamometer consists of a steel ring, comparator with the accuracy of 1/1000mm and stand pedestal as illustrated in Figure 6. Dynamometers with the capacity of 250kN were used for force measurement in case of uniaxially compressed prismatic specimens, while dynamometers with the capacity of 350kN were used for force measurement in case of biaxially compressed specimens. Different capacities of dynamometer have been achieved by increase in width of the ring which was 60 or 80 mm.

Each dynamometer was tested in the laboratory press with the defining of the coefficient of proportionality between the ring deflection and on the ring of the applied force. The deflection-force relation is linear: $F=k \cdot u$, where: F - vertical force, u -vertical deflection of the ring. The coefficient of proportionality k was determined by the least squares method for each constructed dynamometer and its values ranged between 462.00 and 491.04.

The creep test lasted for a period of over one year with temperature variations from 10 oC to 32oC. Therefore, the accuracy of the instrument was tested against the effect of temperature variations. For the temperature range from 10oC to 40oC, a measurement error of 0.2% has been identified due to the changes in temperature, while total measurement error for one year period was beyond the acceptable limit of 1% for this type of test [4]. A mechanical instrument enabled very simple and reliable force measurement during the incremental application of load, and also the control of force during the creep test for a period of over one year. Upon test completion, the hand of the comparator integrated in the dynamometer returned to zero position, which indicated with certainty that the measuring ring remained within the range of elastic stress.

Slika 6. Prstenasti mjerač sile kapaciteta 250 kN
Figure 6. Ring dynamometer of capacity 250kN

3.2 Mjerenje deformacija

Mjerenja dilatacija izvedena su mehaničkim deformetrom tipa „Pfender“ (slika 7 – očitavanja pomjeranja 1/1000 mm na mjernoj bazi 100 mm) i pokazala su bolje rezultate pri testu puzanja, u poređenju s mjernim trakama, u pogledu tačnosti mjerenja u toku dugog intervala. Nakon dugotrajnih testiranja, ustanovljena je greška mjerenja ovog tipa uređaja 2-3/1000 mm. Mjerena promjena rastojanja između repera u toku testa puzanja na uzorcima od laporca kretala su se od 0.5 do 1 mm. Imajući u vidu ostvarene dilatacije, greška mjerenja od 3/1000 mm može se ocijeniti kao prihvatljiva.

Slika 7. Mjerenje deformetrom tipa „Pfender“ na pločastom uzorku
Figure 7. Measurement of deformations in plate specimen by deformeter type "Pfender"

4 TEHNIKA FIKSIRANJA MJERNIH TAČAKA I MJERENJE DEFORMACIJA

Prizmatični i pločasti uzorci laporca, glavnih serija mjerenja, opremani su mrežom mjernih mjesta za mjerenje promjene dužine između mjernih baza mehaničkim deformetrom tipa „Pfender“. Mjerenje ovim deformetrom zahtijeva lijepljenje mjernih tačaka (mesingana pločica sa utisnutom čeličnom kuglicom) direktno na uzorak. Pritom, mek stijenski materijal i prirodna vlažnost uzorka pričinjavaju dosta poteškoća. Nakon proba učinjenih s nekoliko vrsta ljepkova i načina pripreme podloge na uzorku, ustanovljeno je da fiksiranje mesinganih pločica – mjernog mjesta ljepilom tipa „Hotinger-X60“ i lagano hrapavljenje podloge tj. površine uzorka, daju najbolje rezultate. Ovako fiksirana mesingana pločica ostaje adekvatno fiksirana za uzorak u toku perioda mjerenja od godinu dana i pri više desetina serija mjerenja.

4.1 Prizmatični uzorci

Svi prizmatični uzorci laporca dimenzija 15x15x40 cm opremljeni su mjernim tačkama koje su omogućile mjerenje deformacija u pravcu podužne ose uzorka i deformacija u porečnom pravcu (prikazano na slici 8). Mjerni opseg mehaničkog deformetra tipa „Pfender“ jeste 1 mm, a odabrana mjerna baza instrumenta iznosi oko 100.4 mm. Time je bilo moguće izmjeriti dilataciju od

3.2 Deformation measurement

Measurements of dilatations that were performed using mechanical deformeter type Pfender, Figure 7 (reading displacements 1/1000mm on measuring base of 100mm) showed better results at creep test, compared to strain gauge with a view to the measurement accuracy over a long time interval. After long lasting tests, the measurement error of 2-3/1000mm was identified for this type of device. Measured changes in distance between the reference points during the creep testing of marl varied from 0.5 to 1mm. Taking into consideration the occurred dilatations, measurement error of 3/1000mm can be considered as acceptable

4 TECHNIQUE OF AFFIXING THE MEASURING POINTS AND DEFORMATION MEASUREMENT

Prismatic and plate marl specimens of the main measurement series were provided with the network of measuring points for measuring the change in length between measuring bases by mechanical deformeter type „Pfender“. Measuring with this deformeter requires the measuring points (brass plate with inlaid steel ball) to be affixed directly to the specimen. Soft rock material and natural moisture of the specimen caused lot of difficulties hereto. Upon trial attempts using several types of adhesives and methods of base preparation on the specimen, it was observed that fixing of brass plates - measuring points by means of adhesive type „Hotinger-X60“ and slight coarsening of the base i.e. surface of the specimen provided the best results. The brass plate fixed in this way remained properly fixed to the specimen for a measurement period of one year even in the case of several tenths of measurement series.

4.1 Prismatic specimens

All prismatic specimens of 15x15x40cm in size were provided with measuring points, which enabled measurement of deformations in the direction of the longitudinal axis of the specimen and deformations in the horizontal direction as illustrated in Figure 8. Measuring range of the mechanical deformeter type „Pfender“ is 1mm, and selected measuring base of the instrument is

8 do 9 promila. Pripremljeno je osamnaest prizmatičnih uzoraka – šest uzoraka probne serije i dvanaest uzoraka glavne serije, od kojih je na šest sproveden test puzanja u trajanju oko godinu dana, a ostali su testirani na kratkotrajno opterećenje do loma [15].

about 100.4mm. This enabled measurement of a dilatation of 8-9 per mils. Eighteen specimens were prepared: 6 specimens of trial series and 12 specimens of main series, 6 of out of which were subject to creep testing for a period of about one year, while the remaining specimens were tested against short-time loading until failure occurred [15].

Slika 8. Prizmatični uzorak, šema mjernih mjesta
Figure 8. Prismatic sample, layout of measuring points

4.2 Pločasti uzorci

Svi pločasti uzorci opremljeni su sa po dvije mreže mjernih tačaka, sa obje strane uzorka, koje su omogućile mjerenje polja deformacija u ravni ploče. Mreža baze mjerenja 100 mm postavljena je na čitavoj površini uzorka, a mreža baze mjerenja 60 mm formirana je u centralnom dijelu uzorka (prikazano na slici 9). Gušćom mrežom mjernih mjesta obuhvaćen je uži dio oko otvora koji će se izbušiti u drugoj fazi testa. Mjerenje deformacije po stranama trouglova mreže omogućuje definisanje deformacije u bilo kom željenom pravcu.

Postavljanje mjernih baza za mrežu trouglova predstavlja izuzetno komplikovan zadatak zbog malog mjernog opsega instrumenta (1mm). Da bi se mogla obavljati mjerenja, sve tačke su međusobno morale biti postavljene na rastojanju 100 mm $\pm$ 0.2 mm. Nakon promjene naponskog stanja, mjerene su deformacije puzanja na mreži mjernih tačaka (u sve tri faze testa) i to nakon 1, 6 i 24 sata od nanošenja opterećenja, zatim nakon tri dana i sedam dana, a u daljem periodu – svakih petnaest dana. Intervali mjerenja odabrani su tako da razlike prethodne i tekuće mjerene deformacije budu približno jednake.

4.2 Plate specimens

Every plate specimen was provided with two networks of measuring points on both sides of the specimen, which enabled measuring of deformation field in the plane of the plate. Network of the measuring base of 100mm was placed over the total surface of the specimen, while the network of the measuring base of 60mm was formed in the central part of the specimen, as illustrated in Figure 9. A network with higher density of measuring points covered the immediate area around the opening which would be bored in the phase 2 of the test. Measurement of deformation on the sides of triangles of the network enables the deformation to be determined in any preferable direction required.

Setting the measuring bases for the network of triangles is a quite complicated task due to the small measuring range of the instrument, this being 1mm. It was required for all points to be set at the mutual distance of 100mm $\pm$ 0.2mm for measurement purposes. Upon the change of stress state, creep deformations were measured on the network of measuring points a (in all three phases of the test), within 1, 6 and 24 hours after application of the load, then after 3 and 7 days and on every 15 days in the further period. Measuring intervals were selected to ensure approximately even differences in previously and currently measured deformation.

Slika 9. Pločasti uzorak: a) šema mjernih mjesta; b) uzorak za kompenzaciona mjerenja
Figure 9. Plate specimen: a) layout of measuring points; b) specimen for compensation measurements

4.3 Triaksijalni uzorci

Za mjerenje deformacija uzoraka u konvencionalnom triaksijalnom testu, u standardnoj Hook-ovoj ćeliji, upotrijebljene su mjerne trake i rozete koje mjere deformacije u dva upravna pravca (proizvođač: TML-Japan). Za lijepljenje rozeta korišćeno je ljepilo P2 (TML-Japan), koje ima veliku rastegljivost, što omogućava mjerenje velikih dilatacija kakve su očekivane na predmetnom materijalu.

Svaki uzorak opremljen je sa po tri rozete ili trake, postavljene u sredini visine uzorka, pod centralnim uglom 120° , posmatrano u poprečnom presjeku uzorka (kako je prikazano na slici 10). Za povezivanje traka s „data logger-om“ korišćen je trakasti kabl debljine oko 0.3 mm. Nakon postavljanja kabla i povezivanja s rozetama, preko uzorka je navlačena zaštitna membrana. Pripremljena su i ispitana ukupno dvadeset četiri uzorka u triaksijalnom aparatu, uz mjerenje deformacija, a još desetak uzoraka dovedeno je do loma bez mjerenja deformacija (uz mjerenje aksijalne sile loma i bočnog pritiska) [16].

4.3 Tree-axial specimens

Measurement of the specimens' deformations by conventional tree-axial test in the standard Hook's cell included the use of a strain gauge and rosettes for deformation measurement in the two normal directions (accuracy 10-3mm, producer TML - Japan). Glue (TML - Japan), with a high deformation power, was used for the gluing of the rosettes, which enabled the measurement of the high strain expected in the examined material.

Each specimen was equipped with tree rosettes or a strain gauge set in the middle of specimen height under the central angle of 120° , seen through the cross-section of the specimen, as shown in Figure 10. A stripe cable, about 0.3mm thick, was used to connect the strain gauge with the "data logger". After the cable was set and the rosettes were connected, a protective membrane was put over the specimens. A total of 24 specimens were prepared and examined in the tree-axial device along with deformation measurement and about ten more specimens were led to failure without any deformation measurement (with a measurement of the axial stress of the failure and lateral pressure) [16].

Slika 10. Cilindrični uzorak za konvencionalni triaksijalni test;
a) dispozicija mjernih rozeta; b) rozeta postavljena na uzorak
Figure 10. Cylindrical specimen for a conventional tree-axial test;
a) disposition of measurement rosetta; b) rosettes attached to the specimen

5 NEOPTEREĆENI UZORCI ZA MJERENJE DEFORMACIJE SKUPLJANJA I DEFORMACIJE OD PROMJENE TEMPERATURE

5.1 Osnovne fizičko-mehaničke osobine ispitivanog laporca, mineralni i hemijski sastav

Testovi puzanja sprovedeni su na sivom cementnom laporcu. Prosječna vrijednost suve zapreminske težine ovog laporca, iz kojega su uzorci uzeti, iznosi oko 18.8 kN/m³ (od 17.2 do 20.38 kN/m³), a prosječna pritisna jednoaksijalna čvrstoća monolita oko 8.8 MPa. Ispitivani laporac – u pogledu mineralnog sastava – dominantno predstavljaju kalcit (46–48%) i kvarc (12–13%), dok su u okviru glinovite faze – ilit+smektit, montmorijonit, kaolinit, glaukonit, transformisani feldspat i liskun. Prema hemijskom sastavu, sadržaj CaCO₃ je u granicama 48.10–48.30%, dok je sadržaj nerastvornog ostatka (glinovito+kvarc) u granicama 51.03–51.87%.

5.2 Promjene vlažnosti u toku dugotrajnog testiranja

Nakon vađenja iz prirodno vlažne sredine, na sobnoj temperaturi, laporac brzo gubi vlagu. Zbog znatnog sadržaja glinovitih minerala i velike poroznosti, posledica gubitka vlage u uzorcima jeste skupljanje materijala. Pri intenzivnom sušenju i većem stepenu gubitka vlage, skupljanje uzrokuje pojavu pukotina i raspadanje materijala. Deformacije koje se javljaju kao posljedica gubitka vlage tj. skupljanja, imajući u vidu cilj istraživanja, bilo je neophodno svesti na prihvatljiv nivo, kako ne bi imale uticaj na mehaničke karakteristike materijala. Radi redukovanja promjene vlažnosti u toku testa puzanja, nakon postavljanja mjernih baza (pločica), na uzorak je nanošen tanak sloj parafina. Promjena vlage ovom mjerom je znatno redukovana, pa je skupljanje stijenskog materijala, u toku ispitivanja od godinu dana, svedeno na prihvatljiv nivo – od nekoliko procenata.

U toku testova puzanja, pri svakoj seriji mjerenja deformacija, mjereni su temperatura i vlažnost vazduha u laboratoriji u kojoj su rađeni testovi. Vlažnost uzorka određivana je metodom sušenja na temperaturi od 105°C. Prirodna vlažnost uzoraka kretala se od 11 do 12%. Nakon završetka testa puzanja probne serije prizmatičnih uzoraka, koji je trajao tri mjeseca, ustanovljena je prosječna vlažnost od 10.65%, a nakon završetka testa puzanja glavne serije mjerenja, koji je trajao dvanaest mjeseci, izmjerena je prosječna vlažnost 7.40%.

5.3 Uzorci za mjerenje deformacije skupljanja i deformacije od promjene temperature

Pored preduzetih mjera da se spriječi promjena vlage u uzorcima za vrijeme dugotrajnih testova puzanja, dolazi do izvjesne promjene vlage u uzorcima, a time i do deformacije skupljanja uzrokovane gubitkom vlage. Takođe, nije bilo moguće obezbijediti konstantnu temperaturu u laboratoriji u toku godinu dana, te je

5 NON-LOADED SAMPLES FOR MEASUREMENT OF SHRINKAGE DEFORMATION AND DEFORMATION DUE TO TEMPERATURE CHANGE

5.1 Basic physical and mechanical properties of the tested marl, mineral and chemical composition

Creep tests were carried out on gray cement marl. Average value of dry volumetric weight of this marl, which was sampled, is approximately 18.8kN/m³ (from 17.2-20.38 kN/m³), and average uniaxial compression strength of monoliths is about 8.8MPa. In terms to the mineral composition, the marl is represented by calcite (46-48%) and quartz (12-13%), and within the scope of the clayish phase - illite-smectite, montmorillonite, kaolinite, glauconite, transformed feldspar and mica. With a view to its chemical composition, CaCO₃ is within the limits of 48.10 - 48.30%, while the remaining insolvable content (clayish + quartz) is within the limits of 51.03 - 51.87%.

5.2 Change in moisture during long-time testing

Having been extracted from the natural moist environment, marl loses moisture quickly at room temperature. Due to a significant content of clayish minerals and high porosity, the loss of moisture in the specimens results in shrinkage of material. At intensive drying and high moisture loss conditions, the shrinkage causes cracking and decomposition of material. With a view of the objective of the research, it was necessary to reduce deformations resulting from the moisture loss, i.e. shrinkage to the acceptable level to prevent their impact on mechanical properties of the material. For reduction of moisture changes during the creep test, after placing the measuring bases (plates) a thin layer of paraffin was applied to the specimen. This measure enabled significant reduction in moisture change, hence the shrinkage of rock material during the one year period of testing, was reduced to the acceptable level of several percents.

In the course of creep tests, at every deformation measuring series, temperature and air humidity were measured in the laboratory in which the tests were carried out. Humidity of specimen was defined by a method of drying at temperature of 105°C. Natural humidity of specimen varied in the range from 11% to 12%. Upon completion of the creep test of trial series of prismatic specimens, which lasted three months, the measured average humidity was 10.65%. After the completion of creep test main series of measurements, which lasted for 12 months, the measured average humidity was 7.40%.

5.3 Specimens for measurement of shrinkage deformation and deformation due to temperature changes

Despite the measures taken to prevent changes in moisture within samples during the long-time creep tests, certain moisture changes in the samples still appear, and consequently the shrinkage deformations caused by the moisture loss occur. Moreover, it was

temperatura varirala u rasponu od 10 do 32°C, pa su i te temperature promjene uzrokovala izvjesne dilatacije uzoraka.

Da bi se razdvojila dilatacija koja je posljedica naponske promjene od dilatacija koje su posljedica promjene vlage i promjene temperature, pripremljeni su dodatni uzorci koji nijesu opterećivani (kompenzacioni uzorci ili uzorci blizanci [slika 9. b]). Ovi uzorci opremljeni su mjernim bazama kao i opterećivani uzorci (prizmatični i pločasti) i čuvani su u vertikalnom položaju u blizini opterećenih uzoraka. Mjerenja na neopterećenim uzorcima (blizancima) vršena su uvijek kada i mjerenja na opterećenim uzorcima. Time je na neopterećenim uzorcima mjerena deformacija koja je posljedica promjene vlažnosti i promjene temperature, a na opterećenim uzorcima ukupna deformacija. Pri kasnijoj analizi rezultata, mjerene vrijednosti deformacija, dobijene pri testu puzanja, korigovane su (umanjene) za vrijednosti deformacije skupljanja i temperature mjerene na kompenzacionim uzorcima.

Na slici 11 prikazani su rezultati mjerenja dilatacije izmjerene na uzorcima pri testu puzanja, dilatacija izmjerena na kompenzacionim uzorcima (skupljanje uzrokovano gubitkom vlage i temperaturnim promjenama) i korigovani dijagram – dobijen kao razlika ove dvije dilatacije. Iz dijagrama se jasno vidi da se korekcijom mjerenih vrijednosti skupljanja dobija glatka kriva puzanja za dug period nakon opterećivanja.

impossible to enable constant temperature at the laboratory for a period of one year, but the temperature varied in the range from 10 to 32°C, which in turn caused certain sample dilatations.

Due to make differentiation between the dilatation caused by a change in stress and dilatation resulting from moisture change and temperature change, additional specimens were prepared to which load was not applied (compensation specimens or twin specimens), Figure 9.b. These specimens were provided with measuring bases as in the case of the loaded specimens (prismatic and plate-shaped) and were kept in vertical position in the vicinity of the loaded specimens. Measurements of non-loaded specimens (twin specimens) were made always when the measurements of loaded specimens were performed. Here, deformations caused by moisture change and temperature change were measured for non-loaded specimens and total deformation was measured for loaded specimens. Thereafter, during the analysis of the results, measured deformation values obtained from the creep test were adjusted (reduced) for the value of the shrinkage deformation and temperature change as measured on the compensation specimens.

Figure 11 illustrates the results of dilatation measured at creep test, dilatation measured on compensation specimens (shrinkage due to moisture loss and temperature changes) and adjusted diagram resulting from the difference between these two dilatations. The diagram clearly indicates that the adjustment of the shrinkage measuring values results in the smooth creep curve for a long period of time after the load application.

Slika 11. Rezultati mjerenja dilatacije na uzorku pri jednoosijalnom testu puzanja na 2.0MPa i dilatacije skupljanja na kompenzacionom uzorku

Figure 11. Results of dilatation measurement on specimen at uniaxial compression creep test at 2.0MPa and shrinkage dilatation on compensation specimen

6 REZULTATI TESTIRANJA

6.1 Test jednoaksijalne kompresije laporca pri kratkotrajnom opterećenju

Jednoaksijalni test na prizmatičnim uzorcima, pri nespriječenom bočnom širenju, kao najjednostavniji za izvođenje i interpretaciju, obično predstavlja početni korak pri istraživanju naponsko-deformacijskog ponašanja čvrstih materijala. Iako s vrlo jednostavnim poljem napona i deformacija, ovaj test daje vrlo jasne materijalne konstante i/ili parametre koji se mogu korisno upotrijebiti i pri analizi veoma složenih naponski zavisnih fenomena.

Ispitivani uzorci laporca, pri jednoaksijalnom testu, pokazuju nelinearnu vezu između napona i deformacija ovog materijala, čak i pri malom nivou napona. Na slici 12 prikazan je reprezentativan $\sigma - \varepsilon$ dijagram laporca, dobijen pri jednoaksijalnom testu. Uzorci su opterećivani jednoaksijalno, u pravcu duže ose prizme, u inkrementima od 1.0 MPa. Deformacije su mjerene u podužnom i poprečnom pravcu. Pri svakom inkrementu sile, deformacije su mjerene jedan minut nakon nanošenja opterećenja. Brzina opterećivanja je oko 3–4 minuta po inkrementu, tako da je uzorak dovođen do loma za oko 30 minuta.

Brojne stijene pokazuju osobinu da imaju različita deformabilna svojstva u različitim pravcima ispitivanja. Ova osobina je prvenstveno posljedica teksture tj. slojevitosti ili orijentacije zrna u mikrokompoziciji stijenskog materijala. Generalno je poznato da stijenski materijal pokazuje veću deformabilnost u pravcu upravnom na slojeve, a manju u pravcima paralelnim ravnima slojevitosti. Ispitivanje naponsko deformacijske veze laporca u različitim pravcima izvedeno je na prizmatičnim uzorcima pri jednoaksijalnom testu s nespriječenim bočnim širenjem. Uzorci su rezani u tri ortogonalna pravca: jedan vertikalni pravac koji odgovara vertikalnoj osi neporemećene stijene „in situ” i u dva upravna horizontalna pravca.

Na dijagramu slike 12, prikazani su rezultati jednoaksijalnih testova (oznaka EZ ukazuje na opterećivanje upravno na slojeve, EX u ravni slojeva; oznaka v i h ukazuje na pravac mjerenja dilatacija; v - u pravcu dejstva opterećenja, a h - u upravnom pravcu). Jasno se uočava veća deformabilnost laporca u pravcu upravnom na slojeve u odnosu na druga dva ortogonalna pravca. Modul elastičnosti (sračunat pri nivou napona 2.0 MPa) u pravcu X dva puta je veći od modula elastičnosti u pravcu Z, $E_z / E_x = 2.0$. Početni moduli elastičnosti u x-y ravni, pokazuju jednake vrijednosti (horizontalna ravan „in situ”). Navedeno deformacijsko ponašanje laporca ukazuje na to da se adekvatni proračuni naponski zavisnih fenomena u laporcima moraju sprovoditi reološkim modelima koji obuhvataju efekte transverzalne izotropije.

6 TEST RESULTS

6.1 Uniaxial compression test of marl at short-term loading

Uniaxial compression test of prismatic samples, with unconstrained lateral expansion, being the simplest to carry out and interpret usually represents the initial step in research of strain-dependent deformation behaviour of rigid materials. Notwithstanding its quite simple field of stress and deformations, this test provides very clear material constants and/or parameters which can have a purposeful application even for an analysis of highly complex strain- dependent phenomena.

Tested marl specimens, at uniaxial compression test, show non-linear relation between the stress and deformation of this material even at low stress level.

Figure 12 illustrates a typical $\sigma - \varepsilon$ diagram of marl obtained from the uniaxial compression test. Uniaxial load was applied to the specimens in the direction of the longer axis of the prism, in increments of 1.0MPa. Deformations were measured in the longitudinal and transverse direction. At each increment, the deformation forces were measured one minute after the load application. With the loading speed of 3-4 minutes per increment, every specimen was brought to failure within approximately 30 minutes.

The feature common in large number of rocks shows different deformability properties in different directions of testing. This feature comes as a result of the texture and/or layering or orientation of grain in micro-composition of rock material. It is generally known that the rock material shows higher deformability in the direction which is perpendicular to the layers, and lower deformability in the directions that are parallel to the layering planes. Testing of strain-dependent deformation relation of marls in different directions was carried out on prismatic specimens at uniaxial compression test with constrained lateral expansion. The specimens were cut in three orthogonal directions: one vertical direction which corresponds to the vertical axis of the undisturbed rock in situ and two perpendicular horizontal directions.

The Diagram illustrated in Figure 12 shows the results of uniaxial compression tests (where EZ means loading perpendicular to the layers; EX means loading in the layering plane; v and h denote direction of the dilatation measurement; v – in the load effect direction; h - in the perpendicular direction). It is easily observed that the marl exhibits higher deformability in the direction perpendicular to the layers compared to the other two orthogonal directions. Elastic modulus (calculated at the stress level of 2MPa) in the X direction is twice larger than the elastic modulus in the Z direction, $E_z / E_x = 2.0$.

The initial elastic modules in the x-y plane show even values (horizontal plane in situ). The said deformation behaviour of marl indicates that proper calculations of strain-dependent phenomena in marls need to be carried out on rheological models which include the effects of transverse isotropy.

Slika 12. Rezultati jednoaksijalnih testova upravno na slojeve i u ravni slojevitosti
Figure 12. Results of uniaxial compression tests carried out perpendicularly to the layers and in the layering plane

6.2 Rezultati jednoaksijalnih testova pri testu puzanja

Jednoaksijalni test puzanja na laporcu, predstavljen u ovom istraživanju, izveden je na dvije grupe po tri prizmatična uzorka dimezija 15x15x40 cm. Ukupno trajanje testa puzanja bilo je oko 180 dana. Opterećivanje uzoraka izvedeno je u inkrementima od 25% od krajnjeg napona testa puzanja, za svaku grupu uzoraka.

Srednje vrijednosti mjerenja deformacija na po tri prizmatična uzorka svake različito opterećene grupe uzoraka, pri aksijalnom naponu od 2.0MPa i 4.0MPa, prikazane su na slici 13. Na dijagramu se jasno izdvaja zona intenzivnog puzanja materijala u aksijalnom pravcu u prvih dvadeset dana nakon opterećivanja. Priraštaj deformacija u ovom periodu jeste nelinearan u odnosu na vrijeme. Nakon ovog perioda, deformacije puzanja su manje i priraštaj deformacija je približno linearan.

Na uporednom dijagramu prikazanom na slici 13, vidi se da je – pri aksijalnom naponu od 2.0 i 4.0 MPa – gradijent prirasta deformacije u toku vremena veći kod uzoraka opterećenih većim naponom pritiska. Značajno je naglasiti i to da aksijalna deformacija puzanja koja se razvije u toku šest mjeseci dostiže red veličine trenutne deformacije koju indukuje inicijalna promjena napona. Tako, pri naponu od 2.0 MPa, prosječna trenutna deformacija (prosječna deformacija na tri uzorka jedne serije) iznosi 1.41‰, a prosječna vremenska deformacija 0.98‰, dok pri naponu 4.0 MPa prosječna trenutna deformacija iznosi 3.27‰, a prosječna vremenska deformacija 2.74‰.

Poprečne dilatacije su oko deset puta manje od aksijalnih (ako se upoređuju njihove apsolutne vrijednosti), odnosno Poisson-ov koeficijent ima vrijednost $\nu = 0.1$. Ovaj odnos je približno isti za trenutnu dilataciju uzrokovanu naponskom promjenom i vremenski zavisne komponente ukupnih dilatacija. S povećanjem naponskog nivoa, ovaj odnos raste za ukupnu deformaciju (trenutna + vremenska) u sličnom odnosu kao i kod kratkotrajno opterećenih uzoraka (slika 13). Pri lomu, kod ispitivanog laporca, Poisson-ov koeficijent ima vrijednost $\nu = 0.25$.

6.2 Results of uniaxial compression tests at creep test

Uniaxial marl creep test in experimental research presented here was conducted on two groups with three prismatic specimens, 15x15x40cm each. Total duration of the creep test was about 180 days. Loading of the specimen was conducted in increments of 25% of defined level of stress in the creep test, for every group of specimens.

Average values of deformation measurements on three prismatic specimens out of each group of specimens that were subjected to different loading, at axial compression load of 2.0MPa and 4.0MPa are illustrated in Figure 13. A zone of an intensive creep of material in the axial direction in the first twenty days after the load application is clearly seen in the diagram. Increase in deformations over this time interval is not-linear to time. After this period, the creep deformations are smaller and the increase in deformations is almost linear.

Comparative diagram illustrated in Figure 13 shows that at axial compression of 2.0MPa and 4.0MPa, the gradient of deformation increase in time is larger in case of specimens that are subject to a larger compression load. It is important to note that axial creep deformation which occurs within 6 months reaches the order of magnitude of the instantaneous deformation induced by initial change in compression load. Therefore, at the compression load of 2.0MPa, an average instantaneous deformation (average deformation on three samples of one series) is 1.41‰, and an average time-dependent deformation is 0.98‰; while at compression load of 4.0MPa an average instantaneous deformation is 3.27‰, and an average time-dependent deformation is 2.74‰.

Transverse dilatation are about 10 times smaller compared to axial (when absolute values are compared), meaning the value of Poisson ratio is $\nu = 0.1$. This ratio is almost the same in the case of an instantaneous dilatation caused by change in compression and time-dependent component of total dilatations. With the increase of the compression level, this ratio grows for total deformation (instantaneous + time-dependent) in the same proportion as in the case of short-term loaded

Slika 13. Dijagram puzanja aksijalno opterećenih prizmatičnih uzoraka
Figure 13. Creep diagram of axially compressed prismatic specimens

specimens (Figure 13). At the failure of the tested marl, the Poisson ratio is $\nu = 0.25$.

6.3 Test na pločastim uzorcima

Prilikom testa na pločastim uzorcima (slika 14), nanijeto je opterećenje, jednoaksijalno i biaksijalno u svojoj ravni ploče, u inkrementima od 0.5 MPa, u toku jednog sata, do vertikalnog napona od 2.0 MPa, što je oko 25% od vršne čvrstoće ispitivanog laporca. Tri uzorka opterećena su jednoaksijalno, a u sljedeće tri grupe uzoraka variran je odnos horizontalnog i vertikalnog pritiska, $P_h/P_v = 0.3, 0.5$ i 1.0 . Inicirano naponsko stanje (uz održavanje konstantnog odnosa $P_h/P_v = \text{const.}$) održavano je narednih 45 dana, uz mjerenja polja deformacija na oba lica ploče.

6.3 Test on plate specimens

Test on plate specimens (Figure 14) consisted of applying uniaxial and biaxial load on the plate in its own plane, in increments of 0.5 MPa during a period of one hour up to vertical stress of 2.0 MPa, which makes for about 25% of the peak strength of the examined marl. Three specimens were loaded uniaxially, while in the following three groups of specimens the ratio P_h/P_v between horizontal and vertical load components was varied, 0.3, 0.5 and 1.0. The initiated stress state (with maintained constant ratio between horizontal and vertical stress) was retained in the following 45 days, with measurement of the deformation fields on both sides of the plate specimen.

Slika 14. Biaksijalno opterećenje na pločastim uzorcima
Figure 14. Biaxial load on plate specimens

Procedura ove faze testa definisana je tako da se ustanovi uticaj bočnog napona na puzanje u vertikalnom pravcu, te da se ustanovi varijacija mjerenih deformacija (trenutnih i vremenskih), zavisno od oblika uzorka (prizmatičan/pločast).

Bočno opterećenje biaksijalno opterećenih pločastih uzoraka značajno mijenja deformacijsku sliku, kako početne deformacije indukovane naponskom promjenom, tako i deformacije puzanja. Na slici 15 prikazani su rezultati mjerenja deformacije na tri grupe uzoraka opterećenih pri različitom odnosu horizontalnog i vertikalnog napona. Kao uporedna vrednost na svim dijagramima, prikazana je prosječna ukupna vertikalna (PR-v) i horizontalna (PR-h) deformacija prizmatičnih uzoraka pri istom vertikalnom naponu 2.0 MPa.

Pri odnosu $k = \sigma_h / \sigma_v = 1.0$ kod pločastih uzoraka, početna i vremenska vertikalna deformacija vrlo malo se razlikuje od deformacije jednoaksijalno opterećenih prizmatičnih uzoraka, kako je prikazano na dijagramu slike 15. Prirast vremenskih deformacija nešto je veći kod pločastih uzoraka nego kod prizmatičnih, i to nakon 10–15 dana od opterećivanja. Veći prirast vremenskih deformacija, prema tome, jeste posljedica većeg sekundarnog puzanja kod pločastih uzoraka (sekundarno puzanje dobija na značaju s protokom vremena, dok primarno puzanje, nakon desetak dana, praktično nema dalji uticaj na prirast deformacija). Ove razlike su očigledno posljedica oblika uzorka, jer je ispitivanje izvršeno pod istim uslovima na istom materijalu.

Sa smanjenjem odnosa $k = \sigma_h / \sigma_v$ od vrijednosti 1.0 prema jednoaksijalnom stanju, prirast inicijalnih i vremenski zavisnih vertikalnih deformacija raste, kao što je prikazano na dijagramima slike 15, što je posljedica oslobađanja bočnog širenja uzorka.

The procedure of this phase of the test was designed to determine effects of the lateral stress on the creep in the vertical direction as well as to determine variations of the measured deformations (instantaneous and time-dependent) depending on the shape of specimen i.e. prismatic – plate shaped.

Lateral loading in the case of biaxially compressed plate specimens significantly changes the deformation behaviour of both the initial deformations induced by a stress change and creep deformations. Figure 15 shows results of deformation measurements on three group of specimens loaded at different horizontal-vertical stress ratio. A comparative value presented in each diagram is an average total vertical (PR-v) and horizontal (PR-h) deformation of prismatic specimens at the same vertical stress of 2.0MPa.

At ratio $k = \sigma_h / \sigma_v = 1.0$ in the case of plate specimens, the initial and time-dependent vertical deformation slightly defers from the deformation of uniaxially compressed prismatic specimens, as illustrated in diagram, Figure 15. Increment of time-dependent deformations is somewhat larger in the case of plate specimens compared to prismatic specimens, after 10–15 days following the load application. Therefore, larger increment of time-dependent deformations is a consequence of larger secondary creep of the plate specimens (secondary creep grows in line with time, while primary creep after about 10 days practically has no further impact on the increase of deformations). These differences obviously come as a result of the shape of specimen, given that the tests were carried out under the same conditions on the same material.

With decrease of the ratio $k = \sigma_h / \sigma_v$ from the value of 1.0 towards the uniaxial state, the increment of initial and time-dependent deformations grows, as illustrated in Figure 15, which is a consequence of the unconstrained lateral expansion of the specimen.

Slika 15. Dijagram puzanja biaksijalno opterećenih uzoraka (PR– označava prizmatičan jednoaksijalno opterećen uzorak, a K označava odnos horizontalnog i vertikalnog napona na pločastim uzorcima)
Figure 15. Creep diagram of biaxially loaded specimens (PR means uniaxially loaded prismatic specimen, K means ratio of horizontal and vertical stress on plate specimens)

Horizontalna deformacija, kod biaksijalno opterećenih pločastih uzoraka, pokazuje kolebanje u prvih 5–7 dana od opterećivanja. U kasnijem periodu, puzanje u horizontalnom pravcu može se evidentirati samo kod jednako vertikalno i horizontalno opterećenih uzoraka. Kod ostalih uzoraka odnosa $k = \sigma_h / \sigma_v = 0.5$ horizontalne deformacije u toku vremena zadržavaju vrijednost inicijalne deformacije, a kod odnosa $k = \sigma_h / \sigma_v = 0.3$ horizontalne deformacije su skoro iste kao i horizontalne deformacije prizmatičnih uzoraka. Pri odnosu $k = \sigma_h / \sigma_v = 1.0$ i 0.5, horizontalna deformacija jeste deformacija skupljanja, a pri odnosu $k = \sigma_h / \sigma_v = 0.3$ horizontalna deformacija jeste deformacija širenja.

6.4 Konvencionalni test triaksijalne kompresije pri dugotrajnom opterećenju

Konvencionalni test triaksijalne kompresije daje mogućnost analize uticaja bočnog napona na deformisanje. Pritom, bočni pritisak $\sigma_2 = \sigma_3$ (koji se varira u setu testova) obično ne prelazi vrijednost od 50% vršne čvrstoće dobijene u jednoaksijalnom testu bez spriječenog bočnog širenja. Generalno, ovaj tip testa moguće je sprovesti uz kontrolisane sile kojim se uzorak opterećuje ili uz kontrolisanje brzine aksijalne deformacije. Test puzanja, koji je sproveden na laporcu u nešto kraćem vremenu (sedam dana), predstavlja specifičan triaksijalnog testa pri kontrolisanoj sili, koja je u ovom slučaju nakon nanošenja konstantna u toku testa.

Test puzanja na laporcu u konvencionalnom triaksijalnom aparatu sproveden je na deset uzoraka, pri konstantnom opterećenju od 2.0 MPa, u toku tri dana, te pri 4.0 MPa, u toku naredna tri dana. Tri uzorka testirana su bez bočnog pritiska, kod četiri bočni napon je 1.0 MPa, a kod tri 2.0 MPa. Ovaj relativno kratak test puzanja dao je neke kvalitativne pokazatelje ponašanja ispitivane stijene u toku vremena pri dejstvu jednakog bočnog pritiska.

Na dijagramu na slici 16. prikazani su rezultati testa puzanja triaksijalno opterećenih cilindričnih uzoraka pri različitim bočnim naponima pritiska. Pune linije ukazuju na aksijalnu (vertikalnu) dilataciju, a isprekidana linija na horizontalnu (radijalnu) dilataciju. Radijalna deformacija kod svih uzoraka, nakon jednog dana od opterećivanja, zadržava dostignuti nivo, bez obzira na intenzitet radijalnog napona u razmatranom domenu, dok aksijalna deformacija ukazuje na postojanje uticaja bočnog napona na tok vremenskih deformacija [16].

Horizontal deformation in the case of biaxially compressed plate specimens exhibits fluctuations in the first 5-7 days after the load application. In the later period, the creep in the horizontal direction can be observed only in specimens with even vertical and horizontal loading. In the case of other specimens with ratio $k = \sigma_h / \sigma_v = 0.5$, horizontal deformations retain the value of the initial deformation over the time, while at ratio $k = \sigma_h / \sigma_v = 0.3$, horizontal deformations are almost the same as horizontal deformations of the prismatic specimens. At ratio $k = \sigma_h / \sigma_v = 1.0$ and 0.5, horizontal deformation is a shrinkage deformation, and at ratio $k = \sigma_h / \sigma_v = 0.3$, horizontal deformation is an expansion deformation.

6.4 Conventional test of three-axial compression under long term loading

Conventional tests of three-axial compression give the possibility of analysis of influence of lateral stress on deformations. Lateral pressure $\sigma_2 = \sigma_3$ (which varies in the set of tests) usually does not exceed value of 50% of peak strength obtained in uniaxial test with free lateral deformations. Generally speaking, this type of test can be conducted with controlled forces with load against the specimen or with control of velocity of axial deformation. Creep test carried out on marl in a shorter period of time (seven days), represents a specific type of three-axial test with controlled force that is stress state which after the application remains constant during the test.

Creep test on marl in conventional three-axial device was carried out on 10 specimens with constant vertical load of 2.0 MPa over the period of 3 days and with 4.0MPa load within the following 3 days. Three specimens were tested without lateral pressure, the fourth one had lateral pressure of 1.0MPa, and three specimens had a 2.0MPa lateral pressure. This short creep test offered some relative indicators of behaviour of the examined rock in time with influence of rotation symmetrical lateral pressure.

Diagram in Figure 16. shows the creep test results of three-axially loaded cylindrical specimens with different lateral pressure. Full lines indicate axial (vertical) strain and dash lines indicate tangential (horizontal) strain. Radial deformation with all the specimens after one day of loading preserves the obtained level regardless the intensity of radial stress in the considered domain, while axial deformation indicates influence on lateral stress on the flow of time deformations [16].

Slika 16. Rezultati triaksijalnog testa puzanja na prizmatičnim i cilindričnim uzorcima pri aksijalnom naponu 2.0 MPa
Figure 16. Results of three-axial creep tests on cylindrical specimens and of uniaxial test on prismatic specimens with pre-axial stress of 2.0 MPa

7 ZAKLJUČAK

Ispitivanje puzanja laporca pri jednoaksijalnom i biaksijalnom naponskom stanju zahtijevalo je konstruisanje nestandardne opreme i uređaja za opterećivanje i mjerenje sile u toku dugog perioda. Uređaji sa okačenim teretom za nanošenje i održavanje sile u toku dugog perioda omogućili su potpuno i uspješno sprovođenje kompleksnih testova puzanja, u trajanju i od više od jedne godine, uz prihvatljive varijacije napona. Mehanički prstenasti mjerači sile korišćeni su za mjerenje sile u toku nanošenja opterećenja u inkrementima i mjerenje zadatog opterećenja na uzorcima u toku testa puzanja. Ovaj mehanički instrument obezbijedio je mjerenje sile u toku nanošenja opterećenja u inkrementima, ali i kontrolu sile u toku testa puzanja u trajanju od više od jedne godine, na vrlo jednostavan i pouzdan način, uz obezbjeđenje varijacije opterećenja manje od 1%.

Mjerenje deformacija puzanja mehaničkim deformetrom, na uzorcima od laporca, pokazalo se kao vrlo pouzdano u toku dugog perioda trajanja testa puzanja. Obezbijeđena tačnost mjerenja ovog tipa uređaja od 2–3/1000 mm u potpunosti je zadovoljavajuća, jer su mjerene promjene rastojanja između repera (oko 100 mm) od 0.5 do 1 mm. Mana upotrebe mehaničkog deformetra jeste dugotrajno mjerenje na brojnim mjernim mjestima, kao što je to bio slučaj s pločastim uzorcima-modelima.

Rezultati jednoaksijalnih testova ukazuju na to da materijal pokazuje nelinearnost u pogledu napona i deformacija, čak i pri niskom nivou napona, ali se značajna nelinearnost javlja tek kada napon dostigne vrijednost od oko 80% od vršne čvrstoće σ_c pri jednoaksijalnom testu. Laporac je nastao sedimentacijom u dubokoj jezerskoj vodi, a posljedica toga jeste poseban oblik mikrostrukture zbog slaganja čestica s različitom orijentacijom u vertikalnom, odnosno horizontalnom pravcu. Ispitivanje mehaničkih karakteristika u vertikalnom i horizontalnom pravcu pokazalo je da se materijal ponaša izuzetno transversalno izotropno.

7 CONCLUSION

Testing of marl creep behaviour at uniaxial and biaxial stress state required designing non-standard equipment and devices for loading and force measurement over a long time interval. Devices with hanged dead weight for application and control of force over a long time interval enabled the creep tests to be completely and successfully carried out for a period of over one year, with the acceptable stress variations. Mechanical ring-type dynamometers were used for force measurement during incremental application of load and measurement of the predefined load on the specimens at the creep test procedure. In addition to the force measurement in the course of incremental application of load, this mechanical instrument also enabled simple and reliable control of the force at the creep test carried out over a period of more than one year, with the load variations below 1%.

Measurement of creep deformations in marl specimens by mechanical deformer showed to be reliable for a long time interval of the creep test. This type of device provides measurement accuracy of 2–3/1000 mm which is fully satisfying, considering that the measured changes in distance from the reference point (at the distance of about 100 mm) range from 0.5 to 1 mm. Downside of the use of mechanical deformer is a time-consuming measurement on the large number of measuring points, as it was the case with the plate specimens-models.

Results of the uniaxial compression tests indicate that material shows non-linearity in relation to the stress and strain even at the low level of stress; however a significant non-linearity is observed only when the stress reaches the value of 80% of the peak strength σ_c at uniaxial compression test. Marl is formed by sedimentation in deep lake water, which resulted in a specific shape of the microstructure due to the layering of particles with different orientation in the vertical and/or horizontal direction. Testing mechanical properties in the vertical and horizontal direction showed a distinctive

Značajno različito deformacijsko ponašanje laporca u različitim pravcima ukazuje na to da se proračuni naponski zavisnih fenomena u laporcima i sličnim stijenama moraju sprovoditi na reološkim modelima koji obuhvataju efekte transverzalne izotropije.

Testovi puzanja, sprovedeni na jednoaksijalno opterećenim prizmatičnim uzorcima, ukazuju na to da laporac, pri konstantnom jednoaksijalnom naponu pritiska, pokazuje značajne vremenske deformacije - puzanje. U prvih dvadeset dana nakon opterećivanja, priraštaj deformacija je nelinearan u odnosu na vrijeme. To je zona intenzivnog puzanja materijala u aksijalnom pravcu - primarno puzanje. Nakon tog perioda, deformacije puzanja su manje i priraštaj deformacija je približno linearan - sekundarno puzanje. Pritom, gradijent prirasta deformacije u toku vremena je veći kod uzoraka opterećenih većim naponom pritiska.

Bočni pritisak kod biaksijalno opterećenih pločastih uzoraka značajno mijenja deformacijsku sliku, kako početnih deformacija indukovanih naponskom promjenom, tako i deformacija puzanja. Sa smanjenjem odnosa $k = \sigma_h / \sigma_v$ od vrijednosti 1.0 prema (ka) jednoaksijalnom stanju napona, prirast inicijalnih i vremenski zavisnih vertikalnih deformacija raste, što je posljedica oslobađanja bočnog širenja uzorka. Uporedna analiza vremenski zavisnih deformacija jednoaksijalno opterećenih prizmatičnih uzoraka i radijalnih deformacija oko kružnog otvora (kod dvoosno opterećenih pločastih uzoraka - modela), ukazuje na to da nema bitne razlike u obliku i u ukupnoj veličini vremenskih deformacija. Ovo opet ukazuje na to da se rezultati puzanja dobijeni na vrlo jednostavnim jednoaksijalnim testovima mogu koristiti u inženjerskoj praksi za ocjenu vremenski zavisnih deformacija meke stijene, pri znatno složenijem naponskom stanju - kakvo je stanje napona oko tunelskih otvora.

Efekat uticaja bočnog napona pritiska na aksijalnu deformaciju, pri konvencionalnom testu triaksijalne kompresije, znatno je veći nego na uticaj bočnog napona kod biaksijalnog opterećenja. Aksijalna deformacija, u uslovi- ma rotaciono simetričnog pritiska, može biti manja i do 100% (pri hidrostatsičkom stanju napona, $k=1.0$) od aksijalne deformacije, razvijene bez djelovanja bočnog pritiska.

transversal isotropic behaviour of material. The significant differences in the behaviour of marl in different directions indicate that calculations of stress-dependent phenomena in marls and similar rocks should be performed on rheological models which include the effects of the transversal isotropy.

The creep tests of the uniaxially and biaxially loaded specimens suggest that when marl is under constant uniaxial stress state, significant time-dependent deformations - creep are observed. In the first twenty days following the load application, the increment of deformations is non-linear in relation to time. This is a zone of intensive creep of material in the axial direction - primary creep. After this period, the extent of creep deformations is smaller and the increment of deformations is approximately linear - secondary creep. In addition, the gradient of deformation increment is higher in the case of the specimens under higher compression pressure.

Lateral compression in the case of biaxially compressed plate specimens significantly changes the deformation both the initial deformations induced by a change in stress and creep deformations. With the decrease in value of the ratio $k = \sigma_h / \sigma_v$ from value of 1.0 towards uniaxial stress state, the increment of initial and time-dependent vertical deformations grows as a result of the relief from lateral expansion of the specimen. Comparative analysis of time-dependent deformations in uniaxially compressed prismatic specimens and radial deformations around the circular opening (in the case of biaxially compressed plate specimens-models) suggests that there is no relevant difference in the shape and total extent of the time-dependent deformations. This indicates that the results obtained from the quite simple uniaxial compression tests can be applied in the engineering practice for the purposes of assessment of time-dependent deformations in soft rock at far more complex stress state, such as the stress state within the rocks around the tunnel opening.

In the conventional three-axial compression test, the effect of lateral strain on the axial deformation is significantly larger compared to the effect of the lateral strain in the case of the biaxial compression. At rotationally symmetric pressure, the axial deformation can be even up to 100% (at hydrostatic stress state $k=1.0$) smaller than the axial deformation that is generated without an impact of the lateral strain.

8 LITERATURA REFERENCES

- [23] Bergues J. & Nguyen D., Hoetit N. 1998. Time dependent behaviour of hard marls, The Geotechnics of hard Soils-Soft Rock, Evangelista & Picarelli, Balkema, Rotterdam.
- [24] Baryshnikov V. D., 2012, Estimating Remaining Life of Underground Tunnel Concrete Lining by Convergence Measurements, Journal of Mining Science, 2012, Vol. 48, No. 3, pp. 440–444
- [25] Bosman, J., Malan, D., and Drescher, K. 2000. „Time-dependent tunnel deformation at Hartebeestfontein mine.” J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 100(6), pp. 333–340.
- [26] Cristescu, N.D. and Hunsche, U. 1998. Time effects in Rock Mechanics. John Wiley & Sons.
- [27] Cristescu, N.D. 2009. Time Effects in Rock Mechanics. Proceedings of the SEM Annual Conference, June 1–4, Albuquerque New Mexico USA ©2009 Society for Experimental Mechanics Inc.

- [28] Goodman, R. E. 1989. Introduction to rock mechanics, Wiley, New York. John Wiley & Sons.
- [29] Jaeger J.C. & Cook N.G.W., and Zimmerman R.W. 2007. Fundamentals of Rock Mechanics, Chapman and hall Ltd. And Science Paperbanks.
- [30] Langer M., 1979, Rheological behaviour of rock masses, Proc. 4th Int. Con. On Rock Mech., Montreux, Vol.3., pp 29–62.
- [31] Pan Y.W. and Dong J.J. 1991a. Time-Dependent Tunnel Convergence - I. Formulation of the Model, J.Rock Mech. and Mining Sci., pp. 469–475
- [32] Pan Y.W. and Dong J.J., 1991b. Time-Dependent Tunnel Convergence - II. Advance Rate and Tunnel-Support Interaction, J.Rock Mech. and Mining Sci., pp. 475–488
- [33] Pande G.N., Beer G. & Williams J.R. 1995. Numerical Methods in Rock Meshanics, John Wiley & Sons Ltd.
- [34] Phienweij, N., Thakur, P. K., and Cording, E. J. 2007. „Time-dependent response of tunnels considering creep effect.” Int. J. Geomech., 7(4), p.p 296–306.
- [35] Sakurai, S., 1978, „Approximate time-dependent analysis of tunnel support structure considering progress of tunnel face.” Int. J. Numer.Analyt. Meth. Geomech., 2, 59–175.
- [36] Tomanovic, Z. 2006. Rheological model of soft rock based on test on marl. Int. J. Mechanics of Time-Dependent Materials, Springer, pp. 135–154.
- [37] Tomanovic, Z. 2007. Reološki model puzanja matriksa meke stijene / Rheological model of matrix of soft rock creep, Građevinski materijali i konstrukcije / Building matrilas end structure, vol. 50, br. 1-2, str. 3-19
- [38] Tomanovic, Z. 2009. Influence of Ko on creep properties of marl. Int. J. Acta Geotechnica Slovenica, pp. 14-29.

REZIME

TESTIRANJE FENOMENA PUZANJA MEKE STIJENE

Zvonko TOMANOVIĆ

Test puzanja karakteriše konstantno opterećenje pod kojim se materijal s vremenom deformiše. Zbog toga je za korektno izvođenje testa puzanja veoma važno održavanje - kontrolisanje konstantnog naponskog stanja koje je aplicirano na uzorak. Naime, uticaj napona pritiska na veličinu deformacije puzanja izrazito je nelinearan, pa zbog toga nivo napona, odnosno eventualne varijacije napona u toku vremena imaju veliki uticaj na prirast vremenski zavisnih komponenti deformacija. Radi toga, u toku testa puzanja – koji nekada traje i godinama – treba obezbijediti da varijacije napona budu u granici od $\pm 1\%$. U ovom radu predstavlja se konstrukcija aparature s „mrtvim” opterećenjem za održavanje konstantnog naponskog stanja u toku dugog perioda (dana, nedjelja ili godina), kapaciteta od 750 kN i 1500 kN, kao i mjerenje sile i deformacija u toku testa puzanja. Testovi puzanja sprovedeni su na uzorcima laporca, u trajanju do jedne godine. Predstavljeni su rezultati jednoaksijalno opterećenih prizmatičnih uzoraka dimenzija 15x15x40 cm i rezultati testa puzanja biaksijalno opterećenih pločastih modela dimezija 60x60x10 cm, s kružnim otvorom u sredini. Takođe, prikazani su i rezultati testa puzanja u triaksijalnom aparatu na uzorcima dimenzija $d/h = 5.4/108$ cm.

ključne riječi: puzanje, aparatura za opterećivanje, laporac, mjerenje sile i deformacija, meka stijena

SUMMARY

TESTING OF CREEP PHENOMENA ON SOFT ROCK

Zvonko TOMANOVIĆ

Creep test involves deformation of material with time under a constant stress. Hence, for proper conducting of the creep test it is highly important to maintain, i.e. constant control the stress applied to a specimen. Namely, impact of the compression on the extent of deformation is distinctively non-linear; therefore the stress level or eventual variations of stress over time largely affect the increment of time-dependent components of deformation. Therefore, it is necessary to ensure that variations of stress are kept within limits of $\pm 1\%$ during the creep test the duration of which sometimes may last for several years. This paper presents structure of the dead-weight creep apparatus for maintaining constant stress over long time interval (day, week or year) with a capacity of 750kN and 1500kN, as well as for measuring of force and deformations at creep test. The creep tests have been conducted on marl specimens in duration of up to one year. The creep test results are presented for the uniaxially compressed prismatic specimens of dimensions 15x15x40cm and biaxially compressed plate models of dimensions 60x60x10cm, with circular opening at centre.

Key words: creep, load-application apparatus, marl, force and deformation measurements, soft rock