

Uvjeti uporabe lapora za izradu nasipa

Predrag Mišćević, Tanja Roje Bonacci

Ključne riječi

lapor,
nasip,
uvjeti ugradnje,
slijeganje nasipa,
posmična čvrstoća,
rastrojba

P. Mišćević, T. Roje Bonacci

Prethodno priopćenje

Uvjeti uporabe lapora za izradu nasipa

Hrvatski propisi koji reguliraju uvjete ugradnje lapora u nasipe ne vode računa o svojstvu lapora da se vremenom može razgraditi. Zbog degradacije zrna u nasipu od lapora javlja se dodatno neočekivano slijeganje nasipa, a poslije i problemi zbog smanjenja posmične čvrstoće. Osnovni uzrok rastrožbe lapora je ponavljano sušenje i vlaženje. Predlaže se način razvrstavanja lapora s obzirom na podložnost rastrožbi, a predlažu se uvjeti ugradnje kojima se uklanja utjecaj rastrožbe.

Key words

marl,
embankment,
construction
requirements,
embankment settlement,
shear strength,
disintegration

P. Mišćević, T. Roje Bonacci

Preliminary note

Requirements for marl use in embankment construction

Croatian regulations on marl use in embankment construction do not take into account marl's ability to disintegrate with the passage of time. The disintegration of particles in marl embankments causes additional and unexpected settlement of embankment, which eventually causes problems arising from shear strength reduction. The marl disintegration is principally due to the repeated drying and wetting of marl particles. A method for classifying marls with respect to their disintegration susceptibility is proposed, and construction requirements for eliminating disintegration effects are given.

Mots clés

marnes, remblai,
conditions de mise
en oeuvre,
tassement du remblai,
résistance au cisaillement,
altération

P. Mišćević, T. Roje Bonacci

Note préliminaire

Utilisation des marnes pour la construction des remblais

La réglementation croate prescrivant les conditions de mise en oeuvre de la marne dans les remblais ne tient pas compte de l'altération de la marne dans le temps. La dégradation des grains dans un remblai en marne entraîne un tassement supplémentaire intempestif du remblai, ainsi que d'autres problèmes liés à la diminution de la résistance au cisaillement. L'altération de la marne est due essentiellement aux passages successifs de l'état sec à l'état humide. On propose une classification des marnes selon leur tendance à l'altération, ainsi que des conditions de mise en oeuvre supprimant les effets de l'altération.

Schlüsselworte:

Mergel,
Damm,
Einbaubedingungen,
Dammsetzung,
Schubfestigkeit,
Zerfall

P. Mišćević, T. Roje Bonacci

Vorherige Mitteilung

Bedingungen für die Anwendung von Mergel beim Dammbau

Die kroatischen Vorschriften über den Einbau von Mergel in Dämme beachten die Tatsache nicht dass Mergel mit der Zeit zerfallen kann. Wegen der Degradierung der Körner im Mergeldamm geschieht eine unerwartete zusätzliche Setzung des Damms, und später treten Probleme auf wegen der Minderung der Schubfestigkeit. Die Grundursache des Zerfalls ist wiederholtes Trocknen und Befeuchten des Mergels. Vorgeschlagen sind eine Klassifizierungsweise für Mergel in Bezug zur Verfallbarkeit, sowie Einbaubedingungen mit welchen der Einfluss des Zerfalls beseitigt wird.

Autori: Doc. dr. sc. **Predrag Mišćević**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Tanja Roje Bonacci**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Matice hrvatske 15

1 Uvod

Lapor kao dio flišnih naslaga vrlo je raširen na području Hrvatske, posebno u priobalnom pojasu. Zbog toga se često susreće na gradilištima i rabi kao materijal za izradu nasipa. Nažalost, uočena su brojna oštećenja nasipa od zbijenog lapora, koja su posljedica neočekivano velikog slijeganja i posmičnih slomova.

Flišne naslage kao marinski sediment karakterizirane su učestalom izmjenom slojeva gline, lapora, vapnenca, pješčenjaka i breča [1]. Unutar ove serije lapor je materijal koji pokazuje svojstva u rasponu od prekonsolidirane laporovite gline do tvrdoga vapnovitog lapora. Inženjeri u praksi, ali i neki znanstvenici, lapor kao materijal različito definiraju. U ovome radu pod tim pojmom podrazumijevat će se sediment sastavljen uglavnom od kalcita i minerala gline (*ilit*, *ilit-muskovit*, *montmorilonit*) s nešto kvarca, feldspata i plagioklasa. To znači da će se njime obuhvatiti grupa materijala koju čine laporovita glina, glinoviti lapor, lapor i vapnoviti lapor.

Nakon iskopa, poradi oslobađanja naprezanja i utjecaja okoline [5], na laporu se uočava proces promjene (degradacije) inženjerskih svojstava u vremenu. Pri tome red veličine razdoblja u kojem degradacija svojstava teče, u ovome radu opisat će se pojmom "inženjersko razdoblje vremena" [3]. Ovaj pojam obuhvaća razdoblje od nekoliko mjeseci do nekoliko desetaka godina, odnosno razdoblje uporabe građevine. U tom razdoblju neki lapori mijenjaju svojstva (degradiraju) od kamenog materijala u zemljani materijal s česticama veličine gline. Intenzitet rastrožbe varira ovisno o svojstvima pojedine vrste lapora i učestalosti djelovanja okoline.

Mogućnost da se inženjerska svojstva lapora upotrijebjenog za izgradnju mogu značajno promijeniti u razdoblju uporabe nasipa, može uzrokovati značajne teškoće za one koji su uključeni u projektiranje i izgradnju nasipa. Deformabilnost i nosivost nasipa ovisi o strukturi zrna koja ga grade. Struktura može biti promijenjena povećanjem naprezanja i deformacije, ali i dezintegracijom samih zrna. Uzimajući u obzir podložnost rastrožbi, degradacija zrna unutar zbijenog nasipa od lapora postaje značajan čimbenik. Početno stanje strukture od dobro zbijenih krupnih zrna može se tijekom vremena progresivno promijeniti u rahlu strukturu zrna veličine gline. Time se povećava deformabilnost i smanjuje posmična čvrstoća nasipa.

Lapori, koji iskazuju privremenu trajnost, problematični su za pravilan odabir načina ugradnje. Najčešće se ugrađuju kao kameni materijal, pri čemu se stvara struktura koja je izrazito osjetljiva na degradaciju zrna koja je tvore. Ako se međutim ugrađuju kao zemljani materijal, problem stvaraju komadi i blokovi trajnijih i čvršćih slojeva lapora (koji se zbog slojevite strukture fliša go-

tovo uvijek pojavljuju). Ovi komadi onemogućuju pravilno zbijanje jer se opterećenje u trenutku zbijanja prenosi preko njih, a mekši materijal u njihovoj okolini zbog toga ostaje nezbijen. Međutim kada se oni tijekom vremena počnu degradirati i zapunjavati šupljine u svojoj okolini, nastaje dodatno neočekivano slijeganje. Iz tih razloga postaje potrebno pravilno razvrstati lapore, kako bi se mogli odgovarajuće pripremiti i upotrijebiti za izgradnju nasipa. Pri tome, kako su predmetni materijali skloni dezintegraciji i promjeni svojstava, trajnost postaje bitan čimbenik za njihovo razvrstavanje.

Po svojim svojstvima lapori ne pripadaju ni kategoriji zemljanih materijala niti u kategoriju stijena. Svojstva im odgovaraju materijalima koji se danas u literaturi označavaju kao *tvrdi tlo - meke stijene* [8] (*hard soils - soft rocks*). Zbog toga mnogi uobičajeni postupci ispitivanja svojstava razvijeni za tlo ili stijenu nisu u potpunosti odgovarajući za ispitivanje lapora. Pritom problem uporabe ovih materijala za nasipe nije obuhvaćen ni kategorijom mehanike mekih stijena. S obzirom na dosadašnje spoznaje na tom području, problemi se rješavaju na način da, ako su u mekim stijenama dominantne pukotine za rješavanje inženjerske zadaće primjenjuju se teorije mehanike stijena, a ako se može promatrati kao kvazikontinuum primjenjuju se teorije mehanike tla [8]. Međutim takav pristup ne daje kvalitetnu klasifikaciju koja bi obuhvatila i problem trajnosti ovih materijala. Za mnoge slične materijale (glinci, šejlovi itd.) razvijeni su zasebni sustavi klasifikacije koji obuhvaćaju i trajnost inženjerskih svojstava [4, 9], ali za sada oni nisu općenito primjenjivi. Unutar mehanike mekih stijena ovom se problemu u današnjem trenutku posvećuje značajna pozornost.

Postoji nekoliko bitnih zahtjeva korisnika (projektanti, izvođači) koje klasifikacija lapora mora obuhvatiti. Ona im mora omogućiti donošenje odluke o načinu iskorištavanja određenih vrsta lapora za određene zone nasipa.

Trenutno valjani propisi za izradu nasipa ne rješavaju problem degradacije zrna lapora u strukturi nasipa. Prema propisima uvjeti izrade nasipa podijeljeni su u tri kategorije: nasip od zemljanih materijala, nasip od miješanih materijala i nasip od kamenih materijala. Lapor i slični materijali svrstani su u grupu miješanih materijala s opisom "materijali koji su manje osjetljivi na djelovanje vode". Pritom se misli na kvalitetu i mogućnost ugradnje s obzirom na vlažnost materijala, a ne prepoznaje se svojstvo lapora da može promijeniti inženjerska svojstva u vremenu trajanja građevine. Lapor je upravo osjetljiv na proces sušenja i vlaženja.

U ovome se radu na osnovi provedenih istraživanja predlažu uvjeti koje treba primijeniti pri izradi nasipa od lapora, kako bi se uklonila mogućnost dodatnoga neočekivanog slijeganja i smanjenja posmične čvrstoće zbog

degradacije zrna u strukturi. Provedenim ispitivanjima pokazano je da se, procesom ponavljano sušenja i vlaženja, mijenja (smanjuje) čvrstoća lapora i da se povećava deformabilnost nasipa zbog dezintegracije zrna. Predložena je klasifikacija lapora s obzirom na osjetljivost prema rastrožbi te uvjeti ugradnje za pojedinu grupu.

Rješenja problema degradacije zrna lapora u strukturi nasipa, s uvjetovanjem sprječavanja mogućnosti promjene vlažnosti zrna u vremenu (plombiranje nasipa), u ovom se radu nisu razmatrala. Upravo nasipi koji su zahvaljujući slučajnosti inženjerskog rješenja zaštićeni od promjena vlažnosti u vremenu služe kao argument inženjerima u praksi da lator ne treba posebno tretirati. Iz istog se razloga i pri sanaciji oštećenja nasipa od lapora ne pridaje važnost degradaciji zrna u strukturi nasipa.

2 Laboratorijska ispitivanja

Osnovni uzrok degradacije zrna lapora jest promjena vlažnosti u ponavljanoj procesu sušenja i vlaženja [5, 6]. Proces sušenja i vlaženja ima za posljedicu razaranje veza unutar strukture materijala (većinom kalcitnih). Razaranje veza na zrnima lapora očituje se raspucavanjem (mrvljenjem) zrna u manje komade i/ili "ljuštenjem" materijala u obliku sitnih fragmenata s površine zrna. Proces raspucavanja svojstven je za lapore s više kalcita, dok je "ljuštenje" svojstveno za lapore s više minerala gline. Iako je obično jedan proces dominantan, redovito oba teku istodobno.

Osnovni procesi koji istovremenim ili pojedinačnim djelovanjem uzrokuju navedene oblike degradacije lapora su [5]:

- Bujanje koje je posljedica kemijskog procesa. Najčešći oblik jest transformacija karbonata u gips koji ima 99,9% veći obujam od komponenata koje ulaze u reakciju.
- Bujanje minerala gline. Neki lapori sadrže minerale glina koji bujaju u dodiru s vodom.
- Razaranje kalcitnih veza zbog naglog upijanja vode u pukotine suhog zrna (*slaking*). Kapilarno upijena voda u suhom zrnima "nagurava" zarobljeni zrak prema vrhu pukotine što stvara pritisak koji dalje raspucava pukotinu.
- Razlaganje minerala gline. U laporima s većim sadržajem minerala gline, minerali gline se u dodiru s vodom razlažu iz strukture te kidaju obično slabe kalcitne veze u strukturi.
- Promjena obujma zbog promjene temperature. Proces karakterističan za sve materijale na laporima ima za posljedicu razaranje strukturnih veza. Obično je više izražen za materijale na površini, izložene djelovanju atmosferilija, dok za zrna unutar nasipa uglavnom ima mali utjecaj.

2.1 Promjena čvrstoće lapora s procesom sušenja i vlaženja

Promjena čvrstoće lapora s promjenom vlažnosti ispitivala se pokusom točkaste čvrstoće (*point load test*) na nepravilnim uzorcima približno oblikovanim u blokove. Zbog osjetljivosti na promjenu vlažnosti i temperature većinu vrsta lapora nije moguće oblikovati u pravilna tijela za ispitivanje [2]. Rezanje uzoraka vodom (promjena vlage) ili bez vode (promjena temperature zagrijavanjem) razara uzorak. Ispitivani su uzorci reda veličine do 10 cm. U ovome radu prikazat će se ispitivanje dvaju uzoraka lapora označenih sa A1 i A2 svojstva kojih su prikazana u tablici 1.

Tablica 1. Svojstva ispitanih uzoraka

Oznaka uzorka	Sadržaj karbonata C [%]	Slake durability index I_{d2} [%]	Prirodna vlažnost w_o [%]
A1	68.68	96.27	3.16
A2	81.88	98.67	0.92

Za svako ispitivanje indeks točkaste čvrstoće I_S [7] određen je prema izrazu:

$$I_S = \frac{P}{D_e^2} = \frac{P}{\frac{4WD}{\pi}} \quad (1)$$

gdje su:

P - sila pri slomu

W - širina uzorka

D - razmak između točaka opterećenja.

Svi rezultati svedeni su na uzorak promjera 50 mm, kako bi se uklonio utjecaj veličine uzorka, prema izrazu:

$$I_{S(50)} = F \cdot I_S = (D_e / 50)^{0.45} \cdot I_S \quad (2)$$

gdje je F faktor korekcije predložen prema [7]. Utjecaj ovog faktora korekcije nije se posebno ispitivao jer je namjera bila samo usporediti promjenu čvrstoće, a ne odrediti samu vrijednost čvrstoće.

Tablica 2. Primijenjeni ciklusi promjene vlažnosti

Tip ciklusa	Opis promjene vlažnosti
I.	uzorci s prirodnom vlažnošću nakon iskopa
II.	suhi uzorci osušeni iz prirodnog stanja vlažnosti
III.	uzorci navlaženi iz prirodnog stanja vlažnosti do zasićenog stanja
IV.	uzorci osušeni iz prirodnog stanja vlažnosti te ponovno navlaženi do približno prirodnog stanja vlažnosti
V.	uzorci osušeni do suhog stanja iz prirodne vlažnosti pa navlaženi do zasićenog stanja

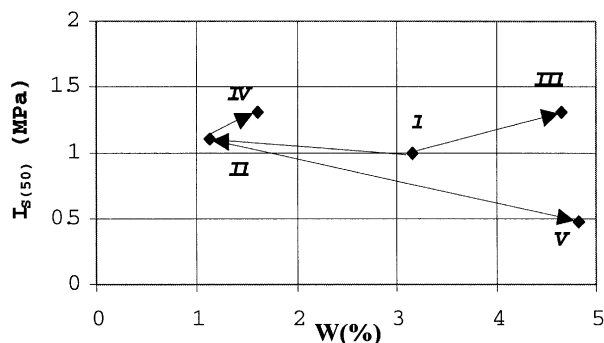
Ispitivane su vrijednosti indeksa točkaste čvrstoće za cikluse vlaženja i sušenja opisane u tablici 2.

Za svaki ciklus sušenja i vlaženja ispitivano je po 15 uzoraka, a vrijednost indeksa točkaste čvrstoće određena je kao srednja vrijednost nakon što je isključena najviša i najniža vrijednost u seriji. Tako dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 3.

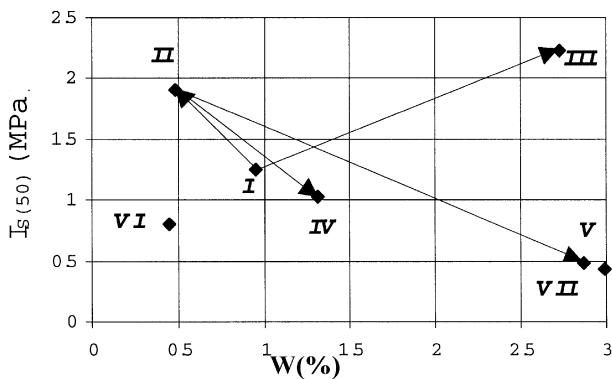
Tablica 3. Prikaz promjene čvrstoće na analiziranim uzorcima, s promjenom indeksa točkaste čvrstoće za cikluse vlaženja i sušenja prema tablici 2.

uzorak ciklus	Uzorcima A1		Uzorcima A2	
	vlažnost [%]	$I_{S(50)}$ [MPa]	vlažnost [%]	$I_{S(50)}$ (MPa)
I	3,16	0,99	0,92	1,25
II	1,13	1,11	0,48	1,90
III	4,66	1,31	2,73	2,23
IV	1,61	1,31	1,31	1,02
V	4,83	0,47	2,87	0,48

Vrijednosti iz tablice 3. nalaze se na slikama 1. i 2., na kojima su strelicama prikazane "putanje" promjene vlažnosti od početne prirodne.



Slika 1. Prikaz promjene srednje vrijednosti indeksa točkaste čvrstoće $I_{S(50)}$ u seriji uzoraka A1 za pojedini ciklus u odnosu prema veličini vlažnosti na kraju ciklusa



Slika 2. Prikaz promjene srednje vrijednosti indeksa točkaste čvrstoće $I_{S(50)}$ u seriji uzoraka A2 za pojedini ciklus u odnosu prema veličini vlažnosti na kraju ciklusa

Pri malim promjenama vlažnosti od prirodne (bilo sušenje bilo vlaženje) ne dolazi do značajne promjene čvrstoće. Međutim, prikazani primjeri pokazuju značajno smanjenje čvrstoće za više od 50%, nakon prvog ciklusa sušenja do približno suhog stanja, pa vlaženja do veličine upijanja. Daljnjim sušenjem i vlaženjem (prikazanim na seriji A2 s točkama VI. i VII. na slici 2.) dolazi do daljnjeg smanjenja čvrstoće.

Zbog smanjivanja čvrstoće zrna koja ga grade, i bez promjene polja naprezanja, u nasipu može doći do deformacije i smanjivanja čvrstoće nasipa kao strukture.

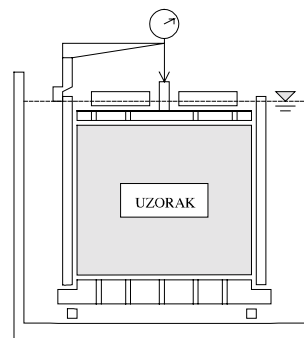
2.2 Deformacija nasipa uzrokovana degradacijom zrna

Dodatno slijeganje (uspravna deformacija) nasipa izrađenog od lomljenog lapora ispitivalo se u laboratorijskim uvjetima, ali je potvrđeno na nizu primjera u praksi [12]. Naziv "dodatno slijeganje" upotrijebit će se zbog toga što se ispitivala deformacija koja nije neposredna posljedica promjene polja naprezanja, već je posljedica promjene svojstava zrna koja grade strukturu.

U prirodnim uvjetima u nasipu proces sušenje-vlaženje, odnosno prijelaz s najveće na najmanju vlažnost i obratno najčešće ovisi o klimatskim i hidrološkim prilikama (ili lokalnom umjetnom unosu vlage - oštećenje kanalizacije, vodovoda i sl.). Zbog najčešće sporog prijelaza iz jednog krajnjeg stanja vlažnosti u drugo, rezultati su vidljivi tek u vremenskom redu veličine od nekoliko godina. Da bi se proces ubrzao u laboratorijskim uvjetima, odabran je umjetni proces sušenje-vlaženje koji se sastojao od ciklusa [10]:

- Vlaženje: - uzorak potpuno uronjen u vodu: 4 sata
- Sušenje: - umjetno sušenje na temp. od 90°C: 17 sati
- sušenje na sobnoj temperaturi (oko 20°C) radi hlađenja uzorka prije uranjanja u vodu: 3 sata

Za pokus je uporabljen cilindar unutarnjeg promjera 15 cm, s početnom visinom uzorka od oko 11 cm, prikazan na slici 3. Cilindar ima nepomične stranice i dno, a samo se ploča s opterećenjem na vrhu može vertikalno pomicati.



Slika 3. Cilindar za ispitivanje slijeganja zbog sušenja i vlaženja zrna u strukturi

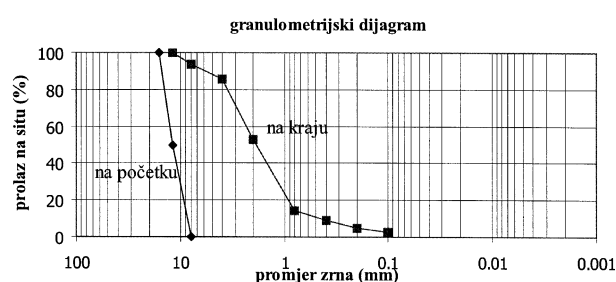
Uzorci su se ugrađivali u cilindar samo uz potresanje, bez mehaničkog zbijanja, kako bi se što više sačuvao granulometrijski sastav ugrađene mješavine zrna. Mehaničko bi zbijanje dodatno usitnjavalo zrna i granulometrijski sastav ugrađenog "paketa" ne bi odgovarao granulometrijskom sastavu kontrolirane mješavine za potrebe pokusa.

Ugrađeni uzorak bez promjene vlažnosti promatran je pod zadanim poljem naprezanja 5 dana. Za to se vrijeme bilježila vrijednost uspravne deformacije. Deformacija je bila zanemarivog reda veličine te se pokusu pristupilo uz pretpostavku da je deformacija poradi vanjskog polja naprezanja završena, a da je daljnji prirast deformacije posljedica rastrožbe zrna unutar paketa. U svakom koraku procesa zabilježena je promjena visine uzorka na kraju sušenja i na kraju vlaženja.

U radu će se prikazati primjer ispitivanja lapora sa ovima svojstvima:

- sadržaj karbonatne komponente: 59,05%
- gustoća meke stijene u suhom stanju: $\rho_d = 2,29 \text{ g/cm}^3$
- indeks rastrožbe (*slake durability index*): $I_{d2} = 50,5\%$
- gustoća materijala koji sačinjava stijenu: $\rho_s = 2,69 \text{ g/cm}^3$
- upijanje vode meke stijene: $w_u = 10,78\%$
- početna visina ugrađenog uzorka: $h_o = 10,91 \text{ cm}$

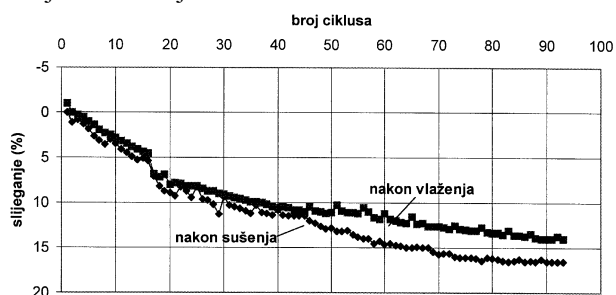
Granulometrijski sastav zrna od kojih je izrađen uzorak iz primjera prikazan je na slici 4. Na slici je prikazana i promjena granulometrijskog sastava na kraju pokusa. U uzorku se u odnosu prema početnom sastavu pojavio veliki postotak čestica veličine praha, a općenito je došlo do usitnjavanja.



Slika 4. Promjena granulometrijskog sastava uzorka zbog degradacije zrna

Na slici 5. prikazane su veličine uspravne deformacije kao dvije krivulje: u svakom ciklusu nakon sušenja i u svakom ciklusu nakon vlaženja. Promjena visine izražena je kao postotak početne visine uzorka. Visina uzorka na kraju izvedenih ciklusa $h = 9,106 \text{ cm}$, odnosno promjena visine iznosila je 16,53%. Na slici se mogu uočiti sljedeća svojstva izvedenog pokusa:

- Povećanjem broja ciklusa prirast vertikalne deformacije se smanjuje (blaži nagib krivulje), što odgovara pretpostavkama procesa - se rastrožbom smanjuje se promjer zrna nosive strukture a time i izložena površina, što znači i manji prirast obujma rastrošenog materijala. Ujedno se zbog djelomičnog zatvaranja makropora rastrošenim materijalom "plombiraju" nerastrošena zrna, što usporava proces rastrožbe.
- Povećanjem broja ciklusa razmak između krivulja deformacije nakon sušenja i nakon vlaženja raste zbog veće količine udjela čestica veličine praha i gline (veličina bujanja).
- Mali nagib krivulja pri kraju pokusa pokazuje da je proces postao vrlo spor, ali da deformacije još nisu potpuno završene. Zbog malog prirasta deformacije i proteklog vremena izvođenja pokusa (više od tri mjeseca), zabilježena visina u zadnjem koraku prihvaćena je kao dovoljno točna.



Slika 5. Promjena visine uzorka izražena u postotku početne visine, pri ciklusima sušenja i vlaženja

Sve prikazane vrijednosti potvrđuju da je u uzorku bez prirasta naprezanja došlo do slijeganja, i to zbog degradacije zrna izazvane procesom sušenja i vlaženja. Zrna se "ljušte" i raspucavaju odnosno usitnjavaju. Usitnjeni materijal zapunjava međuprostore između zrna što dovodi do smanjivanja obujma uzorka, a time i do dodatnog slijeganja koje nije izravna posljedica promjene polja naprezanja.

3 Razvrstavanje lapora prema podložnosti rastrožbi

U istraživanjima [2, 5, 6] su kao indeksni pokazatelji podložnosti rastrožbi lapora ispitivane veličine: sadržaj karbonata, upijanje vode, gustoća suhog materijala, slobodno bubrenje i "indeks rastrožbe" (*slake durability index*). Kao osnovni parametar ocjene trajnosti lapora upotrijebljeno je vrijeme "opaženog početka rastrožbe" (T) pri plitkom uranjanju uzorka u vodu [6, 11]. Regresijskom analizom određena je kombinacija indeksnih pokazatelja koja najbolje može poslužiti za procjenu vremena T . Iz analize je određena jednadžba oblika:

$$T = B + A_1 \cdot P_1 + A_2 \cdot P_2 + \dots + A_n \cdot P_n \quad (3)$$

gdje su:

B - odsječak krivulje na osi

A_i - regresijski koeficijenti

P_i - indeksni pokazatelji

n - broj parametara.

Najbolje rezultate pokazala je kombinacija sadržaja karbonata i "indeksa rastrožbe". Ovi pokazatelji su jednostavni za određivanje, a ujedno dobro opisuju količinu i kakvoću karbonatnih veza u stijenskom materijalu. Ove veze dominantno određuju trajnosti meke stijene. U tablici 4. prikazana je slučajna skupina uzoraka na kojoj je izvršena regresijska analiza s navedena dva indeksna pokazatelja. Uporabljeni su uzorci sa šireg područja Splita. Za analizu su u skupini dodane vrijednosti:

gornja granica - opisuje uzorak koji se ne degradira pri sušenju i vlaženju

donja granica - opisuje uzorak koji se praktično trenutno degradira u dodiru s vodom.

Pri ispitivanju "indeksa rastrožbe" na laporima pokazalo se da cijeli niz uzoraka ima vrlo mali gubitak mase, a da je pritom početnih 10 zrna u uzorku izrazito usitnjeno. Zbog toga za takve uzorke "indeks rastrožbe" kao indeksni pokazatelj ne izražava dobro podložnost rastrožbi. Regresijska analiza dala je znatno bolje rezultate kada je "indeks rastrožbe" korigiran s obzirom na usitnjavanje uzorka. U analizi je za korekciju vrijednosti "indeksa rastrožbe" iskorištena jednadžba oblika:

$$I_{d2}^* = I_{d2} \cdot \left(\frac{10}{n}\right)^{0.05} \quad (4)$$

gdje je:

n - broj zrna u uzorku nakon drugog ciklusa pokusa

I_{d2}^* - korigirana vrijednost "indeksa rastrožbe".

Za vrijednosti iz tablice 4., uz koeficijent korelacije $r=0,971$ i standardnu devijaciju $\sigma = 1272$, dobivena je jednadžba:

$$T = -9970.2 + 498.5 \cdot C - 219.5 \cdot I_{d2}^* \quad (5)$$

gdje su:

T - vrijeme opaženog početka rastrožbe u satima (h)

C - sadržaj karbonata izražen u postocima (%)

I_{d2}^* - korigirana vrijednost "indeksa rastrožbe" u postocima (%)

S obzirom na to da je jednadžba (5) dobivena na slučajnom uzorku, za praksu se može dovoljno točno uporabiti nešto jednostavniji izraz:

$$T = -10000 + 500 \cdot C - 220 \cdot I_{d2}^* \quad (6)$$

Tablica 4. Vrijednosti indeksnih pokazatelja za regresijsku analizu

Oznaka uzorka	Opaženo vrijeme T [h]	Sadržaj karbonata C [%]	I_{d2} [%]	Br. zrna nakon II. ciklusa	I_{d2}^* [%]
gornja granica	18.000,0	100,00	100,00		100,0
U1	2808,0	73,81	98,3	22	94,5
U2	7968,0	77,25	99,0	10	98,9
U3	6000,0	73,81	95,0	10	95,0
U4	3528,0	70,38	97,7	16	95,4
U5	9480,0	77,82	97,6	10	97,6
U6	800,0	62,94	98,6	11	98,0
Z1	200,0	60,07	94,2	37	88,2
Z2	892,0	62,36	96,0	14	94,3
D1	1,0	57,78	88,7	50	81,8
D2	216,0	64,07	97,7	13	96,4
D3	1752,0	60,07	93,5	51	86,2
B1	1,8	43,57	69,2	417	57,4
B2	10,0	43,60	59,1	327	49,6
B3	20,0	44,14	64,0	168	55,5
donja granica	0,1	20	1,0		1,0

Usporedba dobivenih vrijednosti vremena opaženog početka rastrožbe (T) s primjerima primjene lapora za izradu nasipa u praksi (npr. primjeri iz [6, 12]) pokazala je da se lapori kod kojih je $T < 10000$ moraju tretirati kao materijali koje je potrebno usitniti i ugrađivati kao zemljani materijal, kako bi se uklonile mogućnosti pojave dodatnog slijeganja i problema stabilnosti (smanjenje posmične čvrstoće).

Materijali s vrijednošću T koja se nalazi između 10000 i 14000 su tvrdi i trajniji. Oni su teži za iskop, ali će se pri zbijanju zrna od ovog materijala također lomiti. To će biti problem pri zbijanju, te niti ovu grupu materijala ne treba tretirati kao kameni materijal pri ugradnji.

Lapori sa $T > 14000$ mogu se tretirati kao kameni materijal pri ugradnji.

4 Uvjeti ugradnje lapora u nasip

Prikazana ispitivanja pokazuju da lapor pripada vrsti mekih stijena koje su podložne degradaciji zbog utjecaja iz okoline. Osnovni (ne i jedini) proces koji uzrokuje degradaciju jest sušenje i vlaženje, odnosno promjena vlažnosti. Proces degradacije je brži što je promjena vlažnosti učestalija i izrazitija. U poglavlju 2.1 pokazano je da je posljedica tog procesa na laporu gubitak čvrstoće. U poglavlju 2.2 dokazano je da kada se za izradu zrna koja čine strukturu nasipa upotrijebi lapor, tada se poradi navedenog procesa pojavljuje dodatno slijeganje koje nije neposredna posljedica promjene polja naprezanja na nasipu.

Iz navedenih razloga, pri upotrebi lapora kao materijala za izradu nasipa, potrebno ga je tretirati na način da se ukloni utjecaj degradacije materijala koji gradi zrna u strukturi nasipa. Odnosno potrebno je ukloniti moguću pojavu dodatnog slijeganja ili problema stabilnosti. To se može postići na dva načina:

- onemogućiti intenzivne promjene vlažnosti nasipa u vremenu (sušenje i vlaženje)
- materijal ugraditi na način da degradacija zrna ne utječe na pojavu dodatnog slijeganja ili smanjenje stabilnosti.

Prvi postupak značio bi "plombiranje" nasipa od utjecaja vode koja penetrira s površine, podzemne vode koja može dolaziti iz temelja nasipa ili "umjetnog izvora" u samom trupu nasipa. Ovaj je način redovito financijski zahtjevan, a u situacijama kada kroz nasip prolaze cijevi kanalizacije, vodovoda ili slično, riskantan zbog mogućeg pucanja cijevi i izravnog ulijevanja vode u nasip.

Drugo rješenje problema zahtijeva ugradnju lapora na način da se prostori oko zrna u nosivoj strukturi nasipa ispune, kako se tijekom degradacije ti prostori ne bi zapunjavali dijelovima raspadnutih zrna. Time je spriječena pojava promjene obujma strukture zrna odnosno dodatnog slijeganja. Istovremeno se onemogućavanjem odvajanja dijelova zrna smanjuje utjecaj na posmičnu čvrstoću.

Jedan način da se to postigne za lapore, koji su u poglavlju 3 opisani kao materijali kod kojih je $T < 14000$ h, jest da se lapor usitni te ugrađuje kao zemljani materijal. Usitnjavanje materijala može se obaviti mehaničkim putem, prije ili tijekom ugradnje. Međutim ako je moguće unaprijed predvidjeti naslage fliša koje će se upotrijebiti kao pozajmište, usitnjavanje se može izvršiti i prirodnim putem. Potrebno je materijal iskopati i ostaviti ga u tanjim slojevima na odlagalištu da se zbog utjecaja atmosferilija (sušenje i vlaženje) sam usitni. Proces je moguće ubrzati umjetnim vlaženjem na odlagalištu.

Poseban problem jest što je lapor dio flišne naslage koja je sastavljena od slojeva s učestalom promjenom svojstava. Moguća je i pojava laporovitog vapnenca, vapnenca, pješčenjaka, breča i slično, odnosno čvrste stijene kod koje se pojavljuje problem usitnjavanja. Pri uporabi takve "mješavine" čvrsti komadi onemogućuju pravilno zbijanje jer se opterećenje u trenutku zbijanja prenosi preko njih, a mekši se materijal u njihovoj okolini zbog toga ne zbija. Kada se lapori iz okoline čvrstih zrna počnu tijekom vremena degradirati i zapunjavati makropore, nastaje dodatno neočekivano slijeganje i smanjuje se posmična čvrstoća.

Iz tog razloga potrebno je za pojedine dijelove nasipa procijeniti udio ovih čvrstih slojeva na pozajmištu. Pri

dominantnom udjelu slojeva koji se mogu opisati kao čvrsta stijena ili lapor kod kojih je $T > 14000$ h (prema poglavlju 3. ovog rada), materijal se može ugrađivati kao kameni nasip.

Ako udio čvrstih materijala nije dominantan, odnosno dominantni su lapori sa $T < 14000$ h, moguća je ugradnja i na način da se samo dio materijala usitni. Uvjeti ugradnje (npr. suha jedinična težina ugrađenog nasipa i udio sitnih frakcija) koji osiguravaju da daljnja degradacija zrna lapora neće utjecati na promjenu obujma nasipa obrađena je za laboratorijske uvjete u radu [6]. Osnovna je ideja da se usitnjeni dio materijala iskoristi za plombiranje preostalih zrna koja se neće usitnjavati te time ukloni mogućnost utjecaja rastrožbe. Udio usitnjenog materijala (čestice $D < 0,1$ mm) u "mješavini" određen je izrazom:

$$p_{de} = \frac{(\rho_{gr} - \rho_d) \cdot \rho_{de}}{(\rho_{gr} - \rho_{de}) \cdot \rho_d} \quad (7)$$

gdje su:

p_{de} - udio usitnjenog materijala

ρ_d - suha gustoća zbijene "mješavine"

ρ_{gr} - suha gustoća nerastrošenog lapora (meka stijena)

ρ_{de} - suha gustoća usitnjenog materijala ($D < 0,1$ mm) određena kao masa usitnjenog materijala raspoređenog na ukupan obujam "makropora" između neusitnjenih zrna

Da bi se uklonio ili izrazito usporio utjecaj rastrožbe, za laboratorijske uvjete [6] pokazalo se da je pri zbijanju dovoljno postići da je $\rho_{de} > 0,4\rho_{de\ max}$, gdje je $\rho_{de\ max}$ najveća gustoća prema standardnom Proctorovu pokusu za usitnjeni materijal. Ovakav materijal treba ugrađivati s optimalnom vlažnošću određenom kao udio vode potreban usitnjenoj dijelu (optimalna vlažnost prema Proctoru) i udio vode koji upijaju neusitnjena zrna.

Primjenjivost navedenih veličina na terenske uvjete nije ispitana (npr. tehnički problemi miješanja usitnjenog i neusitnjenog dijela, određivanje udjela sitnih frakcija u zbijenom nasipu). Međutim mišljenje je autora da se, kada se pronađu sredstva za pokusne dionice, ovi tehnički detalji mogu vrlo brzo odrediti.

5 Zaključak

Prema sadašnjim propisima, lapori se svrstavaju u grupu "miješanih materijala" koji su manje osjetljivi na djelovanje vode, a skloni su pregranulaciji pri zbijanju. Pritom se misli da utjecaj vode na ugrađivost pri zbijanju te se traži postizavanje optimalne vlažnosti pri ugradnji (prema standardnom Proctorovu pokusu).

Lapor se pritom ne prepoznaje kao materijal podložan degradaciji zbog djelovanja utjecaja iz okoline (dominantno, ne i jedino, proces sušenje-vlaženje). Posebno kod čvršćih lapora, vlažnost vrlo malo utječe na ugradivost. Svi se lapori pri ponavljanom procesu sušenja i vlaženja zbog degradacije pretvaraju u prašnasti materijal. Vrijeme potrebno za taj proces ovisi o količini i kakvoći kalcitičnih veza u strukturi, ali i o intenzitetu i učestalosti promjena vlažnosti. Iz tog se razloga osjetne posljedice ovog problema očituju tek nakon više godina od izgradnje, ali sigurno ostavljaju trag unutar razdoblja uporabe građevine.

Stoga je potrebno u propise uvesti zasebnu kategoriju "netrajnih materijala koji su podložni promjeni inženjer

skih svojstava u vremenu". Za te materijale valja propisati uvjete ugradnje koji će onemogućiti utjecaj degradacije zrna u strukturi nasipa na probleme dodatnog slijeganja ili stabilnosti nasipa. Prijedlog uvjeta ugradnje za lapore prikazan je u poglavlju 4. ovog rada.

Prepoznavanje navedenih materijala je "trend" koji se u svijetu sve više zamjećuje pri analizi materijala svrstanih u grupu pod općim nazivom meke stijene-tvrda tla (*soft rocks-hard soils*). Sve više radova objavljenih u znanstvenim člancima [4, 9] pokazuje da je upravo trajnost svojstava u vremenu jedan od osnovnih parametara na osnovi kojeg se za praktičnu uporabu razvrstavaju materijali ove skupine. Prijedlog razvrstavanja lapora iz priobalnog područja Dalmacije prikazan je u poglavlju 3.

ZAHVALA

Rad je izrađen u okviru znanstvene teme "Uporaba lapora kao građevinskog materijala" (šifra 083162) koju je i financiralo Ministarstvo znanosti i tehnologije Republike Hrvatske. Autori se zahvaljuju Ministarstvu.

LITERATURA

- [1] ISRM. "Suggested methods for determining point load strength", Int. J. for Rock Mech. Min. Sci. & Geo. Abstr. 22 (1985), 51.-60.
- [2] Fookes, P. G.; Gourley, C. S.; Ohikere, C.: *Rock weathering in engineering time*, Quar. J. of Engin. Geology. 21 (1988), 33.-57.
- [3] Richardson, D. N.; Wiles, T. T.: *Shale Durability System Based on Loss of Shear Strength*, Jou. Of Geotechnical Engineering, 116 (1990) No 12, 1864.-1880.
- [4] Yamaguchi, H.; Kuroshima, I.; Fukuda, M. : *Settlement-swelling characteristics of tertiary mudstone induced by effect of drying-wetting*, Proc. of Int. Sym. Geotechnical Engineering of Hard Soils - Soft Rocks, Vol. 2, Athens, Eds. A. Anagnostopulos, A.A. Balkema, Rotterdam, (1993), 1343.-1361.
- [5] Šestanović, S.; Štambuk, N.; Samardžija, I.: *Control of the Stability and Protection of Cut Slopes in Flysch*, Geolog. Croat. 47/1 (1994), 139.-148.
- [6] Johnston, I.W. & E.A. Novello: *Soil mechanics, rock mechanics and soft rock technology*, Geotech. Eng., 107(1), (1994), 3-9
- [7] Mišćević, P.: *Problem primjene glinovitog lapora za izradu nasipa*, Priopćenja savjetovanja Geotehnički problemi u urbanim sredinama (2. savjetovanje HDMTT), Knjiga 1,Varaždin, (1995), 399.-405.
- [8] Mišćević, P.: *Utjecaj rastrošbe na primjenu meke stijene u geotehničkim konstrukcijama*, doktorska disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, (1996)
- [9] Mišćević, P.: *Effect of drying and wetting on mechanical characteristics of Eocene flysch marl*", Proc. XIth Danube-European conf. on soil mech. and geotech. eng., Poreč, Croatia, May 1998., "Geotechnical hazards", Eds. B. Marić, Z. Lisac & A. Szavits-Nossan, A.A. Balkema, Rotterdam, (1998), 737.-741.
- [10] Mišćević, P.: *The investigation of weathering process in Eocene flysch*, Proc. Second Int. Sym. on hard soils-soft rocks/Naples/Italy/, Eds. A. Evangelista & L. Picarelli, A.A. Balkema, Rotterdam, (1998), 267.-272.
- [11] Czerewko, M.A.; Cripps, J.C. : *Simple index tests for assessing the durability properties of mudrocks*, Proc. Second Int. Sym. on hard soils-soft rocks/Naples/Italy/, Eds. A. Evangelista & L. Picarelli, A.A. Balkema, Rotterdam, (1998), 127-134
- [12] Lebo, Ž.: *Laboratorijske analize utjecaja rastrošbe na fliševe*, Zbornik radova Znanstvenostručno svjetovanje sa međunarodnim sudjelovanjem "Mehanika stijena i tuneli", Zagreb, (1999), 53.-57.