LABORATORIJSKO ISPITIVANJE SLIJEGANJA NASIPA OD LAPORA UZROKOVANO RASPUCAVANJEM ZRNA

Izvorni znanstveni rad/Scientific paper
Primljen/Received: 11. 10. 2018.
Prihvaćen/Accepted: 9. 11. 2018.

Predrag Miščević
Sveučilište u Splitu, FGAG, prof.dr.sc.
Vlastelica Goran
Sveučilište u Splitu, FGAG, doc.dr.sc.
Nikolić Mijo
Sveučilište u Splitu, FGAG, dr.sc.

Sažetak: Nasip izrađen od zrna dobivenih drobljenjem meke stijene može biti podložan dodanom slijeganju uzrokovanim raspucavanjem zrna unutar strukture nasipa. Ovo dodatno slijeganje nije uzrokovano promjenom stanja naprezanja unutar nasipa i ne može biti procijenjeno standardnim metodama proračuna na osnovi modula stišljivosti izmjerenog nakon zbijanja nasipa. Raspucavanje zrna je uzrokovano procesom rastrošbe, koji je u mekim stijenama kao što je lapor, uglavnom uzrokovan procesom sušenja i vlaženja. Ako su zrna u strukturi nasipa podvrgnuta sušenju i vlaženju, rezultat je usitnjavanje zrna do razine raspada u materijal koji se može opisati kao tlo. Usitnjeni materijal odvaja se od zrna i popunjava makro pore u strukturi nasipa što za posljedicu ima dodatno slijeganje nasipa. Uzorci za ispitivanje su izrađeni od drobljenog lapora u laboratorijskim uvjetima. Ispitivanje je provedeno sa modificiranim edometarskim uređajem. Izmjerene veličine se mogu iskoristiti u svrhu procjene dodatnog slijeganja nasipa uzrokovanog rastrošbom.

Ključne riječi: Meka stijena; Rastrošba; Lapor; Slijeganje; Nasip

LABORATORY INVESTIGATION OF EMBANKMENT SETTLEMENT CAUSED BY MARL GRAINS DETERIORATION

Abstract: Embankments made of crushed soft rock grains can be susceptible to additional settlement caused by deterioration of the grains inside the embankment. This additional settlement is not caused by the change of the stress state inside embankment and cannot be predicted by standard calculating methods with the embankment modulus of deformability measured after compaction of the embankment. The deterioration of the grains is mainly caused by the weathering process which is, in soft rocks such as marl, mainly induced by the wetting and drying processes. If marl grains in an embankment are subjected to the wetting and drying process, the result is breakage of the grains, as well as decomposition into soil material. Disintegrated material then fills the macropores of the embankment grain structure and gradually causes additional settlement. The samples were made of crushed marl in laboratory conditions. A test was conducted with modified oedometer apparatus. Measured values can be used for estimating the additional settlement caused by the weathering.

Key words: Soft rock; Weathering; Marl; Settlement; Embankment

1. UVOD

Svojstva rastrošbe mekih stijena nedovoljno su istražena kod korištenja drobljene meke stijene za izradu nasipa. Ako se drobljeni materijal meke stijene ugrađen u nasip izloži cikličkoj promjeni vlažnosti, svojstva materijala koja ovise o procesu rastrošbe (eng. weathering) postaju vrlo značajna u analizi slijeganja i stabilnosti nasipa. Kada se zrna u strukturi nasipa brzo dezintegriraju uslijed rastrošbe u sitnije čestice koje se mogu pokretati unutar šupljina strukture nasipa (makropora), a uslijed djelovanja gravitacije i protoka vode, posljedica je dodatno slijeganje nasipa (Wang et al. 2013). Ta slijeganja se ne mogu objasniti niti izračunati s deformacijskim svojstvima određenim na zbijenom nasipu (Oldecop & Alonso, 2003). Opisani proces može dovesti do neočekivano velikih slijeganja, ili/i do klizanja kosina nasipa uslijed smanjenja posmične čvrstoće materijala u nasipu. Lapori iz naslaga fliša sa obalnog pojasa u Dalmaciji (Hrvatska) su dobar primjer meke stijene kod kojih je uočen opisani problem, ali se slični materijali mekih stijena koriste i u drugim područjima za izradu nasipa (Cardoso & Maranha das Neves 2012, Cardoso et al. 2012).

Kao posljedica rastrošbe mehanička svojstva lapora mogu se promijeniti u relativno kratkom razdoblju od nekoliko mjeseci do nekoliko godina (Alonso et al. 2010a; Calcaterra & Mario Parise 2010, Yin et al. 2016). To se razdoblje može analizirati kao inženjersko razdoblje odnosno razdoblje trajnosti konstrukcija.

Osnovni proces koji uzrokuje razgradnje i raspucavanje lapora je proces izmjene vlažnosti, sušenje-vlaženje (Erguler & Ulusay 2009). Proces rastrošbe je istovremeno djelovanje mnogih mehaničkih i kemijskih procesa rastrošbe (Ciantia et al. 2015, Miščević 1998a & 1998b, Gökçeoğlu et al. 2000, Miščević & Vlastelica 2011, Pineda et al. 2014a, Pineda et al. 2014b, Tugrul 2004, Alavi Nezhad Khalil Abad et al. 2015, Alavi Nezhad Khalil Abad et al. 2016). Samo kao primjer može se navesti kemijski proces stvaranja gipsa iz komponenti u samom laporu, čime se slabi struktura samog lapora, a koji istovremeno u pukotinama uzrokuje mehaničko raspucavanje jer gips ima značajno veći volumen od volumena komponenti koje ulaze u proces (Hawkins 2012 & 2015, Oldecop & Alonso 2012). Sve zajedno ako je lapor izložen rastrošbi on mijenja mehanička svojstva, a krajnji rezultat može biti raspadanje početnih zrna u nasipu u manje čestice (Gautama & Shakoor 2013, Son & Chang 2009, Tschernutter 2011, Miščević & Vlastelica 2012, Zhang et al. 2012). Potpuno degradirani materijal se može opisati kao tlo s česticama veličine praha (Sadisun et al. 2005). Kako je tlačna čvrstoća meke stijene relativno mala u usporedbi sa čvrstim stijenama (Tziallas et al. 2013) lomljenje zrna u strukturi nasipa može biti i posljedica stanja naprezanja (Pinyol et al., 2007). Takav proces je posebno naglašen kada je lapor oslabljen procesom rastrošbe.

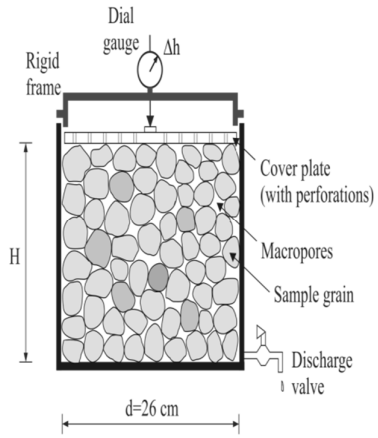
2. LABORATORIJSKA SIMULACIJA SLIJEGANJA

2.1 Uređaj za ispitivanje

S obzirom da ne postoji standardni uređaj u kojem bi se moglo vršiti ispitivanje slijeganja uslijed raspucavanja zrna koja grade nasip, izrađen je uređaj u formi cilindra za ispitivanje. Cilindar je koncipiran u osnovi kao klasični edometar za ispitivanje uzoraka tla ali prilagođen svrsi ispitivanja (Zhang, et al. 2011, Zhang, et al. 2015), odnosno bez mogućnosti nanošenja opterećenja u vertikalnom smjeru. Uređaj i njegov presjek su prikazani na Slici 1.

Cilindar je unutarnjeg promjera 26 cm i visine 14.95 cm. Gornja ploča može se slobodno vertikalno kretati. Ploča je perforirana sa svrhom učinkovitijeg vlaženja i sušenja uzorka. Na vrhu je čvrsti okvir koji se može uklanjati, a koji pridržava mjernu uricu s preciznošću od 0.002 mm za mjerenje vertikalnog pomaka gornje ploče. Okvir se uklanja u fazi sušenja, a zbog izbjegavanja oštećenja mjernog uređaja. Okvir ima tri čvrste točke pričvršćenja kako bi

se minimizirao utjecaj skidanja i vraćanja okvira na točnost mjerenja. Na dnu cilindra je ventil za ispuštanje vode nakon faze vlaženja uzorka. U zoni ulaznog dijela ventila postavljen je filter papir sa svrhom sprječavanja iznosa sitnih čestica iz uzorka. Svako ispitivanje je provedeno istovremeno sa dva identična cilindra za iste uzorke od lomljenog lapora, a sa svrhom potvrđivanja mjerenih rezultata.



Slika 1. Cilindar za ispitivanje

2.2 Priprema uzorka

Uzorci lapora upotrijebljeni u ovom istraživanju uzeti su iz šireg područja grada Splita. Geološke karakteristike tog područja opisane su u radu Miščević i Vlastelica, 2011. Ispitni uzorci su pripremljeni mehaničkim lomljenjem lapora u prirodnom stanju vlažnosti. Svojstva upotrijebljenog lapora za pojedine ispitne uzorke prikazana su u Tablici 1.

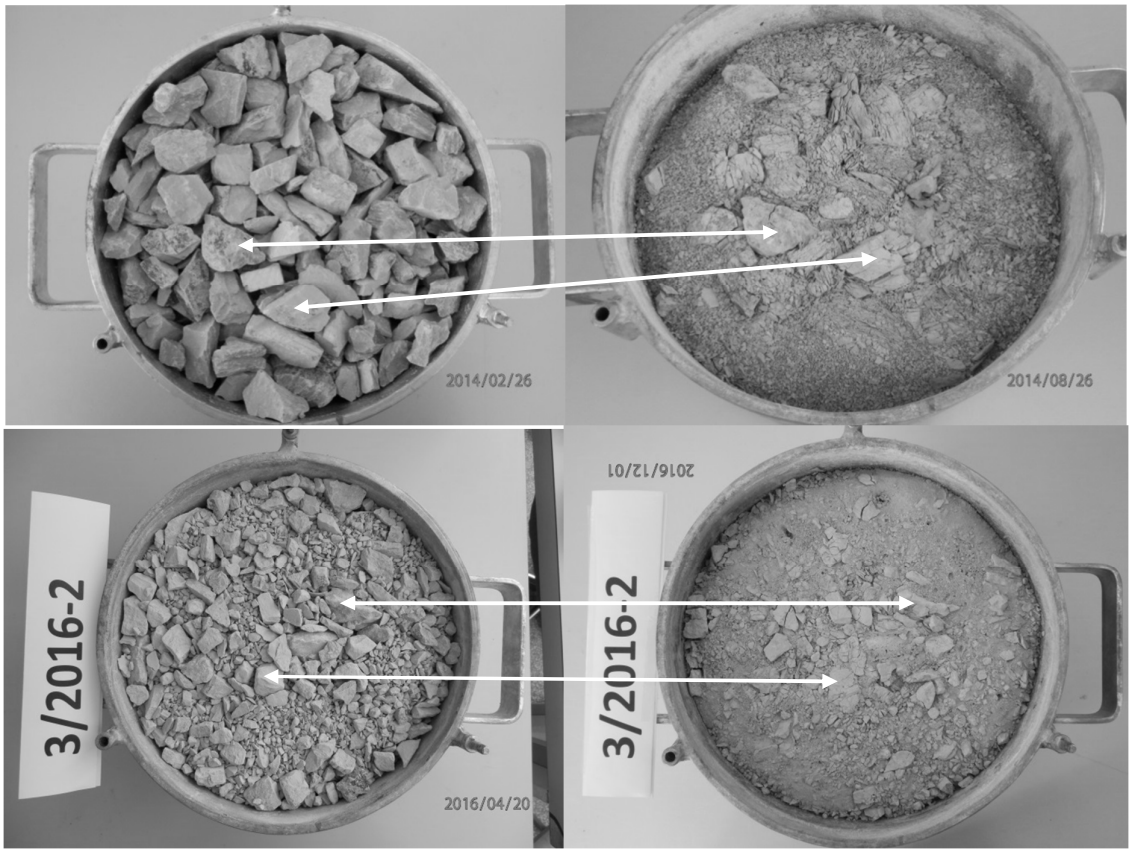
Tablica 1. Svojstva lapora upotrijebljenog za ispitne uzorke

	uzorak 1	uzorak 2	uzorak 3
sadržaj karbonata	63.18 %	59.33 %	64.40 %
suha jed. težina lapora (γ_{rd})	23.44 kN/m^3	22.99 kN/m^3	21.40 kN/m^3
slake durability index (I_{d2})	84.01 %	95.45 %	86.9 %

Ispitni uzorci 1 i 2 su imali uniformni granulometrijski sastav sa veličinom zrna 20-37.5 mm. Uniformni granulometrijski sastav je odabran kako bi se ispitivanje izvršio sa velikim volumenom makropora. Za ispitni uzorak 3 materijal je dobiven miješanjem materijala, a nakon inicijalnog drobljenja i prosijavanja uzorka lapora, u omjeru: 30% zrna promjera 20-37.5 mm, 30 % zrna promjera 10-20 mm, 20% 4-10 mm i 20% 2-4 mm. Pogled na površinu ispitnih uzoraka 1 i 3 prikazan je na Slici 2, lijevo nakon ugradnje (prije ispitivanja) i desno nakon ispitivanja. Ugradnja je izvršena bez zbijanja kako bi se izbjeglo dodatno mehaničko usitnjavanje ispitnih uzoraka.

Gornja površina ispitnih uzoraka je ručno poravnata kako bi bila što je više moguće ravna. Naime vrhovi zrna na gornjoj površini preuzimaju težinu gornje ploče i bez obzira koliko bila mala težina te ploče, raspucavanje tih vrhova u početku ispitivanja daje najveći doprinos vertikalnom pomaku.

Kada je postavljena gornja ploča, opažano je slijeganje u razdoblju od 24 sata kako bi se potvrdilo da nema pomaka koji je posljedica opterećenja od te ploče. Namjera ispitivanja je istražiti deformaciju koja je posljedica raspucavanja zrna unutar ispitnog uzorka, a ne deformaciju koja je posljedica promjene stanja naprezanja unutar ispitnog uzorka.



Slika 2. Pogled na gornju površinu ispitnih uzoraka: 1- gore, 3- dolje; prije ispitivanja (lijevo) i nakon ispitivanja (desno)

2.3 Simulacija procesa rastrošbe

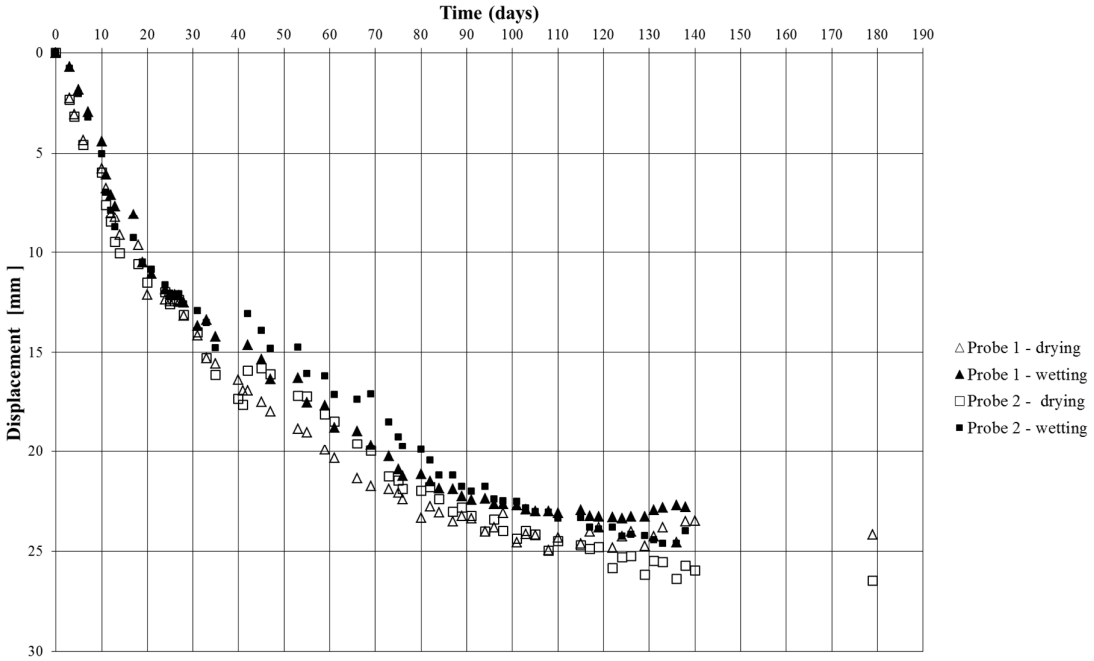
Proces rastrošbe je simuliran u laboratorijskim uvjetima sa ciklusima sušenja i vlaženja. Faza vlaženja se sastojala od: zatvaranje ispusnog ventila; ispunjavanje cilindra sa demineraliziranom vodom kako bi se uklonila mogućnost kemijskih procesa uzrokovanim supstancama otopljenim u vodi; zadržavanje vode u cilindru 2 sata; ispuštanje vode kroz ventil na dnu cilindra sve dok voda istječe. Faza sušenja se sastojala od: sušenje u sušioniku najmanje 42 sata na temperaturi od 105° C; hlađenje cilindra na sobnoj temperaturi najmanje 4 sata. Vrijeme sušenja je određeno, za korištene dimenzije uzorka, kao vrijeme u kojem je vlažnost uzorka pala na manje od 2%.

Opisanim postupkom simulirane rastrošbe indirektno je obuhvaćen i utjecaj grijanja i hlađenja na proces rastrošbe. Namjera je bila da se ubrza rastrošba jer bi u protivnom ispitivanje zahtijevalo razdoblje od više godina zbog dugotrajnog sušenja na sobnoj temperaturi. U stvarnim nasipima magnituda promjene temperature je mala jer je unutrašnjost nasipa zaštićena od zagrijavanja suncem.

2.4 Rezultati ispitivanja

Promjena visine svake od dvije probe svakog ispitnog uzorka mjerena je nakon svake faze sušenja i faze vlaženja. Izmjerene promjene visine obje probe prikazane su: na Slici 3 za ispitni uzorak 1, na Slici 4 za ispitni uzorak 2 i na Slici 5 za ispitni uzorak 3.

Potencijal bubrenja svakog ispitnog uzorka može se vidjeti na prikazanim dijagramima kao povećanje visine nakon faze vlaženja. Razdoblja na dijagramima na kojima nema mjerenih podataka su razdoblja odmora. Prekid ispitivanja nije utjecao na konačne vrijednosti.

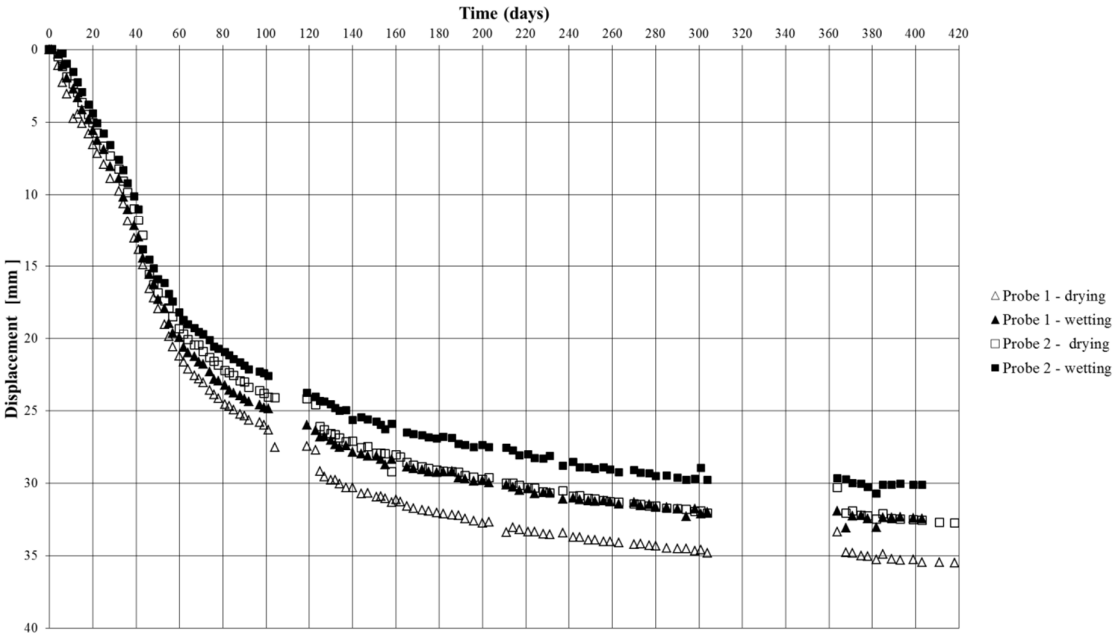


Slika 3. Promjena visine ispitnog uzorka 1 (probe 1 i 2) nakon faze sušenja (drying) i faze vlaženja (wetting)

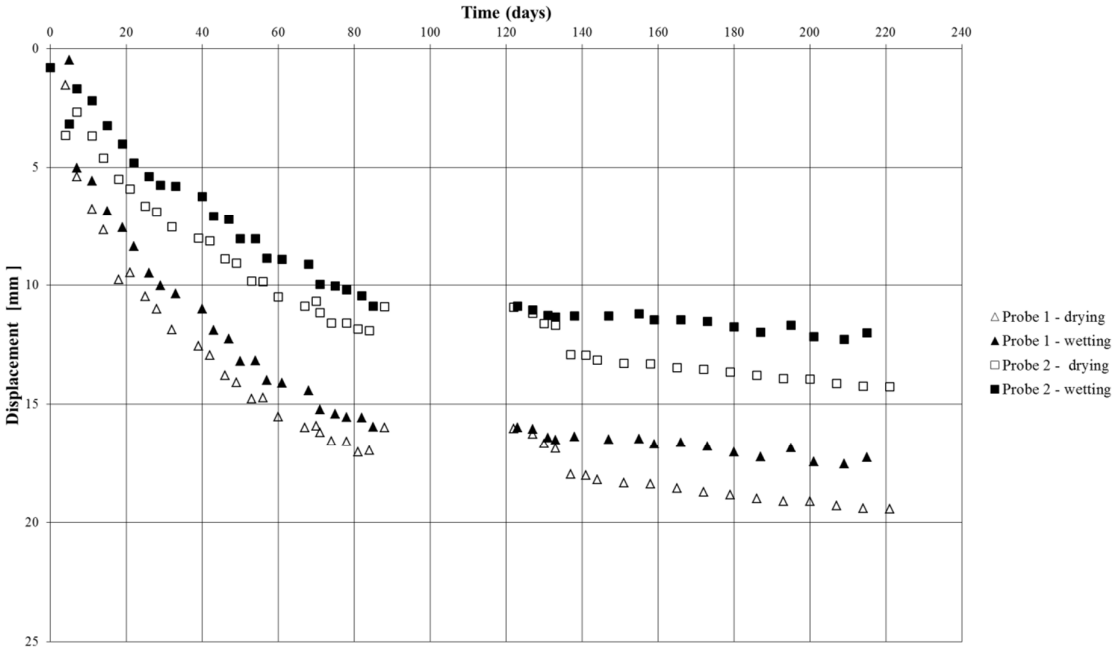
Ako se usporede gornje površine ispitnih uzoraka prije i nakon ispitivanja (Slika 2), mogu se uočiti zone koje se mogu prepoznati kao prvobitna zrna u strukturi prije početka pokusa (primjeri su označeni na slici sa strelicama koje spajaju prikaz zrna prije i nakon ispitivanja). Veći dio početnih zrna se je usitnio u manje čestice, ali se i dalje mogu na površini prepoznati kao zone veće gustoće. Dio materijala je odvojen od početnih zrna i transportiran, uslijed djelovanja gravitacije i protjecanja vode (u fazi dreniranja vode iz cilindra), u okolne makropore. Tim procesom volumen makropora se smanjuje. Pokrenuti dijelovi zrna se djelovanjem rastrošbe i dalje usitnjavanju, pa se potpuno degradirani lapor može promatrati kao materijal s česticama veličine praha. "Makroporozitet" je definiran na volumenu ispitnog uzorka (cilindar) sa suhom jediničnom težinom lapora koji gradi zrna u strukturi, kao "specifičnom težinom" materijala koji gradi strukturu ($\gamma_{d,lapor} \Rightarrow \gamma_s$).

Ispitni uzorci sa većom suhom jediničnom težinom ugrađenog uzorka na početku ispitivanja, imaju manji makroporozitet, što uzrokuje manje dodatno slijeganje kao posljedicu raspucavanja početnih zrna.

Na analiziranim ispitnim uzorcima slijeganje je iznosilo 17% početne visine uzorka za uzorak 1 (prosjek iz dvije probe istog ispitnog uzorka), 22% za uzorak 2, te 14 % za uzorak 3. Makroporozitet ispitnih uzoraka na početku pokusa iznosio je za uzorak 1 n=0.52, za uzorak 2 n=0.49, te uzorak 3 n=0.41. Navedeno vodi do zaključka da manji početni makroporizitet za posljedicu ima manje dodatno slijeganje uzrokovano raspucavanjem zrna.



Slika 4. Promjena visine ispitnog uzorka 2 (probe 1 i 2) nakon faze sušenja (drying) i faze vlaženja (wetting)



Slika 5. Promjena visine ispitnog uzorka 3 (probe 1 i 2) nakon faze sušenja (drying) i faze vlaženja (wetting)

3. ZAKLJUČCI

Nasip izgrađen od lomljene meke stijene podložan je dodatnom slijeganju koje je posljedica raspucavanja zrna u strukturi nasipa. Za zrna od lapora osnovni uzrok raspucavanja je proces rastrošbe koji nastaje kao posljedica promjene vlažnosti unutar nasipa (sušenje-vlaženje). To slijeganje se ne može odrediti sa stišljivošću slojeva nasipa izmjerenom nakon ugradnje materijala u nasip.

Slijeganje uzrokovano raspucavanjem zrna u strukturi nasipa je vrlo dugotrajno zbog sporog procesa promjene vlažnosti u realnom nasipu. I u laboratorijski "ubrzanim" uvjetima promjene vlažnosti na relativno malom volumenu ispitnih uzoraka vrijeme potrebno za ostvarivanje ovog slijeganja iznosilo je više mjeseci. U realnim uvjetima to je proces koji traje godinama, a što i primjeri iz prakse potvrđuju.

Da bi se umanjio efekt ovog dodatnog slijeganja potrebno je ugrađivati lomljeni lapor sa dobro graduiranim granulometrijskim sastavom, a kako bi se postigao što manji makroporozitet ugrađene strukture nasipa. Ispitani primjeri uzoraka lapora upućuju da sa smanjivanjem makroporoziteta utjecaj raspucavanja zrna na slijeganje se smanjuje. Vjerojatno objašnjenje je činjenica da u strukturi s malim makroporozitetom fragmenti odvojeni od zrna ne mogu biti transportirani unutar strukture te nema promjene volumena strukture koja dovodi efekta dodatnog slijeganja. Ova pretpostavka, da bi se potvrdila, zahtijeva daljnja istraživanja s ispitnim uzorcima manjeg makroporiziteta.

LITERATURA

1. Alavi Nezhad Khalil Abad, S.V., Mohamad, E.T., Komoo, I., Kalatehjari, R., 2015. Assessment of weathering effects on rock mass structure. Jurnal Teknologi. 72 (1), 71-75.
2. Alavi Nezhad Khalil Abad, S.V., Tugrul, A., Gokceoglu, C., Jahed Armaghani, D. 2016. Characteristics of weathering zones of granitic rocks in Malaysia for geotechnical engineering design. Eng. Geol. 200, 94-103.
3. Alonso, E. E., Pineda, J. A., Cardoso R., 2010a. Degradation of marls; two case studies from the Iberian Peninsula. Calcaterra, D. & Parise, M. (Eds) Weathering as a Predisposing Factor to Slope Movements, Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications 23, 47–75.
4. Calcaterra, D., Mario Parise, M., 2010.Weathering as a predisposing factor to slope movements: an introduction. Calcaterra, D., Parise, M. (eds). Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 23, 1–4.
5. Cardoso, R., Maranha das Neves, E., 2012. Hydro-mechanical characterization of lime-treated and untreated marls used in a motorway embankment. Engineering Geology 133–134,76–84.
6. Cardoso, R., Maranha das Neves, E., Alonso, E.E., 2012. Experimental behaviour of compacted marls. Geotechnique 62(11), 999-1012.
7. Ciantia, M.O., Castellanza, R., Crosta, G.B., Hueckel, T., 2015. Effects of mineral suspension and dissolution on strength and compressibility of soft carbonate rocks. Engineering Geology 184, 1–18.
8. Erguler, Z.A., Ulusay, R., 2009. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 46, 355–370.
9. Gautama, T.P., Shakoor, A., 2013. Slaking behavior of clay-bearing rocks during a one-year exposure to natural climatic conditions. Engineering Geology 166, 17–25.
10. Hawkins, A.B., 2012. Sulphate heave: a model to explain the rapid rise of ground-bearing floor slabs. Bull Eng. Geol. Environ. 71, 113–117.
11. Hawkins, A.B., 2015.Splitting of mudrocks/shales by gypsum growth.ISRM Congress 2015 Proceedings - Int'l Symposium on Rock Mechanics.

12. Miščević, P., 1998. Effect of drying and wetting on mechanical characteristics of Eocene flysch marl. (Eds) B. Marić, Z. Lisac & A. Szavits-Nossan, Proc. XIth Danube Europian conf. on soil mech. and geotech. eng., Poreč, Croatia, 737-741.
13. Miščević, P., 1998. The investigation of weathering process in Eocene flysch. (Eds) Evangelista A. & Picarelli L.,Proc. Second Int. Sym. on hard soils-soft rocks, Naples, Italy, 267-272.
14. Miščević, P., Vlastelica, G., 2011. Durability Characterization of Marls from the Region of Dalmatia, Croatia. Geotechnical and Geological Engineering, 29: 771-781.
15. Miščević P.,Vlastelica G., 2012. Time-dependant stability of slopes excavated in marl. Gradevinar 64/6, 451-461. (in Croatian).
16. Oldecop, L. A., Alonso E. E., 2003. Suction effects on rockfill compressibility. Geotechnique 53(2), 289–292.
17. Oldecop, L., Alonso, E., 2012. Modelling the degradation and swelling of clayey rocks bearing calcium-sulphate. Int. Journal of Rock Mechanics & Mining Science 54, 90-102.
18. Pineda J. A., Alonso E. E., Romero, E., 2014a. Environmental degradation of claystones. Geotechnique 64(1), 64-82.
19. Pinyol, N., Vaunat, J., Alonso, E.E., 2007. A constitutive model for soft clayey rocks that includes weathering effect. Geotechnique 57(2), 137-151.
20. Sadisun, I. A., Shimada, H., Ichinose, M., Matsui, K., 2005. Study on the physical disintegration characteristics of Subang claystone subjected to a modified slaking index test. Geotechnical and Geological Engineering 23, 199–218.
21. Son, Y.H., Chang, P.W., 2009. Breakage Index of Weathered Soil Reflecting Breakage Level and Weathering Degree. KSCE Journal of Civil Engineering 13(5), 325-332.
22. Tugrul, A., 2004. The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey. Eng. Geol. 75, 215-227.
23. Tschernutter, P., 2011.Influence of soft rock-fill material as dam embankment with central bituminous concrete membrane. Front. Archit. Civ. Eng. China, 5(1), 63–70.
24. Tziallas, G.P., Saroglou, H., Tsiambaos, G., 2013. Determination of mechanical properties of flysch using laboratory methods. Engineering Geology 166, 81–89.
25. Wang. J.J., Zhang, H.P., Deng D.P., Liu M.W., 2013. Effects of mudstone particle content on compaction behavior and particle crushing of a crushed sandstone–mudstone particle mixture. Engineering Geology 167, 1–5.
26. Yin, Y., Zhang, B.Y., Zhang, J.H., Suna, G.L., 2016. Effect of densification on shear strength behavior of argillaceous siltstone subjected to variations in weathering-related physical and mechanical conditions. Engineering Geology 208, 63–68.
27. Zhang, B.Y., Zhang, J.H., Sun G.L., 2011. Development of a Soft-Rock Weathering Test Apparatus. Experimental Techniques (SEM), 1-12.
28. Zhang, B.Y., Zhang, J.H., Sun, G.L., 2015. Deformation and shear strength of rockfill materials composed of soft siltstones subjected to stress, cyclical drying/wetting and temperature variations. Engineering Geology 190, 87–97.