

Tomislav IVANKOVIĆ
prof.dr., dipl.ing.geol., Geotehnički fakultet, Varaždin

Ivan MUHOVEC
mr., dipl.ing.građ., Geotehnički fakultet, Varaždin

Damir ČORKO
mr., dipl.ing.građ., Conex, Zagreb

INJEKTIBILNOST SEDRENIH NASLAGA

SAŽETAK: Različiti genetski uvjeti stvaranja sedrenih naslaga i različiti egzogeni, endogeni i antropogeni utjecaji na ove sedimente rezultirali su velikom raznolikošću geotehničkih svojstava. U cilju sagledavanja problema ojačanja ovakvih materijala obavljeno je pokusno injektiranje nekoherentnog dijela sedrenih naslaga granulacije pjeska i praha uz uporabu cementa različite krupnoće mliva.

Opisan je postupak eksperimenta i izneseni su rezultati laboratorijskih ispitivanja materijala prije i poslije injektiranja. Pokazalo se da injekcijska smjesa s portland cementom ima zanemarljivo malu penetrabilnost, te da uporaba cementa standardne krupnoće mliva ne daje zadovoljavajuće rezultate. Vrlo dobri rezultati postignut smjesom na bazi mikrocementa krupnoće mliva 20 µm, a nešto slabiji sa mikrocementom krupnoće mliva 40 µm.

Nakon otvrđnjavanja injekcijske smjese, postignute čvrstoće uzoraka približno odgovaraju čvrstoći prirodno vezane sedre. Izgled injektiranog materijala u potpunosti odgovara izgledu prirodno očvrslе sedre homogene teksture.

INJECTIBILITY OF THE TRAVERTINE LAYERS

SUMMARY: Different genetic conditions of creating travertine layers, and different egsogenic and antropogenic influences on these sediments, resulted in great varieties of their geotechnical characteristics. Travertine appears in nature ranging from solid rock of different texture to weak rock with particles size of sand & silt.

In order to focus the problem of strengthening such materials, trial grouting of travertine composed of sand and silt sized particles has been carried out, using different grout mixtures. Grout mixture with portland cement has shown to have negligibly small penetration capability, in fact grouting had no effect on strengthening of the material. Very good results have been achieved with the mixture of microcement with particle size 20 µm. Grouting reach with this mixture was much greater than the reach achieved using the microcement with particles 40 µm.

Grout mixtures with water-cement ratios 3.0, 1.5 and 1.0 have been used for trials.

After hardening of the grouting mixture, the strength of grouted travertine samples has been examined. Obtained strength values depended on the used grout mixture, but in case of the microcement grout, obtained strength value was almost as high as the strength of naturally stiff travertine of homogenous texture.

Uvod

Geneza sedrenih naslaga vezana je uz specifične prirodne uvjete usko povezane s organskim i neorganskim procesima u vodi i uz pomoć vode. Tijekom vremena ovi uvjeti su se mijenjali pa su tako nastajale različite vrste sedri koje se razlikuju po teksturi, poroznosti i geomehaničkim svojstvima. Prekid procesa stvaranja sedrenih naslaga rezultat je djelovanja nepovoljnih geoloških, hidroloških, bioloških i antropogenih čimbenika. U tom vremenu često dolazi do degradiranja slabije litificirane sedre i stvaranja nekoherentnih sedrenih naslaga koje su veoma podložne eroziji. Slične nevezane i slabo vezane naslage mogu nastati i u nekim uvjetima stvaranja sedre.

Udio slabo vezanih i nevezanih materijala granulacije pjeska i praha unutar sedrenih naslaga može biti značajan, ponekad i dominantan. Takav je slučaj na slapovima nekih rijeka gdje nepovoljan prostorni položaj ovih naslaga uzrokuje pojavu nestabilnosti, odronjavanja, i degradaciju obalnog područja i područja slapa.

Stabiliziranje ovakvih terena pomoću masivnih betonskih konstrukcija treba izbjegavati jer se radi o ambijentu rijetkih prirodnih vrijednosti u kojem se ne smiju graditi objekti koji narušavaju prirodna obilježja područja. Kao jedno od prihvatljivih rješenja nameće se stabiliziranje sedrenih naslaga postupkom injektiranja.

Ispucale, jako porozne čvrste sedrene naslage sa pojavama kaverni različitog oblika i dimenzija mogu se tretirati injektiranjem uz primjenu uobičajenog dijapazona cementnih i pješčano-cementnih smjesa. Uspjeh primjene ovih injekcijskih smjesa u nekoheretnom dijelu sedrenih naslaga granulacije pjeska i praha je upitan te je potrebno ispitati efekte injektiranja primjenom drugih smjesa koje zadovoljavaju kriterije tražene čvrstoće.

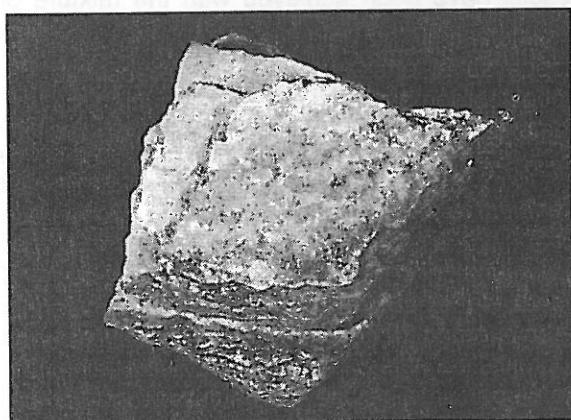
Rješenja sanacije slapa rijeke Plive u Jajcu bila su vezana upravo za gore navedene probleme. Injektibilnost nekoherentnih sedrenih naslaga bio je problem koji se pokušao riješiti primjenom injekcijskih smjesa na bazi mikrocementa različite krupnoće mliva.

Opis i svojstva sedrenih naslaga

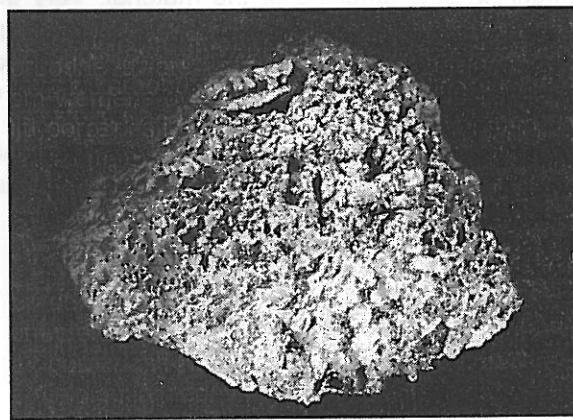
Sedra je slatkovodni kalcij-karbonatni sediment izrazito šupljikav i porozan. Nastao je posredstvom algi i mahovina koje iz vode asimiliraju CO_2 iz kalcijeva bikarbonata. Za razvoj sedrotvornih algi i mahovina potrebni su posebni uvjeti (Pavlović, 1967) kao što su:

- temperatura vode $10\text{-}23,4^\circ\text{C}$
- alkalitet vode 3,6-2,7
- tvrdoča vode 10,2-7,2 njem. stupnjeva
- pH 7,1-7,5
- čista voda bez kem. i biol. štetnih sastojaka
- povoljni svjetlosni uvjeti
- brzina vode 0,5-3,5 m/s

Ovisno o vrsti, veličini i obliku algi i mahovina stvaraju se različiti kalcificirani oblici. Geomehanička svojstva sedre zavise od veličine, oblika i čvrstoće veziva između zrna.



Slika 1. Sedra slojevite teksture



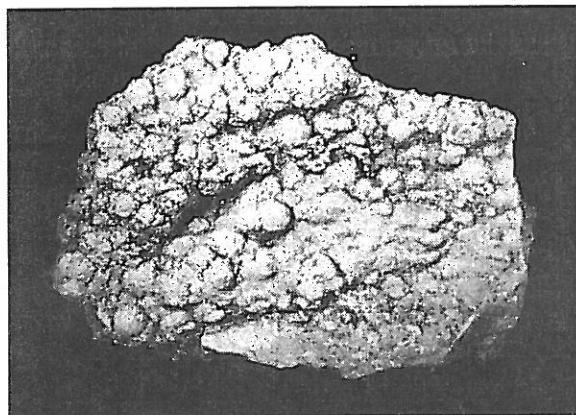
Slika 2. Sedra sružvaste teksture

U području slapa rijeke Plive zastupljene su dvije osnovne vrste sedre:

- sitnozrna slabo vezana i nevezana sedra
- kompaktna litificirana sedra

Kompaktne čvrste vrste sedre mogu imati različite teksture:

- slojevita tekstura (slika 1)
- spužvasta tekstura (slika 2)
- bradavičasta tekstura (slika 3)
- homogena tekstura



Slika 3. Sedra bradavičaste teksture

Unutar sedrenih naslaga pojavljuju se kaverne različitog oblika, veličine i pravca pružanja. Neke kaverne su djelomice ispunjene valuticama vapnenca što ukazuje na intenzivnu cirkulaciju i transport materijala u prošlosti. Heterogenost ovih naslaga u geomehaničkom smislu izražena je udjelom pojedinih komponenti kako slijedi:

- pjesak i prah, produkti rasp. sedre 29,0%
- djelomice ili slabo vezana sedra 42,9%
- sedra srednje vezana 9,2%
- sedra čvrsta, slabo porozna 12,8%
- kaverne nezapunjene 6,1%

Laboratorijskim ispitivanjima nevezanog sedrenog materijala dobivene su vrijednosti prikazane u tabeli 1.

Tabela 1. Rezultati laboratorijskog ispitivanja nevezanog sedrenog materijala

Uzorak	Granulometrijske analize			Specifična gustoća ρ_s (kg/m ³)	Suha nasuta gustoća ρ_d (kg/m ³)	Prikloni kut suhog nasutog mat. ϕ (°)
	Red. br.	Šljunak	Pijesak			
1	20	55	25	2680	980	35,06
2	16	65	29	2620	998	34,89
3	24	51	25	2656	1080	35,80
4	29	48	23	2600	1040	36,00
5	36	38	26	2610	1200	36,50
6	18	60	22	2615	1082	35,18
7	21	57	22	2660	1102	34,99
Sred. vr.	23,43	53,43	24,57	2634	1069	35,49

Čestice sedrenog materijala nisu zaobljene već imaju oštре rubove čime se mogu objasniti relativno visoke vrijednosti za ϕ .

Ispitivanjem litificiranih uzoraka sedre uzetih sa različitim dubina tijekom bušenja, dobivene su vrijednosti prikazane u tabeli 2.

Tabela 2. Rezultati laboratorijskog ispitivanja čvrste sedre

Redni broj	Obujam V (cm ³)	Masa M (g)	Gustoća ρ (kg/m ³)	V_p (m/s)	E_{dyn} (MN/m ²)
1	709,64	840	1183		
2	657,69	890	1353	1177	1874
3	644,80	800	1241	1250	1939
4	601,81	850	1412	1273	2288
5	644,80	900	1396	1304	2374
6	644,80	800	1241	1250	1939
7	645,13	940	1457		
8	581,59	540	928	1200	1336
9	553,90	510	921	1176	1274
10	830,84	830	1000	1250	1562
11	553,90	540	975	1052	1079
12	830,84	763	918	909	758
13	553,90	420	758	952	687
14	830,84	970	1167	1364	2171
15	830,84	750	903	1071	1036
16	553,90	650	1173	1429	2395
17	830,84	820	987	1200	1184
18	553,90	580	1047	1111	1292
19	830,84	880	1059	1200	1525
20	830,84	935	1125	1250	1758
21	830,84	970	1167	1210	1698
22	830,84	985	1185	1145	1554
23	830,84	1010	1216	1364	2262
24	830,84	1075	1294	1429	2642
25	553,90	680	1228	1429	2508
26	637,30	1085	1702		
27	443,90	705	1273	1754	3946
28	830,84	1005	1210	1648	3286
29	830,84	720	867	1049	954
30	524,83	790	1505		

Na 26 uzoraka pored određivanja gustoće ρ (kg/m³) izvršeno je ispitivanje brzine uzdužnih valova ultrazvučnih impulsa V_p (m/s).

Brzine valova ultrazvučnih impulsa kreću se u rasponu 909 m/s do 1754 m/s, a vrijednosti Youngovog dinamičkog modula elastičnosti E_{dyn} se kreću u rasponu $E_{dyn}=758$ MN/m² do $E_{dyn}=3946$ MN/m².

Gornje vrijednosti su dobivene prema izrazima (1), (2) i (3):

$$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)} = 10^3 \text{ M/V} \quad (1)$$

$$V_p = 10^4 \text{ l/t} \quad (2)$$

$$E_{dyn} = (1/10^6) \rho V_p^2 \quad (3)$$

Gdje je:

ρ = gustoća sedrenog uzorka u kg/m^3

M = masa u g

V = obujam u cm^3

V_p = brzina valova ultrazvučnih impulsa u m/s

E_{dyn} = Youngov dinamički modul elastičnosti u MN/m^2

Iako su ispitani uzorci determinirani kao "čvrsta sedra", treba napomenuti da se radi o uzorcima koji ne predstavljaju sedru najvećih vrijednosti čvrstoće. Međutim obzirom na zastupljenost pojedinih komponenti navedene vrijednosti se mogu uzeti kao realne.

Pokusna injektiranja nevezanog sedrenog materijala

Mogućnosti primjene injekcijskih zahvata i tehnologija injekcijskog postupka u nevezanom sedrenom materijalu granulacije pjeska i praha ovisi o penetrabilnosti injekcijske smjese. Kako ove naslage imaju veliku zastupljenost u cijelom sedrenom kompleksu slapa i korita r. Plive njihove geomehaničke značajke i njihov prostorni položaj definiraju ukupnu stabilnost. Čvrsta sedra ima relativno malu zastupljenost i pojavljuje se u obliku nepravilnih tijela koja su rijetko međusobno povezana. Ispiranjem i osipanjem nekoherentnog sedrenog materijala gromade vezane čvrste sedre gube oslonac, dolazi do obrušavanja i kolapsa cijelog prostora slapa.

Projektним rješenjem bila je predviđena konsolidacija slapa injektiranjem. Kako bi se sagledale mogućnosti primjene ove metode izvršeno je laboratorijsko ispitivanje injektibilnosti sedrenog pjeska i praha na velikim uzorcima. Za ispitivanje su korištene čelične posude u obliku valjka promjera 600 mm i visine 1200 mm. Posude su perforirane rupama promjera 3 mm na razmaku 50 mm i to na dnu i do 1/3 visine. Ispitivanja materijala dopremljenog u laboratorij izvršena na 7 uzoraka prikazana su u tablici 1. Da bi se postiglo stanje zbijenosti koje približno odgovara prirodnom stanju unutar tijela sedrenih naslaga izvršeno je nabijanje posebno konstruiranim cilindričnim utezima i to u slojevima po 20 cm.

Kontrola stupnja zbijenosti izvršena je ispitivanjem standardnim penetracijskim pokusom (SPP), pri čemu su oprema i tehnologija ispitivanja bile jednake kao u tijeku istražnog bušenja područja slapa.

Broj udaraca pri prodroru šiljka za jednu stopu iznosi 3 do 5 što odgovara graničnom području vrlo rahlog i rahlog stanja zbijenosti. Ispitivanjem u buštinama dobivene su približno iste ili nešto veće vrijednosti za odgovarajući granulometrijski sastav.

Injektiranje se provodilo utiskivanjem injekcijske smjese kroz gornji poklopac posude čija je konstrukcija omogućila primjenu tlaka injektiranja do 4 bara.

Postupak se završava 30 min. poslije postizanja želenog tlaka.

Primjenjene su slijedeće injekcijske smjese:

- smjesa sa portland cementom Dalmacija cement PC-45 uz dodatak 2% Rheobuilda 1000,
 $W/C = 3,0; 1,5; 1,0$
- Smjesa sa mikrocementom Rheocem 650 SR uz dodatak 2% Rheobuilda 1000,
 $W/C = 3,0; 1,5; 1,0$
- Smjesa sa mikrocementom Rheocem 900 SR uz dodatak 2% Rheobuilda 1000,
 $W/C = 3,0; 1,5; 1,0$

Mikrocement Rheocem 650 SR ima krupnoću mliva $40 \mu\text{m}$, a Rheocem 900 SR ima krupnoću mliva $20 \mu\text{m}$.

Otvaranjem čeličnih posuda s injektiranim materijalom obavljeno je nakon 7 dana. Mjerjenjem obujma injektiranog materijala konstatiran je postotak zastupljenosti koherentnog i nekoherentnog dijela volumena posude, a doseg injektiranja je određen mjerjenjem udaljenosti injektiranog (koherentnog) materijala od cementnog čepa na vrhu posude.

U posudi s materijalom injektiranim injekcijskom smjesom na bazi cementa PC-45 izmjerena penetracija smjese iznosila je samo 3-5 cm, zbog čega je došlo do osipanja ostalog dijela sedrenog pjeska i praha (slika 4), dok je u posudi injektiranoj mikrocementom Rheocem 900 SR cijelokupan sadržaj sedrenog pjeska i praha cementiran u čvrstu sedrenu masu (slika 5).

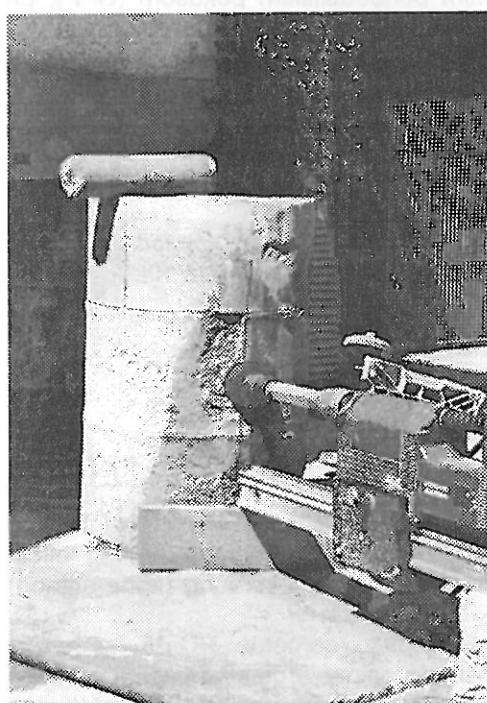


Slika 4. Osipanje sedrenog pijeska i praha

Dakle, doseg injektiranja primjenom mikrocementa Rheocem 900 SR je u radijusu većem od 1,0 m a injektirano je 100% obujma posude.

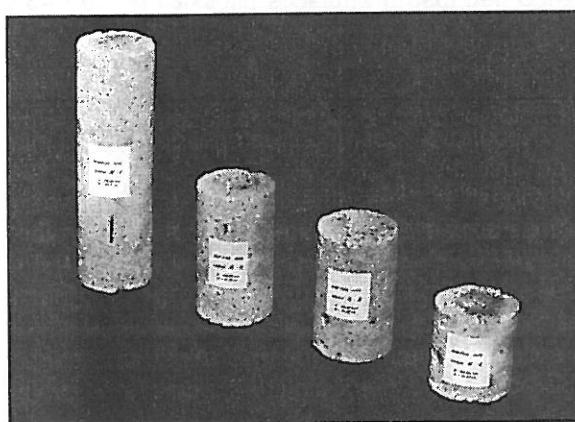
Uspjeh injektiranja primjenom injekcijske smjese na bazi mikrocementa Rheocem 650 SR je djelomičan jer je očvrslo 68% sadržaja posude.

Za potrebe ispitivanja geomehaničkih svojstava injektiranjem očvrslog sedrenog tijela izvršeno je uzorkovanje bušenjem promjera 100 mm (slika 5).



Slika 5. Injektiranjem očvrsli sedreni detritus

Na valjkastim uzorcima injektiranjem očvrslog sedrenog pijeska i praha izvršena su ispitivanja brzine valova ultrazvučnih impulsa (tabela 3, slika 6).



Slika 6. Uzorci injektiranog sedrenog pijeska i praha

Tabela 3. Rezultati laboratorijskog ispitivanja sedrenog pijeska i praha

Uzorak Red. broj	Masa M (g)	Gustoća ρ (kg/m ³)	Brzina V_p (m/s)	E_{dyn} MN/m ²
1	3487,7	1398	2083	6066
2	2027,6	1479	2425	8697
3	1884,5	1505	2492	9346
4	1345,6	1595	3245	16795

Usporedbom vrijednosti dobivenih ispitivanjem valjkastih uzoraka prirodno očvrsle sedre (tabela 2.) i uzoraka sedre dobivene injektiranjem sedrenog pijeska i praha uz primjenu mikrocementa Rheocem 900 SR (tabela 3.) mogu se dobiti pokazatelji mogućeg stupnja litifikacije.

Vrijednosti dobivene ispitivanjem očvrslog sedrenog detritusa injektiranog mikrocementom Rheocem 900 SR veće su od vrijednosti dobivenih ispitivanjem prirodno očvrsle sedre. Ove razlike su nastale zbog različitog pravca ispitivanja u odnosu na teksturu. Osim toga među ispitivanim srodnim uzorcima nije bila zastupljena sedra najveće čvrstoće.

Na utjecaj pravca ispitivanja u odnosu na teksturu ukazuju rezultati površinskog seizmičkog prozvučivanja sedre slojevite teksture i sedre spužvaste teksture. Brzina seizmičkih valova kroz sedru slojevite teksture bila je 2000 m/s, a kroz sedru spužvaste teksture izmjerena brzina je iznosila svega 1000 m/s.

Iz prikazanih rezultata pokusnog injektiranja sedrenog pijeska i praha vidi se da nije moguća uspješna primjena injekcijskih smjesa na bazi cementa standardne krupnoće mliva. Primjenom injekcijskih smjesa na bazi mikrocementa krupnoće mliva ispod 20 µm postižu se veoma dobri rezultati. Radius injektiranja iznosi više od 1 m, a čvrstoće injektiranog materijala jednake su ili veće od čvrstoća prirodno očvrsle sedre.

Izgled injektiranog očvrslog materijala praktički je jednak izgledu prirodno očvrsle sedre homogene teksture, što olakšava izvedbu sanacijskih radova bez narušavanja prirodnog izgleda okoliša.

Zaključak

Velika zastupljenost sedrenog detritusa granulacije pjeska i praha unutar sedrenih naslaga uz nepovoljne prostorne odnose osnovni je uzrok nestabilnosti obalnog područja i slapova nekih rijeka. Sedrene naslage slapa rijeke Plive sadrže 29% sedrenog detritusa granulacije pjeska i praha i 43% djelomice ili slabo vezane sedre veoma podložne eroziji što je osnovni razlog učestalih odronjavanja i degradiranja slapa, posebice pri nailasku velikih voda.

Očvršćivanje sedrenih nekoherenčnih naslaga injektiranjem složen je postupak zbog problema injektibilnosti. Pokusno injektiranje ovih materijala obavljeno različitim injekcijskim smjesama na bazi cementa pokazalo je da se uporabom cementa standardne krupnoće mliva postiže zanemarivo mala penetrabilnost injekcijske smjese.

Vrlo dobri rezultati se postižu primjenom injekcijskih smjesa na bazi mikrocementa krupnoće mliva 20 μm . Radius injektiranja ovom smjesom iznosi više od 1 m, a geotehničke vrijednosti injektiranog materijala odgovaraju vrijednostima veoma čvrste prirodne sedre.

Primjenom mikrocementa krupnoće mliva 40 μm postižu se nešto slabiji rezultati.

Injektiranjem sedrenog detritusa granulacije pjeska i praha injekcijskim smjesama na bazi mikrocementa krupnoće mliva 20 μm dobiva se čvrsta sedra koja izgledom u potpunosti odgovara prirodno očvrsloj sedri homogene teksture.

Literatura

- (1) Dr. Zlatko Pavletić: Izvještaj o biološkim ispitivanjima najdonjeg toka rijeke Plive, 1967.
- (2) CONEX, Zagreb, Institut za građevinarstvo Sveučilišta u Mostaru: Rezultati istraživanja područja korita i slapa rijeke Plive, 1998 god.