

Primjena cementa pri injektiranju sedrenih materijala

Tomislav Ivanković, Ivan Muhovec

Ključne riječi

sedra,
portland cement,
mikrocement,
injektiranje,
injekcijske smjese,
rezultati istraživanja

Key words

tufa,
Portland cement,
microcement,
grouting,
grouting mixes,
investigation results

Mots clés

tuf calcaire,
ciment Portland,
microciment,
injection,
mélanges d'injection,
résultats des
reconnaisances

Ключевые слова

туф,
портланд цемент,
микроцемент,
инжектирование,
инжекционные смеси,
результаты
исследований

Schlüsselworte

Rauhwaacke,
Potlandzement,
Mikrozement,
Verpressung,
Einpressmörtel,
Forschungsergebnisse

T. Ivanković, I. Muhovec

Prethodno priopćenje

Primjena cementa pri injektiranju sedrenih materijala

U članku se opisuju mogućnosti primjene mikroцемента при консолидацијском инјектирању. Описана су истраживања обављена на терену (шири простор ријеке Пливе) и у лабораторији. Аналитички су приказани резултати истраживања станја прије инјектирања и након њега. Закључено је да није могуће инјектирање смјесамa на бази портланд цемента, да се употребом микроцемента финоће млива 40 μm постиже djelomična penetracija, a dobri su rezultati uporabom mikroцемента финоће млива 20 μm .

T. Ivanković, I. Muhovec

Preliminary note

Use of cement for grouting in tufa material

Possibilities of using microcement in consolidation grouting are considered in the paper. On-site investigations (carried out in the wider Pliva river basin) and laboratory testing results are presented. An analytical overview of the situation prior to and after the grouting work is given. The authors have reached the following conclusions: grouting is not possible with mixes based on Portland cement, partial penetration is possible by using microcement with 40 μm grinding fineness, and good results can be obtained when microcement with the grinding fineness of 20 μm is used.

T. Ivanković, I. Muhovec

Note préliminaire

L'emploi du ciment pour l'injection dans les tufs calcaires

Les possibilités d'application du microciment pour l'injection de consolidation sont considérées dans l'ouvrage. Les reconnaissances sur le terrain (conduites dans le bassin de la rivière Pliva) et les résultats des essais en laboratoire sont présentés. Un aperçu analytique de la situation avant et après les travaux d'injection est donné. Les conclusions suivantes ont été faites après les reconnaissances: l'injection n'est pas possible avec les mélanges basés sur le ciment Portland, la pénétration partielle est possible en utilisant le microciment caractérisé par la finesse de mouture de 40 μm , et de bons résultats peuvent être obtenus en utilisant le microciment avec la finesse de mouture de 20 μm .

T. Иванкович, И. Муховец

Предварительное сообщение

Применение цемента при инжектировании туфовых материалов

В работе описываются возможности применения микроцемента при консолидационном инжектировании. Описаны исследования, проведенные в поле (более широкий простор реки Пливы) и в лаборатории. Аналитически показаны результаты исследования состояния до инжектирования и после него. Заключено, что невозможно проводить инжектирование смесями на базе портланд цемента, что при употреблении микроцемента тонкости помола 40 μm достигается частичная пенетрация, а хорошие результаты достигаются при употреблении микроцемента тонкости помола 20 μm .

T. Ivanković, I. Muhovec

Vorherige Mitteilung

Anwendung von Zement bei der Verpressung von Rauhwaacke-Materialien

Im Artikel beschreibt man Möglichkeiten der Anwendung von Mikrozentrum bei Konsolidierungsverpressung. Beschrieben sind Forschungen durchgeführt am Gelände (breiterer Umkreis des Flusses Pliva) und im Laboratorium. Die Ergebnisse der Forschung des Zustandes vor und nach der Verpressung sind analytisch dargestellt. Man kam zum Schluss dass die Verpressung mit Einpressmörtel mit Portlandzement nicht möglich ist, dass man durch Anwendung von Mikrozentrum mit Mahlfineheit 40 μm nur teilweise Penetration erreicht, und dass man gute Ergebnisse mit Mikrozentrum mit Mahlfineheit 20 μm erreichen kann.

Autori: Prof. dr. sc. **Tomislav Ivanković**, dipl. ing. geol.; mr. sc. **Ivan Muhovec**, dipl. ing. građ., Geotehnički fakultet u Varaždinu Sveučilišta u Zagrebu

1 Uvod

Sedra je slatkovodni kalcij-karbonatni sediment specifične geneze. Najčešće je nalazimo u karbonatnim terenima na mjestima gdje su morfološki, geološki, biološki i hidrološki uvjeti omogućili razvoj posebnih vrsta alga i mahovina koje asimiliraju CO₂. Redukcijom CO₂ iz kalcijeva bikarbonata Ca(HCO₃)₂ nastaje kalcit CaCO₃ kojim se inkrustiraju alge i mahovine te nastaju različiti kalcificirani oblici. Razvoj sedre usporava, a često i zaustavlja, svaka značajnija promjena uvjeta u kojim je ona nastala. Promjena hidroloških uvjeta i zagađenje vode najvažniji su čimbenici koji uzrokuju retardaciju i destrukciju naslaga sedre. Za razvoj sedrotvornih alga i mahovina potrebni su posebni uvjeti [1]:

- temperatura vode 10-23,4 °C
- alkalitet vode 3,6-2,7
- tvrdoća vode 10,2
- pH 7,1-7,5
- čista voda bez kemijskih i bioloških štetnih sastojaka
- povoljni svjetlosni uvjeti
- brzina vode 0,5-3,5 m/s

U geološkoj prošlosti najčešće promjene bile su klimatske i hidrološke, a njih su pratile promjene u stvaranju i destrukciji sedre. Ovisno o promjenama genetskih uvjeta unutar sedrenih naslaga nalazimo različite oblike sedre. U geotehničkom smislu sedra se pojavljuje kao kompaktna litificirana stijena i sitnozrna slabo vezana i nevezana stijena. Čvrsta je sedra različite teksture s mnogo diskontinuiteta primarnog i sekundarnog karaktera. Primarni su diskontinuiteti pore makroskopskih i mikroskopskih veličina i veći prazni prostori-kaverne različitih oblika i dimenzija. Kaverne mogu biti djelomično ili potpuno ispunjene sedrenim pijeskom i prahom. Mogući su nalazi vapnenog šljunka i pijeska koji pokazuju hidrološke ekcese u geološkoj prošlosti, odnosno destrukciju sedrenih naslaga snažnim prodorima vode koja je transportirala vapnenački detritus s većih udaljenosti. Sekundarni diskontinuiteti su tektonskog podrijetla. To su pukotine i rasjedi u kojima se često nalazi sedreni pijesak.

Sitnozrna slabo vezana i nevezana sedra može nastati u primarnoj fazi sedimentacije ili u kasnijoj fazi kao rezultat destrukcije nataložene sedre. Sedra nastala u primarnoj fazi ima nešto bolja geotehnička svojstva od naknadno taložene sedre, ali zbog otežanog definiranja granica njihova prostornog položaja često se svrstavaju u istu geotehničku kategoriju.

Za kompaktnu litificiranu sedru s kavernama i pukotinama mogu se očekivati dobri rezultati konsolidacijskog injektiranja uz primjenu injekcijskih smjesa na bazi portlandskoga cementa. Međutim, uspjeh injektiranja sedrenog pijeska i praha nije obećavajući zbog nepovoljnog odnosa veličine pora pijeska i praha i veličine česti



Slika 1. Slap rijeke Plive

ca portlandskoga cementa. Budući da injektiranje kemijskim injekcijama ne daje dovoljne čvrstoće injektiranom materijalu, postoji potreba istraživanja mogućnosti konsolidacijskog injektiranja sedrenog detritusa.

Iz ekoloških je razloga poželjno da injektirani materijal zadrži izgled i boju prirodno očvrstlog materijala, pa se pri odabiru veznog materijala trebaju uzeti u obzir i ovi zahtjevi. Mogućnost primjene mikro cementa u injekcijskim smjesama u konsolidacijskom injektiranju sedrenog pijeska i praha proučavala se laboratorijskim ispitivanjem na uzorcima velikog obujma i injektiranjem u stvarnim uvjetima na terenu. Za probni poligon odabrana je lokacija slapa rijeke Plive u Jajcu (slika 1.). Ova je lokacija bila pogodna za istraživanja zbog velike zastupljenosti sedrenog pijeska i praha i izrazito heterogene građe sedre sa složenim prostornim odnosima pojedinih varijeteta. To je omogućilo provjeru efikasnosti primjene rezultata laboratorijskih ispitivanja u stvarnim uvjetima pri čemu se uporaba injekcijskih smjesa na bazi mikro cementa zbog troškova željela ograničiti samo na zone sedrenog pijeska i praha.

2 Metode istraživanja

Prethodna geološka istraživanja izvedena na širem prostoru slapa rijeke Plive sadrže niz terenskih i laboratorijskih metoda. Od terenskih istraživanja najznačajnija su:

- inženjersko-geološko kartiranje
- istražna bušenja
- refrakcijska seizmička ispitivanja
- *cross-hole* seizmička prozvučivanja
- videoendoskopska ispitivanja
- ispitivanja vodopropusnosti metodom Lefranc
- standardni penetracijski pokus (SPP)
- geodetska snimanja procesa erozije.

Primijenjene su sljedeće laboratorijske metode:

- geomehanička ispitivanja na uzorcima nevezanog tla
- mjerenja brzine ultrazvučnih valova na uzorcima stijene
- ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće na uzorcima stijene.

Inženjersko-geološkim kartiranjem obuhvaćeno je područje uz tok rijeke Plive, područje slapa i područje odrona nizvodno od slapa koje je nastalo u vrijeme posljednjeg kolapsa desne strane slapa.

U tijeku istražnog bušenja s kontinuiranim vađenjem uzoraka provodilo se mjerenje vodopropusnosti metodom Lefranc te obavljali standardni penetracijski pokusi, a prije oblaganja bušotina zaštitnim kolonama izvršena su videoendoskopska ispitivanja kojima su prostorno određeni položaji značajnijih defekata stijene.

Refrakcijska seizmička istraživanja i *cross-hole* seizmička prozvučivanja omogućili su podjelu prostora po geotehničkim svojstvima, što je u kombinaciji s ostalim provedenim istraživanjima rezultiralo izradom geotehničkog modela prostora slapa. Mjerenjem brzina ultrazvučnih impulsa na uzorcima stijene prije mjerenja tlačne čvrstoće dobivena je mogućnost korelacije statičkih i dinamičkih parametara stijene.

Injektibilnost nevezanoga sedrenog materijala ispitana je na uzorcima u laboratoriju, a injektibilnost sedrene mase na probnom polju u blizini ruba slapa.

Za laboratorijska ispitivanja upotrijebljeni su uzorci u obliku valjka promjera 600 mm i visine 1200 mm. Posude su do visine 400 mm i po cijelom dnu perforirane rupama promjera 3 mm na razmaku 50 mm, zbog mogućnosti kontrole injektiranja i filtriranja injekcijske smjese (slika 2.).

Materijal se zbijao posebnim cilindričnim utezima u slojevima od po 20 cm, kako bi se postiglo stanje zbijenosti koje približno odgovara prirodnom stanju. Kontrola zbijenosti izvršena je ispitivanjem standardnim penetracijskim postupkom (SPP), pri čemu su oprema i tehnolo-

gija ispitivanja bile iste kao kod terenskih ispitivanja. Injekcijska se smjesa utiskivala od vrha prema dnu posude pod tlakom do 4 bara. Primijenjene su slijedeće smjese (s naznačenim vodocementnim faktorom, $w = V/C$):

- portlandski cement PC-45 uz dodatak 2% plastifikatora: $w = 3,0; 1,5; 1,0$
- mikro cement krupnoće mliva 40 μm uz dodatak 2% plastifikatora: $w = 3,0; 1,5; 1,0$;
- mikro cement krupnoće mliva 20 μm uz dodatak 2% plastifikatora: $w = 3,0; 1,5; 1,0$.

Kontrola injektibilnosti navedenih injekcijskih smjesa izvršena je mjerenjem obujma koherentnog i nekoherentnog dijela sadržaja posuda i mjerenjem udaljenosti injektiranog (koherentnog) materijala od vrha posude, odnosno početka ispitivane etaže injektiranja. Uzorkovanje za laboratorijska ispitivanja izvršeno je bušenjem s visokim obrtajima uz uporabu tankostijenih dijamančnih kruna promjera 100 mm.

Na valjkastim uzorcima injektiranjem očvrstloga sedrenog pijeska i praha izvršena su ispitivanja brzine ultrazvučnih valova te jednoosne čvrstoće (slika 3.). Radi ispitivanja stupnja litifikacije sedrenog detritusa, ista su ispitivanja izvršena i na uzorcima prirodno očvrstle sedre.



Slika 2. Injektiranje sedrenog detritusa na velikim uzorcima



Slika 3. Uzorci injektiranog sedrenog detritusa

Probim injektiranjem u bušotinama (s injekcijskim tlakom do približno 6 bara) trebalo je odrediti način injektiranja u heterogenim naslagama sedre, s mogućom primjenom i na ostale stijene koje karakterizira nepravilna izmjena varijeteta intergranularne i pukotinske poroznosti. Za probno polje na terenu odabrano je područje slapa rijeke Plive u Jajcu gdje je injektirana 21 bušotina, svaka dubine po 20 m, u dvorednom rasporedu (slika 4.). Unutar svakog reda, najprije su injektirane tzv. primarne bušotine (svaka druga), a potom su interpolirane sekundarne. Injektiranje je provedeno u prvom (I.) redu bušotina, a potom u drugom (II.) redu (tablica 1.).

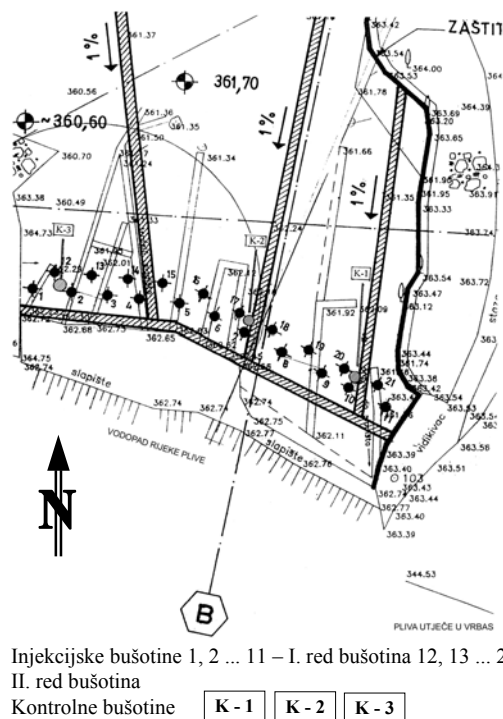
Tablica 1. Pregled utroška injekcijske smjese pri injektiranju probnog polja

Bušotinski raspored		Oznaka bušotine	Utrošak suhe tvari (kg)												
			Mikrocement (MC)				Portland cement (PC)				PC sa pijeskom (PCP)				Ukupno
			Et.A	Et.B	Et.C	Σ	Et.A	Et.B	Et.C	Σ	Et.A	Et.B	Et.C	Σ	
Prvi bušotinski red (I.)	Primarne bušotine	1	306	1.224	357	1.887	-	34.460	-	34.460	-	9.135	-	9.135	45.482
		3	77	2.525	969	3.571	-	1.545	-	1.545	-	270	-	270	5.386
		5	153	1.224	732	2.109	-	23.948	14.678	38.626	-	6.885	3.735	10.620	51.355
		7	230	587	5.508	6.325	-	-	-	-	-	-	-	-	6.325
		9	1.224	3.494	3.418	8.136	-	4.172	-	4.172	-	765	-	765	13.073
	11	3.060	5.457	612	9.129	-	7.416	-	7.416	-	1.260	-	1.260	17.805	
	Σ	5.050	14.511	11.596	31.157	-	71.541	14.678	86.219	-	18.315	3.735	22.050	139.426	
	Sekundarne bušotine	2	77	612	612	1.301	-	5.099	9.888	14.987	-	1.215	2.790	4.005	20.293
		4	357	1.071	230	1.658	-	-	-	-	-	-	-	-	1.658
		6	867	1.301	1.428	3.596	-	1.391	-	1.391	-	-	-	-	4.987
8		765	1.836	1.989	4.590	-	8.189	-	8.189	-	1.815	-	1.815	14.594	
10		918	1.224	2.142	4.284	-	-	-	-	-	-	-	-	4.284	
Σ	2.984	6.044	6.401	15.429	-	14.679	9.888	24.567	-	3.030	2.790	5.820	45.816		
Drugi bušotinski red (II.)	Primarne bušotine	13	153	306	1.224	1.683	-	-	11.742	11.742	-	-	3.240	3.240	16.665
		15	153	740	587	1.480	-	-	-	-	-	-	-	-	1.480
		17	153	1.224	1.224	2.601	-	309	2.009	2.318	-	-	360	360	5.279
		19	153	1.224	2.947	4.324	-	927	-	927	-	270	-	270	5.521
		21	76	76	459	611	-	-	-	-	-	-	-	-	611
	Σ	688	3.570	6.441	10.699	-	1.236	13.751	14.987	-	270	3.600	3.870	29.556	
	Sekundarne bušotine	12	163	335	268	766	-	-	-	-	-	-	-	-	766
		14	98	234	673	1.005	-	-	773	773	-	-	180	180	1.958
		16	306	918	720	1.944	-	464	-	464	-	-	-	-	2.408
		18	199	107	1.284	1.590	-	-	-	-	-	-	-	-	1.590
20		77	383	1.428	1.888	-	-	-	-	-	-	-	-	1.888	
Σ	843	1.977	4.373	7.193	-	464	773	1.237	-	-	180	180	8.610		

Raspored etaža: Et.A (etaža A), od 0 do 5 m; Et.B, od 5 do 10 m; Et.C, od 10-20 m.

Primijenjene injekcijske smjese: MC – mikrocement, PC – Portland cement, PCP – Portland cement s 30% pijeska.

Kriteriji injektiranja: 75 kg/m³ (MC-1), 100 kg/m³ (MC-2), 125 kg/m³ (MC-3), 150 kg/m³ (MC-4), 150 kg/m³ (MC-5), 100 kg/m³ (PC-1), 150 kg/m³ (PC-2) te injektiranje do zasićenja etaža s PCP.



Slika 4. Raspored bušotina u probnom injekcijskom polju

Takav raspored bušotina i redosljed injektiranja omogućavaju ocjenu efikasnosti injektiranja na temelju utroška suhe tvari. Identifikacija svojstava sedrenih naslaga u tijeku bušenja izvršena je posredno registriranjem gubitaka isplake i propadanja pribora. Veličina etaža injektiranja određivala se primjenom rezultata provedenih istraživanja [2] i podataka dobivenih u tijeku bušenja, a iznosila je 2,5-10,0 m.

Problem injektibilnosti naslaga u kojima se smjenjuju varijeteti međuzrnate, pukotinske i kavernoze poroznosti, pri čemu zbog nepovoljnog odnosa veličine pora i čestica veziva u nevezane sedimente najčešće ne penetrira injekcijska smjesa na bazi portlandskoga cementa, pokušao se riješiti primjenom injekcijskih smjesa širokog dijapazona sastava i viskoznosti. Injektiranje je počinjalo rijetkim injekcijskim smjesama na bazi mikrocementa i plastifikatora, a zatim su se primjenjivale sve gušće smjese.

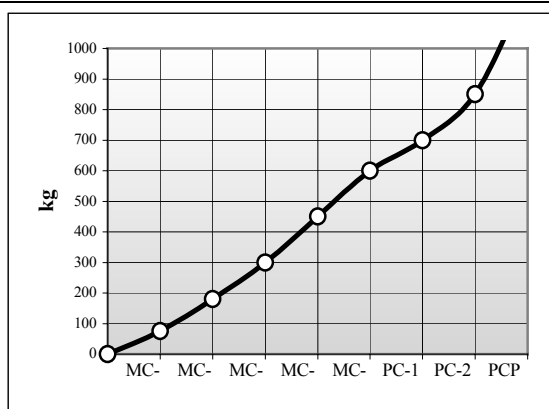
Ako pri ukupnom utrošku od 600 kg/m nije postignut završni kriterij od 1 L/m/5 bara, primijenjene su smjese na bazi portlandskoga cementa i bentonita. Injekcijske smjese s dodatkom 30% pijeska primijenjene su nakon utroška prethodnih smjesa od 250 kg/m. U tablici 2. da-

ni su podaci o upotrijebljenim smjesama, a na dijagramu (slika 5.) prikazane su količine pojedinih smjesa.

Tablica 2. Primjene injekcijskih smjesa

Tip smjese		Kriteriji injekt. utroška [kg/m ³]	
Oznaka	w = V/C		
MC	MC-1	5,0	75
	MC-2	2,0	100
	MC-3	1,5	125
	MC-4	1,0	150
	MC-5	0,8	150
PC	PC-1	1,0	100
	PC-2	0,8	150
PCP	PCP	0,75	do zasićenja

MC – mikrocement, PC – portland cement,
PCP – Portland cement sa 30% pijeska



Slika 5. Injekcijske smjese upotrijebljene na probnom injektivnom polju

Nakon završetka injektiranja izvedene su tri kontrolne bušotine (K1, K2 i K3) promjera 100 mm s kontinuiranim vađenjem uzoraka. Bušotine su locirane u središte istostraničnih trokuta koje čine injekcijske bušotine na razmaku 2,0 m (slika 4.). U bušotinama je izvršen standardni penetracijski pokus (SPP) i obavljeno ispitivanje vodopropusnosti metodom Lugeona.

3 Rezultati istraživanja i diskusija

Prethodna geološka ispitivanja imala su šire značenje pa je za potrebe ispitivanja injektibilnosti sedrenih naslaga uporabljen samo dio rezultata i oni se mogu sažeti u sljedećem: Ovisno o vrsti i obliku alga i mahovina stvaraju se različiti kalcificirani oblici sedre. Geomehanička svojstva ovih naslaga zavise od vrste i dimenzija osnovnih oblika te količine i čvrstoće veziva. Na probnom poligonu u području slapa rijeke Plive zastupljene su dvije osnovne vrste sedre [2]:

- nevezana i slabo vezana sedra
- kompaktna litificirana sedra.

Kompaktne čvrste vrste sedre mogu imati različite teksture:

- slojasta tekstura
- spužvasta tekstura
- bradavičasta tekstura
- homogena tekstura.

Moguća je detaljnija podjela osnovnih vrsta sedre u geotekničkom smislu na:

- pijesak i prah, produkti raspadanja sedre
- djelomice ili slabo vezana sedra
- srednje vezana sedra
- čvrsta sedra
- kaverne nezapunjene.

Visoki postotak udjela nevezane i djelomice vezane komponente, znatno manji postotak čvrste sedre i vrlo visok postotak zastupljenosti praznih prostora-kaverna u sedrenoj masi (tablica 3.) određuju specifičnost građe ovog područja i složenost primjene konsolidacijskog injektiranja. Već na osnovi visokog udjela zrna granulacije pijeska i praha (tablica 4.) moglo se sumnjati u uspjeh primjene standardnoga portlandskog cementa pri injektiranju nevezanoga sedrenog detritusa.

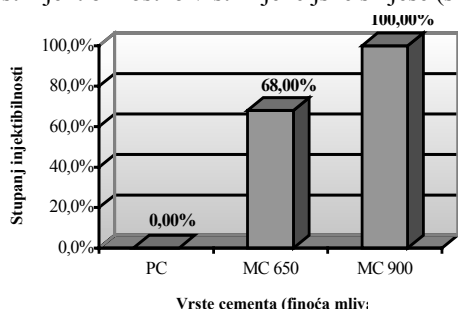
Tablica 3. Zastupljenost sastavnih dijelova sadrenog kompozita

Sastavni dijelovi sedrenog kompozita	Udjel u obujamskim Postocima
1. Pijesak i prah, produkti rasp. sedre	29,0%
2. Djelomice ili slabo vezana sedra	42,9%
3. Sedra srednje vezana	9,2%
4. Sedra čvrsta, slabo porozna	12,8%
5. Kaverne nezapunjene	6,1%

Tablica 4. Rezultati laboratorijskih ispitivanja nevezanoga sedrenog detritusa

Uzo- rak	Granulometrijske analize			Specifična gustoća ρ_s [kg/m ³]	Suha nasuta gustoća ρ_d [kg/m ³]	Prikloni kut suhog nasutog materijala α_0 [°]
	Šljunak	Pijesak	Prah i glina			
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
Sr. vr.	23,43	53,43	24,57	2634	1069	35,49

Rezultati ispitivanja injektibilnosti sedrenog detritusa na velikim uzorcima prikazani kao odnos obujma očvrslog i nevezanog dijela injektiranih uzoraka pokazuju veliku ovisnost injektibilnosti o vrsti injekcijske smjese (slika 6).



Slika 6. Injektibilnost sedrenog detritusa različitim injekcijskim smjesama

Injekcijske smjese na bazi portlandskoga cementa praktički nisu penetrabilne. Djelomična penetrabilnost injekcijskih smjesa na bazi mikro cementa postiže se već kod mikro cementa finoće mliva 40 μm, a potpuna se penetrabilnost postiže kod finoće mliva ispod 20 μm.

Efekti injektiranja mogu se promatrati i putem rezultata ultrazvučnih ispitivanja na valjkastim uzorcima injektiranoga sedrenog detritusa (uzetih iz kontrolnih bušotina, K-1, K-2 i K-3) i prirodno očvrsle sedre. Ukupno je ispitano trideset uzoraka za koje je utvrđena gustoća ρ i brzina prolaza primarnoga ultrazvučnog vala v_p.

Uzimajući u obzir činjenicu da valjkasti uzorci mogu biti tretirani kao izduženi štapni elementi, dinamički modul elastičnosti (E_{dyn}) izračunavao se izrazom:

$$E_{dyn} = \rho v_p^2, \text{ odnosno:}$$

$$E_{dyn} [\text{MN/m}^2] = \frac{1}{10^6} \rho [\text{kg/m}^3] \cdot (v_p [\text{m/s}])^2$$

S tim u vezi, a uz utvrđenu gustoću ρ u rasponu od 758 do 1702 kg/m³ te uz pripadne vrijednosti brzina ultrazvučnih valova za uzorke prirodno očvrsle sedre v_{p(n)} i injektiranog sedrenog detritusa v_{p(g)} u rasponu:

$$v_{p(n)} = 909 - 1754 \text{ m/s}$$

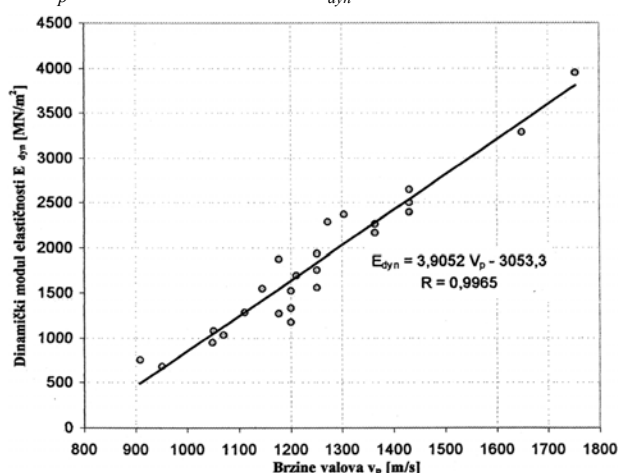
$$v_{p(g)} = 2083 - 3245 \text{ m/s}$$

dobivene su računске vrijednosti Youngova dinamičkog modula elastičnosti:

$$E_{dyn(n)} = 758 - 3945 \text{ MN/m}^2$$

$$E_{dyn(g)} = 6066 - 16795 \text{ MN/m}^2$$

Statistička distribucija navedenih podataka (30 uzoraka) prikazana je na slici 7., a linearizirana veza između brzine v_p i dinamičkog modula E_{dyn} prikazana je na slici 8.

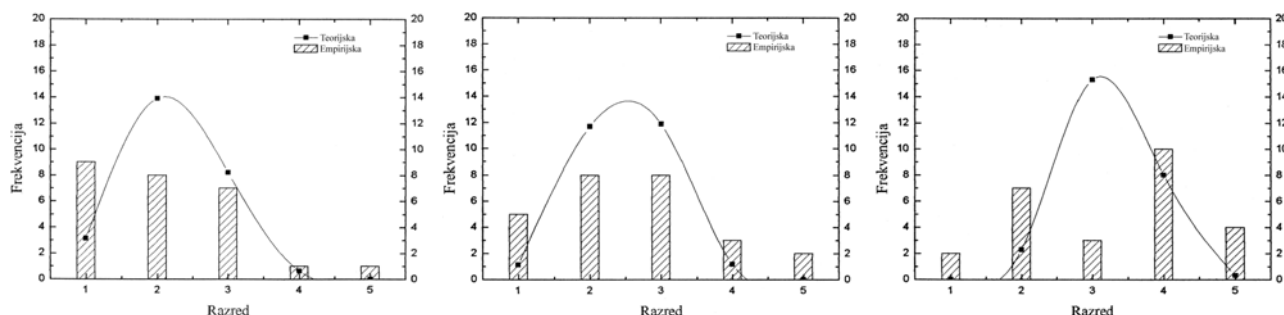


Slika 8. Linearizirana veza između brzine primarnih ultrazvučnih valova (v_p) i dinamičkih modula elastičnosti (E_{dyn})

Odnos srednjih vrijednosti v_p i E_{dyn} za uzorke prirodno očvrsle sedre i injektiranog sedrenog detritusa jest sljedeći:

$$v_{psr(n)}/v_{psr(g)} = 1:2 \quad E_{dyn(n)}/E_{dyn(g)} = 1:5,6$$

Osim prikazanoga geotehničkog aspekta primjene mikro cementa pri injektiranju sedrenog detritusa, važan je i vizualni izgled injektiranoga materijala jer tehnički zahvati u području sedrenih slapova ne smiju narušavati prirodni okoliš. Uzorci injektiranoga sedrenog detritusa imaju izgled prirodno očvrsle sedre homogene strukture (slika 9.), što također pokazuje prihvatljivost primjene nekih vrsta



Slika 7. Statistička obrada laboratorijski utvrđenih podataka za sedreni materijal: distribucija podataka gustoće, ρ [kg/m³], distribucija podataka ultrazvučnih brzina, v_p [m/s], distribucija podataka dinamičkih modula elastičnosti, E_{dyn} [MN/m²]

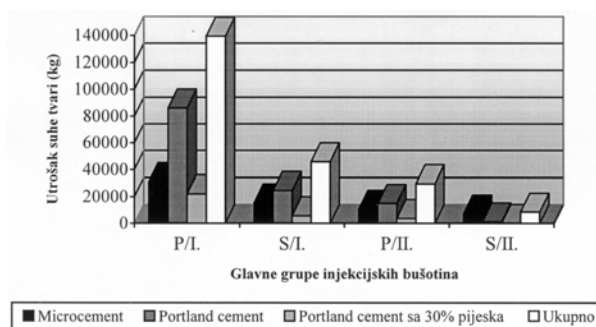


Slika 9. Valjkasti uzorak homogenizirane strukture injektiranog sedrenog detritusa (MC 900 SR)

mikrocementa pri konsolidacijskom injektiranju u područjima sedrenih barijera.

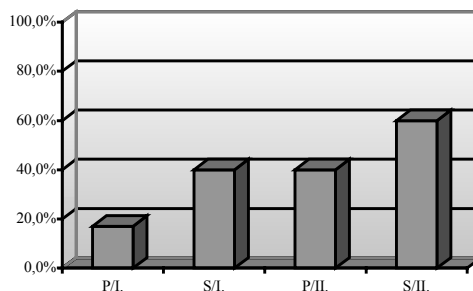
Probno injekcijsko polje, locirano u sedri s čestom izmjenom varijeteta međuznate, pukotinske i kavernozone poroznosti, dalo je veći broj informacija koje pokazuju mogućnost konsolidacijskog injektiranja primjenom mikro cementa. Na temelju rezultata injektiranja metodom približavanja (primarne + sekundarne injekcijske bušotine) uz opisani način prilagođavanja injekcijskih smjesa karakteru stijene, dobiveni su sljedeći pokazatelji:

- Završni kriterij injektiranja primjenom mikro cementa postignut je na 38% etaža (tablica 1.). To približno odgovara postotku sedrenog detritusa u području probnog polja. Na 62% etaža bilo je potrebno primijeniti portlandski cement, što pokazuje približno istu zastupljenost sedre pukotinske i kavernozone poroznosti.
- Primijenjeni razmak bušotina prvog i drugog reda omogućio je efikasno injektiranje sedre. Već u prvom redu injekcijskih bušotina ukupni utrošak suhe tvari kod sekundarnih bušotina bio je 3 puta manji od utroška primarnih bušotina (slika 10.). Utrošak suhe tvari drugoga injekcijskog reda bio je manji 6 puta od utroška suhe tvari prvog reda. Prema tome, programiranim redosljedom injektiranja postiže se zadovoljavajuće preklapanje polumjera injektiranja. Veći postotak smanjenja utroška suhe tvari u drugom redu rezultat je prostornog položaja pukotinskog i kavernozone sustava koji je genetski predisponiran pravcem nastanka sedre.



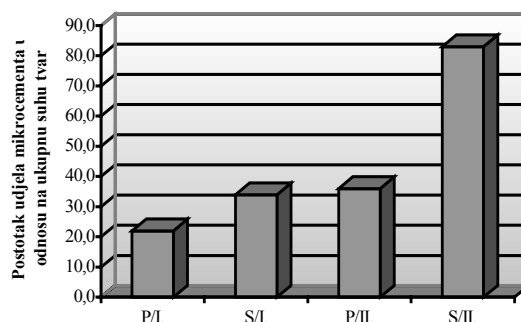
Slika 10. Utrošak suhe tvari (cementa) po pojedinim smjesama i grupama injekcijskih bušotina

- Nakon zapunjavanja pukotina i kaverna injekcijskim smjesama na bazi portlandskoga cementa postižu se uvjeti injektiranja nevezanoga sedrenog materijala injekcijskim smjesama na bazi mikro cementa. Zbog toga s napredovanjem radova raste postotak etaža injektiranih samo mikro cementom (slika 11.).



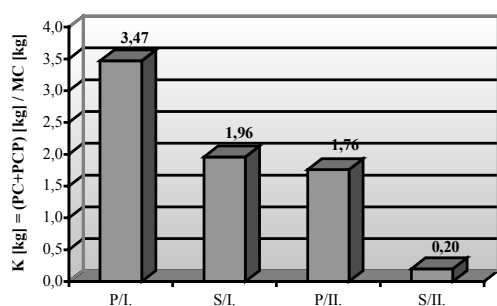
Slika 11. Pregled etaža (u postocima) koje su završno injektirane smjesama na bazi mikro cementa (histogram slijedi terenski redosljed injektiranja)

- Napredovanjem radova povećava se udio mikro cementa u ukupnoj masi suhe tvari pojedinih grupa (slika 12.).



Slika 12. Udio mikro cementa u ukupnoj suhoj tvari (svaka od četiri grupe injekcijskih bušotina sadrži 100% vlastite grupe suhe tvari)

- U odnosu na ukupnu suhu tvar, samo u završnoj fazi injektiranja (sekundarne bušotine drugog reda) prevladava udio mikro cementa (slika 13.).



Slika 13. Pregled utrošaka injekcijskih smjesa na bazi portlandskoga cementa u funkciji redoslijeda izvođenja injekcijskih radova

- Ispitivanjima u kontrolnim injekcijskim bušotinama (K-1, K-2 i K-3), dokazano je smanjenje vodopropusnosti i značajno poboljšanje geotehničkih svojstava sedre.

4 Zaključak

Rezultati probnog ispitivanja na velikim uzorcima sedrenog detritusa pokazuju da injektiranje ovog materijala smjesama na bazi portlandskoga cementa nije moguće. Injekcijskim smjesama na bazi mikro cementa finoće

mliva ispod 40 μm postiže se injektibilnost 68% obujma uzorka, a smjesama na bazi mikro cementa ispod 20 μm injektiran je cjelokupni obujam uzorka. Vrijednosti tlačne čvrstoće injektiranih uzoraka veće su od prirodno liti

ficirane sedre, čime je dokazana mogućnost konsolidacijskog injektiranja sedrenog detritusa. Primjena mikro cementa je i ekološki prihvatljiva zbog sličnosti injektiranog materijala prirodnoj sedri homogene teksture.

Rezultati injektiranja heterogene sedre na probnom poligonu slapa rijeke Plive pokazuju da je potrebno prethodno injektiranje pukotina i kaverna smjesama na bazi portlandskoga cementa, a zatim injektiranje nekoherentnog materijala i mikropukotina smjesama na bazi mikro cementa. Prilagođavanje vrste injekcijskih smjesa stvarnim uvjetima u stijeni uspješno se postiže postupnom promjenom odnosa cement-voda pri čemu injektiranje počinje rijetkim smjesama na bazi mikro cementa.

IZVORI

[1] Pavletić, Z.: *Izveštaj o biološkim ispitivanjima najdonjeg dijela toka rijeke Plive*, Zagreb, 1967.

[2] Ivanković, T.; Muhovec, I.; Čorko, D.: *Injektibilnost sedrenih naslaga*, Zbornik radova znanstvenostručnog savjetovanja, Mehanika stijena i tuneli, knjiga 1, 293-297, Zagreb, 1999.