

Primljen / Received: 1.7.2014.

Ispravljen / Corrected: 14.10.2014.

Prihvaćen / Accepted: 17.11.2014.

Dostupno online / Available online: 10.1.2015.

Utjecaj fosfogipsa na čvrstoću ekspanzivnog tla stabiliziranog vapnom

Autori:



Mr.sc. **Jijo James**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Anna
Inženjerski fakultet Tagora
Zavod za građevinarstvo
Chennai, Indija
jijo_blitz@yahoo.co.in



Prof.dr.sc. **P. Kasinatha Pandian**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Anna
Inženjerski fakultet Tagora
Zavod za građevinarstvo
Chennai, Indija
pknp2020@gmail.com

Prethodno priopćenje

Jijo James, P. Kasinatha Pandian

Utjecaj fosfogipsa na čvrstoću ekspanzivnog tla stabiliziranog vapnom

U ovom radu ispituje se upotreba fosfogipsa (kao aditiva vapnu kako bi se poboljšao učinak vapna u stabilizaciji tla. Fosfogips je nusproizvod koji nastaje u procesu obrade fosfatne stijene tijekom proizvodnje fosforne kiseline. Uzorci ekspanzivnog tla upotrijebljeni u ovom radu, stabilizirani su pomoću tri različita udjela vapna: inicijalnog udjela vapna, optimalnog udjela vapna i udjela vapna manjega od inicijalnog. Rezultati su pokazali da je dodatak fosfogipsa vapnu poboljšao ne samo ranu nego i kasnu čvrstoću stabiliziranog tla.

Ključne riječi:

ekspanzivno tlo, stabilizacija tla vapnom, inicijalni udio vapna, optimalni udio vapna, fosfogips, jednoosna tlačna čvrstoća

Preliminary note

Jijo James, P. Kasinatha Pandian

Effect of phosphogypsum on strength of lime stabilized expansive soil

The use of phosphogypsum as an additive to lime, to enhance its performance in soil stabilization, is analyzed in this paper. Phosphogypsum is a by-product of the phosphate rock processing during production of phosphoric acid. Expansive soil samples used in this paper were stabilized using three different lime proportions: initial lime consumption, optimum lime content, and less than initial lime consumption. The results reveal that the addition of phosphogypsum to lime led to improvement of both the early and late strength of stabilized soil.

Key words:

expansive soil, lime stabilization, initial consumption of lime, optimum lime content, phosphogypsum, uniaxial compressive strength

Vorherige Mitteilung

Jijo James, P. Kasinatha Pandian

Einfluss von Phosphorgips auf die Festigkeit durch Kalk kalkverstärkter expansiver Böden

In dieser Arbeit wird die Anwendung von Phosphorgips als Zusatzstoff in der Anwendung von Kalk untersucht, um eine verbesserte Bodenstabilisierung zu erzielen. Phosphorgips ist ein Nebenprodukt, das im Verarbeitungsprozess von Phosphatgestein zur Herstellung von Phosphorsäure entsteht. Die bearbeiteten Proben expansiven Bodens sind mit drei verschiedenen Kalkanteilen stabilisiert worden: mit initialem Kalkanteil, mit optimalem Kalkanteil und mit einem Kalkanteil unter dem initialen Wert. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass der Zusatz von Phosphorgips in der Anwendung von Kalk nicht nur die frühe, sondern auch die späte Festigkeit des stabilisierten Bodens verbessert.

Schlüsselwörter:

expansiver Boden, Kalkstabilisierung, initialer Kalkanteil, Phosphorgips, einachsige Druckfestigkeit

1. Uvod

Ekspanzivno tlo predstavlja velik izazov inženjerima diljem svijeta jer ono može uzrokovati ozbiljne probleme na objektima sagrađenima na takvom tlu, [1]. Takva tla karakteriziraju velike promjene u volumenu zbog prisutnosti vrlo aktivnih minerala - montmorilonita [2]. Kako bi se poboljšala učinkovitost takvih tala, provodi se proces stabilizacije. Stabilizacija tla uključuje dodavanje veziva za poboljšanje mehaničkih i kemijskih svojstava tla [3]. Tijekom proteklih godina dodavali su se kemijski aditivi, ali s različitim razinama učinkovitosti. Učinkovitost primjene tih aditiva ovisi o stanju tla, vrsti stabilizatora i vrsti konstrukcije [4]. Za stabilizaciju tla koriste se različiti dodaci, a neki od njih su vapno, cement, polimeri, soli, površinska aktivna sredstva i njihove mješavine. Vapno je najčešće upotrebljavan aditiv za stabilizaciju ekspanzivnog tla jer poboljšava mehanička svojstva tla [1]. Danas u literaturi možemo naći mnogo informacija o tom postupku [5-11].

Neki znanstvenici koristili su otpadni materijal za stabilizaciju tla, uključujući ostatke kamena plovuča [12], keramičku prašinu [13], cementnu prašinu [14], ostatke keramičkih pločica [15], pepeo rižinih ljuski [16], stakleni otpad [17] i ostalo. Istraživanja su pokazala da je kombinacija konvencionalnih stabilizatora poput vapna i cementa, zajedno s aditivima, najčešće industrijskim otpadom, dala bolje rezultate [18-25]. Ovaj rad bazira se na upotrebi industrijskog otpada fosfogipsa (PG) koji služi kao dodatak vapnu. Prijašnja ispitivanja pokazala su da se PG primjenjuje kao vezivno sredstvo [26], stabilizator tla [20, 27, 28] te za ispunu zidova [29].

Primarni cilj ovog rada jest proučiti djelovanje fosfogipsa na stabilizacijski potencijal vapna koje se primjenjuje na ekspanzivno tlo. Navedeno je proučavano ispitivanjem jednoosne tlačne čvrstoće tla stabiliziranog vapnom u koje su dodane različite količine fosfogipsa.

2. Materijali i metode

Materijali koji su se koristili u ovom ispitivanju su: prirodno tlo koje se treba poboljšati, vapno kao osnovni stabilizator i fosfogips kao aditiv.

2.1. Prirodno tlo

Uzorak prirodnog tla korištenog u ovom ispitivanju dobiven je u mjestu Thatthamanji, Thiruvallur Distrikt, Tamil Nadu u Indiji. Svojstva tla laboratorijski su ispitana, a rezultati su prikazani u tablici 1.

2.2. Vapno

Vapno je opći izraz koji se rabi za sljedeće tri vrste: živo vapno (CaO, kalcijev oksid), gašeno vapno (Ca(OH)₂, kalcijev hidroksid) i hidratizirano pucolansko vapno (CaCO₃, kalcijev karbonat) [37]. Kalcijev hidroksid je najčešće upotrebljavan kemijski stabilizator za glinovita tla posteljice [38]. Vapnenac nije dovoljno kemijski reaktivan da bi poboljšao karakteristike tla [39], ali se koristi kako bi poboljšao fizikalna svojstva tla koja utječu na poboljšanje čvrstoće. Tlo koje je stabilizirano kalcijevim karbonatom dobivenim od praha ljuske jajeta pokazalo je povećanje jednoosne tlačne čvrstoće [40]. Mehanizam stabilizacije vapnom uključuje:

- ionsku izmjenu i flokulaciju
- pucolanske reakcije
- karbonizaciju [9].

Vapno koje se koristilo u ovom ispitivanju je laboratorijski graduirano vapno, 95-postotne čistoće, a proizvedeno je u laboratoriju Nice Chemicals Pvt.Ltd. u Indiji. Laboratorijski graduirano vapno koristilo se radi bolje kontrole rezultata

Tablica 1. Svojstva tla

Broj uzorka	Svojstva	Vrijednosti	Norme
1	Granica tečenja	68 %	IS 2720 dio 5 [30]
2	Granica plastičnosti	27 %	
3	Indeks plastičnosti	41 %	-
4	Granica skupljanja	10 %	IS 2720 dio 6 [31]
5	Specifična težina	2,76	IS 2720 dio 3 [32]
6	Postotak šljunka	0	IS 2720 dio 4 [33]
7	Postotak pijeska	2,5	
8	Postotak mulja	60,5	
9	Postotak glina	37	IS 2720 dio 7 [34]
10	Maksimalna suha gustoća	15,3 kN/m ³	
11	Optimalna vlažnost	25 %	IS 2720 dio 10 [35]
12	Jednoosna tlačna čvrstoća	115,8 kPa	
13	Klasifikacija tla	CH	IS 1498 [36]

ispitivanja uslijed konzistentnosti sastava. Sastav tog vapna prikazan je u tablici 2.

Tablica 2. Sastav vapna

Broj	Sastojak	Udio [%]
1	vapno	95
2	klorid	0,01
3	sulfat	0,2
4	arsen	0,0004
5	olovo	0,001
6	netopljiva tvar	1

2.3. Fosfogips

Fosfogips (PG) je otpadni materijal koji se stvara obradom fosfatne stijene prilikom proizvodnje gnojiva mokrim postupkom, a na taj način se trenutno proizvodi više od 90 % fosforne kiseline [20, 42]. Služi kao regulator u proizvodnji portland cementa, kao sirovina za klinkere, kao sekundarno vezivo s vapnom i cementom, u proizvodnji umjetnih agregata te za stabilizaciju cesta [27]. Godišnje se proizvede između 100 i 280 milijuna tona fosfogipsa diljem svijeta [42, 43]. Taj izračun se temelji na općem pravilu da se na svaku proizvedenu tonu fosforne kiseline proizvede 4,5 - 5 tona fosfogipsa [42, 44, 45]. U Indiji se godišnje proizvede 11 milijuna tona fosfogipsa [45]. Petnaest posto svjetske proizvodnje fosfogipsa upotrebljava se za proizvodnju građevnog materijala [42, 43]. Razlog niskog postotka uporabe fosfogipsa jest činjenica što sadrži radioaktivne tvari uključujući Ra-226 [20, 27, 42, 46]. U nekoliko zemalja upotreba fosfogipsa je zabranjena [42]. Međutim, 2009. godine Odbor za atomsku energiju u Indiji odobrio je upotrebu fosfogipsa u građevinarstvu pod uvjetom da radioaktivnost Ra-226 u njemu bude manja od 1,0 Bq/g [45]. Shweikani i suradnici [47] ustanovili su da je dopuštena razina zračenja fosfogipsa u cementu u skladu s međunarodnim standardima za građevne materijale. Primjena fosfogipsa u stabilizaciji tla prema Degirmenciju i suradnicima [20] odnosi se na njegovu upotrebu u kombinaciji s cementom, a kasnije je Degirmencij [27] upotrijebio samo fosfogips za stabilizaciju nepečene opeke, dok se u ovom ispitivanju fosfogips koristi kao aditiv vapnu. Udio fosfogipsa (PG-a) u oba slučaja je viši od 2,5 %, a u ovom je ispitivanju maksimalni udio PG-a ograničen na 2 %, što je uvjetovalo da se ispita učinak PG-a na vapno. Gosh [48] je istraživao i usvojio kombinaciju vapna i fosfogipsa (PG) za odlagalište pepela, gdje je udio PG-a bio do 1 %.

PG korišten u istraživanju dobiven je iz postrojenja gnojiva *Coromandel International Limited*, koje se nalazi u Ennoreu, sjeverno od Chennaija u Indiji. U ovom istraživanju primjenjivao se fosfogips sitniji od 75 mikrona, prema indijskim normama za sita. Granulometrijska analiza također je provedena prema suglasnosti Zavoda za indijske norme (BIS) [33]. U PG-u je bilo 88,3 % muljevitiha frakcija i 11,7 % glinovitiha frakcija. Specifična

težina PG-a je 2,48, u skladu s BIS normama [32], prema kojima se treba nalaziti u rasponu od 2,3 do 2,6 [45]. Karakterističan sastav PG-a u Indiji prikazan je u tablici 3.

Tablica 3. Kemijski sastav fosfogipsa u Indiji [45]

Parametar	Sastav [%]
H ₂ O _{krist.}	18,0
SO ₂	43,6
CaO	32,0
MgO	0,40
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	1,82
SiO ₂ Ins. in HCl	1,64
Na ₂ O	0,36
P ₂ O ₅ ukupno	1,03
F _{ukupno}	0,76
Organske tvari	0,26

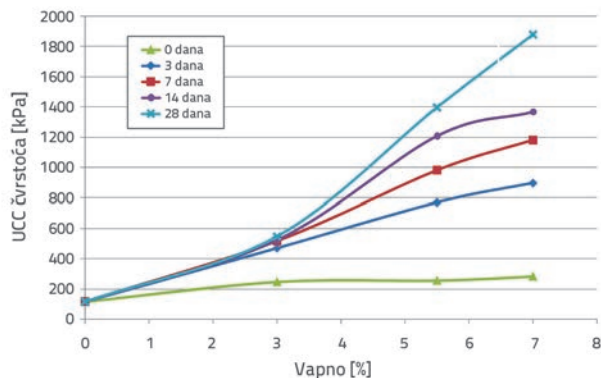
2.4. Metodologija

Priprema uzorka tla za potrebe ispitivanja obavljena je prema indijskim BIS normama [49]. Tlo je očišćeno, sušeno na zraku te podijeljeno na manje dijelove, a potom prosijavano da bi bili zadovoljeni zahtjevi ispitivanja. Tlo je ispitivano i klasificirano prema BIS klasifikacijama [36] (tablica 1.). Za stabilizaciju tla korištena su tri različita udjela vapna: optimalni udio vapna (eng. *Optimum Lime Content* - OLC), inicijalni udio vapna (eng. *Initial Consumption of Lime* - ICL) i udio vapna manji od inicijalnog (LICL). Nasrizar i suradnici [50] navode da postoje tri faze u odnosima između čvrstoće i udjela vapna: u prvoj fazi udio vapna je manji od inicijalnog (ICL), u drugoj fazi udio vapna je veći od inicijalnog, ali manji od optimalnog, a u trećoj fazi udio vapna je veći od optimalnog. ICL je određen Eades Grimovim pH testom [51]. Do optimalnog udjela vapna došlo se nakon ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće tla u skladu s BIS normama [35] pri optimalnoj vlažnosti i maksimalnoj suhoj gustoći uz povećanje udjela vapna, a uzorak je dva dana njegovan u zabrtvljenim plastičnim vrećicama.

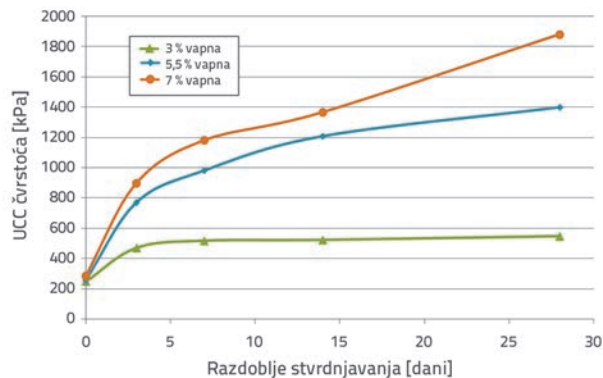
Udio vapna pri kojem je stabilizirano tlo postiglo maksimalnu jednoosnu tlačnu čvrstoću (UCC) uzeta je kao OLC. Ciancio i suradnici [52] odredili su optimalni udio vapna (OLC) koristeći se UCC testom na tlu stabiliziranom vapnom nakon stvrdnjavanja od 28 dana. Earlier, Sivapullaiah i sur. [53] odredili su optimalni udio vapna (ULC) ispitivanjem jednoosne tlačne čvrstoće tla koje je stabilizirano pomoću različitih udjela vapna tijekom vremena njegovanja, a minimalno jedan dan.

Postoje i slučajevi kada su znanstvenici ustanovili inicijalni udio vapna te, za potrebe ispitivanja, na temelju njega odredili pokusne vrijednosti kao veće od inicijalne [41, 54-56].

Ispitivani postoci fosfogipsa određeni su nasumično. Ekspanzivno tlo pomiješano je s različitim udjelima vapna (3 %, 5,5 % i 7 %) i fosfogipsa (0,25 %, 0,5 %, 1 %, 2 %) po suhoj



Slika 1. Promjena jednoosne tlačne čvrstoće tla (UCC) s udjelom vapna uz promjenu perioda njegovanja



Slika 2. Promjena jednoosne tlačne čvrstoće tla (UCC) s vremenom njegovanja za različite udjele vapna

masi tla. Uzorci za ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće su zatim pripremljeni u čeličnom kalupu promjera 38 mm, visine 76 mm pomoću statičkog zbijanja [57-59]. Vrijeme njegovanja pripremljenih uzoraka je dva sata te tri, sedam, 14 i 28 dana u hermetički zatvorenim plastičnim navlakama kako bi se spriječio gubitak vlažnosti.

ASTM [60] navodi da se može usvojiti različito vrijeme njegovanja uzorka, ali obično se usvaja pri 7, 28 i 90 dana. Nasrizar i suradnici [50, 55] usvojili su vrijeme njegovanja od dva sata te sedam, 14, 28 i 90 dana. Al-Mukhtar i suradnici [1, 61] usvojili su minimalni period stvrdnjavanja 1,5 sat (period brze promjene) za promatrana svojstva stabilizacije ekspanzivnog tla vapnom. Nakon određenog vremena njegovanja, uzorci su bili podvrgnuti aksijalnom tlačnom opterećenju koje se povećavalo sve do loma uzorka. Brzina nanošenja opterećenja je 0,625mm/minuti. Bhuvaneshwari i suradnici [62] usvojili su brzinu od 0,55 mm/min, a Dash i Hossain [8] 1,25 mm/min. Muhmed i Wanatowski [11] usvojili su brzinu od 1% u minuti.

3. Rezultati i diskusija

Najniži postotak vapna u tlu koje daje pH-vrijednost 12,4 približni je postotak vapna za stabilizaciju tla [51]. Tijekom reakcija stabilizacije, vrlo alkalno tlo (pH tla je 12,4) potiče otapanje silikata i aluminata iz rešetke mineralne strukture gline. Otopljeni spojevi iz rešetke reagiraju s ionima kalcija iz porne vode te se formiraju kalcijevi i aluminatni hidrati (gel) koji sljepljuju čestice tla i kristaliziraju ih [57]. Na temelju toga, za tlo je određena ICL vrijednost koja iznosi 5,5%. Zabilježene su vrijednosti ICL-a od 2% [11, 54], a za organsko tlo i do 8%, [10]. Optimalni udio vapna, OLC, određen prema rezultatima ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće, iznosio je 7%. Udio vapna manji od 3% korišten je kako bi se ispitala čvrstoća tla stabiliziranog vapnom kada je udio vapna manji od inicijalnog.

3.1. Utjecaj vapna na tlo

Stabilizacijom tla uz pomoć vapna povećava se čvrstoća tla. Zaključeno je da se stabilizacijom glinovitog tla povećava čvrstoća

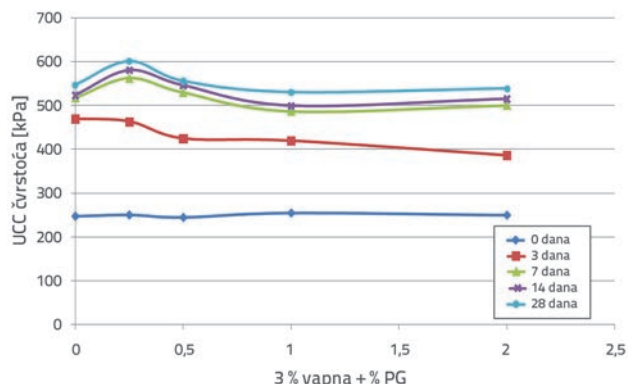
tla kada se poveća udio vapna i produži period njegovanja [5, 11, 23]. U ovom ispitivanju potvrđen je taj zaključak: tlo stabilizirano vapnom imalo je veću čvrstoću s povećavanjem udjela vapna u tlu (slika 1.) te produživanjem vremena njegovanja uzorka, što se može vidjeti na slici 2.

3.2. Utjecaj fosfogipsa na tlo stabilizirano vapnom

Da bi se odredio utjecaj fosfogipsa (PG) na razvoj čvrstoće tla stabiliziranog vapnom trebalo je tlo najprije pomiješati fosfogipsom, a onda tu količinu povećavati. Kako bi se odredio utjecaj PG-a na razvoj čvrstoće tla, učinci PG-a i perioda sušenja analizirani su s obzirom na tri različita udjela vapna.

3.2.1. Utjecaj različitog udjela fosfogipsa u tlu stabiliziranom vapnom

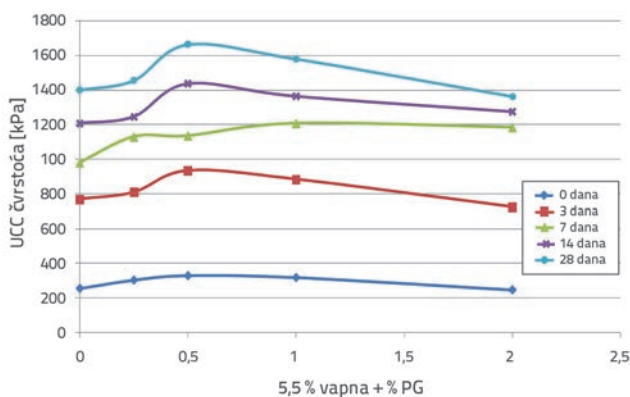
Tlo koje se treba stabilizirati pomiješano je fosfogipsom u različitim količinama, uz 3% vapna, kako bi se ispitao utjecaj fosfogipsa na povećanje čvrstoće tla. Isto je ponovljeno s druga dva uzorka tla koji imaju drugačiji udio vapna. Slika 3. prikazuje promjenu jednoosne tlačne čvrstoće tla stabiliziranog vapnom (3%) s postotkom fosfogipsa tijekom različitih perioda njegovanja.



Slika 3. Promjena jednoosne tlačne čvrstoće (UCC) u tlu s tri-postotnim udjelom vapna i fosfogipsom

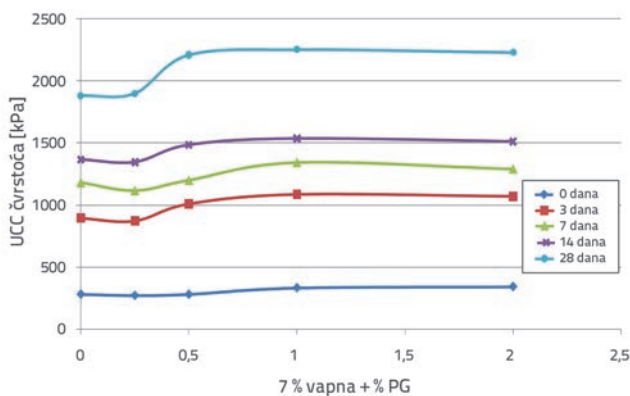
Pri tri-postotnom udjelu vapna, što je manje od inicijalnog, čvrstoća se smanjuje uz povećano vrijeme njegovanja. Značajan pad razvoja čvrstoće dogodio se nakon sedam dana, što se može vidjeti na krivuljama čvrstoće nakon sedam, 14 i 28 dana. Ovaj rezultat može se objasniti činjenicom da je 3 % udjela vapna u tlu nedovoljno da bi se postigla potrebna pH-vrijednost i stabilizacija tla. U literaturi je navedeno da udjeli vapna veći od inicijalnog utječu na povećanje čvrstoće stabiliziranog tla [55]. Ako se tlu doda 0,25 % fosfogipsa, postiže se maksimalna čvrstoća, nakon čega se razvoj čvrstoće stabilizirao.

Dodatak 0,25 % fosfogipsa mješavini vapna i tla rezultirao je povećanjem čvrstoće za gotovo 10 % u usporedbi s običnom stabilizacijom tla vapnom: čvrstoća se povećala sa 547,48 kPa na 601,66 kPa nakon 28 dana. Stoga dodatak fosfogipsa tlu može povećati čvrstoću tla čak i u slučaju kada je udio vapna manji od inicijalnog.



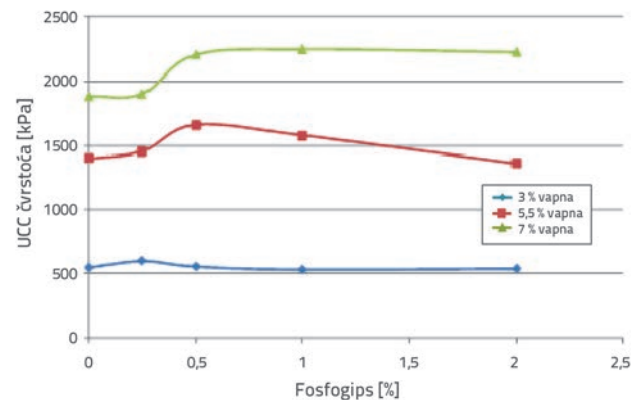
Slika 4. Promjene jednoosne tlačne čvrstoće tla stabiliziranog sa 5,5 % vapna uz dodatak fosfogipsa

Slika 4. prikazuje jednoosnu tlačnu čvrstoću tla stabiliziranog sa 5,5 % vapna uz dodatak fosfogipsa. U usporedbi sa svojstvima tla sa slike 3., možemo vidjeti da uzorak tla s inicijalnim udjelom vapna ima bolja svojstva od uzorka tla u kojem je udio vapna manji od inicijalnog. U uzorku u kojem je 5,5 % vapna, postignuta je maksimalna čvrstoća pri 0,5 % fosfogipsa. Čvrstoća se povećala sa 1398,77 kPa na 1663,8 kPa nakon 28 dana njegovanja, odnosno za gotovo 19 %.



Slika 5. Promjena jednoosne tlačne čvrstoće tla sa 7 % vapna uz dodatak fosfogipsa

Slika 5. prikazuje jednoosnu tlačnu čvrstoću tla sa 7 % vapna uz dodatak fosfogipsa. U takvom tlu dobivena je znatno veća čvrstoća u usporedbi s uzorcima koji sadrže 5,5 % i 3 % vapna u svom sastavu. U ovom slučaju, najveća čvrstoća dobivena je uz dodatak 1 % fosfogipsa. Čvrstoća tla se povećala sa 1881,45 kPa na 2251,07 kPa, pri dodatku od 1 % fosfogipsa tlu stabiliziranom sa 7 % vapna, što znači za 19,6 %.



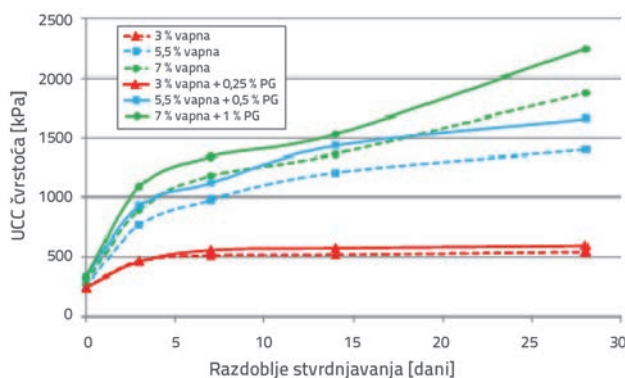
Slika 6. Promjena 28-dnevne tlačne čvrstoće tla stabiliziranog vapnom uz dodatak fosfogipsa

Slika 6. prikazuje usporedbu krivulja optimalne čvrstoće za tri različita udjela vapna u tlu. Možemo vidjeti da je s povećanjem udjela vapna u tlu dobivena maksimalna čvrstoća uz dodatak veće količine fosfogipsa. Možemo pretpostaviti kada je dostupna veća količina vapna da će biti uključena i veća količina fosfogipsa u reakcije vapna u tlu, što rezultira višim iskorištenjem fosfogipsa u stabilizaciji tla. Najveće povećanje jednoosne tlačne čvrstoće tla ostvareno je kada je u tlo s optimalnim udjelom vapna dodano 1 % fosfogipsa. Ghosh [48] je otkrio da je utjecaj fosfogipsa na indeks nosivosti bio izraženiji u uzorcima s manjim udjelom vapna u uvjetima vlažnog tla. Međutim, u suhim uvjetima utjecaj fosfogipsa je rastao s povećanjem udjela vapna, a onda bi se stabilizirao ili smanjivao njegov utjecaj s daljnjim povećanjem udjela vapna. Ovo istraživanje u skladu je s navedenim ponašanjem. Krishnan i suradnici [28] došli su do zaključka da pri konstantnom udjelu letećeg pepela s povećanjem količine fosfogipsa dolazi do povećanja čvrstoće ekspanzivnog tla stabiliziranog letećim pepelom. Shen i suradnici [63] otkrili su da dodatak 2,5 % fosfogipsa na omjer zgure i letećeg pepela 1:1 povećava čvrstoću sa 4,5 MPa na 8,4 MPa. Uz dodatak optimalnog udjela fosfogipsa, smjese s vapnom i letećim pepelom daju čvrstoću veću za 80-90 % u odnosu na smjesu bez fosfogipsa [26].

3.2.2. Utjecaj vremena njegovanja na tlo stabilizirano vapnom uz dodatak fosfogipsa

Kada govorimo o razvoju čvrstoće vapnom stabiliziranog tla uz dodatak fosfogipsa, važno je proučiti njegovanje i utjecaj njegovanja na doprinos fosfogipsa razvoju čvrstoće. Slika

7. prikazuje promjenu čvrstoće tla stabiliziranog vapnom s optimalnim udjelom i bez optimalnog udjela fosfogipsa, za različit udio vapna u tlu.



Slika 7. Ovisnost jednoosne tlačne čvrstoće i perioda njego vanja stabiliziranog tla uz dodatak fosfogipsa i bez njega

Očito je da pri udjelu vapna manjem od 3 % dodavanje fosfogipsa ostvaruje više ili manje stabilan razvoj čvrstoće s povećanjem perioda njego vanja. Međutim, povećanje čvrstoće nije značajno u usporedbi s većim udjelom vapna. Razvoj rane čvrstoće također je beznačajan pri tri-postotnom udjelu vapna u stabiliziranom tlu.

Kod tla sa 5,5 % vapna, dodatak fosfogipsa tlu omogućio je razvoj čvrstoće od 21,3 % u odnosu na tlo stabilizirano vapnom bez fosfogipsa, nakon tri dana. Nakon sedam dana, čvrstoća je veća za 14 %. Tlo stabilizirano sa 7 % vapna i fosfogipsom imalo je porast čvrstoće za 21,4 % pri starosti od tri dana. Nakon sedam dana, porast čvrstoće bio je otprilike kao kod tla sa 5,5 % vapna, odnosno 13,9 %. Pri vremenu njego vanja od 28 dana, porast konačne čvrstoće uzoraka sa 5,5 % i 7 % vapna bio je sličan i iznosio je 19 %, odnosno 19,6 %.

Međutim, u usporedbi s razvojem rane čvrstoće nakon tri dana, razvoj čvrstoće nakon 28 dana bio je manji otprilike za 2 % za oba tla. Rezultati su istovjetni rezultatima koje je Ghosh [48] dobio u svojim istraživanjima. Kad je trebalo vapnom stabilizirati tlo za odlagalište pepela, dodatak fosfogipsa imao je veći utjecaj na indeks nosivosti nakon sedam dana nego nakon 28 dana u suhim uvjetima. Dodatak fosfogipsa omogućio je povećanje rane čvrstoće ako je dostupna dovoljna količina vapna. Prema Krishnan i suradnicima [28], povećanje udjela fosfogipsa omogućilo je veću ranu čvrstoću ekspanzivnog tla stabiliziranog letećim pepelom. Možemo vidjeti kako je razvoj kasne čvrstoće manji nego razvoj rane čvrstoće. Razvoj kasne čvrstoće u tlu, u kojem ima fosfogipsa, vapna i letećeg pepela, ovisi ne samo o udjelu kalciniranog fosfogipsa nego i o omjeru kalciniranog fosfogipsa i vapna [64].

3.2.3. Mehanizam stabilizacije tla vapnom uz dodatak fosfogipsa

Mehanizam koji rezultira razvijanjem čvrstoće u tlu stabiliziranom vapnom uz dodatak fosfogipsa može se objasniti formiranjem etringita (Aft). Više znanstvenika je razvoj rane čvrstoće u smjesama s fosfogipsom pripisalo pojavi etringita [26, 63–65]. Zbog prisutnosti fosfogipsa, ubrzane su pucolanske reakcije [26, 63, 64]. Formiranje etringita zahtijeva visoki pH okoline [6], koji je u ovom slučaju prisutan zbog vapna. S povećanjem razdoblja njego vanja, fosfogips je utrošen u formiranje etringita. Huang i Lin [65] zabilježili su povećanje vršnih vrijednosti etringita i smanjenje u vršnim vrijednostima gipsa, što upućuje na utrošak fosfogipsa na formiranje etringita a u studijama o rendgenskoj difrakciji. Etringiti se ne talože u velike nakupine, već u obliku malih kristala te popunjavaju pore, što je razlog povećanja čvrstoće. Možemo pretpostaviti da će se s povećanjem udjela fosfogipsa iznad optimalnog, etringiti taložiti u velike nakupine koje mogu uzrokovati smanjenje čvrstoće tla.

4. Zaključak

Ovo istraživanje obuhvaća ispitivanje djelovanja fosfogipsa na čvrstoću tla stabiliziranog vapnom. Na osnovi dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Dodatak fosfogipsa u vapno pri stabilizaciji tla povećava krajnju čvrstoću tla u usporedbi s tlom stabiliziranim vapnom bez dodataka.
- Primjena fosfogipsa u vapnu rezultira povećanjem rane čvrstoće tla.
- S povećanjem udjela vapna u tlu treba povećati i količinu fosfogipsa da bi se postigla veća čvrstoća, što upućuje na sudjelovanje fosfogipsa u pucolanskim reakcijama.
- Međutim, potrebno je manje od 2 % fosfogipsa da bi se povećala čvrstoća tla, jer s većim udjelom fosfogipsa u tlu dolazi do smanjenja razvoja kasne čvrstoće tla.
- Fosfogips se može upotrebljavati kao učinkovit dodatak kako bi se poboljšala svojstva stabilizacije ekspanzivnog tla vapnom.

Razvoj čvrstoće u sustavu vapna i fosfogipsa može se naknadno detaljnije ispitati skeniranjem uzorka elektronskim mikroskopom i rendgenskim snimkama kako bi se potkrijepili rezultati ovog istraživanja.

Zahvale

Autori zahvaljuju upravi Inženjerskog fakulteta Tagore na ustupanju prostorija za istraživanja potrebna za ovaj rad. Autori također zahvaljuju gospodinu M. Sasi Kumaru, laboratorijskom tehničaru, djelatnicima Laboratorija za istraživanje tla i studentima Građevinskog fakulteta na pomoći.

LITERATURA

- [1] Al-mukhtar, M., Khattab, S., Alcover, J.: Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil, *Eng. Geol.*, 139 (2012), pp. 17–27.
- [2] Sridharan, A., Prakash, K.: Classification procedures for expansive soils, *Proc. ICE - Geotech. Eng.*, 143 (2000) 4, pp. 235–240.
- [3] Castro-Fresno, D., Movilla-Quesada, D., Vega-Zamanillo, Á., Calzada-Pérez, M.: Lime Stabilization of bentonite sludge from tunnel boring, *Appl. Clay Sci.*, 51 (2011) 3, pp. 250–257.
- [4] Al-Rawas, A., Taha, R., Nelson, J., Al-Shab, T., Al-Siyabi, H.: A Comparative Evaluation of Various Additives Used in the Stabilization of Expansive Soils, *ASTM Geotech. Test. J.*, 25 (2002) 2, pp. 199–209.
- [5] Bell, F.: Lime stabilization of clay minerals and soils, *Eng. Geol.*, 42 (1996) 4, pp. 223–237.
- [6] Rajasekaran, G.: Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays, *Ocean Eng.*, 32 (2005) 8, pp. 1133–1159.
- [7] Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., Alcover, J.: Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20°C, *Appl. Clay Sci.*, 50 (2010) 2, pp. 191–198.
- [8] Dash, S., Hussain, M.: Lime Stabilization of Soils: Reappraisal, *J. Mater. Civ. Eng.*, 24 (2011) 6, pp. 707–714.
- [9] Metelková, Z., Boháč, J., Příkryl, R., Sedlářová, I.: Maturation of loess treated with variable lime admixture: Pore space textural evolution and related phase changes, *Appl. Clay Sci.*, 61 (2012), pp. 37–43.
- [10] Saride, S., Puppala, A., Chikyala, S.: Swell-shrink and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays, *Appl. Clay Sci.*, 85 (2013), pp. 39–45.
- [11] Muhmed, A., Wanatowski, D.: Effect of Lime Stabilisation on the Strength and Microstructure of Clay, *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, 6 (2013) 3, pp. 87–94.
- [12] Saltan, M., Kavlak, Y., Ertem, F.: Utilization of Pumice Waste for Clayey Subgrade of Pavements, *J. Mater. Civ. Eng.*, 23 (2011) 12, pp. 1616–1623.
- [13] Sabat, A.: Stabilization of Expansive Soil Using Waste Ceramic Dust, *Electron. J. Geotech. Eng.*, 17 (2012) Bund. Z, pp. 3915–3926.
- [14] Oza, J., Gundaliya, P.: Study of Black Cotton Soil Characteristics with Cement Waste Dust and Lime, *Procedia Eng.*, 51 (2013), pp. 110–118.
- [15] Ameta, N., Wayal, A., Hiranandani, P.: Stabilization of Dune Sand with Ceramic Tile Waste as Admixture, *Am. J. Eng. Res.*, 02 (2013) 09, pp. 133–139.
- [16] Anupam, A., Kumar, P., Ransinchung, G.: Use of Various Agricultural and Industrial Waste Materials in Road Construction, *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, 104 (2013), pp. 264–273.
- [17] Fauzi, A., Mohd, W., Wan, N., Rahman, A., Jauhari, Z.: Utilization Waste Material as Stabilizer on Kuantan Clayey Soil Stabilization, *Procedia Eng.*, 53 (2013), pp. 42–47.
- [18] Ji-ru, Z., Xing, C.: Stabilization of Expansive Soil by Lime and Fly Ash, *J. Wuhan Univ. Technol. - Mater. Sci. Ed.*, 17 (2002) 4, pp. 73–77.
- [19] Jha, J., Gill, K.: Effect of Rice Husk Ash on Lime Stabilization, *J. Inst. Eng.*, 87 (2006), pp. 33–39.
- [20] Degirmenci, N., Okucu, A., Turabi, A.: Application of phosphogypsum in soil stabilization, *Build. Environ.*, 42 (2007) 9, pp. 3393–3398.
- [21] Kavak, A., Bilgen, G., Faruk Capar, O.: Using Ground Granulated Blast Furnace Slag with Seawater as Soil Additives in Lime-Clay Stabilization, *J. ASTM Int.*, 8 (2011) 7, pp. 1–12.
- [22] Alavéz-Ramírez, R., Montes-García, P., Martínez-Reyes, J., Altamirano-Juárez, D., Gochi-Ponce, Y.: The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks, *Constr. Build. Mater.*, 34 (2012), pp. 296–305.
- [23] Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S.: Effect of the combination of lime and natural pozzolana on the compaction and strength of soft clayey soils: a preliminary study, *Environ. Earth Sci.*, 66 (2012) 8, pp. 2197–2205.
- [24] Obuzor, G., Kinuthia, J., Robinson, R.: Enhancing the durability of flooded low-capacity soils by utilizing lime-activated ground granulated blastfurnace slag (GGBS), *Eng. Geol.*, 123 (2011) 3, pp. 179–186.
- [25] James, J., Lakshmi, S., Pandian, P., Aravindan, S.: Effect of Lime on the Index Properties of Rice Husk Ash Stabilized Soil, *Int. J. Appl. Eng. Res.*, 9 (2014) 18, pp. 4263–4272.
- [26] Shen, W., Zhou, M., Zhao, Q.: Study on lime-fly ash-phosphogypsum binder, *Constr. Build. Mater.*, 21 (2007) 7, pp. 1480–1485.
- [27] Degirmenci, N.: The using of waste phosphogypsum and natural gypsum in adobe stabilization, *Constr. Build. Mater.*, 22 (2008) 6, pp. 1220–1224.
- [28] Krishnan, D., Janani, V., Ravichandran, P., Annadurai, R., Gunturi, M.: Effect of Fly Ash and PhosphoGypsum on Properties of Expansive Soils, *Int. J. Sci. Eng. Technol.*, 3 (2014) 5, pp. 592–596.
- [29] Ajam, L., Ben, M., Sfar, H., El, R.: Characterization of the Tunisian phosphogypsum and its valorization in clay bricks, *Constr. Build. Mater.*, 23 (2009) 10, pp. 3240–3247.
- [30] BIS: IS 2720 *Methods of Test for Soils*: Part 5 - Determination of Liquid and Plastic Limit, India, 1985.
- [31] BIS: IS 2720 *Methods of Test for Soils*: Part 6 - Determination of Shrinkage Factors, India, 1972.
- [32] BIS: IS 2720 *Methods of Test for Soils*: Part 3 - Determination of Specific Gravity/Section 1 Fine Grained Soils, India, 1980.
- [33] BIS: IS 2720 *Methods of Test for Soils*: Part 4 - Grain Size Analysis, India, 1985.
- [34] BIS: IS 2720 *Methods of Test for Soils*: Part 7 - Determination of Water Content-Dry Density Relation Using Light Compaction, India, 1980.
- [35] BIS: IS 2720 *Methods of Test for Soils*: Part 10 - Determination of Unconfined Compressive Strength, India, 1991.
- [36] BIS: IS 1498 *Classification and Identification of Soils for General Engineering Purposes*, India, 1970.
- [37] Literature Review: Stabilised Sub-Bases for Heavily Trafficked Roads, *Transport Research Laboratory*, Berkshire, UK, 2003.
- [38] Petry, T., Little, D.: Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavements and Lightly Loaded Structures - History, Practice, and Future, *J. Mater. Civ. Eng.*, 14 (2002) 6, pp. 447–460.
- [39] Lime-Treated Soil Construction Manual: Lime Stabilization & Lime Modification, *National Lime Association*, Arlington, Virginia, US, 2004.
- [40] James, J., Pandian, P.: Performance Study on Soil Stabilisation

- using Natural Materials, *Int. J. Earth Sci. Eng.*, 06 (2013) 01, pp. 194–203.
- [41] Bhuvaneshwari, S., Thyagaraj, T., Robinson, R., Gandhi, S.: Alternative Technique to Induce Faster Lime Stabilization Reaction in Deeper Expansive Strata, *Indian Geotechnical Conference – 2010, GEOTrendz*, Mumbai, pp. 609–612, 2010.
- [42] Tayibi, H., Choura, M., Lopez, F., Alguacil, F., Lopez-Delgado, A.: Environmental impact and management of phosphogypsum, *J. Environ. Manage.*, 90 (2009) 8, pp. 2377–2386.
- [43] Reijnders, L.: Cleaner phosphogypsum, coal combustion ashes and waste incineration ashes for application in building materials: A review, *Build. Environ.*, 42 (2007) 2, pp. 1036–1042.
- [44] Rusch, K., Guo, T., Seals, R.: Stabilization of phosphogypsum using class C fly ash and lime: assessment of the potential for marine applications, *J. Hazard. Mater.*, 93 (2002) 2, pp. 167–186.
- [45] Guidelines for Management and Handling of Phosphogypsum Generated from Phosphoric Acid Plants (Final Draft), *Central Pollution Control Board*, New Delhi, India, 2012.
- [46] Değirmenci, N.: Utilization of phosphogypsum as raw and calcined material in manufacturing of building products, *Constr. Build. Mater.*, 22 (2008) 8, pp. 1857–1862.
- [47] Shweikani, R., Kousa, M., Mizban, F.: The use of phosphogypsum in Syrian cement industry: Radiation dose to public, *Ann. Nucl. Energy*, 54 (2013), pp. 197–201.
- [48] Ghosh, A.: Compaction Characteristics and Bearing Ratio of Pond Ash Stabilized with Lime and Phosphogypsum, *J. Mater. Civ. Eng.*, 22 (2010) 4, pp. 343–351.
- [49] BIS: IS 2720 *Methods of Test For Soils*: Part 1 - Preparation of Dry Soil Sample for Various Tests, India, 1983.
- [50] Nasrizar, A., Illamparuthi, K., Muttharam, M.: Quantitative Models for Strength of Lime Treated Expansive Soil, American Society of Civil Engineers, *GeoCongress 2012*, Oakland, California, pp. 978–987, 2012.
- [51] ASTM: D6276 Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement, United States, 1999.
- [52] Ciancio, D., Beckett, C., Carraro, J.: Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth, *Constr. Build. Mater.*, 53 (2014), pp. 59–65.
- [53] Sivapullaiah, P., Katageri, B., Herkal, R.: Enhancement of Strength of Soft Soils with Fly Ash and Lime, *First Sri Lankan Geotechnical Society International Conference on Soil and Rock Engineering*, Colombo, Sri Lanka, pp. 1–6, 2007.
- [54] Maaitah, O.: Soil Stabilization by Chemical Agent, *Geotech. Geol. Eng.*, 30 (2012) 6, pp. 1345–1356.
- [55] Nazrizar, A., Muttharam, M., Illamparuthi, K.: Role of Lime Content on Soil-Lime Reaction under Thermal Curing, *Indian Geotechnical Conference – 2010, GEOTrendz*, Mumbai, pp. 595 – 598, 2010.
- [56] Nasrizar, A., Muttharam, M., Illamparuthi, K.: Effect of placement water content on the strength of temperature cured lime treated expansive soil, *GeoShanghai 2010*, Shanghai, pp. 174–180, 2010.
- [57] Rao, S., Shivananda, P.: Role of curing temperature in progress of lime-soil reactions, *Geotech. Geol. Eng.*, 23 (2005) 1, pp. 79–85.
- [58] Kolay, P., Aminur, M., Taib, S., Mohd Zain, M.: Stabilization of Tropical Peat Soil from Sarawak with Different Stabilizing Agents, *Geotech. Geol. Eng.*, 29 (2011) 6, pp. 1135–1141.
- [59] Thyagaraj, T., Rao, S., Sai Suresh, P., Salini, U.: Laboratory Studies on Stabilization of an Expansive Soil by Lime Precipitation Technique, *J. Mater. Civ. Eng.*, 24 (2012) 8, pp. 1067–1075.
- [60] ASTM: D 5102 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures, United States, 1996.
- [61] Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., Alcover, J.: Lime consumption of different clayey soils, *Appl. Clay Sci.*, 95 (2014), pp. 133–145.
- [62] Bhuvaneshwari, S., Robinson, R., Gandhi, S.: Behaviour of Lime Treated Cured Expansive Soil Composites, *Indian Geotech. J.*, (2013) pp. 1–16.
- [63] Shen, W., Zhou, M., Ma, W., Hu, J., Cai, Z.: Investigation on the application of steel slag-fly ash-phosphogypsum solidified material as road base material, *J. Hazard. Mater.*, 164 (2009) 1, pp. 99–104.
- [64] Min, Y., Jueshi, Q., Ying, P.: Activation of fly ash-lime systems using calcined phosphogypsum, *Constr. Build. Mater.*, 22 (2008) 5, pp. 1004–1008.
- [65] Huang, Y., Lin, Z.: Investigation on phosphogypsum-steel slag-granulated blast-furnace slag-limestone cement, *Constr. Build. Mater.*, 24 (2010) 7, pp. 1296–1301.