

UDK 625.731:691.54

Primljeno 24. 6. 2010.

Cementne stabilizacije - karakteriziranje materijala i projektni kriteriji

Ivana Barišić, Tatjana Rukavina, Sanja Dimter

Ključne riječi

cementna stabilizacija, karakteriziranje materijala, projektni kriteriji, modul elastičnosti, Poissonov omjer, kolnička konstrukcija

Key words

cement stabilization, characterization of materials, design criteria, modulus of elasticity, Poisson ratio, pavement structure

Mots clés

stabilisation au ciment, caractérisation des matériaux, critères d'étude, module d'élasticité, coefficient de Poisson, chaussée

Ключевые слова

цементная стабилизация, характеризование материалов, проектные критерии, модуль упругости, коэффициент Пуассона, дорожная одежда

Schlüsselworte

Zementstabilisierte Materiale, Charakterisierung der Materiale, Projektkriterien, Elastizitätsmodul, Poisson's Koeffizient, Fahrbahnkonstruktion

I. Barišić, T. Rukavina, S. Dimter

Pregledni rad

Cementne stabilizacije - karakteriziranje materijala i projektni kriteriji

U radu su prikazane metode određivanja Youngovog modula elastičnosti i Poissonovog omjera cementom stabiliziranih materijala kao osnovnih svojstava za karakterizaciju materijala. Pregledom dosadašnjih istraživanja prikazani su projektni kriteriji ovih slojeva kolničke konstrukcije. Razmatran je i umor materijala kao projektni kriterij te projektni kriteriji novih, recikliranih materijala čiji utjecaj na svojstva ovih slojeva kolničke konstrukcije nije potpuno istražen.

I. Barišić, T. Rukavina, S. Dimter

Subject review

Cement stabilizations - characterization of materials and design criteria

Methods for determining the Young's modulus of elasticity and the Poisson ratio, taken as basic properties for characterization of cement-stabilized materials, are presented in the paper. In the scope of presentation of studies conducted so far, design criteria are given for these layers of the pavement structure. The fatigue of materials is also considered as a design criterion, and design criteria are offered for new recycled materials whose influence on properties of these pavement-structure layers has not been fully investigated.

I. Barišić, T. Rukavina, S. Dimter

Ouvrage de synthèse

Stabilisations au ciment - caractérisation des matériaux et critères d'études

Les méthodes pour la détermination du module d'Young et du coefficient de Poisson, comme propriétés de base pour la caractérisation des matériaux stabilisés au ciment, sont présentées dans l'ouvrage. Au cours de présentation des études conduites jusqu'à présent, les critères pour l'étude de ces couches de chaussée sont fournis. La fatigue de matériaux est aussi considérée comme un critère d'étude, et les critères d'étude sont également fournis pour les nouveau matériaux recyclés dont l'effet sur propriétés de ces couches de chaussée n'a pas encore été pleinement étudié.

И. Барииич, Т. Рукавина, С. Димтер

Обзорная работа

Цементная стабилизация – характеризование материалов и проектные критерии

В работе приведены методы определения модуля упругости Юнга и коэффициента Пуассона для материалов, стабилизированных цементом, в качестве основных свойств характеристики материалов. На основе обзора исследований, проведенных до настоящего времени, приведены проектные критерии для слоев дорожной одежды. В качестве проектного критерия рассмотрено усталостное поведение материала, а также проектные критерии для новых, рециркулированных материалов, влияние которых на свойства слоев дорожной одежды еще полностью не исследовано.

I. Barišić, T. Rukavina, S. Dimter

Übersichtsarbeit

Zementstabilisierte Materiale - Charakterisierung des Materials und Projektkriterien

Im Artikel beschreibt man die Methoden der Festlegung Young's Elastizitätsmoduls und Poisson's Koeffizients von zementstabilisierten Materialien als grundlegende Kennzeichen für die Charakterisierung des Materials. Durch Übersicht der bisherigen Untersuchungen sind Projektkriterien dieser Fahrbahnschichten dargestellt. Man erwäge auch die Materialermüdung als Projektkriterium sowie Projektkriterien neuer, rezyklierter Materiale deren Einfluss auf die Kennzeichen dieser Fahrbahnschichten nicht vollständig erforscht ist.

Autori: **Ivana Barišić**, dipl. ing. građ.; doc. dr. sc. **Sanja Dimter**, dipl. ing. građ., Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku Građevinski fakultet, Osijek; prof. dr. sc. **Tatjana Rukavina**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb

1 Uvod

Arellano i Thompson [1] definiraju cementne stabilizacije kao „krupnozrnata tla ili agregat vezan stabilizirajućim sredstvom kako bi se proizvela čvrsta, kruta masa“. Prema našim je tehničkim uvjetima [2] cementna stabilizacija nosivi sloj koji čine mješavina kamenog materijala određenog stupnja zrnitosti s hidrauličnim vezivom i vodom. U Velikoj Britaniji i Belgiji ovi se materijali nazivaju još i mršavim betonom (*lean concrete*), a u Francuskoj valjanim betonom (*roller-compacted concrete*) [3, 4] budući da su prema sastavu slični betonu.

Pojednostavljena bi definicija cementnih stabilizacija glasila da su to različite vrste agregata kojima se dodaje cement radi poboljšanja određenih svojstava. Cement se materijalima u cestogradnji dodaje radi povećanja vodonepropusnosti, kohezije sitnozrnatih materijala (npr. pijeska), koji bez obrade nisu povoljni za izradu nosivih slojeva kolničke konstrukcije, ili radi povećanja nosivosti materijala povoljnoga granulometrijskog sastava poradi ugradnje u slojeve cesta pod vrlo teškim prometnim opterećenjem [5]. Na taj se način materijalima povećavaju tlačna i vlačna čvrstoća, moduli elastičnosti, otpornost na promjenu vlažnosti te otpornost na cikluse zamrzavanja i odmrzavanja [6]. Velika prednost uporabe cementnih stabilizacija jest porast čvrstoća tijekom vremena, zbog čega se ovi slojevi mogu prilagoditi porastu prometnog opterećenja tijekom uporabe prometnice [1]. Osim poboljšanja svojstava kolničke konstrukcije, prednost uporabe cementnih stabilizacija je i u mogućnosti uštede pri gradnji. Naime, često je lokalni materijal uz gradilište nepovoljan za ugradnju u nosive slojeve kolnika te se dodavanjem cementa njegova svojstva mogu poboljšati i na taj se način izbjegavaju troškovi zamjene i dopreme novog materijala.

Osnovno inženjersko svojstvo bilo kojeg materijala kolničke konstrukcije jest Youngov modul elastičnosti kojim se karakterizira čvrstoća i otpornost stabilizacijske mješavine. Modul elastičnosti ovisi o količini veziva, vrsti i granulaciji agregata, energiji zbijanja te vremenu i uvjetima njege mješavine [1, 5]. Kako bismo mogli riješiti bilo koji analitički model dimenzioniranja kolničke konstrukcije, osim modula elastičnosti moramo poznavati i Poissonov omjer pa će stoga u nastavku biti prikazane metode određivanja ovih veličina i uvjeti sloma cementnih stabilizacija.

2 Karakteriziranje materijala

Kako bismo mogli adekvatno interpretirati ponašanje kolničke konstrukcije, s obzirom na sve utjecaje kojima je izložena, potrebno je dobro poznavati karakteristike materijala svih slojeva. Karakteriziranje materijala najčešće znači određivanje elastičnih konstanti, najprije

modula elastičnosti (E) te Poissonova omjera (ν). Oblik karakteriziranja materijala može biti i određivanje kriterija sloma o čemu će biti riječi u tekstu.

2.1 Modul elastičnosti

Modul elastičnosti osnovni je parametar kojim se opisuju stanje naprezanja, deformacija ili pomaka ako se njihov proračun odvija prema teoriji elastičnosti. Za njegovo određivanje postoje različite metode ispitivanja u laboratoriju ili na terenu te različiti analitički izrazi dobiveni određenim empirijskim korelacijama.

Kako je sastav cementnih stabilizacija sličan sastavu betona, pri kojem se proračun modula elastičnosti veže uz tlačnu čvrstoću materijala, tako se prema [1] navodi izraz:

$$E_c = 57\,500 f_c^{1/2} \quad (1)$$

gdje je:

E_c - modul elastičnosti (psi¹)

f_c - tlačna čvrstoća (psi)

Ovaj izraz dobro odgovara tzv. mršavom betonu ili cementnim stabilizacijama s krupnijim frakcijama agregata. Za mješavine sa sitnijim frakcijama (pijeskom) ili slabijom kvalitetom agregata navodi se izraz:

$$E_c = 1200 f_c \quad (2)$$

dok za glinovite materijale s velikim udjelom sitnih čestica vrijedi izraz:

$$E_c = 440f_c + 0,28 f_c^2 \quad (3)$$

Barker i dr. [1] definirali su izraz za modul elastičnosti cementne stabilizacije s razvijenim pukotinama određen u pokusu sa slobodnim bočnim širenjem:

$$E = 40\,000 10^a \quad (4)$$

$$a = 1,55883 \log(UCS/500) \quad (5)$$

gdje je: E - modul elastičnosti (psi¹)

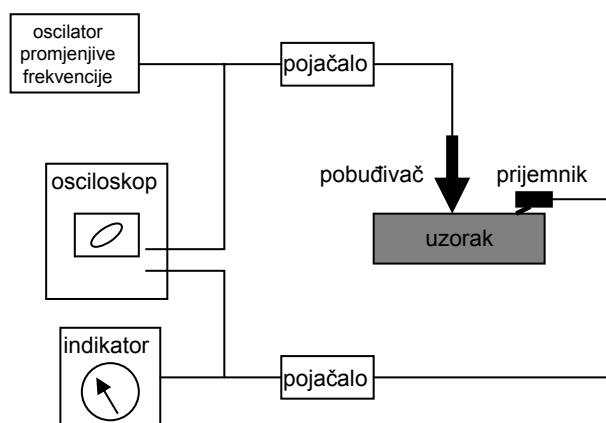
UCS- tlačna čvrstoća (psi)

Ovaj se izraz temelji na pretpostavci da će se stabilizirani materijal zbog pojave pukotina od prometnog opterećenja ponašati slično granuliranom materijalu.

Za razliku od opterećenja kojem je izložen beton u konstrukcijama visokogradnje, prometno opterećenje je po prirodi cikličko, dinamičko opterećenje. Zbog toga je za karakterizaciju materijala kolničke konstrukcije prikladnije rabiti dinamički modul elastičnosti za čije određivanje postoji niz provjerenih metoda koje su u širokoj upo-

¹ 1psi=6,8948 kPa

rabi. Jedna od njih je i metoda rezonantne frekvencije čiji rezultat je dinamički rezonantni modul elastičnosti. Ovom se metodom, ovisno o načinu određivanja rezonantne frekvencije, mogu odrediti uzdužne, poprečne ili torzijske frekvencije uzoraka oblika prizme ili cilindra [7-8]. Uređaj za ispitivanje sastoji se od oscilatora promjenjive frekvencije (100-10000 Hz), pojačala, elektromagnetskog pobuđivača, prijemnika i indikatora (slika 1.) [7].



Slika 1. Shema uređaja za određivanje dinamičkog rezonantnog modula elastičnosti

Uzorak se pobuđuje vibracijama promjenjive frekvencije te dovodi u stanje rezonancije, pri čemu je očitavanje na indikatoru najveće. Ovaj se princip temelji na činjenici da je prirodna frekvencija uzorka uglavnom ovisna o temeljnim karakteristikama materijala (modulima elastičnosti i Poissonovu omjeru) [9].

Određivanje dinamičkoga rezonantnog modula elastičnosti temelji se na odnosu širenja brzine zvuka i rezonantne frekvencije te brzine širenja zvuka i modula elastičnosti materijala, a određuje se prema osnovnom izrazu koji vrijedi za frekvencije u svim smjerovima:

$$E = (\rho 4\pi^2 L^4 n^2) / (k^2 m^4) \quad (6)$$

gdje je:

n - prirodna frekvencija dugačkog štapa koji vibrira pri savijanju

$$n = (m^2 kv) / (2\pi L^2) \text{ -jedadžba Malhotre [10]} \quad (7)$$

v - brzina prolaska ultrazvuka kroz materijal (m/s)

$$v = \sqrt{E/\rho} \quad (8)$$

L - duljina uzorka (m)

k - radijus rotacije presjeka štapa oko osi okomite na ravninu savijanja u metrima

m - konstanta koja ovisi o načinu pobuđivanja vibracija (1,73 za osnovni način vibriranja [8])

E - rezonantni modul elastičnosti (N/m²)

ρ - gustoća materijala (kg/m³)

Dinamički modul elastičnosti može se odrediti i pomoću ultrazvuka pri čemu se mjeri vrijeme prolaska longitudinalnoga vibracijskog pulsa kroz uzorak poznate duljine. Za razliku od prethodne metode, rezultat ove metode je gotovo neovisan o obliku uzorka, već ovisi samo o njegovim elastičnim svojstvima te je ova metoda vrlo pogodna za terenska ispitivanja.

Izbor frekvencije može ovisiti o vrsti materijala i veličini uzorka budući da brzina širenja ultrazvučnog impulsa ne ovisi o frekvenciji. Tako se prema normi [11] navode vrijednosti frekvencija od 60 do 200 kHz za male duljine uzorka (min 50 mm) ili vrijednosti 10 do 40 kHz za veće duljine uzorka (maks. 15 m). Za ispitivanja cementnih stabilizacija upotrebljavaju se frekvencije 20 do 250 kHz [10] budući da se uzorci ispituju u laboratoriju i njihove duljine su relativno male.

Oprema za ispitivanje brzine prolaska ultrazvuka sastoji se od generatora impulsa, predajnika, prijemnika, pojačala električnih impulsa te mjeraca vremena. Vrijeme mjereno od trenutka odašiljanja impulsa i primanja impulsa na prijemniku označava se sa T , a brzina ultrazvuka [11] određuje se prema izrazu:

$$v = L/T \quad (9)$$

gdje je L - duljina uzorka u metrima.

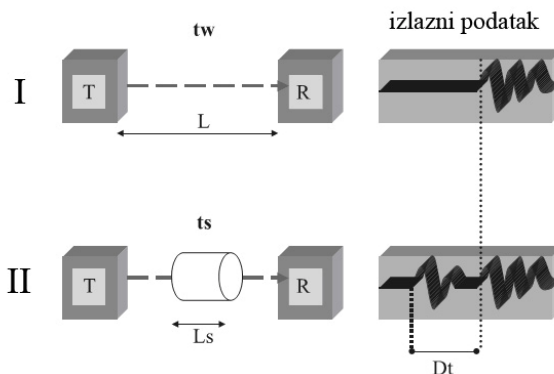
Nakon određivanja brzine ultrazvuka, modul elastičnosti određuje se prema izrazu:

$$E = \rho v^2 ((1+\nu)(1-2\nu)) / (1-\nu) \quad (10)$$

gdje je: ρ - obujamska masa materijala (kg/m³)

ν - Poissonov omjer

Constantinides i Ulm [12] istraživali su utjecaj hidratacije na elastičnost materijala te su rabili modificiranu metodu ultrazvuka za određivanje modula elastičnosti: uzorak je uronjen u vodu i zatim izložen vibracijama na ultrazvučnoj frekvenciji. Voda je trebala eliminirati utjecaj posmičnih valova, kako bi samo longitudinalni valovi dolazili do uzorka, ali i ograničiti pogrešku rezultata zbog imperfekcija na kontaktu pobuđivač-uzorak. Kako bi izolirali brzinu zvuka kroz uzorak, proveli su dva ispitivanja (slika 2.) pri čemu su prvo odredili brzinu prolaska vala kroz vodu, a zatim i kroz uzorak.



Slika 2. Ispitivanje brzine ultrazvuka u vodi [12]

Za proračun modula elastičnosti upotrijebili su prije prikazani izraz (10).

Ova je metoda ograničena za linearne, izotropne, homogene i elastične materijale. Međutim, ako je duljina uzorka L puno veća od valne duljine λ i valna duljina znatno veća od veličine elementarne čestice materijala uzorka, ovi izrazi vrijede i za heterogene materijale poput betona [12].

González-Peña i dr. [13] naglašavaju potrebu za metodom u kojoj neće postojati fizički kontakt između predajnika vala i uzorka te uzorka i prijavnika vala. Taj kontakt i potreba za kalibracijom izmjerenih veličina navode kao glavne nedostatke ovih metoda budući da oni mogu utjecati na rezultate mjerenja. Oni su ispitivali rezonantnu frekvenciju na uzorku oblika grede (duljina je morala biti puno veća od ostalih dimenzija) koja je izložena vibracijama. Val poznate frekvencije usmjeren je kroz uzorak te je određena rezonantna frekvencija pri maksimalnoj amplitudi oscilacija. Kako izgled oscilacija ovisi o graničnim uvjetima, a uzorak je bio oslonjen u sredini (slika 3.), rezonantna se frekvencija može odrediti prema izrazu:

$$f_1 = 1/(2L)\sqrt{(E/\rho)} \quad (11)$$

gdje je:

f_1 - rezonantna frekvencija (Hz)

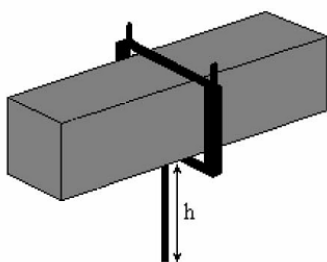
L - duljina uzorka (m)

E - modul elastičnosti (N/m^2)

ρ - gustoća materijala (kg/m^3)

Iz tog izraza može se proračunati modul elastičnosti:

$$E = 4L^2\rho f_1^2 \quad (12)$$



Slika 3. Način oslanjanja uzorka [13]

Brojni su se autori bavili definiranjem modula elastičnosti te su za različite materijale utvrdile različite vrijednosti. U tablicama 1. i 2. navedene su vrijednosti modula elastičnosti prema različitoj literaturi.

U tablici 2. prikazuju se vrijednosti modula elastičnosti ovisno o vrsti agregata i tlačnoj čvrstoći stabilizacija dobiveni prema izrazu:

$$E = 21\,500C(\sigma_{c, failure}/10^{-7})^{0,333} \quad (13)$$

gdje je:

C - konstanta ovisna o vrsti agregata

$\sigma_{c, failure}$ - tlačno naprezanje pri slomu (MPa).

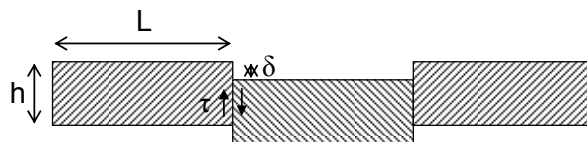
Tablica 1. Vrijednosti modula elastičnosti cementom stabiliziranih slojeva [3, 14, 15]

Vrsta materijala	E (MN/m^2)	Autor
mršavi beton	15 000	Verstraeten
	15 000-38 000	Golden
cementom stabiliziran pijesak	15 000	Bolk
	12 000	Autret
cementom stabiliziran šljunak	20 000	Autret
cementom stabiliziran šljunak	15 000-20 000	Babić

Tablica 2. Očekivane vrijednosti modula elastičnosti ovisno o tlačnoj čvrstoći mješavine [16]

Agregat	C	Tlačna čvrstoća			
		5 MPa	10 MPa	20 MPa	40 MPa
bazalt	1,2	20 500	25 800	32 500	40 100
kvarc	1	17 100	21 500	27 100	24 100
vapnenac	0,9	15 400	19 400	24 400	30 700
pješčenjak	0,7	11 900	15 100	19 000	23 900

Sve navedene vrijednosti odnose se na sloj u kojem nije došlo do razvoja pukotina. Međutim, zbog malog udjela cementa i utjecaja prometnog opterećenja u ovim se slojevima pojavljuju pukotine koje smanjuju dinamički modul elastičnosti i do 50 % [15] te je preporučena vrijednost dinamičkog modula elastičnosti koja se najčešće primjenjuje u proračunima $10\,000\,MN/m^2$. Thom [16] navodi izraz prema kojem se može pretpostaviti efektivni modul elastičnosti nakon ugradnje sloja i pojave pukotina E_{eff} (slika 4.):



Slika 4. Slom sloja cementne stabilizacije

$$E_{eff} = 1/(1/E + 64h/3EL + 4h^2/(3gL^3)) \quad (14)$$

gdje je:

E - modul elastičnosti prije pojave pukotina (N/m^2)

h - debljina sloja (m)

L - razmak pukotina (m)

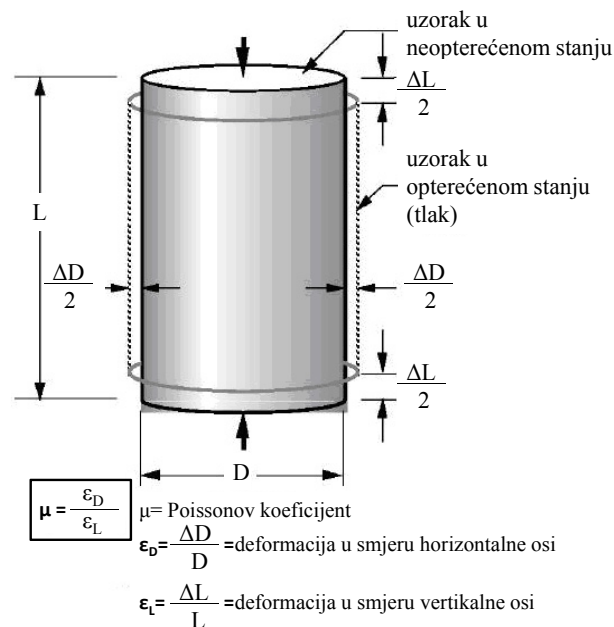
$$g = \tau/\delta \quad (15)$$

τ - posmično naprezanje pri razvoju pukotina (slika 4.) (N/m^2)

δ - vertikalni pomak zbog nastanka pukotine (slika 4.) (N/m^2).

2.2 Poissonov omjer

Poissonov se omjer definira kao omjer poprečnih i uzdužnih deformacija kao što je prikazano na slici 5. [17].



Slika 5. Definicija Poissonova omjera

Kako određivanje Poissonova omjera zahtijeva vrlo precizno mjerenje, a njegov utjecaj na naprezanja i deformacije slojeva kolničke konstrukcije je vrlo malen, njegovu određivanju posvećeno je vrlo malo pozornosti. Općenito se u literaturi navode vrijednosti Poissonova omjera cementom stabiliziranih materijala u rasponu 0,15-0,30, a za proračun se preporučuje usvajanje vrijednosti 0,25 [14, 15].

3 Projektni kriteriji

Kolničke su konstrukcije višeslojni sustavi s materijalima vrlo različitih karakteristika. Svi se oni različito ponašaju pod utjecajem prometa ili prirodnih sila što je razlog postojanja nekoliko projektnih kriterija pri teorijskom dimenzioniranju kolničkih konstrukcija.

Ispravno projektirana kolnička konstrukcija je ona koja u projektiranom razdoblju podnosi sva opterećenja bez pojave prekomjernih i nepredviđenih oštećenja (pukotina i kolotruga).

Kriterij koji se odnosi na cementne stabilizacije ograničava horizontalna vlačna naprezanja pri dnu ovog sloja. Prekoračenjem tog kriterija dolazi do zamora materijala i razvoja pukotina. Projektni se kriteriji mogu formulirati na dva načina. Za određenu razinu naprezanja i deformacija može se ograničiti broj prijelaza standardnih osovinskih opterećenja ili se mogu definirati dopuštene veli-

čine naprezanja i deformacija slojeva kolničke konstrukcije za određeni broj ponavljanja opterećenja koje uzrokuje oštećenje.

Iako se kriterij sloma cementom stabiliziranih materijala većinom veže uz zamor materijala, pri velikom broju ponavljanja prometnog opterećenja, mehanizam sloma cementom stabiliziranih slojeva može se prikazati u tri koraka. Nakon ugradnje sloja javljaju se pukotine zbog skupljanja materijala (hidratacije) neovisno o tome što su količine cementa kod ovih materijala male u odnosu na one u betonu. Razmak tih pukotina ovisi o vlačnoj čvrstoći stabilizacije i o otporu trenja na kontaktu sloja s posteljom, a može se izraziti izrazom [3]:

$$L = 2R/(\mu\gamma) \quad (16)$$

gdje je:

L - razmak pukotina (m)

R - vlačna čvrstoća (N/m^2)

μ - koeficijent trenja između cementom stabiliziranog sloja i postelje

γ - gustoća materijala (kg/m^3).

Pukotine se zatim šire pod djelovanjem promjene temperature, ovisno o modulu elastičnosti sloja [6] i koeficijentu temperaturnog širenja ovisnog o sastavu mješavine, a najveći utjecaj imaju krupne frakcije agregata [16]. Dalje širenje oštećenja kroz kolničku konstrukciju javlja se od prometnog opterećenja pri čemu one izbijaju na površinu kolnika u obliku poprečnih (reflektirajućih-strukturnih) pukotina.

Pszczoła i dr. [18] proveli su terenska ispitivanja da bi odredili odnose između karakteristika kolničke konstrukcije i pojave poprečnih pukotina te su zaključili kako se kod kolničkih konstrukcija sa stabiliziranim slojevima češće pojavljuju poprečne pukotine, da broj pukotina raste sa starenjem konstrukcije te da se smanjuje s povećanjem debljine konstrukcije.

Agostinacchio i dr. [19] promatrali su utjecaje različitih parametara na ponašanje konstrukcije i zaključili kako ponašanje kolničke konstrukcije sa stabiliziranim nosivim slojem ne ovisi o tipu postelje te da on eliminira utjecaj krutosti temeljnog tla na gornje nosive slojeve, a primijetili su i veću otpornost na pojavu uzdužnih pukotina.

Ni i Li [20] bavili su se pukotinama nastalim skupljanjem materijala i zaključili da uporaba cementom stabiliziranog sloja velike čvrstoće (uz velik udio cementa) rezultira manjim razmakom između pukotina što se negativno odražava na pojavu reflektirajućih pukotina na površini kolnika. Kao rješenje navode uporabu geosintetika čime je moguće odgoditi pojavu takvih pukotina te produžiti vijek trajanja kolničke konstrukcije.

Projektni kriterij vezan za čvrstoću materijala dali su Klomp i Lister [10] za cementom vezane zrnate kamene materijale te su ovisno o veličini modula elastičnosti, predložili dva izraza:

$$\sigma_r = 0,315(E/10000)^{0,81} \quad \text{za } E < 10000 \text{ MPa} \quad (17)$$

$$\sigma_r = 0,315(E/10000)^{1,70} \quad \text{za } E > 10000 \text{ MPa} \quad (18)$$

gdje su:

σ_r - dopušteno vlačno naprezanje (MPa)

E- modul elastičnosti (MPa).

3.1 Zamor materijala kao projektni kriterij

Cementom stabilizirani slojevi rijetko dožive slom zbog nailaska jednog vozila. Međutim, pri ponovljenom prometnom opterećenju može doći do loma materijala pri naprezanju manjem od vlačne čvrstoće materijala. Ta se pojava naziva zamorom materijala, a za ove slojeve predstavlja progresivan lom veze između pojedinačnih zrna agregata [16].

Ispitivanje zamora cementom stabiliziranih materijala može se odrediti u laboratoriju na uzorcima oblika gređica koje se izlažu savijanju s ponavljanim opterećenjem. Međutim, kako bi eksperimentalno određivanje materijala zahtijevalo dugotrajan proces ponavljanja opterećenja kojim bi se obuhvatio cijeli projektni period kolničke konstrukcije, najčešće se izvodi ispitivanje kojim se određuje ponašanje materijala pri određenom stupnju naprezanja ili deformacija.

U tablici 3. prikazani su izrazi za kriterije zamora materijala prema različitim autorima [3].

Tablica 3. Kriteriji cementom stabiliziranih materijala [3]

Autor	Godina	Kriterij zamora
Darter	1977.	$\sigma_N/\sigma_0=0,094-0,056 \log N_f$
Autret et al.	1982.	$\sigma_N/\sigma_0=1,20-0,132 \log N_f$
Verstraeten et al.	1982.	$\varepsilon_N/\varepsilon_0=1-0,05 \log N_f$
Freeme	1982.	$\varepsilon_N/\varepsilon_0=1-0,109 \log N_f$
Golden	1988.	$\sigma_N/\sigma_0=0,868-0,0326 \log N_f$
σ_N, ε_N prometom uzrokovano vlačno naprezanje, deformacija σ_0, ε_0 kritično naprezanje, deformacija materijala pri lomu N_f broj ponavljanja opterećenja do pojave loma		

Za cementom stabilizirani drobljeni kamen Jameson i dr. [21] predložili su izraz za proračun broja opterećenja do loma za kolničku konstrukciju s manje od 10 cm slojeva iznad cementom stabiliziranog sloja i 10 % prometne površine s površinskim pukotinama:

$$N = (28400/\mu\varepsilon E^{0,41})^{8,8} \quad (19)$$

Za debljine slojeva iznad stabilizacije veće od 10 cm dali su izraz:

$$N = (35000/\mu\varepsilon E^{0,45})^{8,0} \quad (20)$$

gdje je:

N - broj ciklusa do loma

$\mu\varepsilon$ - deformacija pri savijanju u mikrometrima (10^{-6} m)

E - modul elastičnosti (MPa)

Za cementom vezani šljunak De Beer 1989. [21] predložio je izraz

$$N = 266(UCS/\sigma_z)^{7,69} \quad (21)$$

gdje je:

N - broj ciklusa do loma

UCS- tlačna čvrstoća pri ispitivanju sa slobodnim bočnim širenjem (psi)

$$UCS = 4,46(E/10000)^2 \quad (22)$$

σ_z - normalno tlačno naprezanje (psi).

De Beer [10] je dao izraz i za predviđanje pojave pukotina od zamora za cementom stabilizirane zrnate kamene materijale te za lagano cementirane nosive slojeve i slojeve posteljice:

$$\log N_f = A(1-\varepsilon/(B\varepsilon_{krit})) \quad (23)$$

gdje je:

N_f - broj ponavljanja opterećenja do pojave loma

ε - prometom uzrokovana vlačna deformacija

ε_{krit} - kritična deformacija materijala pri lomu.

A, B - faktori ovisni o pretpostavljenom stanju oštećenja nosivog sloja:

A = 7,19, B = 8,00 za vjerojatnost oštećenja 50 %

A = 7,52, B = 8,36 za vjerojatnost oštećenja 99 %.

Molenaar i Pu [22] radili su terenska ispitivanja zamora cementom stabiliziranog pijeska. Mjerili su progibe kolnika na dijelu kojim prolaze kotači vozila i središnjim dijelom prometnog traka. Veličina vlačne deformacije na donjoj površini cementne stabilizacije na središnjem dijelu prometnog traka služila je kao reprezentativna vrijednost, budući da se smatralo kako tu nema prometnog opterećenja, a određena je prema izrazu:

$$\varepsilon = 0,0931+0,4011 \log d_0 + 0,3243 \log d_{1800} + 0,4504 \log d_{300} - 0,9958 \log d_{900} + 0,8367 \log BDI \quad (24)$$

gdje je:

d_x - progib na x mm udaljenosti od središta opterećenja u $\mu\text{m/m}$

$$BDI = d_{300} - d_{600} \quad (25)$$

Pokazali su da u presjecima u kojima je deformacija bila do 60 $\mu\text{m}/\text{m}$ nema pojave pukotina, dok su na mjestima gdje je deformacija veća od 80 $\mu\text{m}/\text{m}$ zabilježene znatne količine pukotina. Zatim su promatrali dio prometnog traka pod prometnim opterećenjem i došli do izraza kojim su definirali kriterij:

$$\log N = 8,5 - 0,034\varepsilon \quad (26)$$

gdje je:

N - dopušteni broj standardnih osovina (100kN)

ε - vlačna deformacija na donjoj površini cementom stabiliziranog sloja ($\mu\text{m}/\text{m}$).

Zaključili su da je pri vrijednosti vlačne deformacije do 60 $\mu\text{m}/\text{m}$ mala vjerojatnost pojave zamora ovog materijala. Što se tiče trajnosti sloja, promatrali su i mogućnost prijenosa opterećenja pri pojavi pukotine te su zaključili da ako postoji dobar prijenos opterećenja preko poprečne pukotine, granična deformacija je 50 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ako je taj prijenos slab, granična je vrijednost deformacije 41 $\mu\text{m}/\text{m}$.

3.2 Projektni kriteriji novih materijala u cestogradnji

Danas se sve više rabe reciklirani materijali u izgradnji cesta čija svojstva i ponašanje unutar kolničke konstrukcije nisu potpuno istraženi. Jedan od autora koje je proučavao ponašanje novih materijala u kolnicima je i Molenaar [23] koji se bavio mješavinama s drobljenom opekam i betonom kao otpadnim materijalima. Njima je kao vezivo dodavao visokopećnu zguru da bi potaknuo cementirajuća svojstva. Na izvedenoj pokusnoj dionici, a ni u ispitivanim uzorcima, nije primijećen razvoj pukotina unatoč očiglednom smanjenju krutosti materijala. Zaključio je kako ovi materijali prelaze iz vezanog u nevezano stanje bez jasnog razvoja vidljivih pukotina te da se stoga za te materijale ne može jasno definirati kriterij zamora materijala.

Turatsinze i dr. [24] ispitivali su cementne stabilizacije u kojima je određena količina agregata zamijenjena otpadnom gumom i zaključili da takve mješavine imaju manju sklonost pojavi pukotina, ali i smanjenja vrijednosti modula elastičnosti i tlačne i vlačne čvrstoće.

LITERATURA

- [1] Arellano, D.; Thompson, M. R.: *Final report - Stabilized base properties (strength, modulus, fatigue) for mechanistic-based airport pavement design*, Technical Report of Research, Department of civil engineering University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, 1998.
- [2] IGH: *Opći tehnički uvjeti za radove na cestama*, Knjiga III, Kolnička konstrukcija, (2001.)
- [3] Transport research, COST 333, *Development of new bituminous pavement design method: European Commission*, Directorate General Transport, 1999.
- [4] *Stabilization & hydraulic bound mixtures for pavements: www.hydraulicallyboundmixtures.info/pavements.php*
- [5] Žefroa, Ž.: *Projektovanje i građenje kolovoznih konstrukcija*, Građevinska knjiga Beograd, Beograd, 1975.

Shalid i Thom [25] rabili su čelična vlakna koja su imala ulogu armature u cementnim stabilizacijama radi sprječavanja širenja pukotina kroz bitumenski zastor, ograničavajući na taj način reflektirajuće pukotine. Primijetili su kako se pukotine počinju razvijati pri stanju naprezanja znatno manjem od granične nosivosti materijala, ali i da su pukotine imale malu širinu i veliku mogućnost prijenosa opterećenja, što je uvelike smanjilo vertikalne pomake na mjestu pukotine. Zaključili su kako bi se na taj način mogla ograničiti pojava reflektirajućih pukotina na površini kolnika što bi rezultiralo smanjenjem potrebne debljine asfaltnih slojeva i produžilo uporabni vijek kolničke konstrukcije.

4 Zaključak

Uporaba cementom vezanih slojeva pri projektiranju kolničkih konstrukcija ima višestruke prednosti. Njihovom uporabom možemo poboljšati svojstva lokalnih materijala koji bez posebne obrade ne bi zadovoljili propise za ugradnju u nosive slojeve. Osim toga, uporabom ovih materijala smanjujemo utjecaj nosivosti posteljice na nosivost kolničke konstrukcije te možemo graditi prometnicu i na slabije nosivom tlu.

Kako bi se osiguralo ispravno funkcioniranje kolničke konstrukcije kroz cijelo projektno razdoblje, potrebno je ispravno projektirati kolničku konstrukciju, a za to je potrebno poznavati karakteristike materijala od kojih je izgrađena. U radu su prikazane neke od metoda određivanja karakteristika cementnih stabilizacija koje su danas najčešće u uporabi kao i projektni kriteriji kojima se osigurava ispravno projektiranje te funkcioniranje kolničke konstrukcije.

Danas se karakteristike materijala većinom određuju u laboratorijskim uvjetima pa postoji potreba za razvojem novih metoda koje će se izvoditi na terenu i kojima će se uzeti u obzir stvarne karakteristike ugrađenog materijala. Također i napredak tehnologija nameće uporabu novih materijala poput čeličnih vlakana ili letećeg pepela i zgure koji imaju ulogu poboljšati ponašanje i trajnost kolničke konstrukcije, dok istodobno njihove karakteristike i utjecaj na kolničku konstrukciju još nisu potpuno jasni.

- [6] Little, D. N.; Scullion, T.; Kota, P. B. V. S.; Bhuiyan, J.: *Guidelines for mixture design and thickness design for stabilized bases and subgrades*, Texas transportation institute, 1995.
- [7] ASTM C215-97: *Standard test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional resonant frequencies of concrete specimens*, ASTM International, (1997.)
- [8] Dimter, S.: *Svojstva stabilizacijskih mješavina namijenjenih gradnji cesta*, Građevinski fakultet, disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, (2005.)
- [9] Lav, A. H.; Lav, M. A.; Goktepe, A. B.: *Analysis and design of stabilized fly ash as pavement base material*, Fuel. 85, (2006.), 2359-2370
- [10] Rukavina, T.: *Višeparametarska analiza naprezanja i deformacija savitljivih kolničkih konstrukcija*, Građevinski fakultet, disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, (1999.)
- [11] HRN EN12504-4, *Ispitivanje betona- 4. dio: Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa (EN 12504-4:2004)*
- [12] Constantinides, G.; Ulm, F. J.: *The effects of two types of C-S-H on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling*, Cement and Concrete Research. 34, (2003.), 67-80
- [13] Gonzáles-Peña, R.; Martí-López, L.; Cibrián-Ostize de Anda, R. Molina-Jiménez; T. Piqueres-Ayela, C.: *Measurement of Young's modulus of cementitious materials using an electro-optic holographic technique*, Optics and Lasers in Engineering. 36, (2001.), 527-535
- [14] Babić, B.: *Projektiranje kolničkih konstrukcija*, Hrvatsko društvo građevinskih inženjera, Zagreb, 1997.
- [15] Mazić, B.: *Asfaltne kolovozne konstrukcije*, Građevinski fakultet u Sarajevu, Sarajevo, 2007.
- [16] Thom, N.: *Principles of pavement engineering*, Thomas Telford Ltd, London, 2008.
- [17] *Poisson's ratio:*
www.pavementinteractive.org/index.php?title=Poisson%27s_Ratio
- [18] Pszczola, M.; Judycki, J.; Dolzycki, B.: *Investigation of transverse cracking of asphalt pavement in the North-Eastern Poland*, 6th RILEM International conference on cracking in pavements/I.L., A.-Q.; T. S.; A. L. Chicago, USA: Taylor & Francis Group, 2008.853-860
- [19] la Agostinacchio, M.; Ciampa, D.; Olita, S.: *Cracking response and service life prediction of flexible and semi-rigid pavements implementing M-E PDG 2002 code*, 6th RILEM International conference on cracking in pavements/I.L., A.-Q.; T. S.; A. L. Chicago, USA: Taylor & Francis Group, 2008.201-210
- [20] Ni, F. J.; Li, Q.: *A prediction procedure of reflective cracking growth life for cement stabilized base asphalt pavement*, 6th RILEM International conference on cracking in pavement/I.L., A.-Q.; T. S.; A. L. Chicago, USA: Taylor & Francis Group, 2008.211-220
- [21] Ullidtz, P.; Forlang, P.: *Modeling flexible pavement response and performance*, Polyteknisk Forlag Lyngby, 1998.
- [22] Molenaar, A. A. A.; Pu, B.: *Prediction of fatigue cracking in cement treated base courses*, 6th RILEM International conference on cracking in pavements/I.L., A.-Q.; T. S.; A. L. Chicago, USA: Taylor & Francis Group, 2008.191-199
- [23] Molenaar, A. A. A.: *Fatigue performance of self cementing base courses*, 6th RILEM International conference on cracking in pavements/Al-Qadi, I. L.; Scarpas T.; Loizos A. Chicago, USA: Taylor & Francis Group, 2008.
- [24] Turatsinze, A.; Bonnet, S.; Granju, J. L.: *Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based mortars: Improvement in cracking shrinkage resistance*, Construction and Building Materials. 21, (2007.), 176-181
- [25] Shahid, M. A.; Thom, N. H.: *Steel fibre reinforcement in cement bound bases*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Transport/1998.34-43