

Primljen / Received: 11.5.2019.

Ispravljen / Corrected: 17.3.2021.

Prihvaćen / Accepted: 16.5.2022.

Dostupno online / Available online: 10.7.2022.

Određivanje trajnih deformacija savitljivih kolničkih konstrukcija pomoću metode konačnih elemenata

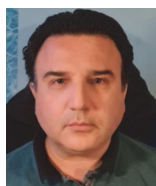
Autori:



Dr.sc. **Hüseyin Karadağ**, dipl.ing.grad.
Ministarstvo obitelji, rada i socijalne skrbi, Turska
karatagh@hotmail.com
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Seyhan Firat**, dipl.ing.grad.
Sveučilište Gazi, Ankara, Turska
Građevinski fakultet
sfirat@gazi.edu.tr



Prof.dr.sc. **Nihat Sinan İşik**, dipl.ing.geol.
Sveučilište Gazi, Ankara, Turska
Građevinski fakultet
nihatsinan@gazi.edu.tr



Prof.dr.sc. **Gülgün Yılmaz**, dipl.ing.grad.
Tehničko Sveučilište Eskişehir, Turska
Građevinski fakultet
gulgunyilmaz@eskisehir.edu.tr

Prethodno priopćenje

Hüseyin Karadağ, Seyhan Firat, Nihat Sinan Isik, Gulgun Yilmaz

Određivanje trajnih deformacija savitljivih kolničkih konstrukcija pomoću metode konačnih elemenata

Nevezani zrnati materijal koji se koristi u savitljivim kolničkim konstrukcijama ponaša se elastoplastično pod utjecajem ponavljanih prometnih opterećenja. Trajne deformacije koje se javljaju na površini kolnika uslijed prometnog opterećenja jedan su od osnovnih problema koji negativno utječu na ponašanje kolničkih konstrukcija. Zbog toga su u novije vrijeme razvijeni brojni modeli za analizu trajnih deformacija, tj. za izračunavanje pojave kolotruga na kolnicima. Većina istraživanja koja se bave tim pitanjem temelje se na provedbi dinamičkih troosnih ispitivanja. U ovom je istraživanju deformabilnost nevezanih zrnatih materijala određena ispitivanjem prema metodi rezonantnog stupca. Također, umjesto određivanja ukupnih trajnih deformacija zbrajanjem izračunanih deformacija pojedinačnih slojeva kolnika, u ovom se radu na četiri različita tipa kolničkih konstrukcija provode dinamičke dvodimenzionalne osnosimetrične analize metodom konačnih elemenata kako bi se predvidjela ukupna trajna deformacija koja se javlja na površini kolnika nakon određenog broja ciklusa opterećenja. Nevezani slojevi za prvi modelirani tip kolničke konstrukcije sastoje se od prirodnog agregata. Nevezani nosivi sloj i/ili tamponski sloj preostalih triju kolničkih konstrukcija sastoji se od otpadnog materijala čelične zgure. Odnos trajnih deformacija i broja ciklusa opterećenja za sva četiri tipa kolničkih konstrukcija prikazan je na polulogaritamskim dijagramima. Za svaki je analizirani tip kolničke konstrukcije prikazana jednadžba trajnih deformacija.

Ključne riječi:

kolnička konstrukcija, metoda konačnih elemenata, dinamička analiza, nosivi sloj, čelična zgura

Research Paper

Hüseyin Karadağ, Seyhan Firat, Nihat Sinan Isik, Gulgun Yilmaz

Determination of permanent deformation of flexible pavements using finite element model

The unbound granular material used in flexible road pavements exhibits an elastoplastic behaviour under repetitive traffic loads. Permanent deformation occurring on pavement surface under traffic load is one of the main road pavement problems affecting road performance. Therefore, many permanent deformation models for calculating road pavement rutting have recently been developed by researchers. Most of these studies involve performance of dynamic triaxial tests. In this study, deformation characteristics of unbound granular materials are determined using the resonant column test. Then, instead of determining the total permanent deformation by summing up the calculated permanent deformations obtained in each pavement layer, dynamic 2D axisymmetric finite element analyses are performed for four different pavement cross sections to predict the total permanent deformation occurring on pavement surface under certain load cycles. The first modelled cross section of unbound granular material consists of natural aggregate. The base and/or subbase of remaining three cross sections consists of steel slag waste material. The permanent deformation versus load cycle is presented for four multi-layer road cross sections using semi logarithmic graphs. Finally, the permanent deformation model equation is developed for each pavement cross section using their fitting curves.

Key words:

pavement, finite element method, dynamic analysis, road base, steel slag

1. Uvod

Kolničke konstrukcije su sustavi koji se sastoje od međusobno povezanih slojeva različitih materijala zbog čega je njihovo ponašanje pod vanjskim utjecajima vrlo složeno te ga je potrebno modelirati primjenom odgovarajućih analitičkih, numeričkih i eksperimentalnih postupaka. Njihovo složeno ponašanje treba se dobro proučiti te se stoga za sve slojeve kolničke konstrukcije trebaju provesti detaljne analize i uspostaviti modeli predviđanja kako bi se ocijenilo dugoročno ponašanje svake pojedine vrste materijala. Jedno od osnovnih pitanja je mogućnost određivanja naprezanja i deformacija pod dinamičkim opterećenjem kojem su kolničke konstrukcije izložene uslijed ponavljanja prometnih opterećenja [1].

U današnje se vrijeme kolničke konstrukcije često projektiraju pomoću empirijskih metoda. Također se nastoje provoditi analize analitičkim metodama kao i aproksimativnim analitičkim metodama. Iako je postupak proračuna naprezanja i deformacija u kolničkim konstrukcijama mehanističkom metodom (eng. *mechanistic method*), koja se bazira na mehaničkim karakteristikama materijala kao što su modul elastičnosti i poissonov koeficijent, pouzdaniji od empirijskih metoda, djelotvornost svake metoda mehaničkog proračuna u postupku projektiranja ovisna je o točnosti modela predviđanja naprezanja i deformacija [2]. Najveća prepreka koja stoji na putu potpunog usvajanja mehanističke metode proračuna u postupku projektiranja sastoji se od niza faktora koji utječu na kolničke konstrukcije i njihovo projektiranje, a to su primjerice okolina, klima, količina vode, osovinsko opterećenje, broj prelazaka osovina, dimenzije kotača, fizikalna i mehanička svojstva korištenih materijala, receptura mješavina i promjer zrna.

Prema podacima iz literature o analizi kolničkih konstrukcija na koje utječu dinamička opterećenja, u današnje se vrijeme primjenjuju sljedeće numeričke metode: metoda konačnih elemenata (FEM), metoda graničnih elemenata (eng. *Boundary Element Method* - BEM) te kombinacije metoda FEM i BEM [3]. Paralelno s razvojem računalnih tehnologija, u posljednjih se nekoliko desetljeća bilježi sve češće primjena numeričkih metoda u analizi kolničkih konstrukcija.

Dvodimenzionalne (2D) ili trodimenzionalne (3D) metode konačnih elemenata posljednjih se godina sve češće primjenjuju u analizi savitljivih kolnika i to zbog njihove fleksibilnosti te sposobnosti mijenjanja uvjeta naprezanja, nizova materijala, uvjeta vodnih ploha i ostalih ulaznih parametara.

U vremenu nakon uvođenja računala kao sredstva za projektiranje kolničkih konstrukcija razvijeni su i brojni računalni programi koji se temelje na linearnoj teoriji elastičnosti [4]. Program CHEV je prvi, a i najpoznatiji program te vrste [5]. Kasnije je taj program dodatno razvijen kako bi se omogućila analiza nelinearnog elastičnog ponašanja zrnatih materijala [6]. Na osnovi linearne teorije elastičnosti razvijeni su i neki drugi programi kao npr. BISAR, ELSYM5 i KENLAYER [7, 8]. Za potrebe projektiranja kolničkih konstrukcija razvijeni su i programi ILLI-PAVE i MICH-PAVE, ali treba napomenuti da se oni temelje na

analizi svojstava materijala ovisno o naprezanju te na primjeni metode konačnih elemenata (FEM) [9, 10].

U projektiranju kolničkih konstrukcija koriste se i komercijalni programi utemeljeni na metodi konačnih elemenata kao što su npr. ABAQUS, ANSYS i LS-DYNA. Ti programi omogućuju primjenu naprednijih modela materijala. Plaxis je također jedan od komercijalnih programa za analizu koji se temelji na metodi konačnih elemenata. Razvijen je na Sveučilištu u Delftu, a područje njegove primjene prošireno je tako da obuhvaća i područje geotehnike. Plaxis se dakle koristi za dvodimenzionalne i trodimenzionalne analize geotehničkih konstrukcija, a omogućuje primjenu brojnih modela ponašanja materijala. Osim toga, mnogi istraživači koriste Plaxis za analizu kolničkih konstrukcija pojačanih geotekstilom kako bi odredili koja je dubina povoljna za polaganje geotekstila. Taj se program također primjenjuje i u analizi kolničkih konstrukcija izvedenih na tlu ojačanom pilotima, te za analize utemeljene na nekim drugim metodama [11-16].

S druge strane, činjenica je da trajne deformacije uzrokovane prometnim opterećenjem uvelike utječu na dugoročno ponašanje kolnika [17]. Stoga su u literaturi objavljeni različiti modeli koji se bave pitanjem trajnih deformacija. Model trajnih deformacija uslijed naprezanja za nevezane nosive slojeve kolničkih konstrukcija razvila je Korkiala-Tantuu [18]. Taj se model sastoji od dva dijela: u prvom se analizira utjecaj broja ciklusa opterećenja, a u drugom utjecaj naprezanja, što je predstavljeno koeficijentom sloma. Model se temelji na laboratorijskim ispitivanjima, ispitivanjima pomoću simulatora teških vozila te na analizi naprezanja prema metodi konačnih elemenata. Analiza je provedena pomoću programa Plaxis kako bi se odredio faktor utjecaja naprezanja, a ponašanje materijala predstavljeno je Mohr-Coulombovim modelom (MC) i modelom očvršćivanja tla (eng. *Hardening Soil* - HS). Utvrđeno je da trajna deformacija nevezanih nosivih slojeva ovisi o broju ciklusa opterećenja, čvrstoći materijala, koeficijentu sloma, udjelu vlage i stupnju zbijenosti.

U istraživanju koje su proveli Erlingsson i Saevarsdottir [12] utvrđeno je da je rezultat analize trajne deformacije slojeva savitljivog kolnika modeliranih pomoću modela HS podudaran s rezultatima koji su dobiveni ubrzanim ispitivanjem kolnika. Što se tiče dugoročnog dinamičnog simuliranja opterećenja kolničke konstrukcije, realniji se rezultati mogu postići ako se u obzir uzme interakcija tla i asfalta [19].

Osnovni cilj istraživanja prikazanog u radu jest uspostava novog modela za određivanje dugoročnih trajnih deformacija višeslojnih savitljivih kolničkih konstrukcija primjenom metode konačnih elemenata, koja omogućuje i određivanje interakcije između pojedinih slojeva. U okviru istraživanja provedene su dvodimenzionalne osnosimetrične analize konačnih elemenata kako bi se predvidjela trajna deformacija razmatranih tipova kolničkih konstrukcija. Utvrđeno je da se krivulja trajnih deformacija sastoji od dva linearna dijela. Vertikalna trajna deformacija prikazana je grafički u odnosu na logaritamski iskazan broj ciklusa opterećenja. Nagib krivulje trajnih deformacija mijenja se nakon prekoračenja određenog broja ciklusa opterećenja.

2. Analizirane kolničke konstrukcije

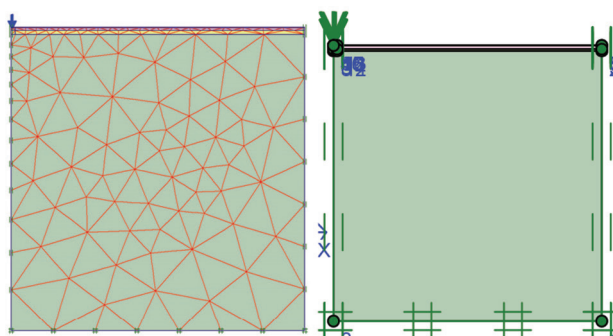
Tradicionalno savitljive kolničke konstrukcije se sastoje od slojeva vruće asfaltne mješavine izrađenih na slojevima od nevezanog zrnatog materijala. Nevezani zrnati materijali mogu biti ugrađeni u jedan sloj ili više slojeva te razlikujemo nosive slojeve i slojeve posebne namjene. Broj nosivih slojeva i njihova debljina ovisi o broju opterećenja u projektnom periodu, veličini opterećenja, nosivosti slojeva i klimatsko-hidrološkim uvjetima. Tipičan presjek savitljive kolničke konstrukcije analizirane u okviru ovog istraživanja prikazan je na slici 1. Presjek se sastoji od sloja asfaltbetona (eng. *Asphalt Concrete - AC*), nevezanog nosivog sloja te tamponskog sloja. Ova konstrukcija leži na posteljici od prirodnog materijala.

Čelična zgura nalazi primjenu u brojnim područjima građevinarstva. Tako se zgura diljem svijeta upotrebljava kao asfaltni agregat, nasipni materijal, dodatak cementu, materijal za poboljšanje svojstava tla, gabionska ispuna, kolosiječni zastor, materijal za nosivi sloj kolnika, kameni nabačaj, te za različite namjene u ekologiji i poljoprivredi.

U ovom istraživanju analizirana su četiri tipa kolničkih konstrukcija čiji su presjeci prikazani na slici 2. Kada se koristi pri izradi slojeva od nevezanog zrnatog materijala, zbog svojih povoljnih mehaničkih svojstava, zgura iz čeličana može predstavljati dobru zamjenu za prirodni agregat. Time se pridonosi očuvanju prirodnih resursa te se rješavaju neki od danas prisutnih ekoloških problema. Osim toga, uspostavljanjem suradničkog odnosa između područja cestogradnje i industrije proizvodnje čelika kroz primjenu zgure iz čeličana u izgradnji kolničkih konstrukcija pridonosi se održivosti industrije proizvodnje čelika, a time se ujedno rješava i pitanje skladištenja/deponiranja zgure iz čeličana. U usporedbi s drugim aktivnostima u građevinarstvu,

sektor cestogradnje jedan je od najvećih potrošača prirodnih materijala. Stoga se može reći da je zgura iz čeličana jedna od mogućih alternativa korištenju prirodnih resursa.

Debljina asfaltnog sloja analiziranih kolničkih konstrukcija iznosi 10 cm. Asfaltni sloj je izgrađen na nevezanom nosivom sloju debljine 30 cm. Ispod njega se nalazi tamponski sloj debljine 40 cm. Ispitivanja metodom rezonantnog stupca provedena su kako bi se utvrdio posmični modul čelične zgure pri malim deformacijama. Drobljeni kamen korišten u analizama je floridski vapnenac. Posmični modul tog materijala određen je u prijašnjim studijama na temelju ispitivanja prema metodi rezonantnog stupca [20].

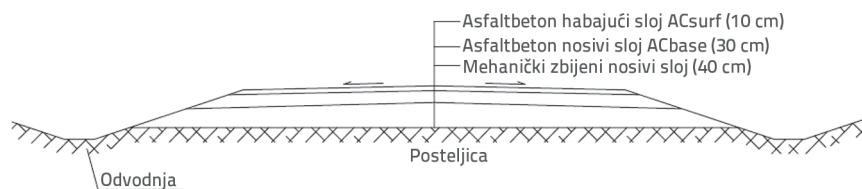


Slika 3. Opći prikaz modela konačnih elemenata

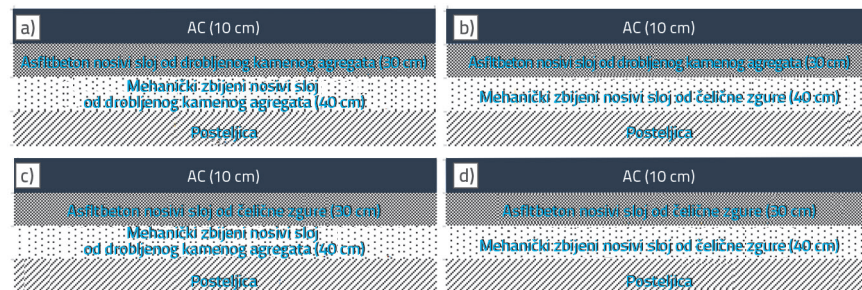
U numeričkoj analizi je korišten dvodimenzionalni osnosimetrični model koji se sastoji od trokutastih elemenata s petnaest čvorova (slika 3.). Za rubne uvjete usvojena je standardna upetost. Model se sastoji od 307 elemenata i od ukupno 2579 čvorova. Baza modela upeta je u svim smjerovima, a valjkasti uvjet odabran je za dvije

vertikalne strane modela kako deformacija ne bi bila ograničena u smjeru okomitom na smjer opterećenja. Gušći su elementi korišteni na mjestima opterećenja kotačem u nosivim i tamponskim slojevima kako bi rezultati bili što pouzdaniji. S druge strane, kako bi se smanjilo vrijeme proračuna, u rubnim dijelovima modela korišteni je manji broj elemenata.

Visina i širina numeričkog modela iznose 30 m. To znači da je veličina modela u oba smjera odabrana tako da bude otprilike 100 puta veća od promjera opterećenja. Te su dimenzije odabrane kako bi se eliminirao utjecaj rubnih uvjeta, što je u skladu s ranije objavljenim preporukama [21-23].



Slika 1. Presjek tipične savitljive kolničke konstrukcije

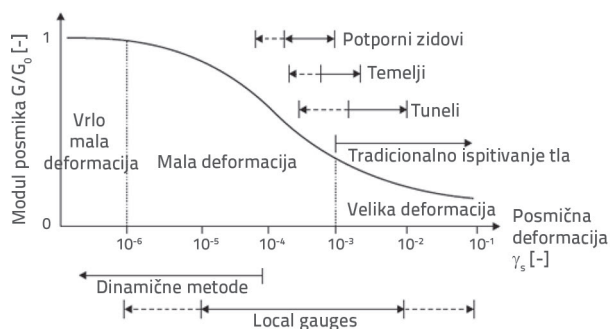


Slika 2. Presjeci analiziranih kolničkih konstrukcija: a) CC (Asfaltbeton nosivi sloj od drobljenog kamenog agregata, mehanički zbijeni nosivi sloj od drobljenog kamenog agregata); b) CS (Asfaltbeton nosivi sloj od drobljenog kamenog agregata, mehanički zbijeni nosivi sloj od čelične zgure); c) SC (Asfaltbeton nosivi sloj od čelične zgure, mehanički zbijeni nosivi sloj od drobljenog kamenog agregata); d) SS (Asfaltbeton nosivi sloj od čelične zgure, mehanički zbijeni nosivi sloj od čelične zgure)

3. Materijali i modeli odziva

U ovom istraživanju, koje se temelji na metodi konačnih elemenata, analizira se deformabilnost savitljivih kolničkih

konstrukcija u funkciji broja ciklusa opterećenja. Krutost tla mijenja se s uvjetima naprezanja i deformacija, a također ovisi i o uvjetima rasterećenja/ponovnog opterećenja. Dio energije opterećenja raspršuje se zbog prigušenja pri svakom ciklusu opterećenja. Pri malim razinama deformacija tlo se ponaša elastično. Nakon prekoračenja određene razine deformacija nastaju trajne (plastične) deformacije. Nelinearnost je još jedna karakteristika tla, a povezana je sa smanjenjem krutosti tla usporedo s povećanjem deformacija. Prema rezultatima prijašnjih istraživanja, funkcija smanjenja krutosti tla poprima oblik slova S kada se prikazuje grafički u odnosu na logaritamski iskazanu deformaciju (slika 4.) [24].



Slika 4. Karakterističan odnos krutosti i deformacija tla i tipični rasponi deformacija za laboratorijska ispitivanja i konstrukcije [24]

Kolničke konstrukcije izložene su djelovanju prometnog opterećenja i klimatskim uvjetima. Prometno opterećenje uzrokuje radijalna vlačna i tlačna naprezanja te vertikalna tlačna naprezanja. Veličina i opseg naprezanja izravno su proporcionalni broju ciklusa i veličini osovinskih opterećenja [25]. Deformacije rastu s porastom broja ciklusa osovinskih opterećenja.

Za nevezane zrnate materijale koji se koriste u nosivim slojevima kolničkih konstrukcija karakteristična su stanja rasterećenja/ponovnog opterećenja jer su podvrgnuti ponavljanju prometnog opterećenja. Smjer i veličina naprezanja mijenjaju se tijekom svakog ciklusa opterećenja. Konstitutivni model nevezanog

zrnatog materijala kolničkih konstrukcija treba uzeti u obzir ovisnost o uvjetima naprezanja, uvjetima rasterećenja/ponovnog opterećenja te smanjenje krutosti usporedo s povećanjem naprezanja. Kako ima sposobnost prepoznavanja uvjeta rasterećenja/ponovnog opterećenja, smanjenja modela s povećanjem deformacija te histereznog prigušivanja, model očvršćivanja tla pri malim deformacijama (HSsmall) koristi se kao konstitutivni model za nevezane zrnate materijale koji se upotrebljavaju u slojevima kolničke konstrukcije. Unatoč određenim ograničenjima, poput neovisnog formuliranja koeficijenta pora i nedostatka kinematičkog otvrdnjavanja, model HSsmall pokazao je svoju učinkovitost na većem broju geotehničkih istraživanja [26].

Budući da se asfaltbeton sastoji od agregata, vode i zraka, analogan je tlu koje se sastoji od krutih tvari, vode i zraka [27]. Dakle, asfalt se pri srednjim temperaturama može modelirati kao Mohr-Coulombov materijal koji se odlikuje kako kohezijskim svojstvima tako i svojstvima koja proizlaze iz njegove zrnitosti [28]. Kut unutrašnjeg trenja asfaltbetona u funkciji je agregata i uklještenosti, a kohezijska svojstva asfalta ovisi o svojstvima bitumena i temperaturi [29]. Prema prijašnjim studijama, unutrašnji kut trenja asfaltbetona veći je od 40°, a kohezija mu iznosi otprilike 500 kPa pri temperaturi od 25°C. Prema nekim eksperimentalnim studijama, pri istoj je temperaturi dobiven unutrašnji kut trenja otprilike 46° [27, 28]. U ovoj su studiji materijal posteljice i nevezani zrnati materijali za nosivi i tamponski sloj modelirani prema HSsmall modelu tla. Sloj asfaltbetona modeliran je pomoću Mohr-Coulombovog modela. Karakteristike deformabilnosti čelične zgure definirane su ispitivanjem prema metodi rezonantnog stupca. Prema nekim eksperimentalnim studijama, kut unutrašnjeg trenja čelične zgure iznosi 47° za nosivi sloj, tj. 45° za tamponski sloj, a kohezija istog materijala iznosi 45–47 kPa [30, 31]. Sva svojstva materijala korištenih u ovom istraživanju prikazana su u tablici 1.

Model HSsmall ugrađen je u komercijalni program Plaxis, a temelji se na modelu HS te koristi iste parametre. Međutim, HSsmall ima i dva dodatna parametra kojima se opisuje

Tablica 1. Svojstva materijala korištenih u istraživanju

Svojstva	Asfaltbeton (AC)	Nosivi sloj (drobljeni kamen)	Tampon (drobljeni kamen)	Posteljica (glina)	Nosivi sloj (čelična zgura)	Tampon (čelična zgura)
Debljina [m]	0,1	0,30	0,40	10,0	0,30	0,40
G0ref [MPa]	-	185	128	55	180	138
E50ref [MPa]		165	115	24	160	124
Eref [MPa]	4500					
ν (Poissonov koeficijent)	0,30	0,35	0,35	0,20	0,35	0,35
Kohezija [kN/m ²]	500	40	40	100	47	45
ϕ (kut trenja) [°]	46	40	35	10	47	45
Rayleighovo prigušenje		5 %	5 %	5 %	5 %	5 %

smanjenje krutosti s povećanjem deformacija. Ta dva parametra su krutost tla pri maloj deformaciji (G_0) te granična posmična deformacija ($\gamma_{0,7}$), a definirani su izrazima (1) i (2):

$$G_0 = G_0^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos f - \sigma_3' \sin f}{c \cos f + p^{\text{ref}} \sin f} \right)^m \quad (1)$$

$$\gamma_{0,7} = \frac{1}{9G_0} \left[2c'(1 + 2 \cos \phi') + \sigma_1'(1 + k_0) \sin 2\phi' \right] \quad (2)$$

gdje je G_0^{ref} posmični modul pri vrlo malim deformacijama $\varepsilon < 10^{-6}$, što odgovara referentnom pritisku (P_{ref}) od 100 kPa, dok je m potencija za međusobni odnos krutosti i naprezanja.

U modelu HSsmall, sekantni posmični modul formuliran je u skladu s preporukama Santosa i Correie [32] na način prikazan u izrazu (3):

$$G_s = \frac{G_0}{1 + 0.385 \frac{\gamma}{\gamma_{0,7}}} \quad (3)$$

gdje je $\gamma_{0,7}$ granično posmično naprezanje pri $0,7G_0$, a prema izrazu (2).

4. Trajne deformacije

Jedna od osnovnih postavki teorije projektiranja savitljivih kolničkih konstrukcija odnosi se na ograničenje razvoja kolotruga. Razvoj kolotruga lako se može izmjeriti ali se s druge strane vrlo teško može predvidjeti. Problem nije samo u karakterizaciji materijala kolničke konstrukcije već i u ocjenjivanju utjecaja uvjeta okoline i proračunavanju odgovarajuće raspodjele naprezanja tijekom trajanja kolničke konstrukcije [33].

Razvoj kolotruga pod djelovanjem prometnog opterećenja ovisi o razini opterećenja, broju ciklusa opterećenja i karakteristikama materijala. Trajne deformacije uzrokovane su zbijanjem, drobljenjem i pomicanjem materijala [34]. Naravno, te promjene u materijalima ovise o vrsti materijala, granulometrijskom sastavu, gustoći i količini vlage [35].

Prema "shakedown" teoriji (eng. *shakedown theory*), koja se u novije vrijeme vrlo primjenjuje koristi, odziv nevezanog zrnatog materijala na ciklično opterećenje može se definirati unutar tri raspona. Ti rasponi su plastični "shakedown", plastično puzanje i postupni slom. U rasponu plastičnog "shakedowna", na materijal djeluju relativno slaba naprezanja. U rasponu plastičnog puzanja, materijal je pod utjecajem naprezanja srednje jačine. U tom rasponu, nakon određenog broja ciklusa opterećenja, brzina prirasta trajne deformacije po ciklusu gotovo je konstantna. Broj ciklusa opterećenja potreban za postizanje te konstantne brzine razvoja deformacija ovisi o materijalu i o razini naprezanja. Taj broj ciklusa opterećenja može označavati kraj naknadnog zbijanja [36]. U rasponu postupnog sloma, razina naprezanja je viša u usporedbi s naprezanjima koja se bilježe u rasponu plastičnog "shakedowna" i plastičnog puzanja. U tom rasponu u konačnici dolazi do sloma materijala [37, 38].

Krivulja trajnih vertikalnih deformacija može se podijeliti na tri faze. U prvoj fazi (naknadno zbijanje), do trajnih deformacija uglavnom dolazi zbog promjene položaja i loma čestica. Zbog povećanja gustoće dolazi i do promjene obujma. U drugoj fazi, brzina trajnih deformacija po ciklusu uglavnom se ne mijenja, a najviše je uzrokovana habanjem (trošenjem) zbog kontakta između čestica a ne toliko lomljenjem čestica. Nakon velikog broja ciklusa u drugoj fazi, počinje se povećavati brzina deformiranja što dovodi do sloma. U toj posljednjoj fazi, trošenje čestica doprinosi slomu materijala [36].

Barksdale [39] je utvrdio da trajna osna deformacija raste linearno s logaritmom ciklusa opterećenja pri konstantnom devijatornom naprezanju. Rezultati ispitivanja upozoravaju na mogućnost naglog porasta trajnih deformacija nakon velikog broja ciklusa opterećenja.

Prema podacima iz literature, u većini modela trajnih deformacija bilježi se eksponencijalni odnos između ciklusa opterećenja i deformacija. Čest i najjednostavniji odnos između broja ciklusa opterećenja i deformacija, predložen u [40], prikazan je u obliku izraza (4):

$$\varepsilon_p = aN^b \quad (4)$$

gdje je ε_p trajna osna deformacija, a i b su regresijski parametri, a N je broj ciklusa opterećenja.

Korkiala-Tanttu [18] razvila je novi nelinearni elastoplastični model ponašanja nevezanog zrnatog kamenog materijala. Jednadžba tog modela deformacija temelji se na teoriji statičkog opterećenja, koja je dopunjena za slučajeve dinamičkog opterećenja. Ta jednadžba glasi:

$$\varepsilon_p = CN^b \frac{R}{1-R} \quad (5)$$

gdje je ε_p trajna vertikalna deformacija, R je koeficijent devijatornog naprezanja, b je parametar posmičnog koeficijenta koji ovisi o materijalu, a C je parametar materijala koji ovisi o razini zbijenosti i zasićenosti.

Huurman [41] je proveo troosna ispitivanja s ponavljanim opterećivanjem u svrhu određivanja deformabilnosti raznih vrsta pijeska. U radu [41] razvijen je pristup log-log modela trajnih deformacija ovisnih o naprezanju za nevezane materijale. Taj se model sastoji od dva člana. Prvi član predstavlja deformacije koje se javljaju pri stabilnom ponašanju. Drugi je član dodan kako bi se opisala faza nestabilnog ponašanja materijala.

Drezdenski model razvijen je na Drezdenskom tehničkom sveučilištu [36] na bazi postojećeg modela [41]. U Huurmanovom modelu [41], prvi član predstavlja linearno povećanje odnosa trajnih deformacija (ε_p) i broja ciklusa opterećenja (N) na logaritamskoj skali. A, B, C i D su koeficijenti modela ovisni s obzirom na odnos σ_1/σ_{1r} . Vrijednosti σ_1 i σ_{1r} predstavljaju normalno naprezanje, tj. normalno naprezanje pri slomu. Umjesto da primijeni odnos σ_1/σ_{1r} Werkmeister [36] je redefinirala parametre A i B u funkciji normalnih naprezanja σ_1 i σ_3 . Drezdenski se model iskazuje pomoću sljedeće jednadžbe:

$$\varepsilon_p = A\left(\frac{N}{1000}\right)^B + C(e^{\frac{D \cdot N}{1000}} - 1) \quad (6)$$

gdje je ε_p trajna vertikalna deformacija, N je broj ciklusa opterećenja. A, B, C i D su koeficijenti modela koji ovise o naprezanju, a vrijednosti σ_1 i σ_3 su normalna naprezanja.

Kao što se navodi u radu [36], prvi član predstavlja trajnu deformaciju prve faze koja je prethodno definirana za prva dva raspona naprezanja u "shakedown" teoriji. Vrijednosti A i B imaju različite funkcije u pojedinim fazama deformacije. Drugi član predstavlja ponašanje pri višoj razini naprezanja, u trećem rasponu naprezanja (raspon postupnog sloma) prema "shakedown" teoriji. Kako podaci dobiveni ispitivanjem u okviru ovog istraživanja nisu bili dostatni za prepoznavanje postupnog sloma, o naprezanju ovisni parametri C i D nisu definirani u drezdenskom modelu.

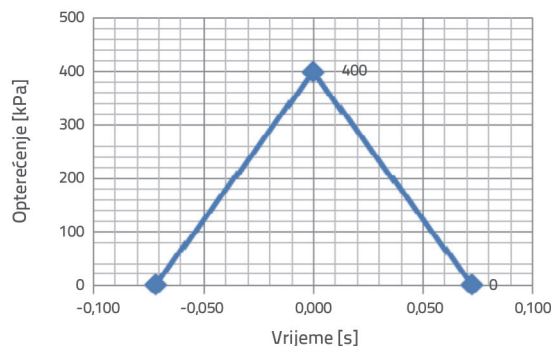
Umjesto određivanja ukupnih trajnih deformacija zbrajanjem izračunanih trajnih deformacija dobivenih u svakom sloju, u ovom se istraživanju težište stavlja na ukupnu deformaciju/pojavu kolotruga, a analiza se provodi metodom FEM u svrhu istraživanja međudjelovanja između slojeva. Odnos između pojave kolotruga i broja ciklusa opterećenja analizira se pomoću dvodimenzionalne metode konačnih elemenata uz primjenu osnosimetričnih analiza.

5. Rezultati i analiza

U većini dosadašnjih istraživanja o deformacijskim svojstvima nevezanih materijala koji se koriste u kolničkim konstrukcijama težište se stavlja na deformacijska svojstva materijala upotrijebljenih u pojedinačnim slojevima [18, 36]. Međutim, kao što je dobro poznato u području geotehnike, slojevi u višeslojnom tlu pri dinamičkom se opterećenju ponašaju drugačije od pojedinačnih slojeva, i to zbog djelovanja između slojeva. U višeslojnom sustavu podvrgnutom dinamičkim opterećenjima, dio energije reflektira se u zonu kontakta između slojeva, dio energije se prenosi, a preostali se dio energije raspršuje jer pojedinačni slojevi imaju različita svojstva elastičnosti i gustoće. Umjesto analize deformacijskih svojstava svakog pojedinačnog sloja, u ovom se radu težište stavlja na sveukupnu deformaciju/pojavu kolotruga na površini kolničke konstrukcije. Kolničke konstrukcije analizirane u ovom radu čine višeslojni sustav koji se sastoji od asfaltbetona (AC), nevezanog nosivog sloja te tamponskog sloja, pri čemu se svaki od njih odlikuje različitim vrijednostima krutosti i gustoće.

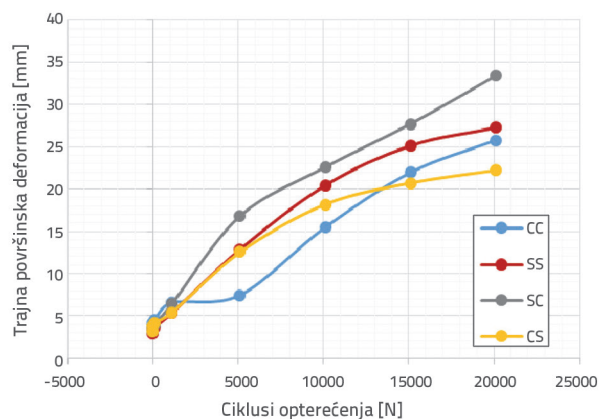
Impulsi naprezanja mogu se pretpostaviti kao haversinusna ili trokutasta opterećenja. Trajanje opterećenja ovisi o brzini vozila i o dubini točke ispod površine kolnika [21, 42]. Za potrebe prikaza haversinusnog opterećenja, u svakom je koraku opterećenja potrebno predvidjeti barem šest potkoraka. Međutim, samo su dva potkoraka potrebna za prikaz trokutastog impulsa opterećenja bez rasterećenja. Kako je u tom slučaju potreban manji kapacitet za pohranu, te kako se vrijeme proračuna može smanjiti zbog manjeg broja potkoraka [43], u ovom je istraživanju

usvojeno trokutasto a ne haversinusno opterećenje. U analizi se koristi tlačno trokutasto impulsno opterećenje u trajanju od 0,144 sekundi, pri tlaku gume od 400 kPa (slika 5.). Spomenuti tlak je zaokružena vrijednost za standardno jednoosovinsko opterećenje od 80 kN za kvadratni prikaz površine kontakta gume, čija rubna dužina iznosi 300 mm.



Slika 5. Impuls dinamičkog naprezanja

U nastavku je, na temelju 20.111 ciklusa nanesenih opterećenja, grafički prikazana trajna vertikalna deformacija površine kolnika u središtu opterećenja ovisno o broju ciklusa, a za četiri analizirana tipa kolničkih konstrukcija prikazanih na slici 2. Numerički su rezultati za svaki tip kolničke konstrukcije prikazani na slici 6.



Slika 6. Odnos trajnih površinskih deformacija i broja ciklusa opterećenja

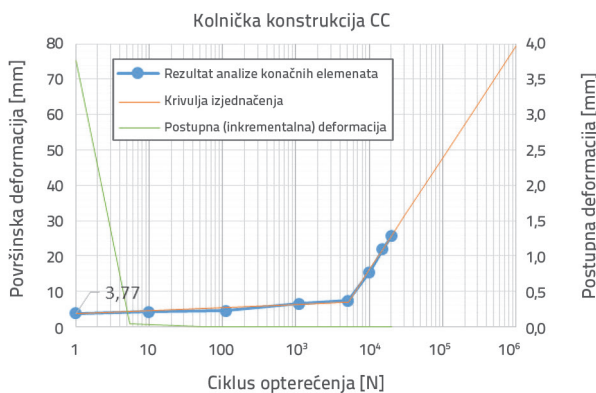
Kao što se može vidjeti na slici 6., najveća je deformacija zabilježena za kolničku konstrukciju CC za prvih 1000 ciklusa opterećenja. Najmanje deformacije zabilježene su za kolničku konstrukciju CC u rasponu od 2.000 i 13.000 ciklusa. Nakon 13.000 ciklusa, najmanje deformacije zabilježene su za kolničku konstrukciju CS. Ti rezultati pokazuju da se analiza treba provesti s dovoljnim brojem ciklusa opterećenja kako bi se mogle prikladno predvidjeti trajne deformacije kolničke konstrukcije tijekom dugog perioda.

Na slici 6. uočava se različita tendencija deformacija kod deformacijske krivulje CC. Razlika u krutosti za nevezani nosivi

sloj i tampon na kolničkoj konstrukciji CC viša je u usporedbi s preostala tri kolnika. Tome su vjerojatno razlog različite deformacijske karakteristike materijala.

Ako se grafički prikaže vertikalna trajna deformacija u odnosu na logaritamski iskazani broj ciklusa opterećenja, može se uočiti da se krivulja trajnih deformacija sastoji od dva linearna dijela (slike 7. do 10.). U prvom se dijelu trajna deformacija linearno povećava usporedo s povećanjem broja ciklusa opterećenja. To znači da je kolnik u stabilnom stanju. Nakon prekoračenja graničnog broja ciklusa opterećenja bilježi se nagli porast prirasta trajnih deformacija s povećanjem broja ciklusa opterećenja. Takvo ponašanje pri trajnim deformacijama u skladu je s drezdenskim modelom [36] i Barksdale-ovom studijom [39]. Međutim, prema slikama od 7. do 10., granični broj ciklusa opterećenja razlikuje se kod svake od analiziranih kolničkih konstrukcija. Kako svaka kolnička konstrukcija ima različite vrijednosti koeficijenta pora i čvrstoće, za iste uvjete opterećenja dobivaju se različiti grafički prikazi deformacija te različite točke loma. Tome je razlog i različiti rasap energije kod svake kolničke konstrukcije, uzrokovan razlikama u karakteristikama materijala pojedinih slojeva.

U nastavku je za svaki tip kolničke konstrukcije dan grafički prikaz odnosa deformacija i broja ciklusa opterećenja te parametri krivulje trajnih deformacija.



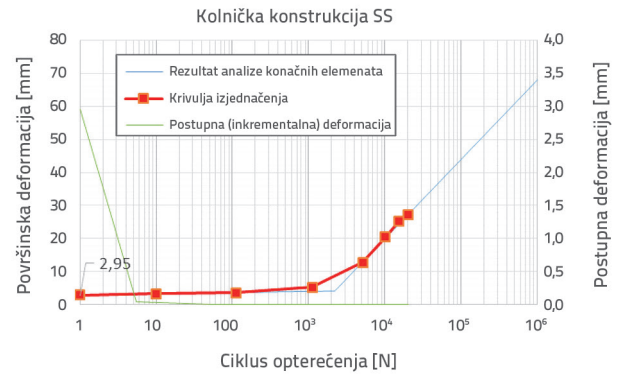
Slika 7. Odnos deformacija i broja ciklusa opterećenja za kolničku konstrukciju CC

$$sN_1 = 3,77 \text{ mm}$$

$$\Delta S_1 = sN_1 + C_1 \text{Log}(N/1) \quad N \leq 5100 \quad (C_1 = 0,871)$$

$$\Delta S_2 = sN_{5100} + C_2 \text{Log}(N/5100) \quad N \geq 5100 \quad (C_2 = 31,545) \quad (7)$$

gdje je sN_1 deformacija za prvi ciklus opterećenja, C_1 je nagib prve linije kada je broj opterećenja manji od 5100, C_2 je nagib druge linije kada je broj opterećenja veći od 5100. Za kolničku konstrukciju CC (nosivi sloj od drobljenog kamena + tampon od drobljenog kamena), granični broj opterećenja je 5100 pri impulsu opterećenja od 400 kPa. Nakon tog broja ciklusa opterećenja, nagib krivulje trajnih deformacija prikazane na polulogaritamskoj skali raste (slika 7.).



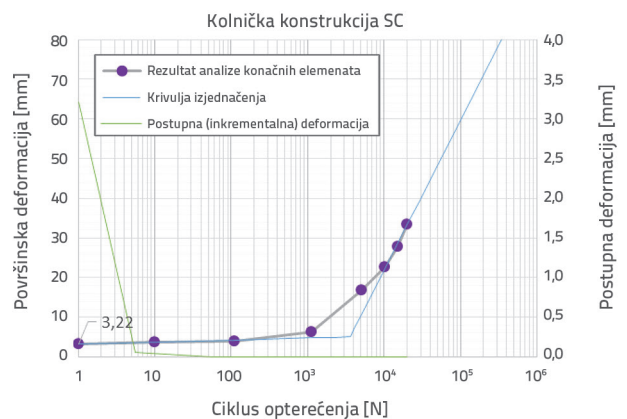
Slika 8. Odnos deformacija i broja ciklusa opterećenja za kolničku konstrukciju SS

$$sN_1 = 2,95 \text{ mm}$$

$$\Delta S_1 = sN_1 + C_1 \text{Log}(N/1) \quad N \leq 2200 \quad (C_1 = 0,374)$$

$$\Delta S_2 = sN_{2200} + C_2 \text{Log}(N/2200) \quad N \geq 2200 \quad (C_2 = 24,006) \quad (8)$$

gdje je sN_1 deformacija za prvi ciklus, C_1 je nagib prve linije kada je broj ciklusa opterećenja manji od 2200, C_2 je nagib druge linije kada je broj ciklusa opterećenja veći od 2200. Za kolničku konstrukciju SS (nosivi sloj od čelične zgure + tampon od čelične zgure), granični broj ciklusa opterećenja je 2200 pri impulsu opterećenja od 400 kPa. Nakon tog broja ciklusa opterećenja, nagib krivulje trajnih deformacija prikazane na polulogaritamskoj skali raste (slika 8.).



Slika 9. Odnos deformacija i broja ciklusa opterećenja za kolničku konstrukciju SC

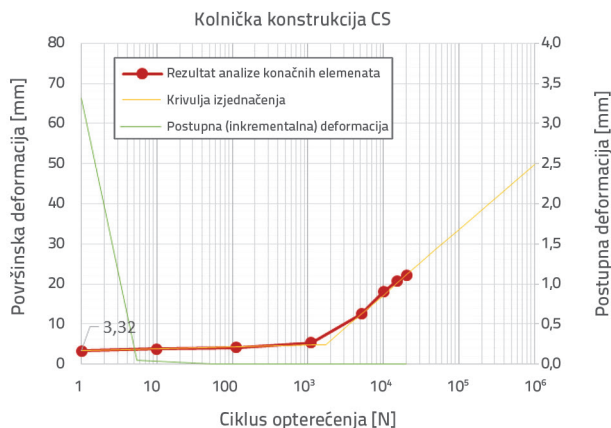
$$sN_1 = 3,219 \text{ mm}$$

$$\Delta S_1 = sN_1 + C_1 \text{Log}(N/1) \quad N \leq 3600 \quad (C_1 = 0,529)$$

$$\Delta S_2 = sN_{3600} + C_2 \text{Log}(N/3600) \quad N \geq 3600 \quad (C_2 = 37,913) \quad (9)$$

gdje je sN_1 deformacija za prvi ciklus, C_1 je nagib prve linije kada je broj ciklusa opterećenja manji od 3600, C_2 je nagib druge linije kada je broj opterećenja veći od 3600. Za kolničku konstrukciju SC (nosivi sloj od čelične zgure + tampon od drobljenog kamena), granični broj ciklusa opterećenja je 3600 pri impulsu opterećenja

od 400 kPa. Nakon tog broja ciklusa opterećenja, nagib krivulje trajnih deformacija prikazane na polulogaritamskoj skali raste (slika 9.).



Slika 10. Odnos deformacija i broja ciklusa opterećenja za kolničku konstrukciju CS

$$\begin{aligned}
 sN_1 &= 3,320 \text{ mm} \\
 \Delta S_1 &= sN_1 + C_1 \cdot \log(N/1) \quad N \leq 1700 \quad (C_1 = 0,458) \\
 \Delta S_2 &= sN_{1700} + C_2 \cdot \log(N/1700) \quad N \geq 1700 \quad (C_2 = 16,248) \quad (10)
 \end{aligned}$$

gdje je sN_1 deformacija za prvi ciklus, C_1 je nagib prve linije kada je broj ciklusa opterećenja manji od 1700, C_2 je nagib druge linije kada je broj ciklusa opterećenja veći od 1700. Za kolničku konstrukciju CS (nosivi sloj od drobljenog kamena + tampon od čelične zgure), granični broj ciklusa opterećenja je 1700 pri impulsu opterećenja od 400 kPa. Nakon tog broja ciklusa opterećenja, nagib krivulje trajnih deformacija prikazane na polulogaritamskoj skali raste (slika 10.).

U tablici 2. dane su vrijednosti prosječne krutosti i koeficijenta pora slojeva od nevezanog zrnatog materijala za sve analizirane kolničke konstrukcije te parametri krivulje trajnih deformacija (slike 7. do 10.).

Krivulje trajnih deformacija sastoje se od dva dijela koja se međusobno razlikuju prema nagibima. U svim grafičkim prikazima deformacija uočavaju se različite faze deformacija, što je u skladu s prethodnim istraživanjima. Prvi dio predstavlja fazu nakon zbijanja. U toj fazi do deformacija dolazi zbog promjene položaja čestica, a te deformacije dovode do promjena

u obujmu. U drugoj su fazi deformacije uglavnom uzrokovane habanjem na kontaktu između čestica.

Iz tablice 2. vidimo da je točka u kojoj dolazi do promjene nagiba krivulje različita kod svake kolničke konstrukcije, te da se krivulje razlikuju i po parametrima kratkoročnih i dugoročnih deformacija.

Na temelju analize rezultata sažeto prikazanih u tablici 2. može se zaključiti da postoji obrnuto proporcionalni odnos između nagiba krivulja na drugom dijelu grafičkog prikaza (C_2) i prosječne krutosti nevezanih slojeva. Takav odnos između prosječne krutosti nevezanih slojeva i dugoročnih deformacija također je uvjetovan činjenicom da C_2 bitno utječe na dugoročne deformacije. Prema rezultatima prikazanim u tablici 2., dugoročne deformacije uvjetovane su krutošću nevezanih zrnatih materijala. Što je veća prosječna krutost nevezanih materijala, to je manja deformacija pri velikom broju ciklusa opterećenja. Međutim, ne uočava se značajna povezanost između krutosti nevezanih slojeva i parametara kratkoročnih deformacija C_1 , sN_1 i ΔS_1 .

Kada se za nosivi sloj ili tamponski sloj koristi isti materijal, uočava se postojanje značajnog odnosa između razlike u krutosti i parametara kratkoročnih deformacija C_1 i ΔS_1 . C_1 i sN_1 predstavljaju nagib prvog dijela krivulje deformacija i početnu deformaciju kod prvog ciklusa opterećenja. Vrijednost ΔS_1 je deformacija pri graničnom broju ciklusa opterećenja pri kojem dolazi do promjene nagiba krivulje. Što je veća razlika u krutosti nevezanih slojeva to su veće i vrijednosti parametara kratkoročnih deformacija C_1 i ΔS_1 . Osim toga, nije uočena korelacija između parametara krutosti i graničnog broja ciklusa opterećenja.

Različite granične vrijednosti broja ciklusa opterećenja za analizirane kolničke konstrukcije te utjecaji razlika u krutosti na neke rezultate pokazuju da postoji međudjelovanje između slojeva kolničke konstrukcije pri ponavljajućim prometnim opterećenjima.

6. Zaključak

U ovom je istraživanju pomoću metode konačnih elemenata analizirano deformacijsko ponašanje savitljivih kolničkih konstrukcija u funkciji ciklusa opterećenja. Model HSsmall korišten je za prikazivanje nevezanih zrnatih materijala nosivog

Tablica 2. Sažeta objašnjenja prikaz grafičkih prikaza

Tip kolničke konstrukcije	Krutost nosivog sloja/ tampona [MPa]	Razlika u krutosti [MPa]	Prosječna krutost nevezanih slojeva [MPa]	Prosječni koeficijent pora nevezanih slojeva (e)	$N_{\text{granični}}$	C_1	C_2	sN_1 [mm]	ΔS_1 [mm]	ΔS_2 [mm]
CC	185/128	57	152	0,586	5100	0,871	31,545	3,77	7,00	25,80
SS	180/138	42	156	0,596	2200	0,374	24,060	2,95	4,20	27,30
SC	180/128	52	150	0,590	3600	0,529	37,913	3,22	5,10	33,40
CS	185/138	47	158	0,591	1700	0,458	16,248	3,32	4,80	22,20

i tamponskog sloja. Modul maksimalne deformacije nevezanih materijala pri smicanju (G_{max}) definiran je pomoću ispitivanja koje se temelji na metodi rezonantnog stupca.

U istraživanju se primjenjuje novi pristup za analizu trajnih vertikalnih deformacija. Umjesto određivanja deformacijskih svojstava svakog sloja kolničke konstrukcije, u ovom je radu težište na analizi sveukupne deformacije/pojave kolotraga na površini. Kolničke konstrukcije ovdje analizirane čine višeslojni sustav sastavljen od asfaltbetona (AC), nosivog i tamponskog sloja, koji se odlikuju različitim svojstvima krutosti i gustoće.

Ako se grafički prikaže vertikalna trajna deformacija u odnosu na logaritamski iskazani broj opterećenja, može se uočiti da se krivulja trajnih deformacija sastoji od dva linearna dijela. U prvom se dijelu trajna deformacija linearno povećava usporedo s ciklusima opterećenja. Može se dakle reći da je kolnička konstrukcija u prvom dijelu grafičkog prikaza deformacija u stabilnom stanju. Nagib krivulje trajnih deformacija raste nakon prekoračenja određenog broja ciklusa opterećenja. Takvo ponašanje pri trajnim deformacijama u skladu je s drezdenskim modelom. Međutim, u grafičkim prikazima deformacija nema konstantne točke loma. Točka loma na grafičkom prikazu deformacija iskazanom na polulogaritamskoj skali varira kod svake kolničke konstrukcije, a isto tako variraju i nagibi prvog i drugog dijela krivulje.

Dva različita zrnata materijala korištena su u istraživanju kao materijali nevezanih slojeva kolničke konstrukcije. Za svaki

analizirani tip kolničke konstrukcije dobiven je drugi granični broj ciklusa opterećenja. Prema rezultatima, grafički prikazi deformacija imaju iste tendencije ali su im nagibi krivulja različiti, a isto tako su različiti i brojevi ciklusa pri kojem dolazi do graničnog opterećenja.

Nagib drugog dijela krivulje (C_2) obrnuto je proporcionalan prosječnoj vrijednosti krutosti nevezanih slojeva. Nagib prvog dijela krivulje (C_1) obrnuto je proporcionalan s razlikom krutosti nevezanih slojeva. Nema korelacije između krutosti ili parametra krutosti i sN_1 .

Kolnička konstrukcija je višeslojni sustav sastavljen od posteljice, nevezanih zrnatih slojeva i asfaltnog sloja. Uz laboratorijsku analizu deformacijskih karakteristika svakog sloja kolničke konstrukcije, treba se numeričkim metodama provjeriti i ukupna deformacija kolničke konstrukcije kako bi se definirala interakcija slojeva. Za numeričko određivanje dugoročnog ponašanja savitljivih kolničkih konstrukcija pod prometnim opterećenjem treba se odabrati dovoljan broj ciklusa opterećenja kako bi se dobio drugi dio deformacijske krivulje. Numerička analiza treba se provoditi za svaku karakterističnu kolničku konstrukciju i za različite uvjete posteljice na trasi razmatrane prometnice. U prikazanom su istraživanju analizirani samo neki od parametara koji utječu na ponašanje kolničke konstrukcije. U budućim se istraživanjima trebaju razmotriti i drugačije razine opterećenja, promjena klimatskih uvjeta, razina vodnog lica, detaljnije razlike u krutosti te ostale varijable.

LITERATURA

- [1] Hai-lin, Y., Wan-ping, W., Ping, C.: Dynamic stress and deformation of a layered road structure under vehicle traffic loads: Experimental measurements and numerical calculations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2012) 39, pp. 100–112
- [2] Wang, J.: Three-Dimensional Finite Element Analysis Of Flexible Pavements, The University of Maine, MSc., Main, 1996.
- [3] Beskou, N.D., Theodorakopoulos, D.D.: Dynamic effects of moving loads on road pavements: A review, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31 (2011) 4, pp. 547–567
- [4] Burmister, D.M.: The general theory of stresses and displacements in layered soil systems, *Journal of applied Physics*, 16 (1945) 5, pp. 296–302
- [5] Warren, H., Dieckmann, W.: Numerical computation of stresses and strains in a multiple-layer asphalt pavement system, International Report, Chevron Research Corporation, Richmond, CA, 1963.
- [6] Hwang, D., Witczak, M.: Program DAMA (Chevron), User's Manual, Department of Civil Engineering, University of Maryland, 1979.
- [7] De Jong, D., Peutz, M., Korswagen, A.: Computer program BISAR - Layered systems under normal and tangential surface load, External Report No. AMSR.006., Amsterdam, 1979.
- [8] Kopperman, S., Tiller, G., Tseng, M.: Elysm5 Interactive microcomputer version, User's Manual, Report No. FHWA-TS-87-206, Federal Highway Administration, 1986.
- [9] Harichandran, R., Baladi, G., Yeh, M.: Development of a computer program for design of pavement systems consisting of bound and unbound materials, Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan State University, 1989.
- [10] Qiu, Y., Dennis, N.D., Elliott, R.P.: Stress distribution in subgrade soils and applications in the design of flexible pavements, 30 (1999), pp. 221–233
- [11] Firat, S.: Stability analysis of pile-slope system, *Scientific Research and Essays*, 9 (2009) 4, pp. 842–852
- [12] Saevarsdottir, T., Erlingsson, S.: Deformation Modelling of Instrumented Flexible Pavement Structure, *Procedia engineering*, 143 (2016), pp. 937–944
- [13] Al-Jumaili, M.: Finite element modelling of asphalt concrete pavement reinforced with geogrid by using 3-D plaxis software, *International Journal of Materials Chemistry and Physics*, 2 (2016) 2, pp. 62–70
- [14] Hashem, M.D., Abu-Baker, A.M., Hashem, M.D.: Numerical Modeling of Flexible Pavement Constructed On Expansive Soils, *Eur. Int. J. Sci. Tech*, 10 (2013) 2, pp. 19–34
- [15] Kazemian, S., et al.: Reinforced pavement above trench under urban traffic load: Case study and finite element (FE) analysis, *Scientific Research and Essays*, 21 (2010) 5, pp. 3313–3329
- [16] Ouf, M.S., et al.: Evaluation of Stabilized Pavement Sections Using Finite Element Modeling, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7 (2016) 4, pp. 1749–1756

- [17] Rahman, M.S.: Characterising the Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials in Pavement Structures, Division of Highway and Railway Engineering, Department of Civil and Architectural Engineering, KTH Royal Institute of Technology, PhD, 2015.
- [18] Korkiala-Tanttu, L.: Calculation method for permanent deformation of unbound pavement materials, Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki University of Technology, 2008.
- [19] Ghadimi, B., Nega, A., Nikraz, H.: Simulation of shakedown behavior in pavement's granular layer, *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, 7 (2015) 4, pp. 198-203
- [20] Hiltunen, D.R., Roque, R., Ayithi, A.: Base Course Resilient Modulus for the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, University of Florida, Department of Civil and Coastal Engineering, Florida, 2011.
- [21] Huang, Y.H.: *Pavement Analysis and Design*, 2th ed., Pearson Prentice Hall, NJ, 2004.
- [22] Duncan, J.M., Monismith, C.L., Wilson, E.L.: Finite element analysis of pavements, *Highway Research Record*, 228 (1968), pp. 18-33
- [23] Kim, M.: Three-dimensional finite element analysis of flexible pavements considering nonlinear pavement foundation behavior, University of Illinois Urbana, Illinois, 2007.
- [24] Atkinson, J.H., et al.: Experimental determination of soil properties, *Proceedings of 10th ECSMFE*, Florence, 1991.
- [25] Güngör, A.G., Sağlık, A.: *Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi*, T.A.D.B.Ü.Ş. Müdürlüğü, KGM, Ankara, 2008.
- [26] Benz, T.: Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences, Univ. of Stuttgart, Inst. of Geotechnik, PhD, Stuttgart, 2007.
- [27] Wang, H., Al-Qadi, I.L.: Near-surface pavement failure under multiaxial stress state in thick asphalt pavement, *Transportation Research Record*, 2154 (2010) 1, pp. 91-99
- [28] Mattos, J., R., Nunez, W., P., Ceratti, J., A., Zingano, A., Fedrigo, W.: Shear strength of hot-mix asphalt and its relation to near-surface pavement failure – A case study in Southern Brazil, *Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Prague, 2016.
- [29] Tan, S., Low, B., Fwa, T.: Behavior of asphalt concrete mixtures in triaxial compression, *Journal of Testing and Evaluation*, 22 (1994) 3, pp. 195-203
- [30] Nouredin, A.S., McDaniel, R.S.: Evaluation of surface mixtures of steel slag and asphalt, *Transportation Research Record*, 1990., pp. 133-149
- [31] Yildirim, I.Z., Prezzi, M.: Use of steel slag in subgrade applications, Final Report, INDOT Office of Research and Development, FHWA/IN/JTRP-2009/32-SPR-3129, Indiana, 2009.
- [32] Dos Santos, J., Correia, A.: Reference threshold shear strain of soil and its application to obtain a unique strain-dependent shear modulus curve for soil, *15th Int. Conf. SMGE*, Istanbul, 1 (2001), pp. 267-270
- [33] Lekarp, F., Isacsson, U., Dawson, A.: State of the art. II: Permanent strain response of unbound aggregates, *Journal of transportation engineering*, 126 (2000) 1, p. 76-83
- [34] Tholen, O.: Falling weight deflectometer, a device for bearing capacity measurements: properties and performance, Degree project, Department of Highway Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 1980.
- [35] Lekarp, F.: Resilient and permanent deformation behavior of unbound aggregates under repeated loading, Royal Institute of Technology (KTH), PhD, Stockholm, 1999.
- [36] Werkmeister, S.: Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions, Dresden University of Technology PhD, Dresden, 2003.
- [37] Dawson, A.R., Wellner, F.: *Plastic Behaviour of Granular Materials*, Final Report, ARC Project 933, Reference PRG99014, The University of Nottingham, Nottingham, 1999.
- [38] Werkmeister, S., Dawson, A.R., Wellner, F.: Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept, *Transportation Research Record*, 1757 (2001) 1, pp. 75-81
- [39] Barksdale, R.D.: Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials, *Proceedings of 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, London, 1972., pp. 161-174
- [40] Sweere, G.T.H.: *Unbound granular bases for roads*, PhD, University of Delft, Delft, 1990.
- [41] Huurman, M.: Permanent deformation in concrete block pavements, Delft University of Technology: Delft, Netherlands, 1997.
- [42] Barksdale, R.D.: Compressive stress pulse times in flexible pavements for use in dynamic testing, *Highway research record*, 345 (1971) 4, p. 32-44
- [43] Karatag, H., Firat, S., Işık, N.S.: Assessment of Performance of Steel Slag Used in Road Base by Finite Element Analysis, *Proceedings of 13th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Çeşme, İZMİR, 2018.