

Analiza potpuno vezanih kolničkih konstrukcija

Tatjana Rukavina, Branimir Babić

Ključne riječi

kolnička konstrukcija, vezane kolničke konstrukcije, analiza, prometno opterećenje, naprezanje, deformacija

Key words

pavement structure, connected pavement structures, analysis, traffic load, stress, strain

Mots clés

chaussée, chaussée avec la couche de base en grave-ciment, analyse, charge due au trafic, contrainte, déformation

Ключевые слова

конструкция мостовой, связанные конструкции мостовой, анализ, транспортная нагрузка, напряжение, деформация

Schlüsselworte

Fahrbahnkonstruktion, gebundene Fahrbahnkonstruktionen, Analyse, Verkehrsbelastung, Spannung, Verformung

T. Rukavina, B. Babić

Izvorni znanstveni rad

Analiza potpuno vezanih kolničkih konstrukcija

Analizirane su deformacije i naprezanja od prometnog opterećenja u potpuno vezanim kolničkim konstrukcijama. Analiza je rađena uz tri promjenjiva parametra (geometrija konstrukcije, svojstva materijala, nosivost tla). Deformacije i naprezanja uspoređeni su s onima koja se javljaju kod uobičajenih kolničkih konstrukcija. U analizama je upotrijebljen računalni program BISAR. Potpuno vezane kolničke konstrukcije pokazale su se povoljnijima u pogledu deformacija od uobičajenih.

T. Rukavina, B. Babić

Original scientific paper

Analysis of completely connected pavement structures

The stress and strain values generated by traffic operated on completely connected pavements structures are analyzed. The analysis is made with three variable parameters (geometry of structure, properties of materials, and load bearing capacity of soil). Stress and strain values are compared with those occurring in usual pavement structures. The computer program BISAR is used in the analyses. Completely connected pavement structures have proven to be more resistant to strain than usual pavement structures.

T. Rukavina, B. Babić

Ouvrage scientifique original

Analyse des chaussées avec la couche de base en grave-ciment

Les auteurs analysent les déformations et les contraintes dans les chaussées avec la couche de base en grave-ciment à la charge due au trafic. L'analyse a été effectuée avec trois paramètres variables (géométrie de la chaussée, propriétés des matériaux, portance du sol). Les déformations et les contraintes ont été comparées à celles apparaissant dans les chaussées habituelles. Le logiciel BISAR a été utilisé dans les analyses. Les chaussées avec la couche de base en grave-ciment ont présenté des avantages par rapport aux chaussées habituelles sur le plan des déformations.

T. Рукавина, Б. Бабић

Оригинална научна работа

Анализ полностью связанных конструкций мостовых

В работе анализированы деформации и напряжения в полностью связанных конструкциях мостовых, возникающие от транспортной нагрузки. Анализ выполнен при трёх неизменяемых параметрах (геометрия конструкции, свойство материала, несущая способность грунта). Деформации и напряжения сопоставлены с теми же, возникающими при обычных конструкциях мостовых. В анализах употреблена вычислительная программа BISAR. Полностью связанные конструкции мостовых показали себя более подходящими в отношении деформаций, чем обычные.

T. Rukavina, B. Babić

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Analyse vollständig gebundener Fahrbahnkonstruktionen

Analysiert sind Verformungen und Spannungen, verursacht von der Verkehrsbelastung, in vollständig gebundenen Fahrbahnkonstruktionen. Die Analyse umfasst drei veränderliche Parameter (Geometrie der Konstruktion, Baustoffeigenschaften, Bodentragfähigkeit). Die Verformungen und Spannungen wurden verglichen mit jenen die bei üblichen Fahrbahnkonstruktionen auftreten. Bei den Analysen benutzte man das Computerprogramm BISAR. Die vollständig gebundenen Fahrbahnkonstruktionen zeigten vom Aspekt der Verformungen bessere Ergebnisse als die herkömmlichen

Autori: Doc. dr. sc. **Tatjana Rukavina**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Branimir Babić**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, Kačićeva 26

1 Uvod

Uobičajene kolničke konstrukcije u svom se gornjem dijelu sastoje od vezanih slojeva (bitumenom i možebitno cementom), dok njihov donji dio čini sloj od nevezanog, mehanički zbijenog zrnatog materijala. One, u slučaju teškog prometa i slabijeg tla u podlozi, moraju imati popriličnu debljinu (oko 75 cm). Pri potpuno vezanim kolničkim konstrukcijama svi su slojevi vezani određenim vezivom (bitumenom ili bitumenom i cementom). Takve kolničke konstrukcije pri istim uvjetima mogu biti tanje od uobičajenih (debljina im je obično otprilike 50 cm) što u mnogim slučajevima može imati veliko ekonomsko značenje. Nisu za podcjenjivanje niti eventualni ekološki učinci (zbog manje potrebe iskopa i(ili) dobave materijala).

Potpuno vezane kolničke konstrukcije nisu novost u cestogradnji. Počele su se spominjati i praktično primjenjivati još prije 30-ak godina. Teoretska razmatranja tih konstrukcija bila su međutim dosta rijetka.

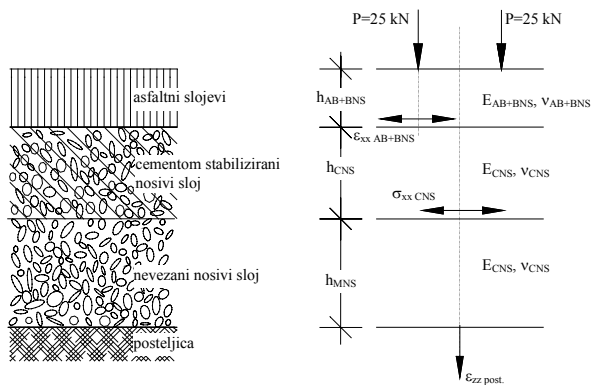
Stoga smo došli na zamisao da u takvoj kolničkoj konstrukciji analiziramo deformacije i naprezanja generirane prometnim opterećenjem uz više promjenljivih parametara (geometrija konstrukcije, svojstva materijala, nosivost tla) te da ih usporedimo s onima kod uobičajenih kolničkih konstrukcija. To je provedeno u jednom opsežnijem radu [1].

Kao "oruđe" u tim analizama upotrijebljen je računalni program BISAR [2], koji je širim razmatranjima ocijenjen pogodnim za ovu namjenu [1].

2 Formulacija modela varijantnih kolničkih konstrukcija i ulazni parametri za analizu

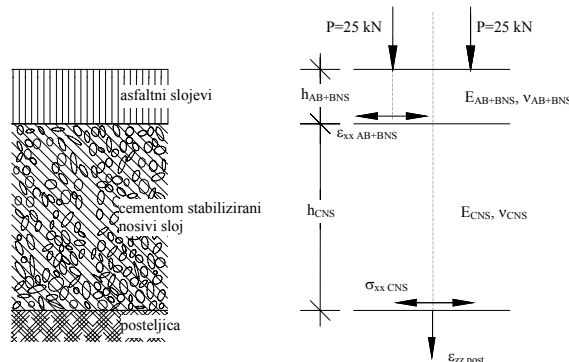
2.1 Modeli konstrukcija

U skladu s idejom i planom istraživanja, analizirani su odgovarajući modeli kolničkih konstrukcija. Za uobičajenu konstrukciju usvojen je četveroslojni model (slika 1.).



Slika 1. Prikaz konstrukcije i modela uobičajene savitljive kolničke konstrukcije (četveroslojni model)

Za potpuno vezanu konstrukciju usvojen je troslojni model (slika 2.).



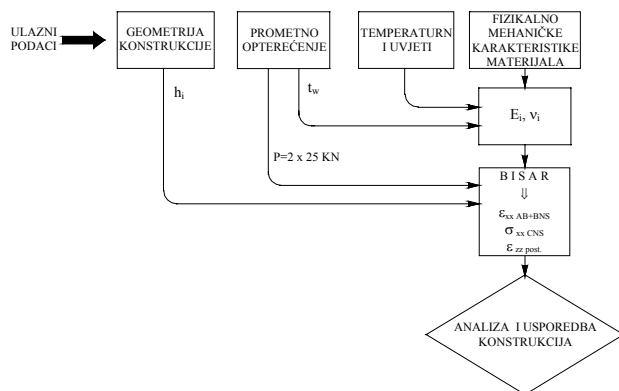
Slika 2. Prikaz konstrukcije s potpuno vezanim slojevima i modela (troslojni model)

U modelima su označene deformacije i naprezanja koji su najznačajniji za ponašanje kolničke konstrukcije [3] i čiji je određivanje bio zapravo cilj rada.

To su:

- horizontalna radijalna deformacija s donje strane asfaltnih slojeva (ϵ_{AB+BNS})
- horizontalno radijalno vlačno naprezanje s donje strane cementom vezanog sloja (σ_{CNS})
- vertikalna deformacija posteljice ($\epsilon_{post.}$).

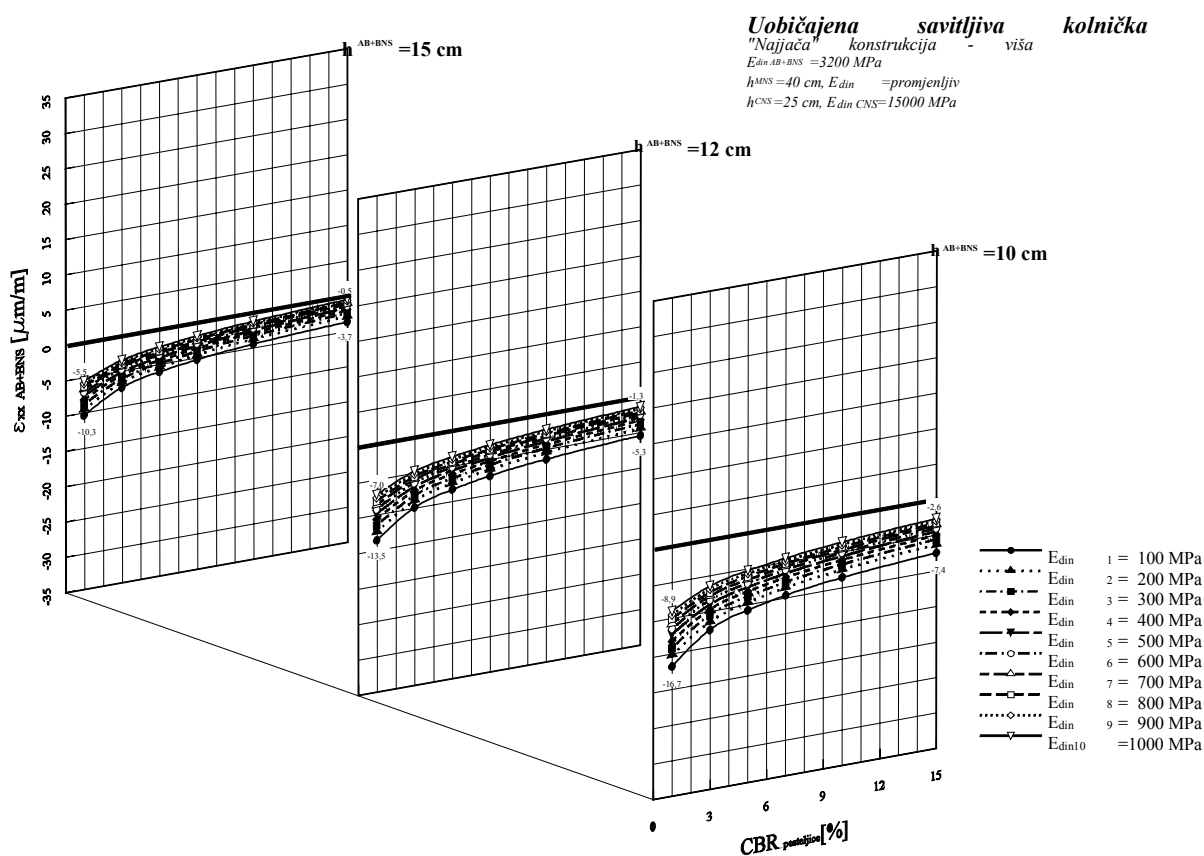
Metodologija analize naprezanja i deformacija prikazana je na flow-karti (slika 3.)



Slika 3. Dijagram toka postupka analize naprezanja i deformacija u varijantnim kolničkim konstrukcijama

Što se tiče ulaznih parametara primijenjena je ovakva logika [4]:

- za asfaltne materijale (normirane) izračunani [4] su moduli svojstveni za dva temperaturna područja – niže temperaturno područje (3°C) i više temperaturno područje (25°C), t.j. 17.200 MPa, odnosno 3.200 MPa
- za cementom stabilizirani sloj (s obzirom na pukotine) usvojene su tri vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti (5.000 MPa, 10.000 MPa i 15.000 MPa).



Slika 4. Radijalne deformacije pri donjoj strani asfaltnih slojeva u slučaju promjene debljine asfaltnih slojeva h_{AB+BNS}

- za nevezani sloj (s obzirom na mogućnost različitih tala u posteljici), moduli su varirani od 20 do 150 MPa (CBR = 2 do 15 %) (šest varijacija modula).

Geometrija konstrukcije bila je sljedeća:

- asfaltni slojevi: 10, 12 i 15 cm
- cementom stabilizirani slojevi
 - uobičajena konstrukcija: 15, 20, 25 cm
 - potpuno vezana konstrukcija: 15, 20, 25, 35, 45, 55 cm
- nevezani nosivi sloj
 - uobičajena konstrukcija: 20, 30, 40 cm
 - potpuno vezana konstrukcija: 0 cm.

Rezultati proračuna računalnim programom BISAR prikazani su brojnim tablicama i dijagramima određenih zavisnosti [1], iz kojih su za ovaj članak odabrani neki karakteristični primjeri (slike 4. i 5.).

3 Analiza napreznja i deformacija u varijantnim kolničkim konstrukcijama

Program BISAR automatski određuje napreznja, deformacije i pomake u proizvoljnim točkama konstrukcije,

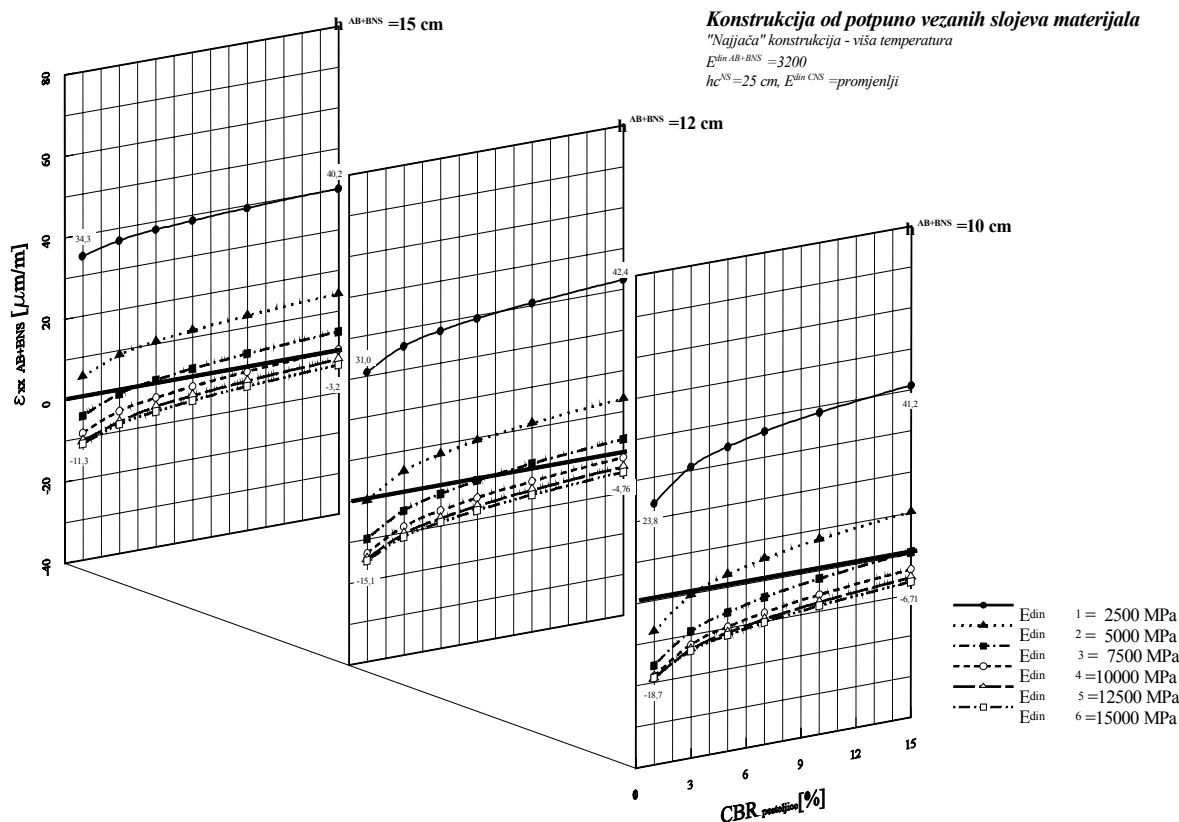
tako da se njime u načelu može dobiti vrlo veliki broj podataka.

U točki 2. izloženo je koja su napreznja i deformacije i na kojim mjestima posebno značajni za ponašanje kolničke konstrukcije pa su ona usvojena za analize (3 kriterija).

Zbog velikog broja ulaznih parametara, analize rezultata rađene su tako da je određen broj parametara držan konstantnim a mijenjane su vrijednosti onih parametara čiji su se utjecaji željeli promatrati. Osnovne analize odnosile su se na utjecaj promjene debljine asfaltnih slojeva (h_{AB+BNS}), na napreznja i deformacije, utjecaj promjene debljine cementom vezanog nosivog sloja (h_{CNS}), utjecaj promjene debljine nevezanog nosivog sloja (h_{MNS}) i utjecaj promjene dinamičkog modula elastičnosti cementom stabiliziranog nosivog sloja ($E_{din\ CNS}$).

Kod uobičajene i potpuno vezane kolničke konstrukcije analizirane su, uvjetno govoreći, "najslabija" i "najjača" konstrukcija ovisno o parametrima koji su pri pojedinoj analizi bili konstantni. Pod pojmom "najslabije" i "najjače" konstrukcije u ovom slučaju podrazumijevaju se konstrukcije definirane na sljedeći način:

- u analizi utjecaja promjene debljine asfaltnih slojeva h_{AB+BNS} :



Slika 5. Radijalna deformacija pri donjoj strani asfaltnih slojeva u slučaju promjene debljine asfaltnih slojeva h_{AB+BNS}

najslabija konstrukcija $h_{MNS} = 20$ cm; $h_{CNS} = 15$ cm;
 $E_{din, CNS} = 5000$ MPa,
 najjača konstrukcija $h_{MNS} = 40$ cm; $h_{CNS} = 25$ cm;
 $E_{din, CNS} = 15000$ MPa

- u analizi utjecaja promjene debljine cementom vezanog nosivog sloja h_{CNS} :
 najslabija konstrukcija $h_{AB+BNS} = 10$ cm; $h_{MNS} = 20$ cm;
 $E_{din, CNS} = 5000$ MPa,
 najjača konstrukcija $h_{AB+BNS} = 15$ cm; $h_{MNS} = 40$ cm;
 $E_{din, CNS} = 15000$ MPa
- u analizi utjecaja promjene debljine nevezanog nosivog sloja h_{MNS} (samo uobičajene kolničke konstrukcije):
 najslabija konstrukcija $h_{AB+BNS} = 10$ cm; $h_{CNS} = 15$ cm;
 $E_{din, CNS} = 5000$ MPa,
 najjača konstrukcija $h_{AB+BNS} = 15$ cm; $h_{CNS} = 25$ cm;
 $E_{din, CNS} = 15000$ MPa
- u analizi utjecaja promjene dinamičkog modula elastičnosti $E_{din, CNS}$ sloja CNS:
 najslabija konstrukcija $h_{AB+BNS} = 10$ cm; $h_{CNS} = 15$ cm;
 $h_{MNS} = 20$ cm,
 najjača konstrukcija $h_{AB+BNS} = 15$ cm; $h_{CNS} = 25$ cm;
 $h_{MNS} = 40$ cm.

Za svaku su konstrukciju mijenjani $E_{din, MNS}$ i CBR_{post} . ($E_{din, post}$). Vrijednost dinamičkog modula elastičnosti

nevezanog nosivog sloja $E_{din, MNS}$ mijenjana je od 100 do 1000 MPa s korakom od 100 MPa, dok je vrijednost CBR_{post} . ($E_{din, post}$) mijenjana od 1 do 15% (1, 3, 5, 7, 10 i 15%).

Konstrukcije s potpuno vezanim nosivim slojevima analizirane su na isti način samo što je dodatno analizirana i konstrukcija s debljinom cementom stabiliziranog nosivog sloja $h_{CNS} = 35$ cm, tako da su u ovom slučaju analizirane, uvjetno govoreći, "najslabija", "najjača" i "dodatna" konstrukcija, definirane na sljedeći način:

- u analizi utjecaja promjene debljine slojeva h_{AB+BNS}
 najslabija konstrukcija $h_{CNS} = 15$ cm;
 $E_{din, CNS} =$ promjenjiv,
 najjača konstrukcija $h_{CNS} = 25$ cm
 $E_{din, CNS} =$ promjenjiv,
 dodatna konstrukcija $h_{CNS} = 35$ cm;
 $E_{din, CNS} =$ promjenjiv
- u analizi utjecaja promjene debljine cementom vezanog nosivog sloja h_{CNS}
 najslabija konstrukcija $h_{CNS} = 10$ cm;
 $E_{din, CNS} =$ promjenjiv,
 najjača konstrukcija $h_{CNS} = 15$ cm; $E_{din, CNS} =$ promjenjiv.

Rezultati obavljenih proračuna i provedenih analiza omogućili su spoznaje o tome kako promjene geometrije kon-

strukcije i svojstava sastavnih materijala utječu na naprezanja i deformacije posebno značajna za ponašanje kolničke konstrukcije. Rezultati predstavljaju doprinos postojećim saznanjima o naprezanjima i deformacijama u uobičajenim konstrukcijama a pogotovo u potpuno vezanim konstrukcijama.

Najvažnije su spoznaje posebno navedene za svaku konstrukciju:

3.1 Uobičajena savitljiva kolnička konstrukcija

Radikalne vlačne deformacije pri dnu asfaltnih slojeva

→ Pri višoj su temperaturi (mali modul elastičnosti asfaltnih slojeva) deformacije na donjoj strani asfaltnih slojeva, ovisno o vrijednosti razmatranih utjecajnih parametara, tlačne ili vlačne, a pri nižoj temperaturi vlačne. Pri nižoj su temperaturi deformacije općenito manje nego pri višoj temperaturi.

→ S povećanjem dinamičkog modula elastičnosti cementom vezanog nosivog sloja u nižem području (5000 MPa na 10000 MPa) deformacije se mijenjaju znatno više nego u višem području (10000 MPa na 15000 MPa).

→ Utjecaj CBR-a posteljice s povećanjem debljine asfaltnih slojeva gotovo se u potpunosti gubi, tako da već pri debljini asfalta od 15 cm (i u slučaju "najslabije" konstrukcije) postaje zanemariv. Debljina cementom vezanog nosivog sloja i nevezanoga nosivog sloja malo utječe na ove deformacije.

Radikalna naprezanja pri dnu cementom stabiliziranog nosivog sloja

→ Radikalna naprezanja na donjoj strani cementom stabiliziranog nosivog sloja su i pri višoj i pri nižoj temperaturi vlačna.

→ Pri nižoj temperaturi tokovi naprezanja slični su onima pri višoj, samo su naprezanja u principu manja. "Blaže" je i djelovanje svih drugih razmatranih utjecajnih parametara.

Vertikalna deformacija posteljice

→ Vertikalna je deformacija posteljice pri višoj i pri nižoj temperaturi tlačna. Smanjuje se povećanjem vrijednosti bilo kojeg od razmatranih utjecajnih parametara.

3.2 Kolnička konstrukcija od potpuno vezanih materijala

Radikalne deformacije pri dnu asfaltnih slojeva

→ Pri višoj su temperaturi (mali modul elastičnosti asfaltnih slojeva), ovisno o vrijednosti razmatranih

utjecajnih parametara, deformacije tlačne ili vlačne, a pri nižoj temperaturi vlačne. Pri nižoj su temperaturi deformacije u načelu manje nego pri višoj (postoje izuzeci).

→ Utjecaj dinamičkog modula elastičnosti cementom stabiliziranog nosivog sloja na deformacije kod ovih je konstrukcija velik. S povećanjem modula vlačne se deformacije smanjuju a tlačne povećavaju.

→ Utjecaj nosivosti posteljice (CBR) općenito je malen, a pogotovo je malen pri većim debljinama cementom stabiliziranog sloja tako da se kod konstrukcije s cementom vezanim slojem debljine 25 cm praktički više i ne osjeća. Većim bi se utjecaj mogao ocijeniti samo pri sasvim malim vrijednostima CBR.

→ Utjecaj debljine asfaltnih slojeva na deformacije nešto je veći samo u slučaju minimalnih vrijednosti ostalih parametara i pri višoj temperaturi, no ni u tom slučaju nije velik.

Radikalna naprezanja pri dnu cementom stabiliziranog nosivog sloja

→ Radikalna su naprezanja pri donjoj strani cementom stabiliziranog nosivog sloja i pri višoj i pri nižoj temperaturi vlačna. Neznatno su veća od onih u uobičajenoj konstrukciji.

Vertikalna deformacija posteljice

→ Vertikalna deformacija na posteljici i pri višoj i pri nižoj temperaturi je tlačna, ali je općenito mala. Smanjuje se s povećanjem vrijednosti bilo kojeg od razmatranih utjecajnih parametara.

4 Usporedba konstrukcija

Kao mjerilo za usporedbu odabran je jedan od razmatranih kriterija - horizontalna radikalna deformacija pri dnu asfaltnih slojeva. Ona je, naime, "najodgovornija" za ponašanje kolničke konstrukcije jer prekoračenjem te deformacije u odnosu na neku dopuštenu dolazi do nastanka pukotina. Manje su deformacije, znači, povoljnije. Analizirane su kod pojedinih tipova kolničkih konstrukcija i to u odnosu na sve razmatrane parametre.

Usporedba je načinjena tako da su razmatrane kolničke konstrukcije s istom debljinom asfaltnih slojeva i istom ukupnom debljinom donjih nosivih slojeva.

Za usporedbu su odabrane prosječne vrijednosti fizičko-mehaničkih karakteristika materijala konstrukcije, budući da bi usporedba konstrukcija sa svim promjenljivim parametrima, zbog velikog broja mogućih kombinacija, bila gotovo nemoguća.

Usporedbe deformacija načinjene su za sljedeće slučajeve:

- a) nižu temperaturu (3°C),
višu temperaturu (22°C);
- b) malu nosivost posteljice ($CBR_{post.} = 3\%$),
veću nosivost posteljice ($CBR_{post.} = 10\%$);
- c) prosječnu vrijednost modula cementom stabiliziranog nosivog sloja ($E_{dinCNS} = 10000$ MPa).
- d) prosječnu vrijednost modula nevezanog sloja ($E_{dinMNS} = 300$ MPa).

Kao i u prije opisanim analizama analizirane su “najslabija” i “najjača” konstrukcija koje su za ovu potrebu definirane na sljedeći način:

Uobičajena konstrukcija

Najslabija konstrukcija:

- debljina asfaltnih slojeva 10 cm
- debljina cementom stabiliziranog nosivog sloja 15 cm
- debljina nevezanog nosivog sloja 20 cm
- ukupno: 45 cm

Najjača konstrukcija:

- debljina asfaltnih slojeva 15 cm
- debljina cementom stabiliziranog nosivog sloja 25 cm
- debljina nevezanog nosivog sloja 40 cm
- ukupno: 80 cm

Konstrukcija od potpuno vezanih slojeva materijala

Najslabija konstrukcija:

- debljina asfaltnih slojeva 10 cm
- debljina cementom stabiliziranog nosivog sloja 35 cm
- ukupno: 45 cm

Najjača konstrukcija:

- debljina asfaltnih slojeva 15 cm
- debljina cementom stabiliziranog nosivog sloja 65 cm
- ukupno: 80 cm

U tablici 1. navedene su vrijednosti radijalnih deformacija na donjoj strani asfaltnih slojeva pri višoj i nižoj tem

peraturi, u “najslabijoj” i “najjačoj” konstrukciji te pri manjoj odnosno većoj nosivosti posteljice, za svaki tip konstrukcije.

Tablica 1. Vrijednosti radijalnih deformacija pri dnu asfaltnih slojeva u razmatranim kolničkim konstrukcijama

Tip kolničke konstrukcije i temperaturni uvjeti				Radijalna deformacija pri dnu asfaltnih slojeva [$\mu\text{m/m}$]	
				$CBR_{post.} = 3\%$	$CBR_{post.} = 10\%$
Uobičajena	temp.	viša	najslabija	-20,40	-12,70
			najjača	-2,45	0,59
		niža (3°C)	najslabija	9,75	10,40
			najjača	7,98	8,41
Potpuno vezana konstrukcija	temp.	viša (22°C)	najslabija	3,81	0,51
			najjača	5,16	6,98
		niža (3°C)	najslabija	5,10	6,58
			najjača	6,70	7,34

Iz tablice 1. vidljivo je da su radijalne deformacije pri dnu asfaltnih slojeva u potpuno vezanim konstrukcijama znatno niže od onih u uobičajenim konstrukcijama.

4 Zaključak

Za veliki broj promjenljivih parametara određene su deformacije ili naprezanja koje u kolničkim konstrukcijama izaziva prometno opterećenje.

Dobiveni rezultati analizirani su i protumačeni posebno za uobičajenu kolničku konstrukciju i za “potpuno vezanu” kolničku konstrukciju, te utvrđeni utjecaji pojedinih parametara. Potvrđena su određene, već poznate, spoznaje ali su stečene i neke nove.

Kao najvažnije saznanje ističe se da je usporedba uobičajene i “potpuno vezane” konstrukcije pokazala da su “vezane” konstrukcije u određenom pogledu (deformacije) povoljnije od uobičajenih.

LITERATURA

[1] Rukavina, T.: *Višeparameterska analiza naprezanja i deformacija savitljivih kolničkih konstrukcija*, disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 1999., str. 169.

[2] *BISAR-PC User Manual*, Shell Pavement Design Method – Stress and Strain Calculations in Pavement Models on a Personal Computer, Shell International Petroleum Company Limited, London, 1995.

[3] Peattie, K. R.: *A Fundamental Approach to the Design of Flexible Pavements*, Proceedings, First International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, 1962.

[4] *BANDS-PC User Manual*, Shell Pavement Design Method – Computerised Bitumen and Asphalt Nomographs, Shell International Petroleum Company Limited, London, 1990.