

Primljen / Received: 16.6.2022.

Ispravljen / Corrected: 25.12.2023.

Prihvaćen / Accepted: 30.1.2024.

Dostupno online / Available online: 10.4.2024.

# Utjecaj temperature, vode i opterećenja na karakteristike naprezanja BFRP-CRCP kolnika

## Autori:



**Xueling Chen**, dipl.ing.građ.

Sjeveroistočno šumarsko sveučilište, Kina  
Građevinski fakultet  
[cxlteacher@126.com](mailto:cxlteacher@126.com)



Prof.dr.sc. **Lifeng Wang**, dipl.ing.građ.

Sjeveroistočno šumarsko sveučilište, Kina  
Građevinski fakultet  
[DCXL198302@163.com](mailto:DCXL198302@163.com)

Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

**Xueling Chen, Lifeng Wang**

## Utjecaj temperature, vode i opterećenja na karakteristike naprezanja BFRP-CRCP kolnika

Karakteristike naprezanja kontinuirano armiranobetonskih kolnika sa šipkama ojačanima bazaltnim vlaknima (BFRP-CRCP) ispitane su primjenom teorije povezanosti temperature, vode i opterećenja, temeljene na svojstvima smrznutog tla u sjeveroistočnoj Kini, u kombinaciji s postojećim istraživačkim iskustvom. Za polaznu je točku uzet utjecaj slijeganja temeljnog tla uslijed odmrzavanja u sjeveroistočnoj Kini. Računalni program COMSOL primijenjen je za izradu modela konačnih elemenata BFRP-CRCP temeljnog tla i kolničke konstrukcije u Kini. Ispitani su osnovni utjecajni elementi poput debljine kolnika, koeficijenta armiranja i modula elastičnosti betona te su dane odgovarajuće preporuke za odabir materijala za BFRP-CRCP kolnik Kini. Nadalje, karakteristike naprezanja kombinirane BFRP-CRCP kolničke konstrukcije ispitane su primjenom triju najčešće korištenih kolničkih konstrukcija u regiji uz fokus na različite elemente koji im doprinose. Navedeno služi kao model za BFRP-CRCP kolničku konstrukciju, pri čemu se uzimaju u obzir deformacije uslijed slijeganja.

### Ključne riječi:

smrznuto tlo, BFRP-CRCP, deformacija uslijed slijeganja, kolnik

Research Paper

**Xueling Chen, Lifeng Wang**

## Temperature–water–load coupling study on stress characteristics of BFRP–CRCP pavement

The stress characteristics of continuously reinforced concrete pavements with basalt fibre-reinforced bars (BFRP-CRCP) were investigated using the temperature–water–load coupling theory, based on the characteristics of frozen soil in Northeast China, combined with existing research experience, and taking the foundation thaw settlement effect in Northeast China as a starting point. The COMSOL finite element software was used to create a finite element model of the BFRP-CRCP subgrade and pavement China. Several common affecting elements, such as pavement thickness, reinforcement ratio, and concrete modulus, were examined, and appropriate recommendations for BFRP-CRCP pavement material selection were made. Further, the stress characteristics of the BFRP-CRCP pavement structure combination were investigated utilising three common structural forms of pavement in the region and focusing on distinct contributing elements. It serves as a model for BFRP-CRCP pavement construction that considers settlement deformation.

### Key words:

frozen soil, BFRP-CRCP, settlement deformation, pavement

## 1. Uvod

Smrznuto tlo rasprostranjeno je širom Kine, dok sezonsko smrznuto tlo i permafrost čine više od 70% ukupnoga geografskog područja. Permafrost se proteže na oko 2,15 milijuna kvadratnih kilometara, što čini petinu geografske površine Kine i zauzima treće mjesto u svijetu, ponajprije na sjeveroistoku i u području Qinghai, na Tibetanskoj visoravni. Sjeveroistočna Kina ima gotovo 3.839.000 kvadratnih kilometara permafrosta, koji je klasificiran kao permafrost "male nadmorske visine i velike geografske širine". Osim permafrosta, veći dio sjeveroistoka čini sezonski smrznuto tlo. Sjeveroistočna Kina bogata je prirodnim resursima, međutim njezin je gospodarski rast usporen zbog hladnog okoliša i neadekvatne infrastrukture. Posljednjih godina država je potaknula ulaganja u infrastrukturu u sjeveroistočnoj regiji, uključujući izgradnju većeg broja prometnica na različitim razinama. Geološke katastrofe uzrokovane smrzavanjem i odmrzavanjem poput povećanja volumena tla uslijed smrzavanja i usitnjavanja tla zbog odmrzavanja uobičajene su na područjima sa smrznutim tlom zbog niskih temperatura i znatne temperaturne razlike između dana i noći. Navedeni proces uzrokuje neravnomjerno slijeganje kolnika, što rezultira dodatnim naprezanjima. Opterećenja od vozila i dodatna naprezanja dovode do deformacija ili oštećenja kolnika [1, 2].

Američki stručnjaci istraživali su kontinuirano ojačane betonske kolnike (engl. *Continuously Reinforced Concrete Pavement* - CRCP) kako bi proučili različite oblike oštećenja kolnika. CRCP je izveden s odgovarajućim čeličnim šipkama u uzdužnome i poprečnome smjeru kolnika kako bi se izbjeglo stvaranje pukotina uzrokovano uzdužnim skupljanjem betonske kolničke ploče. Kod CRCP-a ne predviđaju se dilatacijske i kontrakcijske spojnice (osim onih potrebnih za izvođenje spojeva i konstruktivnih struktura), što rezultira potpuno ravnom voznom površinom i poboljšanom stabilnošću pri vožnji. Nadalje, ukupna se čvrstoća kolnika poboljšala [3-5]. CRCP je istraživalo nekoliko istraživača od kasnih osamdesetih godina prošlog stoljeća [6-10].

## 2. Postavljena pitanja

Zbog svojih se izrazitih prednosti CRCP naširoko primjenjuje u Kini. Međutim, ako CRCP pukotine nastanu zbog utjecaja okoliša, čelične šipke u betonu hrđaju, smanjujući ukupnu trajnost kolničke konstrukcije. Ojačanje od bazaltnih vlakana nadmašuje čelične šipke u pogledu čvrstoće, otpornosti na koroziju, male vlastite težine i jednostavnosti transporta. Nadalje, njegov koeficijent toplinskog istezanja usporediv je s koeficijentom betona. Još je važnije to što je ojačanje od bazaltnih vlakana novi materijal za zaštitu okoliša, a metoda proizvodnje ne zagađuje okoliš. Kada se čelične šipke zamijene šipkama ojačanim bazaltnim vlaknima (engl. *basalt fiber reinforced polymer* - BFRP) u CRCP-u, tada se poboljšavaju svojstva kolnika, a vijek trajanja se produljuje [28]. Zbog golemih kineskih resursa bazalta i cementa BFRP-CRCP ceste ključne su za obogaćivanje varijanti CRCP-a i razvijanje novih tehnologija i metoda za kolnike sa

širokim mogućnostima primjene. Xingyu [11] analizirao je i usporedio primjenu šipki od bazaltnih vlakana i čeličnih šipki u kolničkim konstrukcijama te zaključio da je, teoretski, potpuno izvedivo primjenjivati kontinuirane šipke od bazaltnih vlakana umjesto čeličnih šipki.

Prednosti BFRP-CRCP-a su jasne, a istraživanje BFRP-CRCP-a u sjeveroistočnoj Kini još uvijek je u ranoj fazi [12-16]. Zamrznuto tlo sjeveroistočne Kine prolazi kroz dva fizikalna procesa: smrzavanje i odmrzavanje, što rezultira slijeganjem temeljnog tla uslijed odmrzavanja i pojavom pukotina u betonskoj kolničkoj ploči. Ovim istraživanjem ispitane su karakteristike naprezanja BFRP-CRCP-a primjenom teorije povezanosti temperature, vode i opterećenja te utjecaja slijeganja temeljnog tla uslijed odmrzavanja. Računalni program COMSOL primijenjen je za izradu BFRP-CRCP modela konačnih elemenata u sjeveroistočnoj Kini i nekoliko osnovnih utjecajnih elemenata poput debljine kolnika, koeficijenta armiranja i modula elastičnosti betona kao i zakon utjecaja karakteristika naprezanja raznih BFRP-CRCP materijala i strukturnih oblika. Prijedlozi dani za oblik kolničke konstrukcije i odabir materijala BFRP-CRCP-a bili su prihvatljivi.

## 3. Teorija povezanosti

Zamrznuto temeljno tlo deformira se zbog slijeganja tla uslijed odmrzavanja, a pojava slijeganja uslijed odmrzavanja zahtijeva uvođenje teorije vezanja triju polja, tj. temperature, vode i opterećenja [15-22]. Zbog lakše analize postavljene su sljedeće osnovne hipoteze: temeljno tlo izotropno je homogeno; tlo se promatra kao malo tijelo koje se deformira linearno elastično; čestice tla, leda i vode u tlu su nestišljive; temeljno tlo deformira se zbog slijeganja uslijed odmrzavanja pod djelovanjem opterećenja i vlačne sile uzrokovane smrzavanjem tla.

Za model u ovome radu primijenjen je računalni program COMSOL. Tri jednadžbe za povezivanje temperature, vode i opterećenja su sljedeće:

a) Kontinuirana jednadžba tečenja vode u tlu može se dobiti na temelju zakona o očuvanju mase mehanike kontinuuma [29]:

$$\frac{\partial \theta_u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D \frac{\partial \theta_u}{\partial z} - K \right] - \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \quad (1)$$

pri čemu su  $\theta_u$  volumen nezamrznute vode u tlu (%),  $\theta_i$  volumen leda u tlu (%),  $D$  i  $K$  koeficijent difuzije ( $\text{m}^2/\text{h}$ ) i koeficijent vodljivosti ( $\text{m}/\text{h}$ ),  $\rho_w$  zapreminska gustoća vode ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), a  $\rho_i$  zapreminska gustoća leda ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

b) Slično tome, prema zakonima očuvanja mase i provođenja topline mehanike kontinuuma, osnovna jednadžba temperaturnog polja jest [29]:

$$C_{vs} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] + L \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \quad (2)$$

pri čemu su  $T$  temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $C_{vs}$  molarni toplinski kapacitet ( $\text{kJ}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ),  $\lambda$  koeficijent toplinske vodljivosti ( $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ),  $L$  linearna duljina puta procjeđivanja,  $\rho_w$  zapreminska gustoća vode ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), a  $\rho_p$  zapreminska gustoća leda ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

c) Deformacija temeljnog tla u smrznutom području primarno uključuje tlačnu deformaciju uzrokovanu slijeganjem uslijed odmrzavanja pod vanjskim opterećenjem. Prema teoriji elastičnosti, osnovna jednadžba polja naprezanja jest [29]:

$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \nabla \sigma = F \quad (3)$$

pri čemu su:  $U$  pomak,  $F$  vanjsko opterećenje,  $\sigma$  naprezanje, a  $\rho$  gustoća tla.

## 4. Numerička simulacija

Ovo istraživanje uključuje sljedeće osnovne pretpostavke: u ovome istraživanju primijenjen je BFRP-CRCP, a pukotine nastale uslijed sušenja i temperaturnog skupljanja betonske kolničke ploče bile su relativno male i moglo ih se zanemariti. Betonska kolnička ploča modelirana je kao kontinuirana i cjelovita ploča, a deformacije šipki ojačanih bazaltnim

vlaknima i betona usklađene su bez razmatranja klizanja između njih. Ostali slojevi kolničke konstrukcije izotropno su linearno elastični; betonski površinski sloj, nosivi slojevi i temeljno tlo potpuno su kontinuirani; na temelju zadovoljavajućih mehaničkih svojstava šipki od bazaltnih vlakana smatra se da te šipke ostaju u području elastičnih deformacija tijekom cijele analize. Za konstitutivni odnos betona odabran je Ottosenov [25] konstitutivni model s punim rasponom. Uspostavljeni model: BFRP šipke i beton modelirani su zasebno.

### 4.1. Utvrđivanje parametara modela

Kolničku konstrukciju BFRP-CRCP čine površinska betonska ploča, cementom stabilizirani nosivi sloj od makadama i nosivi sloj od vapnenačkog tla. Ključni strukturni parametri slojeva kolničke konstrukcije navedeni su u tablici 1.

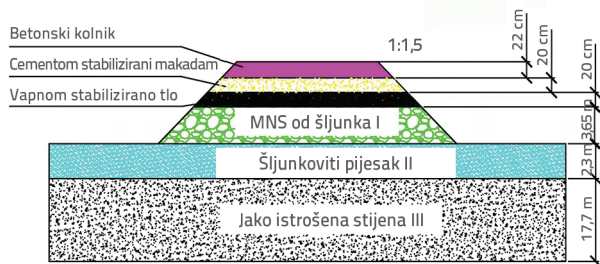
Prema geološkim parametrima područja sa sezonski zamrznutim tlom u sjeveroistočnoj Kini [6], ispunjena mehanički zbijenog nosivog sloja i temeljnog tla izvedena je primjenom šljunka, šljunkovitog pijeska te jako istrošene muljevite stijene. U tablici 2. prikazane su svojstvene karakteristike mehanički zbijenog nosivog sloja i slojeva temeljnog tla. Debljina temeljnog tla u ovome istraživanju iznosila je 20 m. Na slici 1. prikazani su temeljno tlo i kolnička konstrukcija.

Tablica 1. Glavni parametri BFRP-CRCP kolničke konstrukcije

Sloj kolničke konstrukcije	Debljina sloja [cm]	Modul elastičnosti [GPa]	Poissonov koeficijent	Gustoća [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Toplinska vodljivost [ $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ ]	Koeficijent linearnog širenja [ $10^{-5}\text{C}^{-1}$ ]
Betonska kolnička ploča	22	30,0	0,20	2643	1,4	1,0
Cementom stabilizirani nosivi sloj od makadama	20	1,4	0,25	2000	1,3	0,8
Nosivi sloj od vapnenačkog tla	20	1,5	0,30	1870	1,0	0,6

Tablica 2. Vrijednosti karakterističnih parametara mehaničkog nosivog sloja i temeljnog tla

Fizikalni parametri	Suha gustoća [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Početni udio vlage [%]	Specifična toplina [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]				Toplinska vodljivost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]		Koeficijent difuzije vode [ $\mu\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	Temperaturni gradijent [ $^{\circ}\text{C}/\text{degC}$ ]	Latentna toplina [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	Empirijski koeficijent
			Skelet odmrznutog tla	Skelet smrznutog tla	Voda	Led	Odmrznuto tlo	Smrznuto tlo				
Mehanički nosivi sloj od šljunka	1800	25	790	710	4182	2090	1,92	1,98	9,35	-0,20	334,56	0,61
Sloj od šljunkovitog pijeska	1700	30	840	730	4182	2090	1,95	2,69	46,60	-0,10	334,56	0,73
Jako istrošena muljevita stijena	1500	30	840	750	4182	2090	1,47	1,82	3,44	-0,05	334,56	0,47



Slika 1. Poprečni presjek cestovne kolničke konstrukcije i temeljnog tla

## 4.2. Postavljanje graničnih uvjeta

### 1. Granični uvjeti temperaturnog polja

Na temelju podataka dobivenih promatranjem područja permafrosta tijekom godina [30], bez razmatranja porasta temperature uzrokovanog globalnim zagrijavanjem i u kombinaciji s teorijom povezanosti, gornja granična temperatura modela permafrosta pojednostavljena je u sljedeći trigonometrijski izraz s godišnjim razdobljem [31]:

$$T = T_{\alpha} + \Delta T + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{360}t + \frac{\pi}{2}\right) \tag{4}$$

U jednadžbi  $T_{\alpha}$  predstavlja prosječnu godišnju temperaturu regije, pri čemu  $T_{\alpha}$  iznosi  $-3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .  $\Delta T$  jest ukupni porast temperature uzimajući u obzir utjecaj teorije povezanosti, pri čemu  $\Delta T$  površine sloja mehanički zbijenoga nosivog tla, pokosa mehanički zbijenoga nosivog tla i prirodne površine temeljnog tla iznosi  $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  odnosno  $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .  $A$  predstavlja temperaturnu amplitudu na površini sloja MNS-a te  $A$  površine mehanički zbijenog nosivog tla, pokosa mehanički zbijenoga nosivog tla i prirodne površine temeljnog tla iznosi  $15,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $14,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  odnosno  $11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Bez razmatranja utjecaja sunčanih i sjenovitih padina, temperature površine MNS-a, pokosa MNS-a i prirodne površine temeljnog tla mogu biti zasebno izražene kao:

$$T_1 = 3,5 + 15,15 + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{360}t + \frac{\pi}{2}\right) \tag{5}$$

$$T_2 = 1,0 + 14,55 + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{360}t + \frac{\pi}{2}\right) \tag{6}$$

$$T_3 = -0,5 + 11,5 + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{360}t + \frac{\pi}{2}\right) \tag{7}$$

Tablica 3. Tablica parametara BZZ-100

Standardno osovinsko opterećenje	BZZ-100	Standardno osovinsko opterećenje	BZZ-100
Standardno osovinsko opterećenje F [kN]	100	Ekvivalentni promjer kruga d [cm]	21,30
Tlak gume na podlogu P [MPa]	0,70	Središnja udaljenost dvaju kotača [cm]	1,5 d

Prema podacima dobivenim promatranjem, na određenoj dubini temeljnog tla ispod prirodne površine u području permafrosta varijacije u temperaturi tla vrlo su male. U modelu je temperatura približno određena na  $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  na temelju stvarnih podataka dobivenih promatranjem te je postavljena kao granični uvjet za dno modela. Rubovi površine trupa ceste smatraju se toplinski izoliranim granicama.

### 2. Granični uvjeti polja pomaka

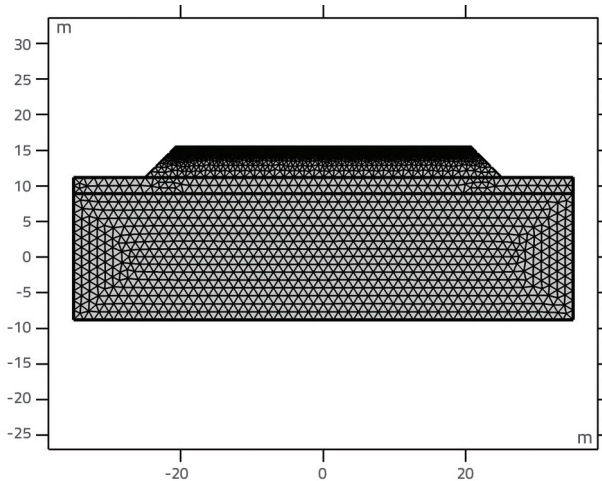
U ovaj rad uključeno je samo slijeganje temeljnog tla uslijed promjene temperature. Zato je gornja površina modela bila slobodna granica. Lijevom i desnom rubu modela dopušten je vertikalni pomak, ali je horizontalni pomak ograničen, dakle,  $u_x = 0$ . Nadalje, učvršćeno dno modela ne dopušta pomake i zato je  $u_x = 0$ ,  $u_y = 0$  i  $w = 0$ .

### 4.3. Postavke opterećenja

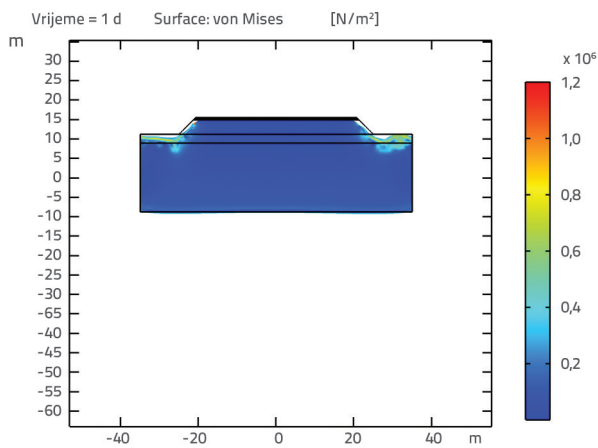
Dvostruko kružno jednoliko opterećenje BZZ-100 primijenjeno je kao standardno aksijalno opterećenje prema projektnim zahtjevima za kineske autoceste, a parametri su navedeni u tablici 3. S obzirom na to da ekvivalentni promjer kruga površine prijenosa tlaka jednoga kotača iznosi  $0,213\text{ m}$ , dvostruko kružno jednoliko opterećenje može se zamijeniti pravokutnim jednolikim opterećenjem te je tada dodirni tlak gume  $0,7\text{ MPa}$ , prema konceptu ekvivalentne površine. Pravokutno jednoliko opterećenje bilo je veličine  $0,213\text{ m} \times 1\text{ m}$ , a razmak između dvaju pravokutnih opterećenja bio je  $0,1065\text{ m}$ , odnosno polovica odgovarajućeg promjera kruga. Opterećenje je primijenjeno u sredini ceste primjenom koncepta ekvivalentne površine, bez razmatranja utjecaja različitih položaja kritičnog opterećenja na temeljno tlo. Međutim, BZZ-100 se ne može primijeniti na modelu, pa je opterećenje pretvoreno u dvodimenzionalno linearno opterećenje prema principu statičkog ekvivalenta te se njegova veličina promijenila s  $0,7\text{ MPa}$  u tri dimenzije na  $117371\text{ N/m}$  u dvije dimenzije, dok su veličina i razmak površine opterećenja ostali nepromijenjeni.

Za računalni model u ovome radu odabran je zasebni model za dodavanje BFRP-CRCP-a u beton primjenom opće funkcije ekstruzije u računalnom programu COMSOL, a klizanje između BFRP-CRCP-a i betona nije uzeto u obzir. Model je bio dvodimenzionalan.

U područjima s permafrostom primijenjen je BFRP-CRCP kako bi se potpuno razmotrili utjecaji slijeganja uslijed odmrzavanja i opterećenja vozila. Tehnika jedne varijable primijenjena je za istraživanje elemenata koji utječu na naprezanja BFRP-CRCP-a i karakteristike naprezanja različitih kombinacija kolničke konstrukcije kako bi se pojednostavio izračun. Na slici 2. prikazana je mrežna podjela simulacijskog modela. Na slici 3. prikazano je naprezanje kolnika u specifičnim uvjetima.



Slika 2. Mreža modela



Slika 3. Analiza naprezanja

## 5. Analiza osjetljivosti parametara BFRP-CRCP-a

Različiti modeli BFRP-CRCP kolničke konstrukcije izrađeni su primjenom tehnike jedne varijable i softvera COMSOL za ispitivanje utjecaja kolničke konstrukcije na naprezanja BFRP-CRCP-a. U tablici 4. prikazani su specifični jednofaktorski parametri. Vrijednosti konstantnih parametara kolnika navedene su u tablici 4.

### 5.1. Debljina BFRP-CRCP ploče

Ako debljina BFRP-CRCP kolničke ploče varira, hoće li to utjecati na naprezanja kolničke konstrukcije i koja bi bila razlika između razmatranja i nerazmatranja utjecaja slijeganja uslijed odmrzavanja?

Kako bi se zadržali osnovni faktori proračuna konstrukcije kolnika, u ovome su radu odabrane debljine kolničke ploče od 20, 22, 24, 26 i 28 cm. U tablici 5. prikazani su rezultati, a maksimalno glavno naprezanje izračunano je ispod betonske ploče.

U tablici 5. pokazano je da razmatranje samo opterećenja vozila (slučaj 1.) i razmatranje povezanosti slijeganja uslijed odmrzavanja i opterećenja vozila (slučaj 2.) imaju istu tendenciju promjene, odnosno kada se debljina kolnika povećava, tada se maksimalno glavno naprezanje u kolniku kontinuirano smanjuje. Posljedično, povećanje debljine BFRP-CRCP ploče može učinkovito smanjiti glavna naprezanja u kolničkoj ploči.

### 5.2. Koeficijent armiranja BFRP-a

Uzimajući u obzir koeficijente armiranja BFRP šipki od 0,6 %, 0,65 %, 0,7 %, 0,75 % i 0,8 %, ispitan je njihov utjecaj na naprezanja kolničke konstrukcije. Rezultati izračuna dobiveni

Tablica 4. Odabrani jednofaktorski parametri

Parametri	Postavka
Debljina BFRP-CRCP ploče [cm]	20, 22, 24, 26, 28
Modul elastičnosti betona [GPa]	24, 26, 28, 30, 32
Koeficijent armiranja [%]	0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80
Debljina CNS-a i nosivog sloja od vapnenačkog tla [cm]	16, 18, 20, 22, 24
Modul CNS-a [GPa]	1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6
Modul nosivog sloja od vapnenačkog tla [GPa]	1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7

Tablica 5. Maksimalno glavno naprezanje u pločama različitih debljina

Debljina BFRP-CRCP ploče [cm]	20	22	24	26	28
Maksimalno glavno naprezanje (bez razmatranja slijeganja uslijed odmrzavanja) [MPa]	1,210	1,031	0,836	0,724	0,654
Maksimalno glavno naprezanje (razmatrajući slijeganje uslijed odmrzavanja) [MPa]	2,762	2,581	2,428	2,307	2,206

Tablica 6. Maksimalna glavna naprezanja u pločama za različite koeficijente armiranja

Koeficijent armiranja [%]	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
Maksimalno glavno naprezanje (bez razmatranja slijeganja uslijed odmrzavanja) [MPa]	1,259	1,264	1,270	1,273	1,281
Maksimalno glavno naprezanje (razmatrajući slijeganje uslijed odmrzavanja) [MPa]	2,635	2,642	2,651	2,658	2,663

Tablica 7. Maksimalno glavno naprezanje u ploči za različite module elastičnosti betona

Modul elastičnosti betona [GPa]	24	26	28	30	32
Maksimalno glavno naprezanje (bez razmatranja slijeganja uslijed odmrzavanja) [MPa]	1,026	1,124	1,218	1,323	1,437
Maksimalno glavno naprezanje (razmatrajući slijeganje uslijed odmrzavanja) [MPa]	2,564	2,682	2,746	2,867	2,983

Tablica 8. Maksimalno glavno naprezanje u ploči za različite debljine CNS-a

Debljina cementom stabiliziranog nosivog sloja [cm]	16	18	20	22	24
Maksimalno glavno naprezanje (bez razmatranja slijeganja uslijed odmrzavanja) [MPa]	1,582	1,476	1,356	1,241	1,125
Maksimalno glavno naprezanje (razmatrajući slijeganje uslijed odmrzavanja) [MPa]	2,945	2,835	2,702	2,593	2,485

za nepromijenjene osnovne proračunske parametre kolničke konstrukcije prikazani su u tablici 6.

Prema tablici 6., koeficijent armiranja imao je minimalan utjecaj na naprezanja uzrokovana utjecajem povezanosti opterećenja vozila i slijeganja.

### 5.3. Modul elastičnosti betona

Održavajući osnovne parametre proračuna kolničke konstrukcije stalnima, utjecaj modula elastičnosti betona na naprezanja kolničke konstrukcije ispitan je primjenom modula od 24 GPa, 26 GPa, 28 GPa, 30 GPa i 32 GPa. U tablici 7. prikazani su rezultati proračuna.

Kao što je prikazano u tablici 7., maksimalno glavno naprezanje u BFRP-CRCP ploči povećavalo se s povećanjem modula elastičnosti betona, bez razmatranja slijeganja uslijed odmrzavanja. Kada je modul betona iznosio 24 GPa, tada je maksimalno glavno naprezanje u ploči bilo 1,026 MPa; kada je modul betona iznosio 32 GPa, tada je maksimalno glavno naprezanje u ploči bilo 1,437 MPa, odnosno došlo je do povećanja od 0,411 MPa; kada se modul betonske ploče povećao u prosjeku za 1 GPa, tada se maksimalno glavno naprezanje kolničke ploče povećalo za 0,05 MPa.

Kada je razmotreno slijeganje uslijed odmrzavanja, tada se maksimalno glavno naprezanje u BFRP-CRCP kolničkoj ploči povećavalo s povećanjem modula betona. Posljedično, modul elastičnosti betona potrebno je primjereno smanjiti kako bi se regulirala unutarnja naprezanja kolničke ploče.

### 5.4. Debljina cementom stabiliziranoga nosivog sloja

Održavajući ostale osnovne parametre proračuna kolničke konstrukcije stalnima, odabrana je debljina cementom stabiliziranoga nosivog sloja od 16, 18, 20, 22 i 24 cm kako bi se istražio utjecaj njegove debljine na naprezanja kolničke konstrukcije. U tablici 8. navedeni su rezultati proračuna.

Kao što je prikazano u tablici 8., maksimalno glavno naprezanje u BFRP-CRCP ploči smanjivalo se s povećanjem debljine CNS-a kada nije razmatrano slijeganje uslijed odmrzavanja. Pri debljini CNS-a od 16 cm maksimalno glavno naprezanje u ploči iznosilo je 1,582 MPa, a pri debljini od 24 cm maksimalno glavno naprezanje u ploči iznosilo je 1,125 MPa, odnosno došlo je do smanjenja od 0,457 MPa. Maksimalno glavno naprezanje u ploči smanjivalo se za 0,057 MPa za svako povećanje debljine CNS-a od 1 cm. Maksimalno glavno naprezanje u BFRP-CRCP kolničkoj ploči smanjivalo se u slučaju kada se razmatralo slijeganje uslijed odmrzavanja. Najveće glavno naprezanje u ploči iznosilo je 2,945 MPa pri debljini CNS-a od 16 cm te se ono smanjilo za 0,460 MPa pri debljini CNS-a od 24 cm. Maksimalno glavno naprezanje smanjilo se za 0,058 MPa kada se debljina CNS-a povećala u prosjeku za 1 cm. Tendencija maksimalnoga glavnog naprezanja generiranog u kolničkoj ploči koje se mijenja s debljinom CNS-a je ista, bilo da se uzima u obzir samo opterećenje vozila bilo teorija povezanosti slijeganja uslijed odmrzavanja i opterećenja vozila. Zbog navedenog, pri izgradnji kontinuiranih armiranobetonskih kolnika na područjima s permafrostom, debljinu CNS-a treba primjereno povećati kako bi se regulirali uvjeti naprezanja u kolničkoj ploči.

Tablica 9. Maksimalno glavno naprezanje u ploči za različite module CNS-a

Modul cementom stabiliziranoga nosivog sloja [GPa]	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
Maksimalno glavno naprezanje (bez razmatranja slijeganja uslijed odmrzavanja) [MPa]	1,426	1,323	1,271	1,168	1,105
Maksimalno glavno naprezanje (razmatrajući slijeganje uslijed odmrzavanja) [MPa]	2,654	2,758	2,849	2,986	3,142

Tablica 10. Maksimalno glavno naprezanje u ploči za različite debljine nosivog sloja od vapnenačkog tla

Debljina nosivog sloja od vapnenačkog tla [cm]	16	18	20	22	24
Maksimalno glavno naprezanje (bez razmatranja slijeganja uslijed odmrzavanja) [MPa]	1,442	1,375	1,308	1,243	1,154
Maksimalno glavno naprezanje (razmatrajući slijeganje uslijed odmrzavanja) [MPa]	2,993	2,924	2,862	2,802	2,728

## 5.5. Modul cementom stabiliziranoga nosivog sloja

Utjecaj debljine cementom stabiliziranoga nosivog sloja na naprezanja u kolničkoj ploči ispitan je primjenom modula sloja od 1,2, 1,3, 1,4, 1,5 i 1,6 GPa, pri čemu su osnovni parametri proračuna kolničke konstrukcije ostali stalni. U tablici 9. navedeni su rezultati proračuna.

Bez razmatranja slijeganja uslijed odmrzavanja, maksimalno glavno naprezanje u BFRP-CRCP ploči smanjivalo se s povećanjem modula CNS-a kao što je to prikazano u tablici 9. Najveće glavno naprezanje u ploči iznosilo je 1,426 MPa, kada je modul CNS-a iznosio 1,2 GPa; najveće glavno naprezanje u ploči iznosilo je 1,105 MPa, kada je modul CNS-a iznosio 1,6 GPa, što predstavlja smanjenje od 0,321 MPa. Maksimalno glavno naprezanje u ploči smanjilo se za 0,064 MPa, kada se modul CNS-a povećao za 100 MPa. U slučaju slijeganja uslijed odmrzavanja maksimalno glavno naprezanje u BFRP-CRCP kolničkoj ploči povećavalo se s povećanjem modula CNS-a. Kada je modul CNS-a iznosio 1,2 GPa, tada je maksimalno glavno naprezanje u ploči iznosilo 2,654 MPa; kada je modul CNS-a iznosio 1,6 GPa, tada je maksimalno glavno naprezanje u ploči iznosilo 3,142 MPa, što je povećanje od 0,488 MPa. Za svako povećanje modula CNS-a od 100 MPa, maksimalno glavno naprezanje povećalo se za 0,098 MPa. Tendencija promjene maksimalnoga glavnog naprezanja kolničke ploče razlikovala se na temelju rastućeg modula CNS-a, razmatrajući isključivo opterećenje vozila te u odnosu na teoriju povezanosti slijeganja uslijed odmrzavanja i opterećenja vozila. Zato, a kako bi se smanjilo naprezanje u kolničkoj ploči, za BFRP-CRCP kolnike u područjima smrznutog tla treba primjenjivati cementom stabilizirane nosive slojeve niskog modula.

## 5.6. Debljina nosivog sloja od vapnenačkog tla

Održavajući osnovne parametre proračuna kolničke konstrukcije stalnima, debljine nosivog sloja od vapnenačkog tla iznosile su 16, 18, 20, 22 i 24 cm kako bi se istražio utjecaj debljine sloja na naprezanja u kolničkoj ploči. U tablici 10. navedeni su rezultati proračuna.

Bez razmatranja slijeganja uslijed odmrzavanja, maksimalno glavno naprezanje u BFRP-CRCP ploči smanjivalo se s povećanjem debljine nosivog sloja od vapnenačkog tla kao što je to prikazano u tablici 10. Najveće glavno naprezanje u ploči iznosilo je 1,442 MPa pri debljini sloja od 16 cm. Najveće glavno naprezanje u ploči iznosilo je 1,154 MPa pri debljini sloja od 24 cm, što je smanjenje od 0,288 MPa. Maksimalno glavno naprezanje u kolničkoj ploči smanjivalo se u prosjeku za 0,036 MPa s povećanjem debljine nosivog sloja od vapnenačkog tla za 1 cm. Kada je razmotren utjecaj slijeganja uslijed odmrzavanja, tada se maksimalno glavno naprezanje u BFRP-CRCP ploči smanjivalo s povećanjem debljine sloja. Maksimalno glavno naprezanje iznosilo je 2,993 MPa kada je debljina sloja iznosila 16 cm, a kada se debljina sloja povećala na 24 cm, maksimalno glavno naprezanje iznosilo je 2,728 MPa, što je smanjenje od 0,265 MPa. Kada se debljina sloja povećala u prosjeku za 1 cm, maksimalno glavno naprezanje smanjilo se za 0,033 MPa. Razmatranjem isključivo opterećenja vozila ili teorije povezanosti utjecaja slijeganja uslijed odmrzavanja i opterećenja vozila, tendencija fluktuacije maksimalnoga glavnog naprezanja u kolniku s debljinom sloja bila je jednaka. Kao rezultat navedenog, u zonama permafrosta odgovarajuće povećanje debljine nosivog sloja od vapnenačkog tla učinkovito je u kontroli stanja naprezanja u kolničkoj ploči.

## 5.7. Modul nosivog sloja od vapnenačkog tla

Održavajući ostale osnovne parametre proračuna kolničke konstrukcije stalnima, ispitan je utjecaj modula nosivog sloja od vapnenačkog tla na naprezanja kolničke konstrukcije pomoću modula sloja od 1,3, 1,4, 1,5, 1,6 i 1,7 GPa. U tablici 11. prikazani su rezultati proračuna.

Bez razmatranja slijeganja uslijed odmrzavanja, maksimalno glavno naprezanje u BFRP-CRCP ploči smanjivalo se s povećanjem modula nosivog sloja od vapnenačkog tla kao što je to prikazano u tablici 11. Najveće glavno naprezanje u ploči iznosilo je 1,356 MPa kada je modul sloja iznosio 1,3 GPa;

Tablica 11. Maksimalno glavno naprezanje u ploči za različite module nosivog sloja od vapnenačkog tla

Modul nosivog sloja od vapnenačkog tla [GPa]	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
Maksimalno glavno naprezanje (bez razmatranja slijeganja uslijed odmrzavanja) [MPa]	1,356	1,304	1,243	1,208	1,169
Maksimalno glavno naprezanje (razmatrajući slijeganje uslijed odmrzavanja) [MPa]	2,785	2,832	2,894	2,966	3,065

Tablica 12. Kombinacije kolničke konstrukcije

Kolnička konstrukcija 1.	Kolnička konstrukcija 2.	Kolnička konstrukcija 3.
BFRP–CRCP kolnička ploča	BFRP–CRCP kolnička ploča	BFRP–CRCP kolnička ploča
Makadam stabiliziran cementom	Gradirani drobljeni kamen	ATB–25
Nosivi sloj od vapnenačkog tla	Makadam stabiliziran cementom	Makadam stabiliziran cementom

Tablica 13. Specifikacije materijala za svaki sloj kolničke konstrukcije

Parametri materijala	BFRP–CRCP kolnička ploča	Gradirani drobljeni kamen	Vapnenačko tlo	Cementom stabiliziran makadam	ATB–25
Debljina sloja [cm]	20 – 28	16 – 24	20	20	12
Modul [GPa]	2,4–3,2	0,3	1,5	1,2	1,2

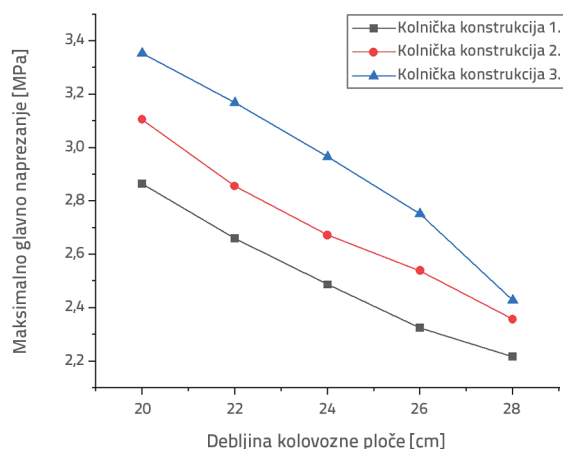
najveće glavno naprezanje u ploči iznosilo je 1,169 MPa kada je modul sloja iznosio 1,7 GPa, što je smanjenje od 0,187 MPa. Maksimalno glavno naprezanje u ploči smanjilo se za 0,037 MPa kada se modul nosivog sloja od vapnenačkog tla povećao za 100 MPa. Pri razmatranju slijeganja uslijed odmrzavanja maksimalno glavno naprezanje u ploči povećavalo se s povećanjem modula sloja. Maksimalno glavno naprezanje u ploči iznosilo je 2,785 MPa kada je modul sloja iznosio 1,3 GPa. Kada je modul sloja iznosio 1,7 GPa, tada se maksimalno glavno naprezanje u ploči povećalo za 0,28 MPa, na 3,065 MPa. Maksimalno glavno naprezanje u ploči povećalo se za 0,056 MPa kada se modul sloja povećao u prosjeku za 100 MPa. Pod dva različita uvjeta, točnije pri razmatranju i nerazmatranju slijeganja uslijed odmrzavanja, utjecaj modula nosivog sloja od vapnenačkog tla na maksimalno glavno naprezanje u ploči bio je potpuno suprotan. U skladu s utjecajem teorije povezanosti, s povećanjem modula raste i maksimalno glavno naprezanje. Posljedično, kako bi se smanjila naprezanja u ploči, modul nosivog sloja od vapnenačkog tla trebalo bi odgovarajuće smanjiti.

## 5.8. Kombinirane karakteristike naprezanja različitih BFRP–CRCP kolničkih konstrukcija

U tablici 12. prikazane su tri najčešće upotrijebljene kolničke konstrukcije CRCP-a temeljene na strukturnim svojstvima BFRP–CRCP kolnika i utjecaja slijeganja uslijed odmrzavanja tla u sjeveroistočnoj Kini. Optimalna kombinacija odabrana je nakon usporedbe utjecaja debljine pojedinih slojeva i modula na stanje naprezanja u kolničkoj ploči. U tablici 13. prikazane su specifikacije materijala za svaki sloj kolničke konstrukcije.

### 1. Utjecaj debljine kolničke ploče

Na slici 4. prikazana je promjena maksimalnih glavnih naprezanja u ploči za tri različite kombinacije kolničke konstrukcije s različitim debljinama kolničke ploče.



Slika 4. Tendencija varijacije maksimalnoga glavnog naprezanja za različite debljine kolničke ploče u tri različite kolničke konstrukcije

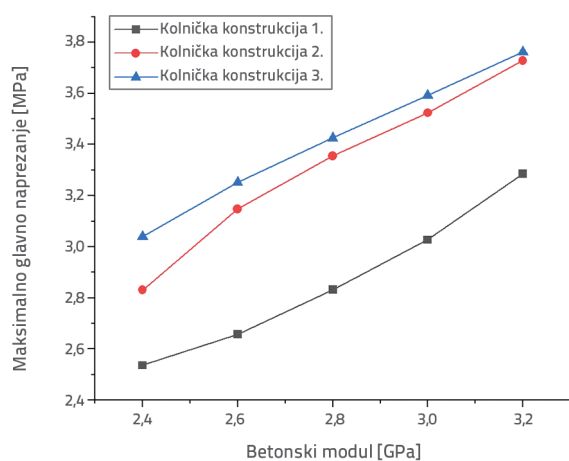
Kao što je to prikazano na slici 4., maksimalno glavno naprezanje u kolničkim konstrukcijama 1., 2. i 3. postupno se smanjivalo s povećanjem debljine kolničke ploče. Kada je debljina ploče iznosila 20 cm, tada su najveća glavna naprezanja kolničkih konstrukcija 1., 2. i 3. iznosila 2,865, 3,106 i 3,353 MPa. Kada je debljina ploče iznosila 28 cm, tada je odgovarajuće maksimalno glavno naprezanje iznosilo 2,216, 2,357 i 2,428 MPa, što odgovara smanjenju od 0,649, 0,749 odnosno 0,925 MPa.



Maksimalno glavno naprezanje u kolničkoj konstrukciji 3., sa slojem asfaltnog makadama, bilo je najveće i na njega je najviše utjecala debljina kolničke ploče.

## 2. Učinak modula betona

Na slici 5. prikazana je promjena maksimalnoga glavnog naprezanja u ploči za tri različite kolničke konstrukcije s različitim modulima elastičnosti betona.



Slika 5. Tendencija varijacije maksimalnoga glavnog naprezanja u kompozitnim pločama s različitim modulima betona u tri različite kolničke konstrukcije

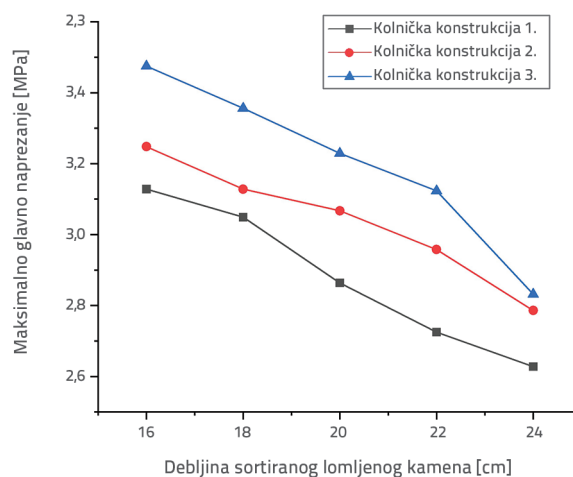
Kao što je to prikazano na slici 5., s povećanjem modula betona povećavalo se maksimalno glavno naprezanje u pločama kolničkih konstrukcija 1., 2. i 3. Kada je modul betona iznosio 2,4 GPa, tada je najveće glavno naprezanje u ploči kolničkih konstrukcija 1. – 3. iznosilo 2,536, 2,831 odnosno 3,039 MPa. Kada je modul betona iznosio 3,2 GPa, tada su maksimalna glavna naprezanja iznosila 3,285, 3,728 i 3,762 MPa, što odgovara povećanju od 0,749, 0,897 odnosno 0,723 MPa. Može se uočiti da modul betona ima znatan utjecaj na kolničke konstrukcije 1. i 3.

## 3. Utjecaj debljine sloja gradiranog šljunka

Na slici 6. prikazana je promjena maksimalnog naprezanja u ploči za tri različite kolničke konstrukcije s različitim debljinama sloja gradiranog šljunka. Kao što je to prikazano na slici 6., maksimalno glavno naprezanje u pločama kolničkih konstrukcija 1., 2. i 3. smanjivalo se s povećanjem debljine sloja gradiranog šljunka. Maksimalna glavna naprezanja kolničkih konstrukcija 1., 2. i 3. iznosila su 3,128, 3,248 odnosno 3,475 MPa, kada je debljina sloja gradiranog šljunka iznosila 16 cm. Kada je debljina sloja gradiranog šljunka iznosila 24 cm, tada su najveća glavna naprezanja iznosila 2,628, 2,786 i 2,832 MPa, što odgovara smanjenju od 0,50, 0,462 odnosno 0,643 MPa.

Na temelju veličine maksimalnoga glavnog naprezanja u betonskim kolnicima razlikuju se tri kombinacije kolničke konstrukcije: konstrukcija 1. < konstrukcija 2. < konstrukcija 3.

Iz ispitivanja utjecaja slijeganja uslijed odmrzavanja jasno je da je konstrukcija 1. najbolja BFRP-CRCP kolnička konstrukcija za primjenu na području permafrosta.



Slika 6. Tendencija varijacije maksimalnoga glavnog naprezanja za različite debljine sloja gradiranog šljunka kod tri različite kolničke konstrukcije

## 6. Zaključak

Kontinuirani armiranobetonski kolnici s ojačanjem od bazaltnih vlakana izvode se u sjeveroistočnoj Kini u područjima permafrosta. Karakteristike naprezanja BFRP-CRCP kolničke konstrukcije u područjima permafrosta analizirane su primjenom računalnog programa COMSOL, pružajući temelj za razvoj odgovarajućih BFRP-CRCP kolničkih konstrukcija. Glavni zaključci su sljedeći:

- Utjecaj slijeganja uslijed odmrzavanja na karakteristike naprezanja kolničke konstrukcije u izgradnji BFRP-CRCP kolnika u sjeveroistočnoj Kini bio je znatan. Pri projektiranju ne može se uzeti u obzir samo opterećenje vozila te se utjecaji slijeganja uslijed odmrzavanja također moraju pravilno prepoznati jer maksimalno glavno naprezanje uzrokovano utjecajem povezanosti slijeganja uslijed odmrzavanja i opterećenja vozila na kolnik u područjima permafrosta raste s vremenom.
- Kada se radi o stanju naprezanja pod utjecajem teorije povezanosti, tada je povećanje debljine betonske ploče, cementom stabiliziranoga nosivog sloja i nosivog sloja od vapnenačkog materijala smanjilo maksimalno glavno naprezanje kolničke ploče. Istodobno je povećanje modula čvrstoće betona, cementom stabiliziranoga nosivog sloja i nosivog sloja od vapnenačkog materijala povećalo maksimalno glavno naprezanje kolničke ploče. Koeficijent armiranja nije utjecao na stanje naprezanja.
- Od triju različitih kombinacija kolničke konstrukcije kolnička konstrukcija BFRP-CRCP ploča + cementom stabiliziran makadam + vapnenačko tlo bila je prikladnija za sjeveroistočno područje permafrosta, barem u smislu smanjenja maksimalnoga glavnog naprezanja u kolničkoj ploči.

## LITERATURA

- [1] Gáspár, L., Bencze, Z.: Increasing the life expectancy of road pavements, *GRADEVINAR*, 72 (2020) 6, pp. 515-522, <https://doi.org/10.14256/JCE.2644.2019>.
- [2] Stijanović, M., Radonjanin, V., Malešev, M., Milović, T., Furgan, S.: Compressive strength of cement stabilisations containing recycled and waste materials, *GRADEVINAR*, 73 (2021) 8, pp. 791-804, <https://doi.org/10.14256/JCE.3161.2021>.
- [3] Dongwei, C., Changshun, H.: Temperature relaxation stress analysis of CRCP concrete, *China Journal of Highways*, 14 (2001) 1, pp. 1-4.
- [4] Garnham, M.A.: The development of CRCP design curves", *Highways & Transportation*, 36 (1998) 12, pp. 259-281.
- [5] Minghui, Z., Unk, U.: Structural analysis and engineering application of continuous reinforced concrete pavement, Doctoral dissertation, Nanhua University, 2015.
- [6] Wang, X.: Research on basic theory test and design method of continuous reinforced concrete pavement, Doctoral dissertation, Southeast University, 1990.
- [7] Yimin, T., Xiaoming, H., Xuejun, D.: Load stress analysis of continuous reinforced concrete pavement, *Geotechnical Engineering Journal*, 18 (1996) 6, pp. 88-95.
- [8] Gao, Y., Huang, X., Chen, C.: Design method of reinforcement ratio of continuous reinforced concrete pavement based on reliability, *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 39 (2009) 4, pp. 835-839.
- [9] Zhou, Y.: Temperature stress analysis and reinforcement design of continuous reinforced concrete pavement in cold regions, Doctoral dissertation, 2006.
- [10] Zuo, Z., Zhang, H., Wang, Y.: Field test and analysis of early mechanical response of continuous reinforced concrete pavement, *Chinese Journal of Highway*, 23 (2010) 3, pp. 22-28.
- [11] Gu, X., Lu, J., Wang, W.: Analysis and comparison of basalt fibre reinforcement and reinforcement in pavement application, *Highway*, 12 (2009), pp. 54-57.
- [12] Ming, E.: Structural mechanics analysis of basalt fibre reinforced continuous reinforced concrete pavement considering impact failure, Doctoral dissertation, South China University of Technology, 2015.
- [13] Xu, Z.: Mechanical analysis and design method of continuous reinforced concrete pavement with BFRP bars, Doctoral dissertation, South China University of Technology, 2017.
- [14] Fang, F.: Experimental study on the bonding performance of basalt fibre reinforced concrete, Doctoral dissertation, Dalian University of Technology, 2009.
- [15] Zhang, X.: The bond-slip characteristics and construction technology of BFRP continuous reinforcement composite pavement materials, Doctoral dissertation, Zhejiang University, 2014.
- [16] Ji, J., Gu, X., Lu, J., et al.: Research on Construction Technology of Continuous Basalt Fiber Reinforced Cement Concrete Pavement, *Highway Traffic Technology (Applied Technology Edition)*, 5 (2009) 5, pp.37-39.
- [17] Yu, L., Qiu, J., Wang, Z.: Study on the frost heaving coupling model of roads in Changchun City, *Journal of Harbin Institute of Technology*, 4 (2011), pp. 291-294.
- [18] Mao, X., Li, N., Wang, B., et al.: Water-thermal-mechanical coupling theoretical model and numerical simulation of permafrost subgrade, *Natural Science Edition*, 26 (2006) 4, pp. 16-19.
- [19] Li, N., Xu, B., Chen, F.: The coupling analysis of temperature field, deformation field and stress field of frozen soil subgrade, *Chinese Journal of Highway*, 19 (2006) 3, pp. 1-7.
- [20] Zhu, Z., Ning, J., Ma, W.: Research on constitutive model of frozen soil based on damage and numerical simulation of water, heat and force coupling, *Scientific Report*, 21 (2010), pp. 758-772.
- [21] Zhou, J., Tan, T., Wei, C.: Experimental study on freezing temperature and supercooling temperature of soil, *Geotechnical mechanics*, 36 (2015) 3.
- [22] Li, S., Lai, Y., Pei, W., et al.: Moisture-temperature changes and freeze-thaw hazards on a canal in seasonally frozen regions, *Natural Hazards*, 72 (2014) 2, pp. 287-308.
- [23] Wang, W., Wang, L., Wang, Q.: Study on one-dimensional melting and consolidation characteristics under periodic temperature boundary conditions, *Glacier Permafrost*, 36 (2014) 4, pp. 895-901.
- [24] Ottosen, N.S.: A failure criterion for concrete", *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, 103 (1977), pp. 527-535.
- [25] Hu, Z.: The characteristics of permafrost degradation in the north of Xiaoxing' an Mountains and its influence on the stability of highway subgrade, Doctoral dissertation, Northeast Forestry University, 2017.
- [26] Lai, Y., Zhang, L., Zhang, S.: Cooling effect of rubble subgrade on Qinghai-Tibet Railway under climate warming, *Scientific Bulletin*, 3 (2003), pp. 292-297.
- [27] Yin, D.: Study on continuous reinforced concrete pavement in permafrost regions Doctoral dissertation, Southeast University, 2019.
- [28] Mingli, Z., Zongyun, G., Xiaobin, H., et al.: Analysis of coupled water and heat transfer in frozen soil based on mathematical module of COMSOL multiphysics, *Science Technology and Engineering*, 18 (2018) 33, pp. 7-12.
- [29] Jianbing, C.: Theoretical model of three-field coupling analysis of highway subgrades in permafrost regions under freeze-thaw cycles, *Highway*, 60 (2015) 10, pp. 7.
- [30] Linnan, Z.: Study on the Interfacial Layers of Different Underlying Surfaces in Plateau Permafrost Regions, *Journal of Glaciology and Geocryology*, 10 (1988) 1, pp. 8-14.