

Primljen / Received: 24.9.2019.

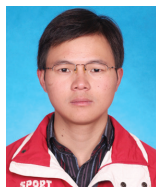
Ispravljen / Corrected: 18.1.2020.

Prihvaćen / Accepted: 9.5.2021.

Dostupno online / Available online: 10.9.2021.

Numeričko ispitivanje seizmičkog ponašanja željezničkog nasipa u hladnim područjima

Autori:

Doc.dr.sc. **Chen Tuo**, dipl.ing.građ.

Sveučilište rudarstva i tehnologije, Kina

Državni laboratorij za geomehaniku i podzemno inženjerstvo

tuo.chen@cumt.edu.cn

Autor za korespondenciju

Prof.dr.sc. **Mu Yanhu**, dipl.ing.građ.

Kineska akademija znanosti

Državni laboratorij za inženjerstvo smrznutog tla

muyanhu@lzb.ac.cnIzv.prof.dr.sc. **Wang Jianzhou**, dipl.ing.građ.

Sveučilište rudarstva i tehnologije, Kina

Državni laboratorij za geomehaniku i podzemno inženjerstvo

wjzh@cumt.edu.cnProf.dr.sc. **Zhang Junwei**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Southwest Petroleum, Kina

Fakultet geoznanosti i tehnologije

zhangjun_wei@126.com

Prethodno priopćenje

Chen Tuo, Mu Yanhu, Wang Jianzhou, Zhang Junwei

Numeričko ispitivanje seizmičkog ponašanja željezničkog nasipa u hladnim područjima

U ovom radu provedene su iscrpne rasprave i analize primjenom numeričkih tehnika, a s ciljem da se posve ispita seizmičko ponašanje željezničkog nasipa Qinghai-Tibet. Točnije, provedena je analiza jednodimenzionalnog ekvivalentnog linearnog odziva tla u područjima permafrosta. Na temelju toga, seizmički odziv tipičnog željezničkog nasipa dalje se ispitao nelinearnim dinamičkim proračunom metodom konačnih elemenata. To je rezultiralo određivanjem nelinearnog ponašanja tla na području permafrosta (stalno smrznuto tlo), a raspravljalo se o dinamičkom ubrzanju, brzini i pomaku nasipa te se predvidjela približna kvantitativna ocjena. Rezultati upućuju na to da dinamički odziv nasipa ima izrazito nelinearna svojstva. Koeficijent vršnog ubrzanja tla na kruni nasipa veći je nego na prirodnoj površini tla, a označava povećanje od 73% u odnosu na koeficijent na prirodnoj površini tla. Kada seizmički intenzitet postigne određenu vrijednost, područje plastičnosti postupno se pojavljivalo na nasipu, a postoji i kontinuirano proširenje područja plastičnosti koje je povezano s povećanjem vršnog ubrzanja ulaznog seizmičkog vala. Rezultati istraživanja mogu dati uvide i imati značajne implikacije za daljnje istraživanje hladnih područja.

Ključne riječi:

permafrost, dinamičko ponašanje, seizmički odziv, područje plastičnosti

Research Paper

Chen Tuo, Mu Yanhu, Wang Jianzhou, Zhang Junwei

Numerical investigation of seismic behaviour of railway embankments in cold regions

To investigate more fully seismic behaviour of the Qinghai-Tibet railway embankment, a comprehensive discussion and analysis is conducted in this paper by applying a numerical technique. Specifically, the one dimensional equivalent linear ground response analysis was conducted in permafrost regions. On this basis, the seismic response of a typical railway embankment was further studied by applying the nonlinear dynamic finite element analysis method. As a result, nonlinear behaviour of permafrost sites was determined, and the dynamic acceleration, velocity and displacement of the embankment was discussed and the quantitative assessment was approximately estimated. The results indicate that the dynamic response of the embankment has distinct nonlinear characteristics. The peak ground acceleration coefficient at the embankment shoulder is larger than the natural ground surface, marking a 73% increase compared to the coefficient on the natural ground surface. When the seismic intensity reaches a certain value, a plastic zone gradually appears in the embankment, and a continuous extension of the plastic zone can be noted with an increase in peak acceleration of the input seismic wave. The findings of this research may provide an additional insight and have significant implications for further research of cold regions.

Key words:

permafrost, dynamic behaviour, seismic response, plastic zone

1. Uvod

Područje permafrosta, odnosno trajno smrznuto tlo, odnosi se na tlo čija je temperatura konstantno ispod 0 °C barem dvije godine zaredom. Visoravan Qinghai-Tibetan (QTP) najviša je i jedna je od najopsežnijih visoravni na svijetu koja ima najveće prostranstvo uzdignutog područja permafrosta. Procjenjuje se da je područje permafrosta na QTP-u $1,3 \times 10^6$ km² [1, 2]. Štoviše, QTP leži na jednom od svjetski najaktivnijih seizmičkih područja koje su pogodila 33 Ms 6,0 – 6,9 potresa te 3 Ms 7.0–8.5 potresa od 1980. godine [3, 4]. Potres Ms 8.1 Central Kunlun koji se dogodio 14. studenoga 2001. proizveo je gotovo 400 km dugačko područje s pukotinama na površini sa 16,3 m lijevog bočnog pomaka po pružanju duž aktivnog rasjeda Kunlun na sjevernom Tibetu [5]. Otkriveno je da oblici devastacije na područjima koja su podlegla permafrostu uglavnom uključuju pomake rasjeda, pukotine, likvefakciju, slijeganje uslijed potresa te urušavanje terena.

Mnogi istraživači proučavaju dinamička svojstva smrznutog tla primjenom laboratorijskih i terenskih vrijednosti. Područje permafrosta posebna je vrsta tla koja je jako osjetljiva na promjene temperature [6]. Svojstva područja permafrosta u velikoj mjeri ovise o temperaturi. Drastičnu promjenu u dinamičkom odzivu može izazvati čak i relativno mala promjena temperature. Tako je, primjerice, Youngov modul elastičnosti smrznutog tla u magnitudama od deset do sto puta veći nego onaj nesmrznutog tla, a smrznuto tlo karakteriziraju veće posmične brzine vala u usporedbi s nesmrznutim tlima [8-11]. Temperatura tla ima velik utjecaj na posmični modul i koeficijent prigušenja, a takva promjena u dinamičkim svojstvima tla može značajno promijeniti seizmički odziv lokacije, kao i seizmički odziv infrastrukture. Ipak, dosad se proveo samo ograničeni broj istraživanja kako bi se ispitao utjecaj permafrosta na seizmički odziv lokacije. Vinson [12] je proučio seizmički odziv lokacije debelog permafrosta i zaključio da bi seizmički odziv debelog sloja permafrosta bio sličan stijeni. Sritharan i dr. [13] ispitali su utjecaj sezonski smrznutog tla na seizmičko ponašanje mostova. Yang i dr. [14] proučili su svojstva gibanja tla u područjima permafrosta na Aljasci primjenom jednodimenzionalne ekvivalentne linearne analize. Wang i dr. [15] proučili su svojstva gibanja tla na lokaciji permafrosta pod različitim temperaturama i saželi utjecaje zemljine temperature na parametre gibanja tla. Chen i dr. [16] raspravljali su o utjecaju promjene permafrosta na seizmički odziv lokacije i zaključili da su na parametre gibanja tla značajno utjecali permafrost i aktivna debljina sloja. U prethodno spomenutim istraživanjima provedenim u područjima permafrosta, većina seizmičkih odziva koje daju područja permafrosta provode se samo na temelju jednodimenzionalnog modela i rijetko se mogu povezati s odzivom infrastrukture u hladnim područjima.

Iz tog razloga najvažnije je razumjeti na koji način permafrost utječe na svojstva gibanja tla pri različitim razinama intenziteta gibanja tla, te bi se zato kvantitativna analiza lokacije i infrastrukture trebala dalje proučavati. Rad predstavlja

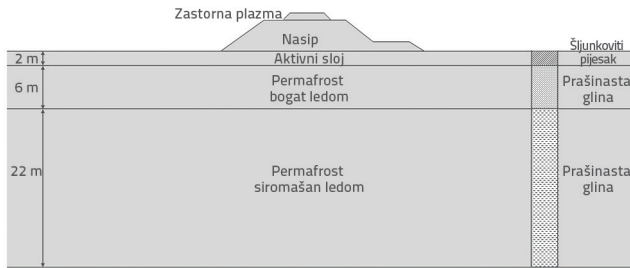
kvantitativnu procjenu seizmičkog odziva lokacije, uzimajući u obzir toplinsko stanje aktivnog sloja. Odabran je dio nasipa smještenog na odsječku Beiluhe željeznice Qinghai-Tibet (QTR) kako bi predstavio tipični profil tla. Usvojena je jednodimenzionalna ekvivalentna linearna analiza kako bi se analizirao seizmički odziv lokacije na različite stupnjeve seizmičke opasnosti, a odredili su se odzivi lokacije u različitim sezonama. Zatim je seizmički odziv tog nasipa određen nelinearnim dinamičkim proračunom metodom konačnih elemenata te se napravila približna kvantitativna procjena. Rezultati ovog istraživanja bit će od teorijskog i praktičnog značenja za potresnu otpornost i sprječavanje katastrofa u hladnim područjima Kine.

2. Opis lokacije

Na temelju *in situ* istraživanja i eksperimentalnih analiza te na temelju prethodnih inženjerskih iskustava u područjima permafrosta, srednja godišnja temperatura tla (eng. *mean annual ground temperature* - MAGT) u širokoj je upotrebi u područjima permafrosta s ciljem da se procijeni toplinska stabilnost permafrosta. MAGT je temperatura tla na dubini profila gdje je doseg godišnje temperature blizu nule. Nadalje, sadržaj volumena leda (eng. *ice volume* - *iv*) drugi je ključni čimbenik koji utječe na mehanička svojstva smrznutoga tla [17]. Trenutačno, MAGT od -1 °C definiran je kao temperaturna granica između toplih i hladnih područja permafrosta [18]. Područje permafrosta koje sadrži više od 20 % udjela leda odredilo se kao područje permafrosta bogato ledom [19, 20]. U svjetlu tih podjela, željeznica QTR prešla je 550 km područja permafrosta uključujući 275 km toplih područja permafrosta, 221 km područja permafrosta bogatog ledom te 124 km toplih i ledom bogatih područja permafrosta [21].

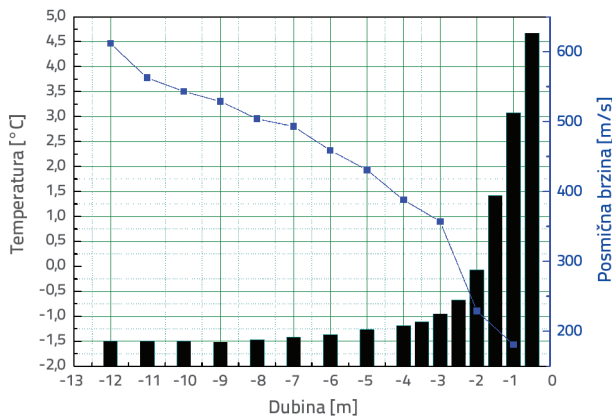
Odsječak Beiluhe željeznice QTR (34°51.26' N, 92°56.35' E) nalazi se na području (QTP) visoravni gdje je suha klima, a na kojem razdoblje smrzavanja traje od rujna do sljedećeg travnja. Najviša godišnja temperatura na tom području iznosi 23,2 °C, najmanja -37,7 °C, a prosječna -3,8 °C [22]. Na odsječku Beiluhe vrijednost MAGT varira između -1,41 i -1,68 °C [23]. U okolišu koji sadrži permafrost aktivni sloj je gornji sloj tla koji se otapa tijekom ljeta te se smrzava opet tijekom jeseni. Ispod aktivnog sloja nalazi se permafrost, a prirodna je površina permafrosta na tom odsječku između -2 m i -3 m. Litologiju tog odsjeka čine šljunkoviti pijesak, prašinsto glina i muljnjak. Obilat je debeli ledeni sloj koji se nalazi ispod, u blizini prirodne površine permafrosta, a na lokaciji postoje vremenske i prostorne varijacije toplinskih režima permafrosta. Odsječak Beiluhe smatra se nezahvalnim i lošim dijelom i sa stajališta geološkog inženjerstva [24].

Slika 1. ilustrira prikaz profila i stratigrafsku konfiguraciju tipičnog tradicionalnog nasipa na odsječku Beiluhe K1137+700 željeznice QTR. Taj se nasip odabire kao cilj ovog istraživanja, a površina permafrosta ispod tog nasipa debela je približno 2 m. Ispod površine permafrosta od vrha do dna razvijaju se permafrost bogat ledom (20 % < *iv* ≤ 30 %) i onaj siromašan ledom (*iv* ≤ 10 %). Izmjerena debljina permafrosta bogatog ledom iznosi 6 m, a debljina permafrosta siromašnog ledom iznosi 22 m.



Slika 1. Prikaz profila i stratigrafske konfiguracije tipičnog željezničkog nasipa

Slika 2. prikazuje krivulje temperature tla i brzine posmičnih valova (eng. *shear wave velocity* - VS) tipičnih bušotina na odsječku Beiluhe K1137+700 željeznice QTR izmjerene u srpnju 2012. Uočeno je da se brzina posmičkih valova u tlu povećava značajno u blizini gornje granice permafrosta. Nadalje, temperatura tla može dosegnuti -1,5 °C na dubini od 12 m, a VS smrznutoga tla može dosegnuti i do 620 m/s.



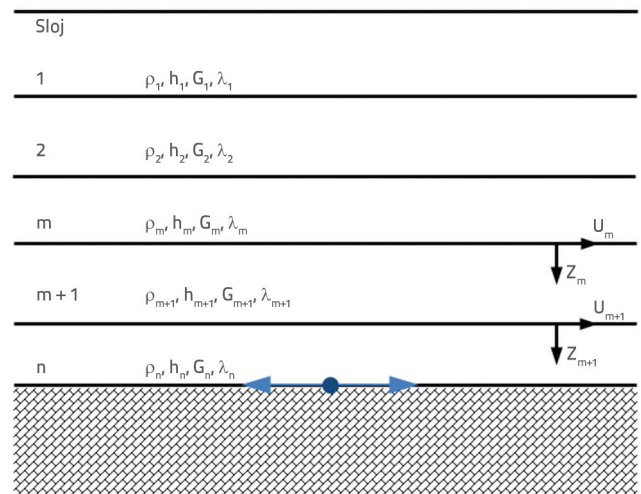
Slika 2. Temperatura tla i varijacija brzine posmičnih valova i dubine

3. Seizmički odziv lokacija permafrosta

3.1. Model seizmičkog odziva

Ključno je razumjeti utjecaje lokacije na seizmičku pobudu kako bi se poboljšala procjena seizmičke opasnosti. U ovom istraživanju primijenjena je jednodimenzionalna ekvivalentna linearna metoda [25, 26]. Dokazalo se da su rezultati izračuna tehnički prihvatljivi kad je amplituda deformacije tla pri smicanju manja od otprilike 1–2 %, a ubrzanja površine tla manja od otprilike 0,3–0,4g [27]. Ta je metoda implementirana na temelju teorije širenja elastičnog vala uz pretpostavku vertikalnog širenja horizontalnih posmičnih valova kroz. Tada se može matematički opisati širenje seizmičkih valova rješavanjem valne jednadžbe. Profil tla diskretizira

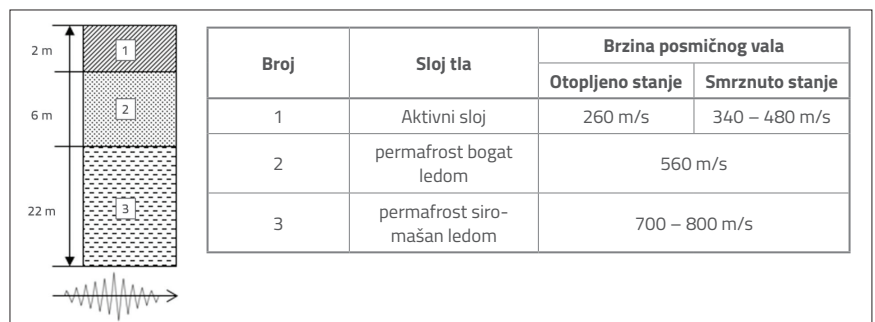
se u sustav posmičnih greda s više stupnjeva slobode, kao što to prikazuje slika 3. Smatra se da je svaki sloj *m* homogen i izotropan te ga opisuju modul posmika G_m , gustoća tla ρ_m , koeficijent prigušenja λ_m i debljina h_m , te normalizirani modul posmika G_m/G_{max} (G_{max} je maksimalni modul posmika), a koriste se za prikaz krivulje smanjenja modula. Zatim se izvodi iterativni izračun primjenom određenih računskih parametara, pa se tada nelinearni problem pretvara u linearni.



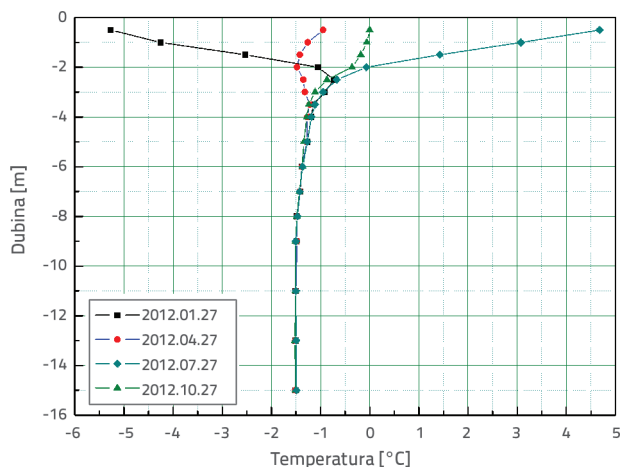
Slika 3. Jednodimenzionalna idealizacija horizontalno uslojenog tla

3.2. Shema numeričkog izračuna

Shema numeričkog modela izrađena je na temelju geologije odsječka Beiluhe s ciljem da se izračuna seizmički odziv u područjima permafrosta (slika 4.). Taj model za jednodimenzionalnu analizu odziva lokacije sadrži tri sloja: gornji aktivni sloj, sloj permafrosta bogat ledom i sloj permafrosta siromašan ledom kao što to prikazuje slika 4. Krivulje temperature izmjerene u različito vrijeme 2012. godine na odsječku Beiluhe prikazane su na slici 5. Aktivni je sloj smrznut u hladnoj sezoni, a potom se topi u toploj sezoni, dok je permafrost uvijek smrznut i temperatura je približno -1,5 °C. Iz tog razloga uzima se u obzir toplinsko stanje aktivnog sloja u sljedećem izračunu. Temperatura je aktivnog sloja u hladnim sezonama -1 i -5 °C, a oko 5 °C u toploj sezoni.



Slika 4. Model za jednodimenzionalnu analizu odziva lokacije

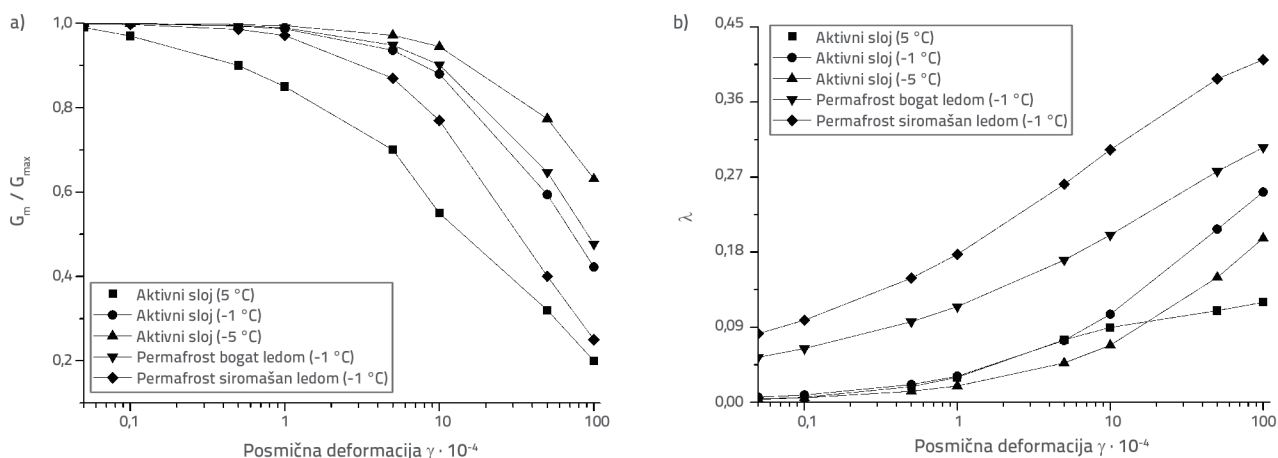


Slika 5. Krivulje koje prikazuju temperature izmjerene na odsječku Beiluhe

Tablica 1. prikazuje relevantne parametre jednodimenzionalnog modela. Pretpostavlja se da tla koja imaju istu litologiju, imaju isti raspon modula posmika i koeficijenta prigušenja, dok s

Tablica 1. Parametri tla prema jednodimenzionalnom modelu

Sloj	Litologija	Temperatura [°C]	Debljina [m]	Jedinična težina [kN/m ³]	V _s [m/s]
Aktivni sloj	šljunkoviti pijesak	5	2	18,0	270
		-1	2	18,0	400
		-5	2	18,0	500
Ledom bogati permafrost	prašinstava glina	-1,5	6	16,0	560
Ledom siromašni permafrost	praškasta glina	-1,5	5	18,0	700
		-1,5	6	18,4	730
		-1,5	5	18,7	750
		-1,5	6	19,1	780
Matična stijena	muljnjak			22,0	800

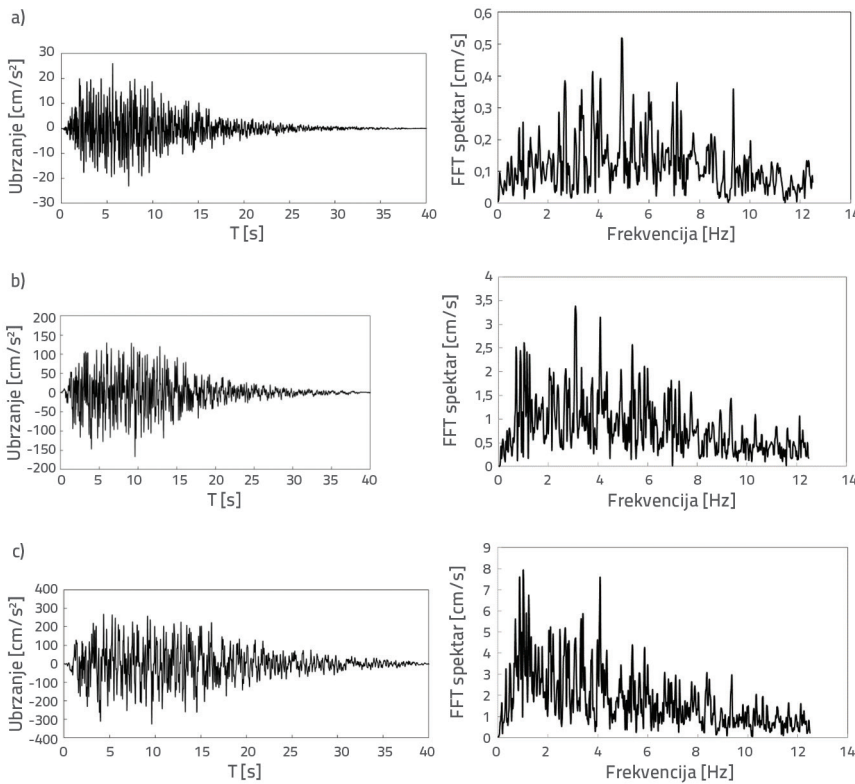


Slika 6. Dinamički parametri tipičnog smrznutog tla: a) G_m/G_{max} vs γ ; b) λ vs γ

druge strane, gustoće i brzine posmičnih valova različite su na različitim dubinama [28]. U tablici 1. prikazane su brzine posmičnih valova u slojevima tla na različitim dubinama, određene prema terenskim i laboratorijskim ispitivanjima brzine širenja posmičnih valova. Tada se izračunava seizmički odziv lokacije primjenom ekvivalentne linearne metode.

3.3. Dinamički parametri

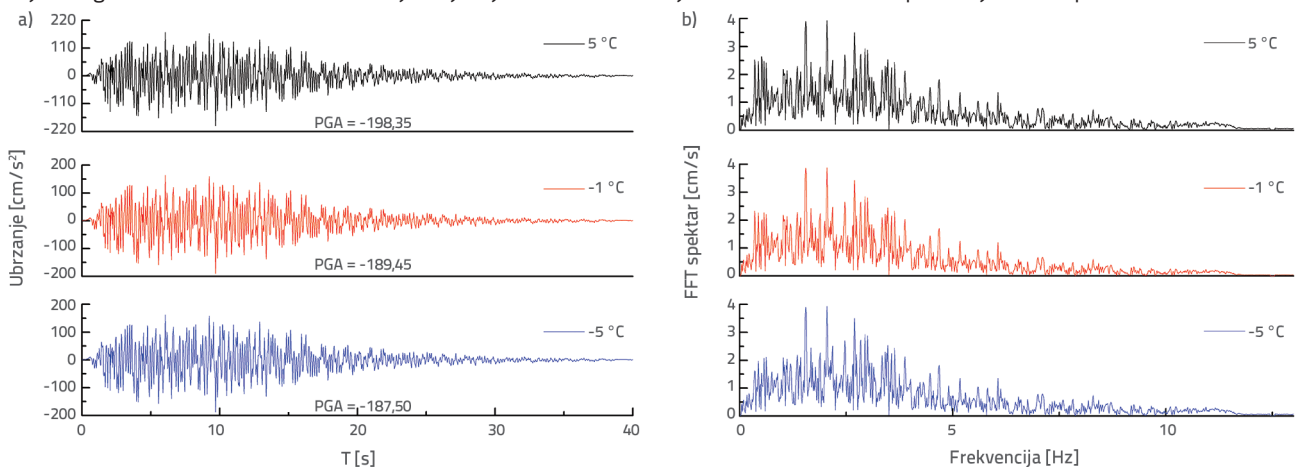
Modul posmika i koeficijenti prigušenja dva su najvažnija parametra u dinamičkoj analizi, a varijacije tih parametara zajedno s amplitudom deformacije pri smicanju mogu se tada ispitati u laboratoriju. Proveden je niz triaksijalnih ispitivanja smrznutoga tla u Državnom laboratoriju za inženjerstvo smrznutoga tla u Kineske akademije znanosti. Tada su se odredili normalizirani modul posmika G_m/G_{max} i koeficijenti prigušenja. Slika 6. prikazuje varijaciju dinamičkih parametara tipičnog smrznutog tla. Povećanjem posmične deformacije γ , dinamički se modul posmika G_m/G_{max} smanjuje, a koeficijenti prigušenja λ također se povećavaju.



Slika 7. Ulazne vrijednosti ubrzanja dobivene vremenskom diskretizacijom te njihova svojstva prema Fourierovom spektru signala: a) 63,5 % vjerojatnosti premašivanja u razdoblju od 50 godina; b) 10,0 % vjerojatnosti premašivanja u razdoblju od 50 godina; c) 2,0 % vjerojatnosti premašivanja u razdoblju od 50 godina

3.4. Seizmička ulazna gibanja

Svojstva gibanja tla trebaju se uzeti u obzir kada se provode analize odziva lokacije. S obzirom na raspodjelu seizmičkog intenziteta i parametre gibanja tla na visoravni QTP, u ovom radu su kao ulazni parametri na matičnoj stijeni korišteni umjetno generirani seizmički valovi koji uključuju tri različita



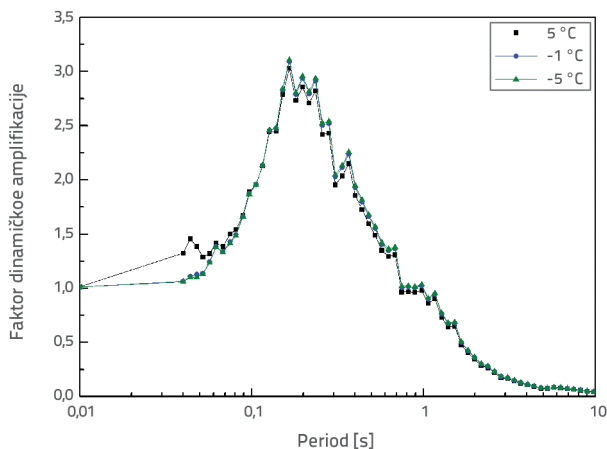
Slika 8. Ubrzanje tla dobiveno vremenskom diskretizacijom uzimajući u obzir aktivni sloj pod različitim temperaturama: a) Krivulje ubrzanja dobivene vremenskom diskretizacijom; b) Krivulje Fourierovog spektra odziva

stupnja intenziteta [29]. Tri stupnja intenziteta definiraju se kao vjerojatnosti premašivanja koje iznose 63 % u razdoblju od 50 godina, odnosno 10 % u razdoblju od 50 godina te 5 % u razdoblju od 50 godina. Slika 7. prikazuje ulazne vrijednosti ubrzanja dobivene postupkom vremenske diskretizacije te njihova svojstva prema Fourierovom spektru signala. U slučaju manjeg potresa (a), vrhunac ubrzanja iznosi 26 cm/s², srednje jakog potresa (b) 167 cm/s² te jakog potresa (c) 326 cm/s².

3.5. Karakteristike seizmičkog odziva nalazišta

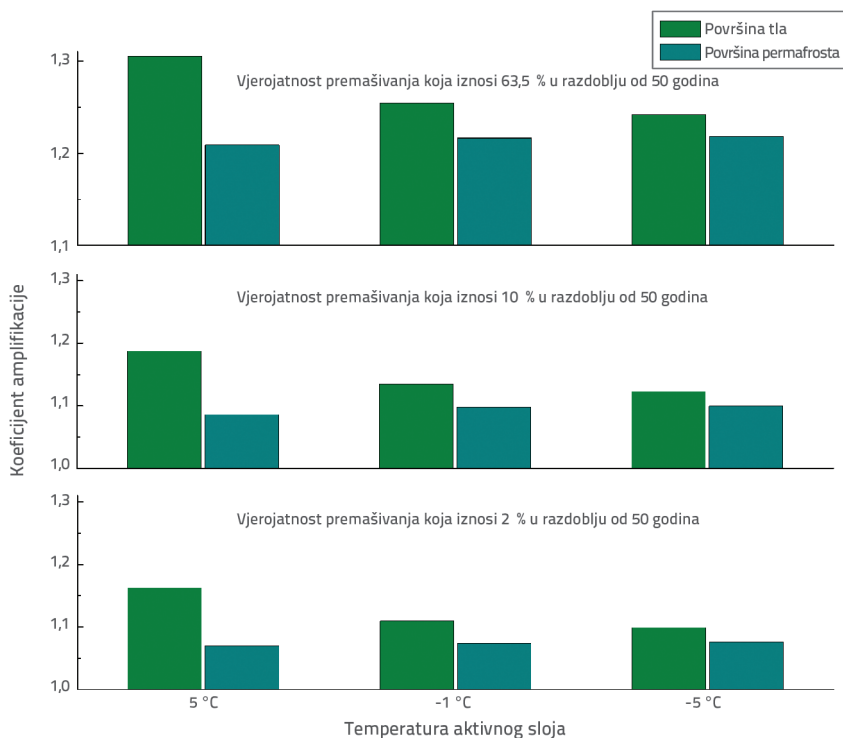
Na slici 8.a prikazane su vrijednosti ubrzanja tla dobivene postupkom vremenske diskretizacije na odsječku Beiluhe željeznice QTR, a koje je pod utjecajem seizmičkog gibanja s vjerojatnosti premašivanja od 10 % u razdoblju od 50 godina. Karakteristike spektra tih oblika valova prikazane su na slici 8.b. Intuitivno se može vidjeti da je fazna razlika vremenskog intervala relativno mala, a karakteristike spektra gotovo su jednake pod različitim toplinskim uvjetima. Vršna akceleracija tla (PGA) iznosi 198,35 cm/s² kad je aktivni sloj temperature 5 °C, a ta se vrijednost smanjuje na 187,50 cm/s² pri temperaturi -1 °C. Vrijednost PGA povećava se s povećanjem temperature aktivnog sloja, što se može i očekivati zbog uskladištenja energije i disipacije u toplinski omekšanom sloju. Normalizirani spektri odziva ubrzanja prikazani su na slici 9. Može se vidjeti da je faktor dinamičke amplifikacije (DAF) spektra odziva u hladnim

područjima bio otprilike 3,0. Taj pokazatelj označava omjer maksimalnog ubrzanja mase do konkretno vršne akceleracije tla, a koji se temelji na modelu s jednom masom, te odražava dinamički odziv elastične strukture. Na temelju podataka sa slike 9. očito je da je vrijednost DAF gotovo jednaka u slučaju kad aktivni sloj ima različite temperature. Može se uočiti da varijacija u toplinskim uvjetima aktivnog sloja ne mijenja pripadajuća svojstva lokacije. Varijacija krutosti aktivnog sloja može imati malo utjecaja na spektar odziva.



Slika 9. Spektri ubrzanja koji uzimaju u obzir aktivni sloj pod različitim temperaturama

Rezultati izračuna pokazuju kako utjecaj seizmičke amplifikacije postoji na lokaciji Beiluhe. U ovom radu izveden



Slika 10. Raspodjela koeficijenata amplifikacije vršnog ubrzanja tla s temperaturama aktivnog sloja

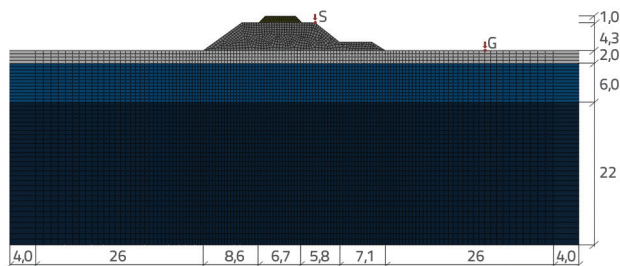
je koeficijent amplifikacije (Camp) kako bi se kvantificirao i procijenio taj utjecaj. Taj je koeficijent definiran kao omjer vršnog ubrzanja tla u odnosu na ulazno seizmičko ubrzanje (eng. *input seismic acceleration* - ISA). Slika 10. prikazuje raspodjelu koeficijenta amplifikacije vršnog ubrzanja tla na površini terena i na površini permafrosta s temperaturama aktivnog sloja, za umjetno generirane seizmičke valove s različitim vjerojatnostima premašivanja u 50 godina. Ustanovilo se da je vršna akceleracija tla bila najveća za vrijeme topljenja aktivnog sloja tijekom toplijih sezona. Vršna akceleracija tla na površini permafrosta ima približno iste vrijednosti, što pokazuje da toplinsko stanje aktivnog sloja uglavnom utječe na dinamički odziv plitkih slojeva tla koji se nalaze iznad površine permafrosta u područjima permafrosta. Jednako tako, slika 10. predstavlja nelinearnost koeficijenta amplifikacije vršnog ubrzanja tla. Intenzitet seizmičke gibanja ima značajan utjecaj na učinak seizmičke amplifikacije. Vrijednosti koeficijenata amplifikacije vršnog ubrzanja tla smanjuju se s 1,3 na 1,1 povećavanjem ulaznog seizmičkog ubrzanja s 26 cm/s² na 326 cm/s². Važno je istaknuti da se tijekom većeg ulaznog seizmičkog ubrzanja vrijednosti koeficijenata amplifikacije vršnog ubrzanja tla mogu se dalje smanjivati, čak toliko da nema učinka amplifikacije.

4. Seizmički odziv nasipa

Na osnovi navedene analize i rasprave, seizmički je odziv lokacija na područjima permafrosta najjači tijekom toplih sezona, a proučavaju se i utjecaji seizmičke amplifikacije lokacije. Iz tog razloga primjenom dinamičke metode analize konačnih elemenata odabire se nasip u toploj sezoni kao tipični slučaj, a seizmički odziv proučava se primjenom programa ABAQUS.

4.1. Numerički model i parametri

Numerički model za proračune metodom konačnih elemenata tipičnog tradicionalnog željezničkog nasipa odsjeka Beiluhe željeznice QTR izrađen je na temelju geološke prospekcije terena i strukture nasipa. Slika 11. prikazuje numerički model za analize. Taj numerički model sastoji se od pet slojeva (balast je jedan sloj), a oni su u skladu s stratigrafijom naznačenom na slici 1. U numeričkom slučaju, nasip i aktivni sloj su u otopljenom stanju, a donji sloj tla je permafrost. Dodijeljene su i različite gustoće te mehanički parametri koji odgovaraju jednodimenzionalnom modelu.



Slika 11. Numerički model analize metodom konačnih elemenata

Numerički izračun u ovoj simulaciji izvodi se na temelju pretpostavke o ravninskom stanju deformacija, a tipična dimenzija elemenata iznosi približno 1x1 m. Kako bi se smanjio utjecaj graničnih uvjeta na refleksiju energije i svojstva transmisije, beskonačni elementi koriste se kako bi simulirali bočne rubne uvjete, a umjetni rubni uvjet koristi se kao donja granica. Horizontalni pomak je na dnu oslobođen, a tri umjetno generirana seizmička vala prehodno spomenuta (slika 3.) koriste se kao ulazni horizontalni seizmički valovi za numerički izračun. Uzimajući u obzir svrhu i važnost istraživanja, točka opažanja G na prirodnoj površini tla grupira se s točkom opažanja na kruni nasipa S.

U dinamičkoj analizi metodom konačnih elemenata tlo se smatra elastičnoplastičnim materijalom, a njegov modul posmika (G_{max}) može se odrediti prema brzini širenja posmičnih valova (V_s) i gustoći tla (ρ), i to izrazom (1):

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (1)$$

Gdje se brzina širenja posmičnih valova (V_s) i gustoća tla (ρ) određuju u skladu s parametrima tla jednodimenzionalnog modela prikazanog u tablici 1. Nadalje, koristi se elastični, sasvim plastični konstitutivni model koji uzimajući u obzir Mohr–Coulombov kriterij sloma [30]. Na temelju velikog broja mehaničkih ispitivanja smrznutog tla dokazano je da je Mohr–Coulombov kriterij sloma prikladan za smrznuto tlo [31–33]. Fizička i mehanička svojstva tla u numeričkom

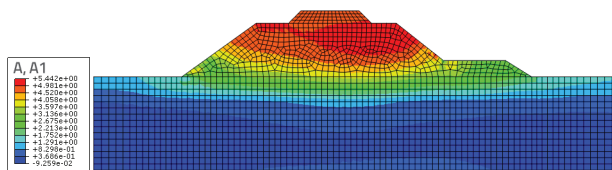
Tablica 2. Fizička i mehanička svojstva tla u numeričkom izračunu

Litologija	Temperatura [°C]	Gustoća [kN/m ³]	Dinamički modul posmika [kPa]	Poissonov koeficijent	Kohezija [kPa]	Kut unutarnjeg trenja [°]
Zastorna prizma	5	20,0	$2,86 \cdot 10^5$	0,30	/	/
Nasip	2	19,0	$2,26 \cdot 10^5$	0,31	30	23
Aktivni sloj	0,5	18,0	$1,32 \cdot 10^5$	0,35	150	22
Permafrost bogat ledom	-1,5	16,0	$5,02 \cdot 10^5$	0,35	340	39
Permafrost siromašan ledom	-1,5	18,5	$1,04 \cdot 10^6$	0,35	320	34

izračunu, kao što je prikazano u tablici 2., određuju se dinamičkim triaksijalnim ispitivanjima smrznutog tla [34–38].

4.2. Numerički rezultati i analize

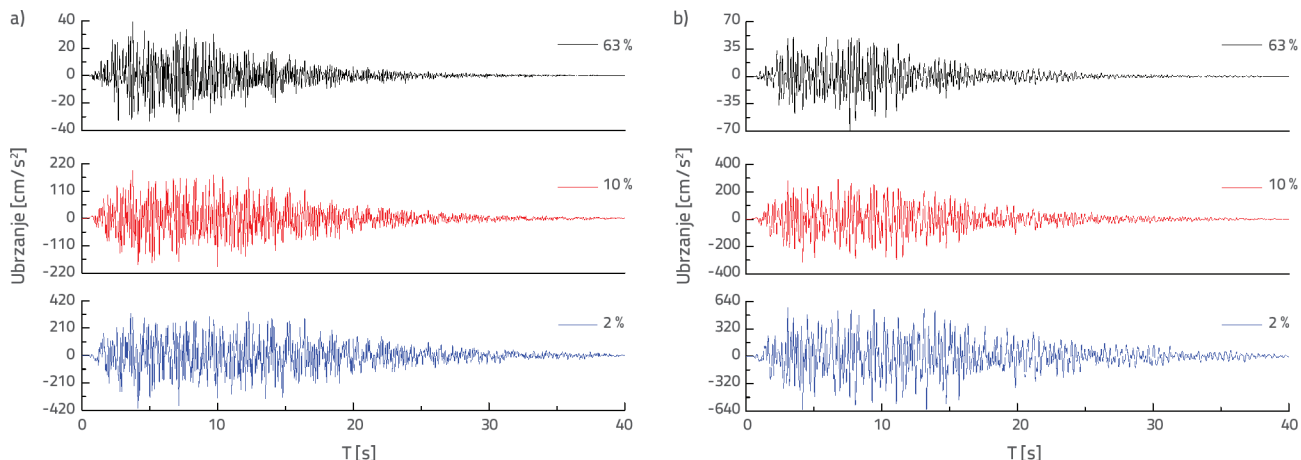
Slika 12. prikazuje konture horizontalnog ubrzanja u trenutku vršnog ubrzanja pod utjecajem jakog potresa, s 2 % vjerojatnosti premašivanja u razdoblju od 50 godina. Rezultati pokazuju da je ubrzanje nasipa uslijed pobude veće nego ubrzanje na površini terena. Energija se nakuplja na nasipu zbog refleksije i refrakcije seizmičkog vala tijekom širenja vala nasipom.



Slika 12. Konture horizontalnog ubrzanja nasipa (2,0 % vjerojatnosti premašivanja u razdoblju od 50 godina) (jedinica: m/s²)

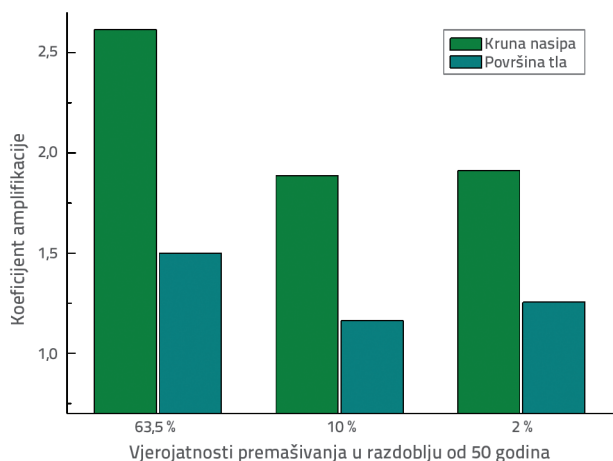
U ovom radu rezultati analize seizmičkog odziva lokacije smatraju se prihvatljivima. Zatim se rezultati dvodimenzionalne simulacije uspoređuju s rezultatima jednodimenzionalnog modela. U ovom istraživanju izdvaja se krivulja vremenskog zapisa ubrzanja tla u točki motrenja G na prirodnoj površini tla, a maksimalna vrijednost uspoređuje se s vrijednosti PGA koja je rezultat seizmičkog odziva lokacije.

Slika 13. prikazuje vremenske zapise ubrzanja tla u točkama motrenja G i S, i to pod utjecajem seizmičkog gibanja s različitim vjerojatnostima premašivanja u razdoblju od 50 godina. Usporedbom se utvrdilo da se dvodimenzionalni rezultati simulacije znatno poklapaju s rezultatima jednodimenzionalnog modela. Nadalje, uspoređujući različite točke motrenja, maksimalna ubrzanja na kruni nasipa veća su nego na prirodnoj površini tla.



Slika 13. Vremenski zapisi ubrzanja tla promatrani u dvije točke motrenja: a) točka motrenja G; b) točka motrenja S

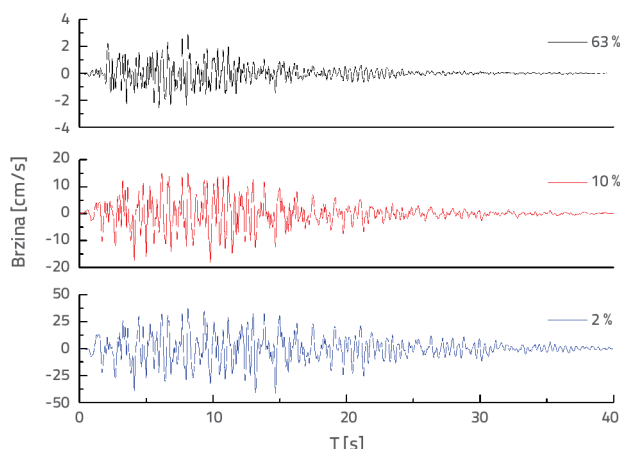
Slika 14. prikazuje raspodjelu koeficijenata amplifikacije PGA na različitim točkama motrenja s vjerojatnostima premašivanja. Koeficijent amplifikacije vršnog ubrzanja tla kad je riječ o prirodnoj površini tla, iznosi 1,5 tijekom manjeg potresa. Koeficijent amplifikacije na točki motrenja na kruni nasipa penje se do 2,6 tijekom manjeg potresa, što čini 73 % povećanja u usporedbi s koeficijentom na prirodnoj površini tla. Tijekom srednje velikih i velikih potresa koeficijent amplifikacije vršnog ubrzanja tla u slučaju prirodne površine tla uglavnom zadržava svoju vrijednost čineći 58 % povećanja. Koeficijent amplifikacije smanjit će se povećanjem intenziteta. Kad intenzitet dosegne određenu razinu, taj će koeficijent gotovo zadržati svoju vrijednost.



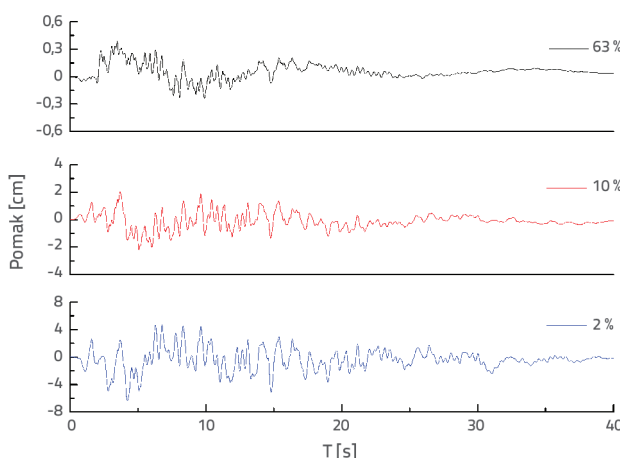
Slika 14. Varijacija koeficijenata amplifikacije PGA s vjerojatnostima premašivanja

Slika 15. prikazuje brzinu dobivenu postupkom vremenske diskretizacije na kruni nasipa u horizontalnom smjeru, pri seizmičkim pobudama različitih stupnjeva intenziteta. Maksimalne brzine na kruni nasipa iznose 3 cm/s u slučaju malog potresa, 18 cm/s u slučaju srednje velikog potresa te 42 cm/s u slučaju velikog potresa. Slika 16. prikazuje pomak na kruni nasipa u horizontalnom smjeru koji je dobiven postupkom

vremenske diskretizacije. U slučaju malog potresa maksimalni pomak na ramenu nasipa iznosi 0,4 cm, u slučaju srednje velikog potresa iznosi 2,2 cm, odnosno 6,2 cm u slučaju velikog potresa.

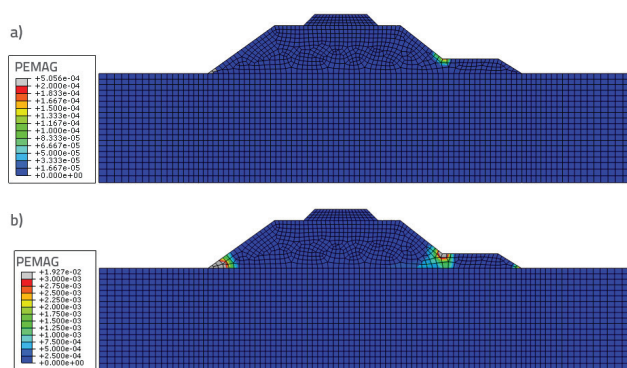


Slika 15. Krivulje koje prikazuju brzine dobivene postupkom vremenske diskretizacije na kruni nasipa u horizontalnom smjeru



Slika 16. Krivulje koje prikazuju pomake dobivene postupkom vremenske diskretizacije na kruni nasipa u horizontalnom smjeru

Analiza dinamičkih svojstava poput gore navedenog ubrzanja, brzine i pomaka pokazuje da dinamički odziv nasipa ima posebne nelinearne karakteristike. Slika 17. pokazuje magnitudu plastičnih deformacija nasipa u trenutku vršnog ubrzanja pod utjecajem seizmičke pobude sa 10 % i 2 % vjerojatnosti premašivanja u razdoblju od 50 godina. Kada seizmička pobuda dosegne određenu vrijednost, područje plastifikacije postupno se pojavljuje na nasipu te se kontinuirano proširuje povećanjem intenziteta potresa. Vidljivo je da tlo u nožici nasipa ulazi u stanje plastičnosti, a magnituda plastične deformacije dostiže $5 \cdot 10^{-3}$ u trenutku vršnog ubrzanja i to pod seizmičkim gibanjem sa 10 % vjerojatnosti premašivanja u razdoblju od 50 godina, dok ta vrijednost dostiže $1,9 \cdot 10^{-2}$ pod seizmičkim gibanjem sa 2 % vjerojatnosti premašivanja u razdoblju od 50 godina.



Slika 17. Konture plastičnih deformacija u nasipu: a) 10,0 % vjerojatnosti premašivanja u razdoblju od 50 godina; b) 2,0 % vjerojatnosti premašivanja u razdoblju od 50 godina

5. Rasprava na temelju rezultata

Dinamički odziv plitkog sloja tla iznad površine permafrosta uglavnom je uvjetovan toplinskim stanjem aktivnog sloja. Dinamički odziv permafrosta ograničen je smrzavanjem aktivnog sloja uglavnom zbog promjene dinamičkih svojstava tla tijekom procesa smrzavanja i topljenja. Međutim, dinamičke promjene mehaničkih parametara tla iz sezone u sezonu možda nisu dostatne kako bi promijenile svojstva lokacije u područjima permafrosta, to više što su spektri odziva lokacije gotovo isti uz različita toplinska stanja aktivnog sloja. Jednako tako, utjecaji lokacije na seizmički odziv vezani su uz sami seizmički val, poput "near-field" i "far-field" potresa čiji akcelrogrami imaju različite karakteristike frekvencije i amplitude. O tom se problemu treba dalje raspraviti.

Analiza seizmičkog odziva prethodno spomenutog nasipa pokazala je da nasip ima veće ubrzanje nego prirodna površina

tla zbog nakupljanja energije u nasipu. Štoviše, brzina i pomak nasipa imaju izrazite nelinearne karakteristike s povećanjem amplitude seizmičkog gibanja. Zbog oštećenja strukture tla, nasip ulazi u stanje plastičnosti, pa bi zato u praktičnom inženjerstvu trebalo uzeti u obzir ojačanje kosine nasipa. Dinamička stabilnost nasipa izloženog velikim potresima drugi je predmet rasprave koji se treba detaljno proučiti.

Potrebno je napomenuti da je u ovom radu odabrana određena lokacija smještena na odsječku Beiluhe željeznice Qinghai-Tibet Railway (QTR) na kojoj su se provela odgovarajuća istraživanja, zbog čega se rezultati ne mogu generalizirati za sve lokacije i sva tla na tom području.

6. Zaključak

U ovom radu analiziran je seizmički odziv na lokacijama permafrosta uzimajući u obzir toplinsko stanje aktivnog sloja. Na temelju toga, dalje je proučen seizmički odziv nasipa u toploj sezoni primjenom nelinearne dinamičke analize metodom konačnih elemenata. Rezultati istraživanja pokazuju sljedeće:

- Utjecaj aktivnog sloja na seizmičke efekte lokacije mogao bi biti nizak u područjima permafrosta. Toplinsko stanje aktivnog sloja uglavnom je utjecalo na dinamički odziv plitkog sloja tla iznad površine permafrosta, a slabo je utjecalo na spektre odziva.
- Odziv nasipa mnogo je veći nego okolnog tla. Vršno ubrzanje tla na kruni nasipa veće je nego na prirodnoj površini tla i obilježava porast od 73 % u odnosu na koeficijent na prirodnoj površini tla.
- Dinamički odziv nasipa ima izrazite nelinearne karakteristike. Kada seizmički intenzitet dosegne određenu vrijednost, područje plastičnosti postupno se pojavljuje na nasipu te dolazi do kontinuiranog proširenja područja plastičnosti s porastom intenziteta potresa.
- Zbog oštećenosti strukture tla, tlo u nasipu ulazi u stanje plastičnosti te se tada u praktičnom inženjerstvu treba uzeti u obzir ojačanje nožice nasipa.

Zahvala

Ovo istraživanje sponzorirali su Kineska državna zaklada za prirodne znanosti (br. 41701058 i br. 51874286), Otvoreni fond Državnog laboratorija za inženjerstvo smrznutoga tla (Subvencija br. SKLFSE201606) te Kineska zaklada za postdoktorske znanosti (Subvencija br. 2015M570490). Iskreno zahvaljujemo anonimnim recenzentima na njihovim dragocjenim prijedlozima i konstruktivnim komentarima koji su u velikoj mjeri poboljšali izlaganje ovog rada.

LITERATURA

- [1] Cheng, G.D.: Problems on zonation of high-altitude permafrost. *Acta Geol. Sin.*, 39 (1984) 2, pp.185–193.
- [2] Jin, H.J., Zhao, L., Wang, S.L., Jin, R.: Thermal regimes and degradation modes of permafrost along the Qinghai–Tibet highway. *Sci. China Ser. D Earth Sci.*, 49 (2006) 11, pp. 1170–1183.
- [3] Wang, L.M., Wu, Z.J., Sun, J.J., Liu, X.F., Wang, Z.M.: Characteristics of ground motion at permafrost sites along the Qinghai-Tibet railway. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 29 (2009), pp. 974–981.
- [4] Deng, Q.D., Cheng, S.P., Ma, J., Du, P.: Seismic activities and earthquake potential in the Tibetan plateau. *Chin. J. Geophys.*, 57 (2014) 7, pp. 2025–2042.
- [5] Lin, A.M., Fu, B.H., Guo, J.M., Zeng, Q.L., Dang, G.M., He, W.G., Zhao, Y.: Coseismic strike-slip and rupture length produced by the 2001 Ms 8.1 Central Kunlun Earthquake, Science, 296 (2002), pp. 2015–2017.
- [6] Arenson, L., Springman, S.: Mathematical descriptions for the behaviour of ice-rich frozen soils at temperatures close to 0 °C. *Canadian geotechnical Journal*, 42 (2005) 2, pp. 431–442.
- [7] Esmaili-Falak, M., Katebi, H., Vadiati, M., Adamowski, J.: Predicting Triaxial Compressive Strength and Young's Modulus of Frozen Sand Using Artificial Intelligence Methods. *Journal of Cold Regions Engineering*, 33 (2019) 3, pp. 1–14.
- [8] Wang, D.Y., Ma, W., Wen, Z., Wu, Z.J.: Stiffness of frozen soils subjected to K-0 consolidation before freezing. *Soils and Foundations*, 47 (2007) 5, pp. 997–997.
- [9] Yang, Z.H., Still, B., Ge, X.X.: Mechanical properties of seasonally frozen and permafrost soils at high strain rate. *Cold Regions Science and Technology*, 113 (2015), pp. 12–19.
- [10] Yu, X.B., Sun, R., Yuan, X.M., et al: Resonant Column Test on the Frozen Silt Soil Modulus and Damping at Different Temperatures. *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, 61 (2017) 4, pp. 762–769.
- [11] Esmaili-Falak, M., Katebi, H., Javadi, A.: Experimental Study of the Mechanical Behaviour of Frozen Soils - A Case Study of Tabriz Subway. *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, 62 (2018) 1, pp. 117–125.
- [12] Vinson TS, 1978. Response of frozen ground to dynamic loadings. In: Andersland OB, Anderson DM, editors. *Geotechnical Engineering for Cold Regions*. McGraw-Hill Book Company, pp. 405–458.
- [13] Sritharan, S., Suleiman, M.T., White, D.J.: Effects of seasonal freezing on bridge column-foundation-soil interaction and their implications. *Earthquake Spectra*, 23 (2007), pp. 199–222.
- [14] Yang, Z.H., Utpal Dutta, Xu, G., et al: Numerical analysis of permafrost effects on the seismic site response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31 (2011), pp. 282–290
- [15] Wang, L.M., Zhang, D.L., Wu, Z.J., Ma, W., Li, X.J.: The influence of earth temperature on the dynamic characteristics of frozen soil and the parameters of ground motion on sites of permafrost. *Earthquake Research in China* 18 (2004) 1, pp. 1–12.
- [16] Chen, T., Ma, W., Zhou, G.Q.: Numerical analysis of ground motion characteristics in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Railway. *Cold Regions Science and Technology*, 148 (2018), pp. 88–95.
- [17] Goering, D.J.: Passively cooled railway embankments for use in permafrost areas. *Journal of Cold Regions Engineering*, 17 (2003) 3, pp. 119–133.
- [18] Mu, Y.H., Ma, W., Wu, Q.B., Sun, Z.Z.: Cooling processes and effects of crushed rock embankment along the Qinghai–Tibet Railway in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*, 78 (2012) 1, pp. 107–114
- [19] Ma, W., Cheng, G.D., Wu, Q.B.: Construction on permafrost foundations: lessons learned from the Qinghai–Tibet Railroad. *Cold Regions Science and Technology*, 59 (2009) 1, pp. 3–11.
- [20] Wu, Q.B., Cheng, G.D., Ma, W., Niu, F.J., Sun, Z.Z.: Technical approaches on permafrost thermal stability for Qinghai-Xizang Railroad. *Geomechanics and Geoengineering*, 1 (2006) 2, pp. 119–128.
- [21] Ma, W., Mu, Y.H., Wu, Q.B., Sun, Z.Z., Liu, Y.Z.: Characteristics and mechanisms of embankment deformation along the Qinghai–Tibet Railway in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*, 67 (2011) 3, pp. 178–186.
- [22] Zhang, M.L., Wen, Z., Xue, K.: The effects of precipitation on thermal - moisture dynamics of active layer at Beiluhe permafrost region. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 30 (2016) 4, pp. 159–164.
- [23] Sun, Z.Z., Ma, W., Li, D.Q.: Ground temperature characteristics of block stone embankment characteristics of block stone embankment and traditional embankment at Beiluhe along Qinghai-Tibet Railway[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 30 (2008) 2, pp. 303–308.
- [24] Chen, T., Ma, W., Wu, Z.J., Mu, Y.H.: Characteristics of dynamic response of the active layer beneath embankment in permafrost regions along the Qinghai–Tibet Railroad *Cold Regions Science and Technology*, 98 (2014), pp. 1–7.
- [25] Idriss, I.M., Seed, H.B.: Seismic Response of Horizontal Soil Layers. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE* 94 (1968) 4, pp. 1003–1031.
- [26] Li, X.J.: The soil seismic response of one-dimensional linear calculation program, *Seismic Microzonation (Theory and Practice)*. Beijing, Earthquake Publishing House, pp. 250–265, 1989.
- [27] Kramer, S.L., Paulsen, S.B.: Practical use of geotechnical site response models. In: *Proceedings of the International Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and their Impact on Modeling Dynamic Soil Response*. Berkeley: University of California, pp. 162–165, 2004.
- [28] Nassr, A., Esmaili-Falak, M., Katebi, H., Javadi, A.: A new approach to modeling the behavior of frozen soils. *Engineering geology*, 246 (2018), pp. 82–90.
- [29] Lu, M., Li, X.J.: Report of Seismic Security Estimation on Engineering Site of four Bridges in Qinghai–Tibet Railway. *Research Center of Seismic Engineering, China Earthquake Administration, Harbin*, 2001.
- [30] Li, S.Y., Lai, Y.M., Zhang, M.Y., Jin, L.: Seismic analysis of embankment of Qinghai–Tibet railway. *Cold Regions Science and Technology*, 55 (2009) 1, pp. 151–159.
- [31] Li, D.W., Wang, R.H.: Frozen soil ant-shear strength characterand testing study. *Journal of Anhui University of Science and Technology*, 24 (2004) S1, pp. 52–55.
- [32] Tan, Y.Z., Liu, Y.X., Zhang, Y., Ge, Z.C., Zhou, J.W.: Discussing of the penetration depth in high-cold and high-altitude permafrost area. *Journal of Vibration and Shock*, 34 (2015) 22, pp. 9–12.
- [33] Qi, J.L., Ma, W.: State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils. *Rock and Soil Mechanics*, 31 (2010) 1, pp. 133–144.
- [34] Zhao, S.P., Zhu, Y.L., He, P., et al.: Testing study on dynamic mechanics parameters of frozen soil. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22 (2003) S2, pp. 2677–2681 .
- [35] Lai, Y.M., Zhang, Y., Zhang, S.J., Jin, L., 2008. Experimental study of strength of frozen sandy soil under different water contents and temperatures. *Rock and Soil Mechanics*, 30 (12), pp. 3665–3670.
- [36] Wang, L.M., Wu, Z.J., Sun, J.J., Liu, X.F., Wang, Z.M.: Characteristics of ground motion at permafrost sites along the Qinghai-Tibet railway. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29 (2009), pp. 974–981.
- [37] Du, H.M., Ma, W., Zhang, S.J., Zhou, Z.W., Liu, E.L.: Strength properties of ice-rich frozen silty sands under uniaxial compression for a wide range of strain rates and moisture contents. *Cold Regions Science and Technology*, 123 (2016), pp. 107–113.
- [38] Ling, X.Z., Zhu, Z.Y., Zhang, F., Chen, S.J., Wang, L. N., Gao, X., Lu, Q.R.: Dynamic elastic modulus for frozen soil from the embankment on Beiluhe Basin along the Qinghai–Tibet Railway. *Cold Regions Science and Technology*, 57 (2009) 1, pp. 7–12.