

Primljen / Received: 30.7.2018.

Ispravljen / Corrected: 15.5.2022.

Prihvaćen / Accepted: 18.8.2022.

Dostupno online / Available online: 10.11.2022.

Utjecaj ponašanja svježeg betona na projektiranje održivih tanjih betonskih ploča

Autori:

Izv.prof.dr.sc. **Mauricio Pradena**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Concepciónu, Čile

Građevinski fakultet

mpradena@udec.cl

Autor za korespondenciju

Prof.dr.sc. **Lambert Houben**, dipl.ing.građ.

Tehnološko sveučilište u Delftu, Nizozemska

Fakultet građevinarstva i geoznanosti

Odjel za kolničke konstrukcije

L.J.M.Houben@tudelft.nl

Prethodno priopćenje

Mauricio Pradena, Lambert Houben

Utjecaj ponašanja svježeg betona na projektiranje održivih tanjih betonskih ploča

Učinkovitost prijenosa opterećenja (load transfer efficiency - LTE) na dilatiranim betonskim kolnicima bez moždanika (jointed plain concrete pavements - JPCP), kao što su inovativne kratke ploče, određena je prema pukotinama koje se stvaraju ispod razdjelnica dok je beton svjež. Autori su prethodno razvili i kalibrirali model za predviđanje širine pukotina u tradicionalnim JPCP-ovima. Cilj prikazanog istraživanja je potvrditi ovaj model korištenjem kratkih ploča kako bi se utvrdila veza između širine pukotina i LTE-a. Nakon usporedbe predviđene širine pukotina s onima uočenim u urbanim, industrijskim i međugradskim JPCP-ovima s kratkim pločama, zaključuje se da je model koristan za uključivanje ponašanja svježeg betona pri projektiranju održivih tanjih ploča.

Ključne riječi:

svježi beton, betonski kolnici, kratke ploče, projektiranje kolnika, prijenos opterećenja, tanje ploče

Research Paper

Mauricio Pradena, Lambert Houben

Influence of early-age behaviour on structural design of sustainable thinner concrete slabs

The load transfer efficiency (LTE) of non-dowelled jointed plain concrete pavements (JPCPs), such as the innovative short slabs, is defined in terms of the cracks that form under the joints at an early age. The authors had previously developed and calibrated a model to predict crack widths in traditional JPCPs. The aim of this study is to validate this model using short slabs to relate crack width and LTE. After comparing the predicted crack width with actual ones observed in urban, industrial, and interurban short slab JPCPs, it is concluded that the model is useful for incorporating the early-age concrete behaviour into the structural design of these sustainable thinner slabs.

Key words:

early-age, concrete pavements, short slabs, structural design, load transfer, thinner slabs

1. Uvod

Kratke betonske ploče inovacija su tradicionalnih dilatiranih betonskih kolnika (eng. *jointed plain concrete pavements* - JPCP). Smanjenje razmaka razdjelnica osigurava novu konfiguraciju prometnog opterećenja za ploče, kao i smanjenje zakrivljenosti ploča, zbog čega ploče mogu izdržati veća prometna opterećenja od tradicionalnih JPCP-ova iste debljine [1]. Također je moguće koristiti tanje JPCP-ove za istu količinu prometa [2]. Ovo ne samo da je održivija opcija (manje betona), već se time smanjuju i početni troškovi izgradnje. Ušteda može biti i do 25 % budući da razdjelnice između kratkih ploča nemaju moždanike ni brtve [2, 3]. Ostale konstrukcijske značajke kratkih ploča su sljedeće: duljina ploče < 2,5 m; zrnati nosivi sloj s ograničenim udjelom finih čestica ($\leq 6\%$ do 8% prolazeći $75\ \mu\text{m}$); tanko piljenje na razdjelnicama (2-3 mm debljine); bez moždanika ili spojnih šipki [4].

Neke aspekte tehnologije kratkih ploča patentirala je privatna čileanska tvrtka [5-7]. U kombinaciji s kontinuiranim interesom za primijenjena istraživanja i inovacije u tehnologiji kolnika u okviru Nacionalnog laboratorija za autoceste Čilea, izrađene su brojne probne dionice i projekti vezani za istraživanje kratkih ploča u Čileu. Istraživanje razvoja kratkih ploča uglavnom je usmjereno na analizu konstrukcije ove inovacije [1-4, 8-12].

Iako su kratke ploče JPCP-ovi bez moždanika, nije bilo specifičnih istraživanja o odnosu između LTE-a uzrokovanog ukleštenjem agregata i njegovog izravnog uzroka (širine pukotine) uzimajući u obzir ovu najsuvremeniju inovaciju. S obzirom na to da se osiguranje prijenosa opterećenja oslanja na ukleštenje agregata, što je najvažniji mehanizam prijenosa opterećenja u JPCP-ovima bez moždanika [13-15], vrlo je važno utvrditi vezu između LTE-a i širine pukotina. Zato je potrebno ne samo utvrditi LTE na kratkim pločama, već ga i povezati s ukleštenjem agregata određenim širinom pukotine na poprečnim razdjelnicama, što je izravan uzrok LTE-a u JPCP-ovima bez moždanika koji se koriste kao kratke ploče. Pradena i Houben [16] razvili su odnos između prijenosa opterećenja i širine pukotine (na razdjelnicama) posebno za inovativne kratke betonske ploče bez moždanika. Houben [17, 18], Pradena [19] te Pradena i Houben [20, 21] razvili su i kalibrirali model za predviđanje širine pukotina na razdjelnicama tradicionalnih JPCP-ova. Cilj ovog istraživanja je potvrditi taj model upotrebom kratkih ploča kako bi se utvrdio odnos između širine pukotina i LTE-a i uključilo ponašanje svježeg betona u projektiranje kratkih ploča JPCP-ova.

Validacija modela je proces u kojem se potvrđuje da predviđanja pomoću modela predstavljaju izmjerene fizikalne pojave [22]. Glavna ideja validacije je ispitati može li se model koristiti u svrhe predviđanja. Validacija uspoređuje simulirani kapacitet sustava s opažanjima stvarnog sustava pomoću podataka koji se ne koriste u razvoju modela [23].

2. Modeliranje procesa pucanja JPCP-ova

Predviđanje pucanja u JPCP-ovima vrlo je izazovan proces koji uključuje brojne varijable. Čak i detaljan sustav poput Vodiča

za mehaničko-empirijske metode za projektiranje kolnika (eng. *Mechanistic-Empirical Pavement Design* - MEPDG) koristi pojednostavljenu formulu za procjenu širine pukotine ispod razdjelnica [24]. U ovom se istraživanju proces pucanja JPCP-a predviđa pomoću detaljnog racionalnog modela, koji JPCP smatra sustavom u kojem modeliranje procesa pucanja nije ovisno samo o vremenu, već i o prostoru, tj. uključuje interakciju skupine razdjelnica [18, 21]. U ovom pristupu promjene u betonu koje započinju dok je beton svjež modeliraju se prema razvoju svojstava betona s obzirom na vrijeme, sušenje i autogeno skupljanje (prema Eurokodu 2: Projektiranje betonskih konstrukcija – dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade [25]), kao i toplinsku deformaciju, umjesto na fiksne srednje vrijednosti kao u pojednostavljenoj AASHTO formuli [26]. U ovom odjeljku dajemo samo kratak opis modela. Pojednostojnosti o modelu mogu se pronaći kod Houbena [17, 18], Pradene [19] i Pradene i Houbena [20, 21]. Prema osnovnoj formulaciji, vlačna naprezanja koja se javljaju u JPCP-u uzrokovana su ograničenom deformacijom kako je predviđeno Hookeovim zakonom, ali su pod utjecajem viskoelastičnog ponašanja betona (relaksacija),

$$\sigma(t) = g \cdot R \cdot E(t) \cdot \varepsilon(t) \quad (1)$$

gdje je $E(t)$ modul elastičnosti betona ovisan o vremenu (MPa), ε je ukupna vlačna deformacija JPCP-a ovisna o vremenu zbog skupljanja i toplinskih učinaka (-), R je faktor relaksacije (viskoelastično ponašanje JPCP-a) (-), a g je faktor povećanja (-).

$$g = \frac{h}{h - jd} \quad (2)$$

Najveća vlačna naprezanja javljaju se na razdjelnicama, gdje je poprečni presjek oslabljen. Debljina betona ispod razdjelnice je $h - jd$ (mm), gdje je h (mm) debljina kolnika, a jd (mm) dubina poprečne razdjelnice.

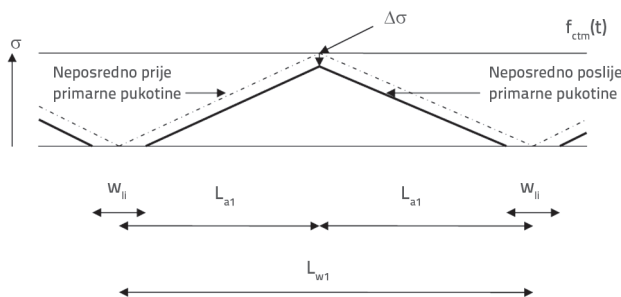
Koeficijent toplinske ekspanzije modeliran je kao funkcija modula elastičnosti, a temperatura hidratacije modelirana je kao funkcija vremena. Kada su različiti izrazi faktora relaksacije primijenjeni na realnim scenarijima, uočene su značajne razlike. U skladu s tim, Pradena i Houben predložili su novu jednadžbu za faktor relaksacije, gdje se on smatra funkcijom vremena [20]. Model temeljen na predloženoj jednadžbi relaksacije kalibriran je za tradicionalne JPCP-ove [19, 20].

U ovom sustavnom pristupu međusobna udaljenost primarnih pukotina određena je takozvanom duljinom disanja (L_{a1}) (slika 1.). Ovom se udaljenosti razdjelnice uspostavljaju samo gdje nastaju prvi nizovi pukotina, a uspostavlja se i razvoj procesa pucanja.

$$L_{a1}(t) = \frac{E_{cm}(t) \cdot \varepsilon(t)}{\gamma \cdot f} \quad (3)$$

$E_{cm}(t)$ predstavlja modul elastičnosti (MPa) u trenutku nastanka pukotina, $\varepsilon(t)$ je najveća ukupna spriječena deformacija kolnika

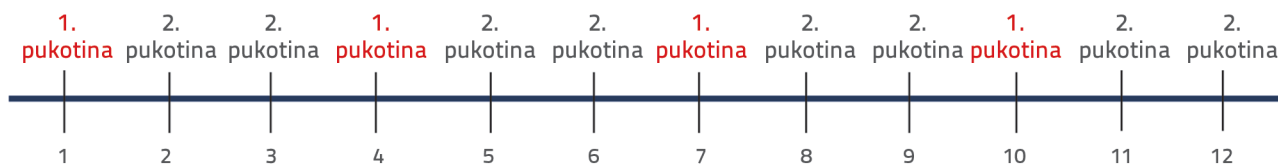
u trenutku nastanka primarnih pukotina (-), γ je zapreminska težina betona (kN/m^3), a f je trenje između betonske ploče i podloge (-). Houben [17, 18] je pretpostavio vrijednost od 1,0 za trenje zrnatog nosivog sloja, što je slično vrijednosti primijenjenoj u različitim istraživanjima u vezi s JPCP-ovima, kao što su FHWA model [27, 28], AASHTO model [26] i istraživanja nenapuknutih razdjelnica koja su proveli Lee i Stoffels [29] te Beoma i Lee [30].



Slika 1. Vlačna naprezanja u betonskom kolniku u trenutku nastanka primarnih pukotina [17, 21]

U ovom pristupu, za izračun početka i razvoja procesa pucanja u JPCP-ovima kolnik se smatra sustavom s unaprijed definiranim oslabljenim dijelovima (mjesto razdjelnica). U tom sustavu vrijednost širine pukotine ne ovisi samo o promjenama u materijalu već i o mjestima na kojima se nalaze prvi nizovi pukotina, drugi nizovi pukotina, itd. sve dok proces pucanja ne završi. Konkretno ovisi o lokaciji prvog niza pukotina i načinu na koji se proces pucanja zapravo razvija. Primjerice, na slici 2. vidljivo je da kada se pojavi prvi niz poprečnih pukotina na svakoj trećoj razdjelnici (kod razdjelnica br. 1, br. 4, br. 7 itd.), mogući drugi niz pukotina zbog simetrije se pojavljuje zajedno u dvije razdjelnice koje se nalaze između (br. 2 i 3, br. 5 i 6, br. 8 i 9, itd.). Model je izvorno razvijen za tradicionalne JPCP-ove dovoljne duljine za razvoj uzorka pucanja uzimajući u obzir kontinuitet kolničke konstrukcije na početku i kraju ispitne dionice.

Klimatski uvjeti modelirani su prema promjenama temperature koje uzrokuju toplinsku deformaciju kolnika. Razmatra se prosječna temperatura između 1. svibnja i 1. studenoga, a amplituda srednje dnevne temperature ($T_{ampyear}$) opisuje se pomoću sinusne funkcije. Procjenjuje se da je maksimalna dnevna temperatura JPCP-a ljeti oko 25 °C (1. kolovoza), minimalna približno 5 °C zimi (1. veljače), što se odnosi na sjevernu hemisferu. Amplituda dnevne varijacije temperature (T_{ampday}) opisuje se korištenjem sinusne funkcije koja doseže



Slika 2. Razvoj procesa pucanja kada prvi niz pukotina nastaje na svakoj trećoj razdjelnici [19]

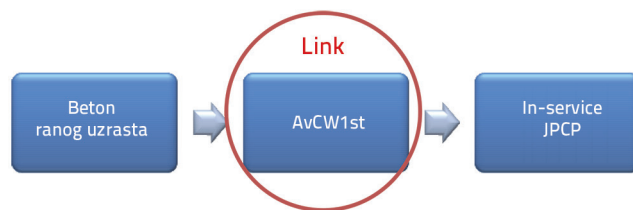
maksimum u 16:00 sati, minimum u 4:00 sata ujutro, a prosjek u 10:00 sati i 22:00 sata [17, 18].

Čak i kada je složeni proces pucanja JPCP pojednostavljen, model je kalibriran usporedbom rezultata modelirane širine pukotina sa stvarnim pukotinama u JPCP-ovima u Belgiji i Čileu. Kao što je već spomenuto, model je kalibriran za tradicionalne JPCP-ove [19, 20]. Osim toga, model su primijenili Xuan [31], Mbaraga [32] i Wu [33] u svojim istraživanjima. Xuan [31] je analizirao proces pucanja cementom stabiliziranih mješavina uz pomoć recikliranog betona i ziđa za upotrebu u nosivim slojevima kolnika u Nizozemskoj. Slične promjene uočili su Mbaraga [32] u Južnoj Africi i Wu [33] u Nizozemskoj. Primijenili su model za analizu procesa pucanja cementom stabiliziranih nosivih slojeva.

3. Metodologija

3.1. Značajna (i praktična) vrijednost širine pukotina na razdjelnicama

Kao što je spomenuto u uvodu, glavni uzrok LTE-a u JPCP-ovima bez moždanika (kratke ploče) jest uklještenje agregata koje ovisi o širini pukotine ispod poprečnih razdjelnica kolnika. Stoga se mora definirati značajna (i praktična) vrijednost širine pukotina na razdjelnicama kako bi se poboljšala definicija LTE-a koji će biti uključen u projektiranje kratkih ploča JPCP-a. Ova definicija mora uzeti u obzir da "dobar" model ovisi o tome za što se koristi, tj. o predviđenoj upotrebi modela [34]. Prosječna širina pukotine je reprezentativna vrijednost, korisna za poboljšanje odabira LTE-a koji će biti uključen u projektiranje JPCP-ova s kratkim pločama. Nadalje, budući da projektiranje kolnika ovisi o najširim pukotinama, prosječna širina prve serije pukotina ($AvCW1^{st}$) ona je koju treba uzeti u obzir jer su pukotine koje nastanu prve zapravo najšire [17, 18]. Na slici 3. prikazana je veza koju predstavlja $AvCW1^{st}$ između konkretnog ponašanja svježeg betona i JPCP-ova u uporabi. U ovom istraživanju posebno nas zanimaju konstrukcijska svojstva kolnika u uporabi.



Slika 3. Veza osigurava $AvCW1^{st}$ [19]

3.2. Mjerenje na terenu

Mjerenje širine pukotina provedeno je u nekoliko istraživanja na JPCP-ovima i besprekidno armiranim betonskim kolnicima [29, 35-39]. Chou i sur. [38] izmjerili su širinu pukotine koja odgovara sredini debljine (na rubu kolnika) u JPCP-ovima zračnih luka, iako su takvi JPCP-ovi deblji od onih koji se koriste u drugim primjenama. Chou i sur. [38] u svojem su radu pratili Pitmana [36], koji je izvršio statističku analizu jezgri kolnika i zaključio da su širine pukotina gornje polovice statistički jednake onima u donjoj polovici jezgri. Lee i Stoffels [29] izveli su mjerenja na površini spojeva, smatrajući da površina predstavlja varijaciju širine pukotine uz dubinu spoja. Njihova odluka da provedu mjerenja na površini temeljila se na maksimalnoj razlici (0,15 mm) koju su Poblete i sur. [37] zabilježili za čileanske JPCP-ove bez moždanika; ta najveća razlika u većini slučajeva predstavlja manje od 5 % raspona širine pukotine. Lee i Stoffels [29] za potrebe svog istraživanja (analiza svojstava brtvi) ovu razliku ne smatraju značajnom. Prethodni primjeri pokazuju važnost razmatranja ciljeva istraživanja pri razvijanju optimalne metode za mjerenje širine pukotine na razdjelnicama JPCP-a. Prema tome, za ciljeve ovog istraživanja i predviđenu upotrebu modela

($AvCW1^{st}$ za vezu sa svojstvima JPCP-a u uporabi) smatra se prikladnim mjerenje širine pukotine na sredini debljine JPCP-a (na rubu kolnika) pomoću uređaja za mjerenje pomaka pukotina (slika 4.).

Prosječna temperatura kolnika procjenjuje se na temelju informacija meteorološke postaje najbliže JPCP-u, potkrijepljenih diskretnim mjerenjima temperature kolnika pomoću infracrvenih termometara (slika 4. desno). S ovim se informacijama varijable $T_{ampyear}$ i T_{ampday} koje se koriste u modeliranju (odjeljak) s ciljem usporedbe rezultata modeliranja sa stvarnim ponašanjem JPCP-a.

Uz mjerenja širine pukotina pomoću uređaja provedena su i mjerenja pomoću linearnog varijabilnog diferencijalnog transformatora (LVDT) i invarne šipke (zbog niskog koeficijenta toplinske ekspanzije, $1,2 \times 10^{-6}/^{\circ}C$). Uređajem za mjerenje pomaka pukotina izmjerena je apsolutna vrijednost širine pukotina, a LVDT-om (slika 5.) varijacija širine pukotina pri različitim temperaturama. Ove su vrijednosti uspoređene s rezultatima izračuna $AvCW1^{st}$. LVDT je postavljen sa šipkom za svako mjerenje varijacije u širini pukotine (slika 5. lijevo), a zatim je postavljen na dva klina koji su prethodno bili pričvršćeni na rubu kolnika (slika 5. desno).



Slika 4. Mjerenje širine pukotine uređajem (lijevo) i temperature kolnika izmjerene infracrvenim termometrom (desno) [19]



Slika 5. Mjerenja LVDT-om i invarnom šipkom [19]

Sustav LVDT–invarna šipka ima različite praktične prednosti jer mjerenja ne zahtijevaju postavljanje senzora u kolnik tijekom procesa izgradnje i jer se ne mora razbijati površina kolnika. Metoda ima točnost od 0,001 mm i isplativa je jer je za terenska mjerenja potreban samo jedan LVDT. U ovom ja radu korišten LVDT Sylvac 305-1301 (slika 5).

3.3. Usporedba rezultata modela s AvCW1st stvarnih kratkih ploča

Model je izvorno razvijen (i kalibriran) za tradicionalne JPCP-ove koji su dovoljno dugi za razvoj uzorka pucanja, s kontinuitetom kolničke konstrukcije na početku i kraju probne dionice [17-19]. U ovoj studiji rezultati modela uspoređeni su s AvCW1st vrijednosti izvedenih urbanih, međugradskih i industrijskih JPCP-ova s kratkim pločama. U usporedbu su uključene i kratke ploče s kontinuitetom kolničke konstrukcije (i dovoljne duljine za razvoj uzorka pukotina), kao i probne dionice ograničene duljine.

4. Rezultati

4.1. Urbani JPCP-ovi s kratkim pločama

JPCP-ovi koji se tradicionalno koriste za kalibraciju modela imaju kontinuitet kolničke konstrukcije na početku i kraju

probne dionice i dovoljnu duljinu za razvoj uzorka pucanja. Ovi su uvjeti uzeti u obzir u izvorno razvijenom modelu. Međutim, u gradovima je moguće pronaći JPCP-ove različitih značajki. U tablici 1. navode se pojedinosti o probnim dionicama slijepih ulica u čileanskoj provinciji Biobio.

U tablici 2. prikazani su AvCW1st rezultati dobiveni terenskim ispitivanjima i modeliranjem ($T_{ampyear} = 10^{\circ}\text{C}$ i $T_{ampday} = 6^{\circ}\text{C}$). Može se zamijetiti da je ovim modelom moguće predvidjeti stvarni AvCW1st. AvCW1st vrijednost dijela kratke ploče izračunana je uporabom modela s 50 % širine pukotine (0,24 mm) tradicionalnog JPCP-a koji ima dvostruko veću duljinu ploče (širina pukotine 0,48 mm za duljinu ploče od 3,50 m). Ovo smanjenje temelji se na radu AASHTO-a (1993) i NCHRP-a (2003). AvCW1st vrijednosti dobivene terenskim ispitivanjima koristeći tradicionalni JPCP (0,46 mm) i JPCP s kratkim pločama (0,23 mm) s 50 % duljine ploče, tj. 3,5 m za tradicionalni JPCP i 1,75 m za kratke ploče JPCP potvrdile su rezultate. Probne dionice se nalaze na dvjema susjednim ulicama u stambenom području i imaju iste karakteristike (tablica 1.) osim duljine ploče; probne dionice izgrađene su u istim klimatskim uvjetima i dobu dana.

4.2. Međugradski JPCP-ovi s kratkim pločama

Ispitne dionice "Interurban 1" i "Interurban 2" iz tablice 3. dio su međugradskog JPCP-a s kratkim pločama koji se nalazi

Tablica 1. Karakteristike gradskih probnih dionica

Probna dionica	Duljina dionice [m]	Debljina [mm]	RJD* [%]	Duljina ploče [m]	Nosivi sloj	Klasa betona
Urbana tradicionalna	70	120	30	3,50	Zrnati	C28/35
Urbane kratke ploče	70	120	30	1,75	Zrnati	C28/35

(*): RJD: Omjer između dubine piljenja i debljine ploče. Iako tablica 1. uključuje podatke o debljini ploče, modeliranje ovisi o RJD-u.

Tablica 2. Usporedba stvarnih i modeliranih AvCW1st vrijednosti na gradskim probnim dionicama

Probna dionica	Vrijeme [sati]	AvCW1 st [mm]	
		Polje	Model
Urbana tradicionalna	60	0,46	0,48
Urbane kratke ploče	60	0,23	0,24



Slika 6. Popločavanje slipformerom (lijevo) i (rano) piljenje poprečnih razdjelnica (desno) na međugradskom JPCP-u s kratkim pločama [19]

Tablica 3. Obilježja međugradske probne dionice

Probna dionica	Duljina dionice [m]	Debljina [mm]	RJD [%]	Duljina ploče [m]	Nosivi sloj	Klasa betona
Interurban 1	100	140	35	2,00	Zrnati	C35/45.
Interurban 2	100	140	35	2,00	Zrnati	C35/45.

(*) Uključuje sintetička vlakna tipa Barcship-54 (2,5 kg/m³ od betona)

Tablica 4. Usporedba stvarnog AvCW1st i modeliranog AvCW1st na međugradskim probnim dionicama

Probna dionica	Vrijeme [sati]	AvCW1 st [mm]	
		Polje	Model
Interurban 1	80	0,20	0,22
Interurban 2	70	0,25	0,23

u čileanskoj provinciji Tierra del Fuego (slika 6.). U tablici 3. prikazane su karakteristike probnih dionica.

U tablici 4. prikazani su stvarne AvCW1st vrijednosti i vrijednosti dobivene modeliranjem ($T_{\text{ampyear}} = 10^{\circ}\text{C}$ i $T_{\text{ampday}} = 6^{\circ}\text{C}$). Uočava se da su prikazani slični stvarni rezultati AvCW1st i vrijednosti predviđene kalibriranim modelom.

4.3. Industrijske JPCP kratke ploče

JPCP-ovi u industrijskim objektima, kao što su industrijski podovi i dvorišta, mogu predstavljati ograničenja duljine zbog rasporeda industrijskog kompleksa, dimenzija skladišta, diskontinuiteta itd. Kao što je spomenuto, izvorno razvijeni model te uvjete ne uzima u obzir. Stoga je važno usporediti AvCW1st vrijednosti

predviđene modelom sa stvarnim vrijednostima. Posebno su razmotrene probne dionice "Industrial 1" i "Industrial 2" (tablica 5.). Zapravo, te probne dionice imaju duljinu od samo 24 [m]. Ostale karakteristike dionica "Industrial 1" i "Industrial 2" navedene su u tablici 5.

Na slici 7. prikazan je industrijski pod na kojem se nalaze "Industrial 1" i "Industrial 2" (provincija Concepción, Čile). Slika lijevo prikazuje primjer diskontinuiteta industrijskog poda uzrokovanog industrijskim rasporedom. Zbog takve konfiguracije dionice JPCP-a bit će kratke.

U tablici 6. prikazane su AvCW1st vrijednosti dobivene ispitivanjima na terenu i modeliranjem ($T_{\text{ampyear}} = 10^{\circ}\text{C}$ i $T_{\text{ampday}} = 5^{\circ}\text{C}$). Ponovno se može uočiti da su vrijednosti predviđene modelom bliske stvarnim AvCW1st vrijednostima.

Tablica 5. Obilježja probnih dionica

Probna dionica	Duljina dionice [m]	Debljina [mm]	RJD [%]	Duljina ploče [m]	Nosivi sloj	Klasa betona
Industrial 1	24	120	25	2,00	Zrnati	C28/35
Industrial 2	24	120	25	2,00	Zrnati	C28/35



Slika 7. Izrada industrijskog poda s kraćim nepravilnim dionicama (lijevo) i pogled na industrijski pod (desno) [19]

Tablica 6. Usporedba stvarnih i modeliranih $AvCW1^{st}$ vrijednosti na probnim dionicama

Probna dionica	Vrijeme [sati]	$AvCW1^{st}$ [mm]	
		Polje	Model
Industrial 1	72	0,52	0,50
Industrial 2	216	0,58	0,54

5. Utjecaj na projektiranje JPCP-ova s kratkim pločama

Primjenjujući dimenzionalnu analizu [40], Salsilli i sur. [41] razvili su mehaničko-empirijsku metodu projektiranja za kratke ploče koja se može koristiti u praksi. Prepoznata je važnost provođenja specifičnih istraživanja LTE-a u kratkim pločama bez moždanika. Pradena i Houben [16] konkretno su odredili odnos između prijenosa opterećenja i širine pukotine (na razdjelnicama) za betonske kolnike s kratkim pločama bez moždanika. Međutim, nije modelirano stvaranje širine pukotina, tj. iz ponašanja svježeg betona, u JPCP-ovima s kratkim pločama.

Uzimajući u obzir rezultate predstavljene u ovom radu, koji upućuju na točnost predviđanja širine pukotina (na razdjelnicama) stvarnih JPCP-ova kratkih ploča, moguće je objasniti izravni uzrok LTE-a, tj. širinu pukotine na razdjelnicama svježeg betona pri projektiranju konstrukcije kratkih ploča.

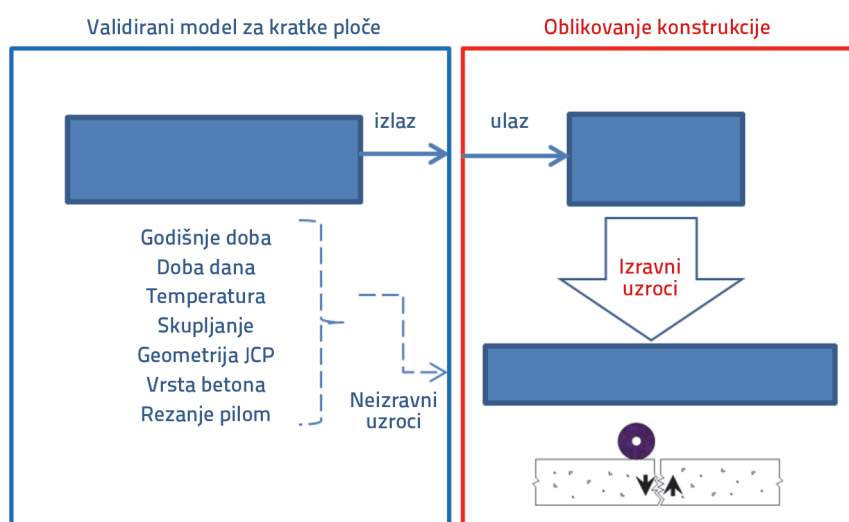
Na slici 8. prikazane su varijable uključene u modeliranje ponašanja svježeg betona. Glavni rezultat procesa modeliranja je širina pukotine na razdjelnicama, koja se može koristiti kao ulazni podatak za dobivanje LTE-a izravno iz uzroka (uklještenje agregata).

Stoga, s validiranim modelom za JPCP-ove s kratkim pločama, LTE se može povezati s izravnim uzrokom umjesto s neizravnim uzrocima (kao što je temperatura) koji se ponekad koriste za stvaranje odnosa s LTE-om JPCP-a u uporabi (slika 8.). Izravno određivanje učinkovitosti prijenosa opterećenja temeljno je

za projektiranje kratkih betonskih ploča, koje će pomoći u održavanju jedne od glavnih karakteristika betonskih kolnika - njihove trajnosti [42].

6. Zaključak

U ovom istraživanju, model razvijen za predviđanje širine pukotina na razdjelnicama u tradicionalnim JPCP-ovima kalibriran je i validiran za JPCP-ove s kratkim pločama. Rezultati modeliranja uspoređeni su sa širinom pukotina stvarnih izvedenih kratkih ploča urbanih, međugradskih i industrijskih JPCP-ova različitim konfiguracija kao i ograničene duljine. To modeliranje omogućuje uključivanje izravnog uzroka učinkovitosti prijenosa opterećenja uklještenjem agregata kao širine pukotine na razdjelnicama nastale od rane dobi u projektiranju JPCP-ova s kratkim pločama. Model uzima u obzir različite varijable (između ostalog temperaturu kolnika, skupljanje, klasu betona, geometriju kolnika, piljenje, godišnje doba i doba dana kada je kolnik izgrađen) u sustavnom pristupu umjesto fiksne srednje vrijednosti kao u AASHTO formuli. Naposljetku, korištenjem validiranog modela za JPCP-ove s kratkim pločama, LTE se može povezati s izravnim uzrokom, a ne s neizravnim uzrocima (kao što je temperatura) koji se ponekad primjenjuju za utvrđivanje odnosa s LTE-om JPCP-ova u uporabi. Međutim, oni učinkovitost ne povezuju s izravnim uzrokom uklještenjem agregata; upravo smo to razmotrili u ovom istraživanju.



Slika 8. Posljedice validiranog modela ponašanja svježeg betona na projektiranje konstrukcije JPCP-ova s kratkim pločama (prilagođeno iz Pradena i Houben [16])

Zahvala

Autori zahvaljuju sljedećim institucijama i suradnicima: Nacionalni laboratorij za autoceste Čilea, Služba za stanovanje i urbanizam regije Bio Bio (eng. Walter Poza), provincije Bio Bio (eng. Enrique Araneda), i građevinskoj tvrtki Ebco (inž. Gustavo Alvarez, inž. Carlos Ochoa, inž. Juan Dominguez).

Napomena

Ovaj je rad dio istraživanja provedenog u okviru doktorske disertacije "Učinci ponašanja mladog betona običnih spojenih betonskih kolnika u uporabi" predane na Tehnološkom sveučilištu u Delftu.

LITERATURA

- [1] Roesler, J.R., Cervantes, V.G., Amirkhanian, A.N.: Accelerated Performance Testing of Concrete Pavement with Short Slabs, *International Journal of Pavement Engineering*, 13 (2012) 6, pp. 494-507.
- [2] Covarrubias, J.P.: Design of concrete pavement with optimized slab geometry, *Revista Ingeniería de Construcción*, 27 (2012) 3, pp. 181 – 197.
- [3] Covarrubias, J.P.: TCP Design (Thin Concrete Pavements), World Bank, Washington D.C., USA, 2008.
- [4] Roesler, J.R.: Thinner Concrete Pavement Technologies, National Concrete Consortium Presentation, USA, 2013.
- [5] Covarrubias, J.P.: Improved concrete pavement slabs for streets, roads or highways and the methodology for the slab design, Patent Application to World Intellectual Property Organization, WO2007/042338, 2007.
- [6] Covarrubias, J.P.: Una Losa de Hormigón para Realizar la Pavimentación de Calles, Caminos, Carreteras y Autopistas donde el Largo, Ancho y Espesor de la Losa Están Asociados a la Distancia Libre de las Ruedas Delanteras o Traseras de un Camión de Carga Patrón Promedio; y Método de Construcción de Una Losa. Chilean Patent No. 44820, 2009a.
- [7] Covarrubias, J.P.: Concrete pavement slabs for streets, roads or highways and the methodology for the slab design. U.S. Patent 7,571,581 B2, 2009b.
- [8] Chilean Highway Agency: Complement to the Technical Specifications of the Highway Manual, Annex 1: Design Method to Thin Cement Concrete Pavement (in Spanish). Ministry of Public Works, Santiago, Chile, 2012.
- [9] Salsilli, R., Wahr, C., Delgadillo, R., Huerta, J., Sepúlveda, P.: Design Method for Concrete Pavements with Short Slabs Based on Westergaard's Equations and Dimensional Analysis. 92nd Transportation Research Board Annual Meeting, Washington DC, USA, 2013.
- [10] Salsilli, R., Wahr, C.: Trends in Concrete Pavements (in Spanish), Seminar New Challenges and Trends in Concrete Pavements, Chile, 2010.
- [11] Salgado, M.: Analysis and Prediction of the Behaviour of Semi-Rigid Short Slabs Concrete Pavements (in Spanish), International Seminar Latest Advances in Design and Construction of Concrete Pavements, Buenos Aires, Argentina, 2011.
- [12] Salsilli, R., Wahr, C., Delgadillo, R., Huerta, J., Sepúlveda, P.: Field performance of concrete pavements with short slabs and design procedure calibrated for Chilean conditions, *International Journal of Pavement Engineering*, 16 (2015) 4, pp. 363-379.
- [13] Buch, N., Frabizzio, M.A., Hiller, J.E.: Impact of coarse aggregates on transverse crack performance in jointed concrete pavements, *ACI Materials Journal*, 97 (2000) 3, pp. 325-332.
- [14] Hanekom, A.C., Horak, E., Visser, A.T.: Comparison of South African and American aggregate interlock efficiency at concrete pavement joints, 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, Seattle, USA, 2003.
- [15] Jensen, E.: Mechanism of load transfer-crack width relation in JPCP: Influence of coarse aggregate properties, 7th International Conference on Concrete Pavements, Orlando, SAD, 2001.
- [16] Pradena, M.A., Houben, L.J.M.: Load transfer-crack width relation of non-dowelled jointed plain concrete short slabs, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 13 (2018) 1, pp. 40-45.
- [17] Houben, L.J.M.: Model for Transversal Cracking in Non-Jointed Plain Concrete Pavements as a Function of the Temperature Variations and the Time of Construction, Proceedings of the 7th International DUT-Workshop on Design and Performance of Sustainable and Durable Concrete Pavement, Sevilla, Spain, 2010.
- [18] Houben, L.J.M.: Transversal Cracking in Jointed Plain Concrete Pavements for Dutch Climatic Conditions. Proceedings of the 7th International DUT-Workshop on Design and Performance of Sustainable and Durable Concrete Pavement, Sevilla, Spain, 2010.
- [19] Pradena, M.A.: The effects of the early-age concrete behaviour on the in-service performance of jointed plain concrete pavements, PhD thesis. Delft University of Technology, the Netherlands, 2017.
- [20] Pradena, M.A., Houben, L.J.M.: Analysis of the Stress Relaxation in Plain Concrete Pavements, *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 10 (2015) 1, pp. 46-53.
- [21] Pradena, M., Houben, L.: Influence of early-age concrete behaviour on concrete pavements performance, *GRAĐEVINAR*, 69 (2017) 9, pp. 875-883, <https://doi.org/10.14256/JCE.1931.2016>.
- [22] Trucano, T.G., Swilera, L.P., Igusab, T., Oberkampfc, W.L., Pilchc, M.: Calibration, validation, and sensitivity analysis: What's what, *Reliability Engineering and System Safety*, 91 (2016), pp. 1331–1357.
- [23] Rykiel, E.J.: Testing ecological models: the meaning of validation, *Ecological Modelling* 90 (1996), pp. 229-244.
- [24] NCHRP: Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Document, NCHRP Project 1-37A, Transportation Research Board, National Research Council, U.S., 2003.
- [25] EN 1992-1-1: Design and Calculation of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: Europe Committee for Standardization, 2005.
- [26] AASHTO: Guide for design of pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 1993.
- [27] Smith, K.D., Mueller, A.L., Darter, M.I., Peshkin, D.G.: Performance of Jointed Concrete Pavements, Volume II: Evaluation and Modification of Concrete Pavement Design and Analysis Models, (Report FHWA-RD-89-137). Washington, DC: Federal Highway Administration, 1990.
- [28] Ruiz, J.M., Rasmussen, R.O., Chang, G.K., Dick, J.C., Nelson, P.K., Schindler, A.K., Turner, D.J., Wilde, W.J.: Computer-Based Guidelines for Concrete Pavements, Volume III: Technical Appendices. (Report FHWA-HRT-04-127). McLean, VA: Federal Highway Administration, 2006.
- [29] Lee, S.W., Stoffels, S.: Effects of Excessive Pavement Joint Opening and Freezing on Sealants, *Journal of Transportation Engineering*, 129 (2003) 4, pp. 444–450.
- [30] Beom, C.J., Lee, S.W.: Effects of uncracked joints in jointed concrete pavements, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 11 (2007) 3, pp. 141-144.
- [31] Xuan, D.: Cement treated recycled crushed concrete and masonry aggregates for pavements, Doctoral Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2012.
- [32] Mbaraga, A.N.: Shrinkage characterisation, behavioural properties and durability of cement-stabilized pavement materials, Doctoral Thesis, Stellenbosch University, Stellenbosch, 2015.
- [33] Wu, P.: Cement stabilized materials with use of RoadCem additive, Doctoral Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2015.

- [34] Erkens, S.M.J.G.: Asphalt Concrete Response (ACRe). Determination, Modelling and Prediction. Doctoral Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2002.
- [35] NHL: Slab curling in undoweled jointed plain concrete pavements (in Spanish), (Technical Report No 2). Santiago: Chilean Highway Agency, 1989.
- [36] Pittman, D.: Factors Affecting Joint Efficiency of Roller-Compacted Concrete Pavement Joints and Cracks, Transportation Research Record, 1525 (1996), pp. 10-20.
- [37] Poblete, M., Salsilli, R., Valenzuela, A., Bull, A., Spratz, P.: Field Evaluation of Thermal Deformations in Undoweled PCC Pavement Slabs, Transportation Research Record 1207 (1988), pp. 217-228.
- [38] Chou, C., Cheng, H., Lin, S.: Analysis of concrete joint movements and seasonal thermal stresses at the Chiang Kai-Shek international airport, FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, New Jersey, USA, 2004.
- [39] Kohler, E., Roesler, J.: Crack spacing and crack width investigation from experimental CRCP sections, International Journal of Pavement Engineering, 7 (2006) 4, pp. 331-340.
- [40] Ioannides, A.M.: Analysis of slabs-on-grade for a variety of loading and support conditions, PhD Thesis, University of Illinois, Urbana-Champaign, 1984.
- [41] Salsilli, R., Wahr, C., Delgadillo, R., Huerta, J., Sepúlveda, P.: Field performance of concrete pavements with short slabs and design procedure calibrated for Chilean conditions, International Journal of Pavement Engineering, 16 (2015) 4, pp. 363-379.
- [42] Gáspár, L., Bencze, Z.: Increasing the life expectancy of road pavements, GRAĐEVINAR, 72 (2020) 6, pp. 515-522, <https://doi.org/10.14256/JCE.2644.2019>.