Primljen / Received: 16.11.2016.
Ispravljen / Corrected: 22.5.2017.
Prihvaćen / Accepted: 28.6.2017.
Dostupno online / Available online: 10.10.2017.

Utjecaj ponašanja svježeg betona na svojstva betonskih kolnika

Autori:

Doc.dr.sc. Mauricio Pradena, dipl.ing.građ.
Sveučilište Concepción, Čile
Građevinski fakultet
mpradena@udec.cl

Izv.prof.dr.sc. Lambert Houben, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište u Delftu, Nizozemska
Odjel za kolničke konstrukcije
L.J.M.Houben@tudelft.nl

Pregledni rad

Mauricio Pradena, Lambert Houben

Utjecaj ponašanja svježeg betona na svojstva betonskih kolnika

Pukotine u razdjelnicama posljedica su ponašanja betona u početku uporabe konstrukcije što može utjecati na konstrukcijska svojstva betonskih kolnika. U radu se analiziraju dosadašnja znanja za procjenu utjecaja betona u početnom periodu uporabe betonske kolničke konstrukcije. Ispitivanje je pokazalo da je pri modeliranju ponašanja pukotina potrebno uzeti u obzir međudjelovanje (u vremenu i prostoru) grupe razdjelnica. Kao rezultat takvog pristupa može se predvidjeti odnos razdjelnica i širina pukotina kako bi se procijenili njihovi učinci na svojstva betonskih kolnika.

Ključne riječi:
betonski kolnik, svježi beton, pukotine, razdjelnice, konstrukcijska svojstva, prijenos opterećenja

Subject review

Mauricio Pradena, Lambert Houben

Influence of early-age concrete behaviour on concrete pavements performance

Cracks in joints are the consequence of concrete behaviour in the initial period of use of pavement structures, which can affect structural properties of concrete pavements. Current knowledge on the influence of concrete in the initial period of use of concrete pavement structures is analysed in the paper. The analysis has shown that interaction (in space and time) of the group of joints must be taken into account in the scope of crack behaviour modelling. As a result of this approach, the relationship between joints and crack width can be predicted in order to evaluate their effects on properties of concrete pavements.

Key words:
concrete pavement, early-age concrete, cracks, joints, structural properties, load transfer

Übersichtsarbeit

Mauricio Pradena, Lambert Houben

Auswirkung von Frischbeton auf die Eigenschaften von Betonfahrbahnen

Risse in den Trennfugen ergeben sich aus dem Verhalten des Betons am Beginn des Einsatzes einer Konstruktion, was sich auf die Konstruktionseigenschaften von Betonfahrbahnen auswirken kann. In der Arbeit werden die bisherigen Kenntnisse in Bezug auf die Beurteilung der Auswirkung von Beton am Beginn der Nutzung einer Betonfahrbahn ausgewertet. Die Untersuchung hat ergeben, dass bei der Modellierung des Rissverhaltens die Interaktion (zwischen Zeit und Raum) von Trennfugengruppen zu berücksichtigen ist. Infolge eines solchen Ansatzes können das Verhältnis zwischen den Trennfugen und der Rissbreite vorgesehen und die Auswirkungen auf die Eigenschaften von Betonfahrbahnen beurteilt werden.

Schlüsselwörter:
Betonfahrbahn, Frischbeton, Risse, Trennfugen, Konstruktionseigenschaften, Lastübertragung

1. Uvod

Betonski kolnici osobito su značajni za primjenu na kritičnim prometnim čvorištima poput raskrižja ili kružnih tokova, na autobusnim stajalištima, kolodvorima, gradskim cestama i autocestama s velikim prometnim opterećenjem, zračnim lukama, za industrijske podove i slično. Kod betonskih kolnika, pukotine se pojavljuju ispod razdjelnica kao posljedica deformacija betona u ranoj fazi konstrukcije. Širina tih pukotina može imati pozitivan ili negativan utjecaj na uporabna svojstva betonskih kolnika, prije svega u kolnicima sa slobodnim pločama (bez moždanika) na kojima je osnovni mehanizam prijenosa opterećenja uklještenje čestica agregata [1-3]. Danas se, osim tradicionalnih betonskih kolnika (kod kojih je duljina ploča ≥ 3,5 m), primjenjuju i takvi betonski kolnici s kraćim pločama (duljina ploče < 2,5 m), što je svojevrsna inovacija, budući da se ne upotrebljavaju moždanici. Kratke ploče takvih kolnika podrazumijevaju promjenu pristupa u pogledu tradicionalne prakse ograničavanja broja razdjelnica u kolniku.

Promjena razmaka između razdjelnica stvara novu konfiguraciju prometnog opterećenja na pločama, kao i smanjenje zakrivljenosti ploča koje omogućuju veću otpornost na prometno opterećenje nego tradicionalni betonski kolnici iste debljine [4] ili omogućuju smanjenje debljine kolnika kako bi se zadovoljila otpornost na isto prometno opterećenje [5]. Ušteda može biti i do 30 %, s obzirom na to da razdjelnice nisu zapunjene [5-6]. Neka iskustva iz prakse pokazala su zadovoljavajuća svojstva takvih kolnika [5-6]. Primjerice, Roesler i suradnici [4] proveli su APT ispitivanje (*engl. Accelerated Pavement Testing)* na tri ispitne dionice po 40 m, kraćih betonskih ploča duljine 1,8 m na Sveučilištu Ilinois (SAD). Pojedine dijelove tehnologije kratkih ploča patentirala je privatna tvrtka u Čileu [7-9]. Ovakva situacija te kontinuirani interes za primjenu istraživanja i inovacija u kolnicima Nacionalnog laboratorija za autoceste u Čileu rezultirali su ispitnim dionicama kolnika s kratkim betonskim pločama. Cilj istraživanja koje je prikazano u ovom radu jest analiza utjecaja ponašanja betona u ranoj fazi životnog vijeka betonske kolničke konstrukcije. Zbog toga su analizirane mogućnosti modeliranja betona u ranoj fazi u betonskim kolnicima. Zatim su analizirani učinci neraspucanih pukotina i širina pukotina (u razdjelnicama) na konstrukcijska svojstva takvih betonskih kolnika. Iako analiza predstavljena u ovom radu vrijedi općenito za betonske kolnike, posebna je pozornost usmjerena na kratke ploče, ne samo zbog inovativnosti nego i zbog činjenice da je to betonski kolnik bez moždanika u kojem se opterećenje prenosi uklještenjem čestica agregata, tj. ovisi direktno o širini pukotina (kod razdjelnica), a što je posljedica ponašanja betona u ranoj fazi uporabljivosti konstrukcije.

2. Modeliranje nastanka pukotina u betonskim kolnicima

Za modeliranje pukotina u betonskim kolnicima dostupni su izrazi pomoću kojih se računa dio procesa nastajanja pukotina, prije svega otvaranje pukotine. Pomoću klasičnog izraza Američke udruge za državne ceste i promet (engl. *American Association of State Highway and Transportation Officials* - AASHTO) [10] računa se otvaranje pukotine ΔL (mm), koje je uzrokovano promjenom temperature i skupljanjem od sušenja, kao funkcija duljine ploče L (mm).

$$\Delta L = C \cdot L \cdot (\alpha_t \cdot \Delta T + \varepsilon) \quad (1)$$

gdje izraz ΔL ovisi o koeficijentu toplinskog rastezanja α_t (°C^{-1}); rasponu temperature ΔT (°C); koeficijentu skupljanja ε (mm/mm) i trenja temeljne ploče C (-). Nadalje, Vodič za projektiranje kolnika MEPDG (engl. *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* - MEPDG) koristi izmijenjenu verziju AASHTO izraza za proračun širine razdjelnice jw (in), uzrokovanu promjenom temperature i skupljanjem, te je izražen*a* kao funkcija duljine ploče *JTSpace* (ft) [11].

$$jw = Max(12000 \cdot JTSpace \cdot \beta \cdot (\alpha_{PCC} \cdot (T_{constr} - T_{mean}) + \varepsilon_{sh,mean}),0) \quad (2)$$

gdje je koeficijent toplinskog rastezanja α_{PCC} (in/in/°F); temperature ugradnje betona T_{constr} (°F); srednja mjesečna noćna temperatura T_{mean} (°F), srednje naprezanje pri skupljanju $\varepsilon_{sh,mean}$ (in/in) te koeficijent otvaranja/zatvaranja pukotina u spoju β (-), koji odgovara koeficijentu C u izrazu (1).

U svrhu poboljšanja južnoafričke metode za projektiranje betonskih kolnika razvijena je jednadžba za predviđanje širine pukotina koje se pojavljuju ispod razdjelnica u betonskim kolnicima [12]:

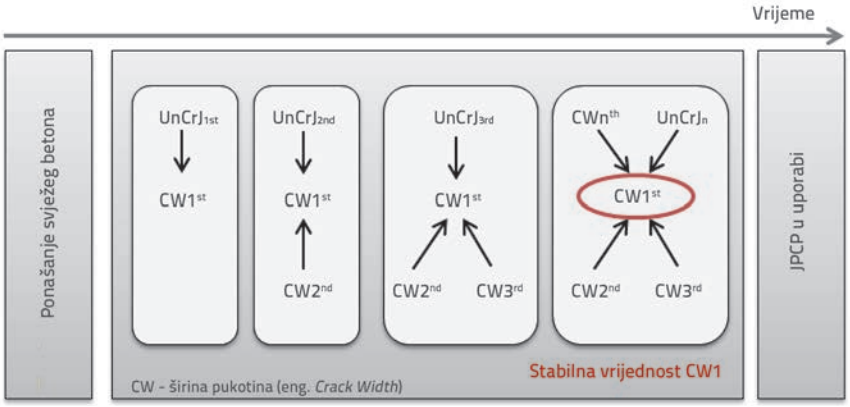
$$\Delta x = \left[\frac{C_3}{h} \cdot \left\{ \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \left(0.019 \cdot \frac{w^{2.1}}{f^{0.28}} + 270 \right) + (900 - t) \cdot (t - 0.08)^{0.18} \right\} \cdot (1 - h_u) + (T_0 - T_t) \cdot \eta \right] \cdot L \quad (3)$$

gdje je:

C_3 - konstanta
h - debljina ploče [m]
α_1 - koeficijent vrste cementa
α_2 - faktor njegovanja
α_3 - faktor vrste agregata
w - količina vode u betonu [MPa]
h_u - faktor relativne vlažnosti
t - vrijeme (u godinama)
T_0 - temperatura u trenutku asfaltiranja [°C]
T_t - trenutačna temperatura [°C]
η - toplinski koeficijent betona [°C^{-1}]
L - duljina ploče [m].

S ciljem poboljšanja AASHTO izraza [10], Roesler i Wang [13] razvili su algoritam za predviđanje otvaranja pukotina. Modificirali su model koji su razvili Zhang i Li [14] gdje je u obzir uzet samo utjecaj skupljanja pri sušenju. Roesler i Wang [13] u izrazu su primijenili i faktor promjene temperature.

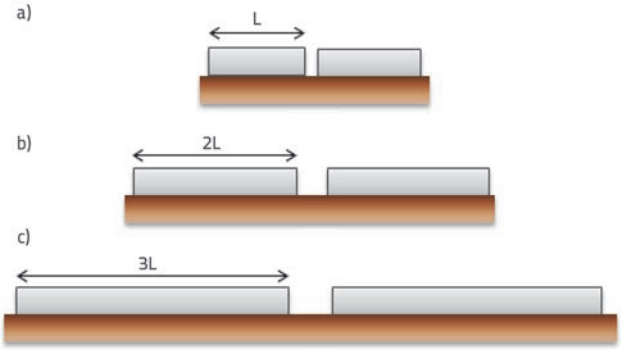
Opisani modeli imaju najmanje dvije zajedničke karakteristike:
- ne uzimaju u obzir viskoelastično ponašanje betona u ranoj fazi njegovanja betona
- ne uzimaju u obzir međudjelovanje (u vremenu i prostoru) te utjecaje ponašanja grupe ploča u predviđanju pojave pukotina u pojedinoj razdjelnici.



Slika 2. Utjecaj neraspucanih razdjelnica (UnCrJ) i širine pukotine (CW) različitih serija pukotina na vrijednost širine pukotine prve serije pukotina [22] (JPCP - Jointed Plain Concrete Pavements)

Beom i Lee [15] navode u svom radu da će se u razdjelnicama s pukotinama u čijoj su blizini razdjelnice bez pukotina pojaviti nepredvidivo otvaranje pukotine, što je zaključeno na temelju ispitivanja betonskih kolnika koja su provedena u SAD-u i Koreji te prethodnih ispitivanja koja su se odnosila na projektiranje i svojstva razdjelnica [16-18]. Ta ispitivanja potvrdila su ranije zaključke Moriana i suradnika [19] na temelju ispitivanja betonskih kolnika provedenih na terenu u SAD-u, koji su naveli da AASHTO metoda nije prikladna za procjenu otvaranja pukotina na terenu. Zaključak je svih tih ispitivanja taj da spomenuti pristup nije prikladan za izračun otvaranja pukotina u razdjelnici. No problem nije isključivo u AASHTO formuli, jer je glavni razlog velikih pukotina u razdjelnici taj što nije uzet u obzir učinak neraspucanih razdjelnica na određivanje pojavljivanja pukotina u razdjelnici.

Neraspucane razdjelnice nisu neuobičajene za betonske kolnike. Osim referentnih istraživanja, prisutnost neraspucanih razdjelnica na stvarnim takvim kolnicima zabilježili su u svom radu Zollingerea i suradnici [20] te Pradena i Houben [21].



Slika 1. Prikaz utjecaja sustava betonskog kolnika na otvaranju jedne pukotine u razdjelnici [22]

Pradena i Huoben [21] zabilježili su neraspucane razdjelnice čak i kada su bile ispunjene tehničke specifikacije za zarezivanje u razdjelnici. Slika 1. prikazuje utjecaje otvaranja pukotine na pojedinačnoj razdjelnici kao funkciju ponašanja susjednih razdjelnica. Slika 1.a prikazuje otvaranje pukotine kada su sve razdjelnice aktivirane. U tom je slučaju efektivna duljina ploče jednaka projektiranoj duljini ploče (L). Kada susjedne razdjelnice nisu aktivirane, može se očekivati veće širenje pukotine (slika 1.b).

U slučaju kada je efektivna duljina ploče dva puta dulja od projektiranje duljine ploče (2L) može se očekivati da se pukotina u razdjelnici pojavi kada susjedna četiri spoja (po dva sa svake strane) nisu aktivirana (slika 1.c). U tom je slučaju efektivna duljina ploče tri puta veća od projektirane duljine ploče (3L).

Morian i Stoffels [23] i Morian i suradnici [19] predložili su da se napravi ispitivanje na terenu između razdjelnica koji uzrokuju veće pukotine od onih koje su izračunane, kako bi se dobilo razumno objašnjenje pojave pukotina u razdjelnicama. U konkretnom slučaju kratkih ploča, Roesler i suradnici [4] predlažu međudjelovanje razdjelnica s jednakim obrascem nastajanja pukotina u betonskom kolniku. Prema Roesleru i suradnicima [4], međudjelovanje tijekom vremena utječe na efikasnost prijenosa opterećenja (engl. *Load Transfer Efficiency* - LTE) na kratkim pločama bez moždanika. Međutim, takvo predloženo međudjelovanje nije ispitivano uzimajući u obzir odnos efikasnost prijenosa opterećenja – širina pukotine, s najutjecajnijim mehanizmom prijenosa opterećenja u razdjelnicama bez moždanika - uklještenjem čestica agregata [1-3]. Slika 2. prikazuje utjecaj razvoja pukotina u betonskom kolniku s razdjelnicama, s obzirom na njihovu širinu, u ovom slučaju dubinu pukotine u prvoj seriji pukotina (CW1.), prikazuje razdjelnice koje su prve aktivirane. Na slici 2. mogu se vidjeti, osim razvoja neraspucanih pukotina u vremenu na betonskom kolniku ima utjecaj na CW1., nego također razvoj uzorka širenja pukotina, primjerice širina pukotina u drugoj seriji pukotina (CW2.), u trećoj seriji pukotina (CW3.) itd.

Nakon što je uzorak širenja pukotina dovršen (širina pukotina n-te serije, CWn.), proces može potrajati nekoliko mjeseci, nakon čega se vrijednost serije CW1. stabilizira, a to je značajan podatak za usporedbu s betonskim kolnikom u uporabi.

Istraživanja koja su proveli Beom i Lee [15], Lee i Stoffels [16], Lee i Stoffels [17], Lee [18] i Morian i suradnici [19] fokusirana su na analizu zatvaranja razdjelnica u betonskim kolnicima u uporabi. Zapravo, procedura koju su razvili Lee i Stoffels [16] ne može se primijeniti na nove betonske kolnike. Štoviše, Lee i Stoffels [17] su eksplicitno izrazili nužnost izrade modela kako bi se predvidio fenomen neraspucanih razdjelnica i napredak poprečnih pukotina u ranoj fazi njegovanja takvih kolnika.

3. Ponašanje svježeg betona u betonskim kolnicima

Jedna od najvećih grupa korisnika kolnika su agencije koje su djelomični vlasnici ili suvlasnici takvih prometnica, primjerice agencije za autoceste, odjeli za transport i gradske prijevozničke agencije. Takve agencije određuju prioritete ovisno o stanju konstrukcijskih svojstava kolnika [24]. Analize u ovom radu usmjerene su na praktičnost i korisnost metoda koje se primjenjuju za kolnike kako bi korisnici cesta bili zadovoljni. Stoga, iako je metoda konačnih elemenata važan alat za analizu kolničkih konstrukcija, općenito se ne može jednostavno implementirati kao dio praktične metode projektiranja kao što se može putem mehaničko-empirijske metode. Stoga je analiza stanja područja predstavljena u ovom poglavlju usmjerena na mehaničko-empirijske metode za projektiranje kolnika. Štoviše, iz onoga što je spomenuto u prethodnom poglavlju, relevantni rezultati pokazuju da ponašanje betona u ranoj fazi uporabe konstrukcije može utjecati na konstrukcijska svojstva betonskih kolnika, i to na širinu pukotina (u razdjelnicama) te neraspucane razdjelnice u betonskim kolnicima.

3.1. Širina pukotine (u razdjelnicama)

Kao što je spomenuto, širina pukotina direktno je povezana s efikasnošću prijenosa opterećenja na kolnike (JPCP) koji su u uporabi. Taj je utjecaj još vidljiviji ako razdjelnice nisu povezane moždanicima pa prijenos opterećenja ovisi o uklještenju čestica agregata. Stoga je nužno ispitati način na koji mehaničko-empirijske metode uzimaju u obzir efikasnost prijenosa opterećenja prilikom projektiranja betonskih kolnika.

Westgaardova jednadžba za naprezanja na krajevima ploče, uslijed odgovarajućeg opterećenja kotača, sadrži ograničavajuće pretpostavke koje se razlikuju od stanja u stvarnim betonskim pločama. Kako bi se označila ta ograničenja, Ioannides [25] je u svom radu naveo metodologiju temeljenu na primjeni principa dimenzionalne analize. Ta metodologija uvrštena je u različite postupke mehaničko-empirijske metode [26-34].

Kako bi se uzela u obzir Westgaardova pretpostavka izolirane ploče i efikasnost prijenosa opterećenja (LTE), Ioannides i sur. [35], Ioannides i Korovesis [36], Salsilli [29], Ioannides i suradnici [37] te Cabrera [38] koriste izraz (4) kao faktor prilagodbe:

$$F_{LTE} = 0.996573 + 0.00439187 \cdot LTE - 0.00005851 \cdot (LTE)^2 - 0.003124 \cdot \left(\frac{a}{l}\right) \cdot LTE - 0.03682 \cdot ln(LTE) \quad (4)$$

gdje izrazi označavaju:

a - radijus kotača koji dodiruje površinu kolnika [mm]

l - radijus relativne krutosti betonske ploče [mm].

Druge mehaničko-empirijske metode za projektiranje betonskih kolnika ne koriste nužno izraz (4), ali uzimajući u obzir efikasnost prijenosa opterećenja, LTE, kako bi prilagodile izračune stvarnim uvjetima i prijenosu opterećenja između ploča na betonskim kolnicima. Primjeri takvih metoda mogu se naći u Nizozemskoj [39], Švedskoj [40], SAD-u [41], Čileu [42], itd.

Međutim, te i druge metode u kojima se primjenjuje izraz (4) ne uzimaju u obzir direktan odnos s najvažnijim mehanizmom za prijenos opterećenja u betonskom kolniku bez moždanika, a to je uklještenje čestica agregata (zatim širinu pukotine u razdjelnicama koja je posljedica ponašanja betona u ranoj fazi konstrukcije).

Iznimke su Vodič za projektiranje kolnika (MEPDG) [11] i Južnoafrička metoda projektiranja za betonske kolnike [12]. Međutim, obje metode ne uzimaju u obzir viskoelastično ponašanje betona u ranoj fazi konstrukcije u razvoju pukotina. Nadalje, ne uzima se eksplicitno u obzir međudjelovanje (u vremenu i prostoru) i utjecaj ponašanja grupe razdjelnica u predviđanju širine pukotine, u odnosu na efikasnost prijenosa opterećenja.

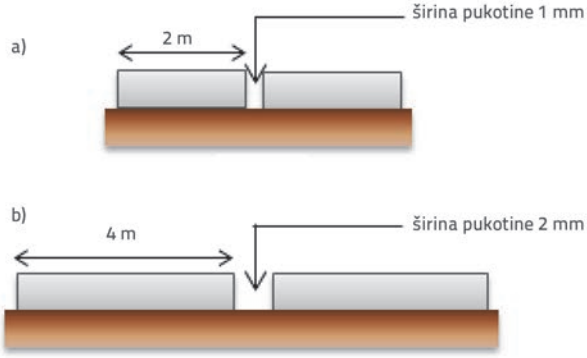
U slučaju kratkih ploča betonskih kolnika, Salsilli i suradnici [34, 43] razvili su praktičnu mehaničko – empirijsku metodu koristeći dimenzionalnu analizu [25]. Salsili i suradnici [34, 43] primijenili su faktor prilagodbe za prijenos opterećenja, koji je izvorno razvijen za tradicionalne betonske kolnike, izraz (4), kako bi se mogao primijeniti na kratke ploče. Štoviše, Čileanska agencija za ceste [42] razvila je metodu za projektiranje konstrukcija kratkih ploča. U toj metodi vrijednosti efikasnosti prijenosa opterećenja, LTE, preporučene su i prilagođene proračunima [42]. Štoviše, iako su ispitivanja kratkih ploča fokusirana na konstrukcijsku analizu betonskih kolnika bez moždanika [4-6, 34, 42-45], ona ne uzimaju u obzir direktnu vezu s najvažnijim mehanizmom prijenosa opterećenja u betonskom kolniku bez moždanika, a to je uklještenje čestica agregata (i pojava pukotina u razdjelnicama zbog ponašanja betona u ranoj fazi razvoja konstrukcije). Pristup autora Covarrubias [5, 6] sličan je kao pristup u Vodiču za projektiranje kolnika (MEPDG). Primjerice ne uzima u obzir viskoelastično ponašanje betona u ranoj fazi razvoja konstrukcije ili međudjelovanje (u vremenu i prostoru) niti utjecaje ponašanja grupa rezdjelnica u predviđanju širine pukotina u korelaciji s efikasnošću prijenosa opterećenja. Za kratke betonske ploče, Salsilli i suradnici [34] zaključili su u svom istraživanju da je nužna izrada studija efikasnosti prijenosa opterećenja u pogledu spomenute inovacije. Iako su Roesler i suradnici [4] proveli mjerenja efikasnosti prijenosa opterećenja u kratkim pločama bez moždanika, nisu proučavali odnos efikasnosti prijenosa opterećenja i širine pukotine.

3.2. Neraspucane razdjelnice

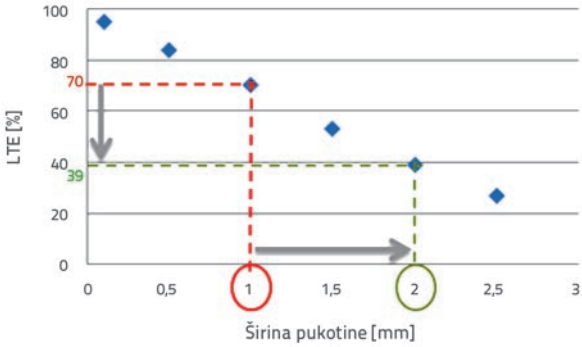
Kao što je spomenuto, autori su ispitivali fenomen neraspucanih razdjelnica [15-18]. Međutim ta ispitivanja bila su usmjerena na projektiranje i svojstva razdjelnica, ali ne i na utjecaj neraspucanih

razdjelnica na konstrukcijska svojstva betonskih kolnika. Neraspucane razdjelnice ne utječu samo na širinu pukotina i efikasnost prijenosa opterećenja, već određuju i efektivnu duljinu ploče kolnika u uporabi. Ako postoji neraspucana razdjelnica, efektivna duljina ploče razlikovat će se od projektirane duljine ploče. Prisutnost neraspucane razdjelnice osobito je važna za kratke ploče betonskih kolnika jer se prednosti te inovacije odnose na činjenicu da su ploče kraće uz veću učinkovitost. Posljedica prisutnosti neraspucanih razdjelnica je veća širina pukotina u aktiviranim razdjelnicama. Slika 3.a predstavlja slučaj kada neraspucana razdjelnica iznosi 0 %. Tada je efektivna duljina ploče ista kao projektirana duljina ploče (u navedenom primjeru iznosi 2 m). S druge strane, na slici 3.b samo je 50 % razdjelnica bilo aktivirano. U tom je slučaju efektivna duljina ploče jednaka dvostrukoj duljini projektirane ploče (u navedenom primjeru iznosi 4 m).

Slika 5. Ponavljanje opterećenja s FWD na slobodnom spoju [22]



Slika 3. Utjecaj neraspucanih razdjelnica na širinu pukotina aktiviranih razdjelnica [22]



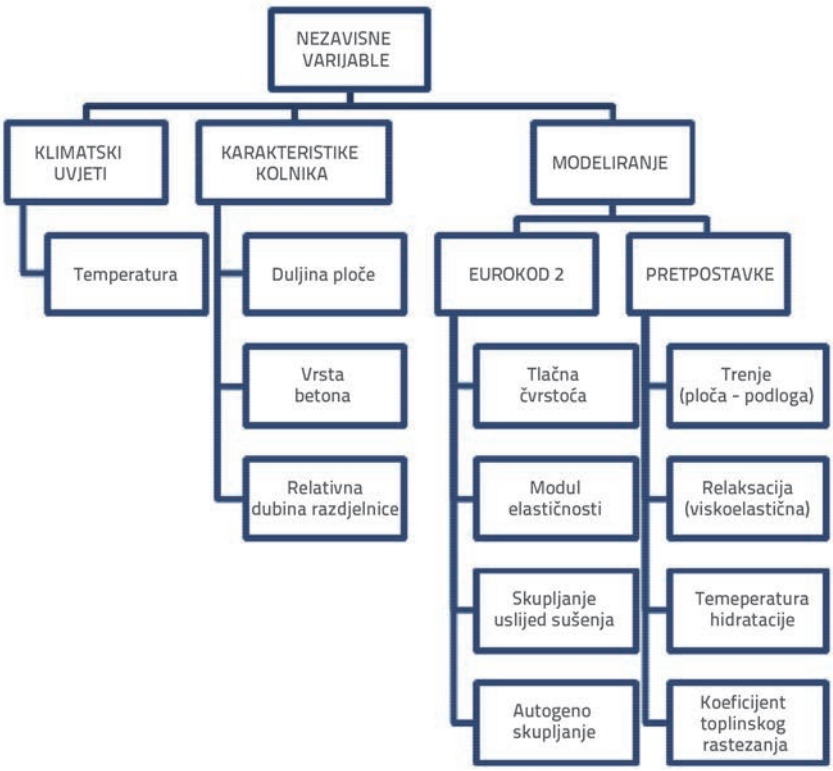
Slika 4. Varijacije efikasnosti prijenosa opterećenja i širine pukotine [22]

Slika 4. prikazuje varijacije efikasnosti prijenosa opterećenja sa širinom pukotine, u konkretnom slučaju efikasnost prijenosa opterećenja povezana je sa širinom pukotine od 1,0 mm (70 %) i 2.0 mm (39 %). Izračuni su napravljeni u 3D programu pomoću konačnih elemenata EverFE [46] uzimajući u obzir kratke ploče betonskih kolnika duljine 2 m za industrijske podove (120 mm debljine) gdje je prednja osovina Forklift Toyote 7FBMF25 (www.toyota-forklifts.eu) pozicionirana neposredno prije razdjelnice. Svojstva betona ploča su sljedeća: modul elastičnosti je 29000 MPa, Poissonov koeficijent je 0,2, koeficijent toplinskog rastezanja (CTE) 1,1 x 10^{-5} °C^{-1}, a gustoća betona iznosi 2400 kg/m^3.

Uzimajući u obzir da se od 60 do 70 % efikasnosti prijenosa opterećenja smatra prikladnim za optimalna konstrukcijska svojstva promatranih kolnika, slika 4. prikazuje kako prisutnost neraspucanih razdjelnica smanjuje efikasnost prijenosa opterećenja iz optimalnog omjera (LTE = 70 %), na neprihvatljiv iznos omjera (LTE = 39 %). S obzirom na mogući utjecaj prometnog opterećenja na aktivaciju razdjelnica, Beom i Lee [15] i Lee i Stoffels [16] analizirali su razvoj aktivacije razdjelnica u tradicionalnim betonskim kolnicima na području SAD-a i Kanade. Nakon više od jedne godine uporabe kolnika (pod utjecajem prometnog opterećenja) zaključili su da je aktivacija razdjelnica u uobičajenim betonskim kolnicima rezultat ponašanja betona u ranoj fazi razvoja konstrukcije [15]. Budući da su kratke ploče također iste vrste, aktivacija razdjelnica također je rezultat ponašanja betona u ranoj fazi uporabe konstrukcije. Međutim, budući da kratke ploče za promatrane kolnike mogu biti tanje od uobičajenih ploča za takve kolnike, potencijalni utjecaj prometnog opterećenja na aktivaciju razdjelnica preliminarno je ispitan na ispitnoj dionici u NHL u Santiagu, u Čileu. Svojstva ispitivane dionice kolnika su sljedeća: duljina ploče je iznosila 1,8 m, debljina ploče 140 mm, veličina čestica agregata 38 mm (maksimalna veličina čestica), bez moždanika, CBR mehanički zbijenog nosivog sloja 40 %, savojna čvrstoća 5 MPa. Iznad neraspucane razdjelnice primijenjeno je opterećenje iznosa 73 kN deflektometrom s padajućim teretom (FWD) (slika 5.). Nakon 400 ponavljanja opterećenja, razdjelnica je ostala neraspucana. Iako je nužno provesti daljnja ispitivanja, navedeni su rezultati potvrdili da su promatranja zabilježena na tradicionalnim betonskim kolnicima, primjerice aktivacija spojeva kratkih ploča, uglavnom rezultat ponašanja betona u ranoj fazi uporabe konstrukcije. Zapravo, iako bi neka buduća ispitivanja mogla pokazati utjecaj prometnog opterećenja na aktivaciju razdjelnica, glavni razlog tomu je ponašanje betona u ranoj fazi uporabljivosti konstrukcije u kolniku. Stoga se zahtijeva novi pristup kojim bi se mogao modelirati fenomen neraspucanih razdjelnica.

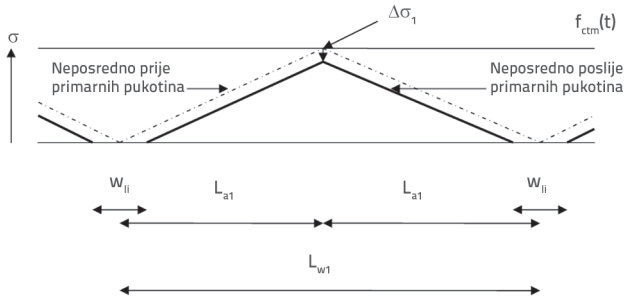
4. Sustavni pristup određivanju ponašanja svježeg betona na svojstva betonskih kolnika

Prethodno poglavlje jasno je pokazalo da je nužan novi pristup za modeliranje ponašanja betona u ranoj fazi uporabljivosti konstrukcije u betonskim kolnicima. Taj novi pristup treba biti sustavan, primjerice treba uzimati u obzir interakciju grupe razdjelnica. Sustavni pristup koji je osmislio Houben [47-49] omogućuje upravo to. Zapravo je moguće modelirati takvo međudjelovanje kada se kolnik tretira kao sustav gdje je duljina modela zapravo duljina koja se zahtijeva uzorkom pukotine (grupom ploča) umjesto duljinom jedne izolirane ploče. U sustavnom pristupu Houbena [47-49] uzorak pukotine određen je s obzirom na faktore vremena i prostora prema specifičnostima betonskog kolnika koji se analizira. Zapravo, ne utječe samo razvoj svojstava materijala na proces pojave pukotina, nego i geometrija kolnika (debljina, duljina ploče), vrijeme izgradnje betonskog kolnika i primijenjena metoda zarezivanja (konvencionalna metoda plitkog rezanja) između ostalog. Stoga taj pristup uzima u obzir sva međudjelovanja sustava za predviđanje širina pukotina, primjerice CW1 na slici 2. Štoviše, Houbenov model [47-49] također uzima u obzir viskoelastično ponašanje betona primjenom faktora relaksacije (slika 6). Slika 6. predstavlja shemu projekta s nezavisnim varijablama sustavnog pristupa. Houben [47-49] je koristio jednadžbe prema Eurokodu 2 [50] (svojstva i deformacije betona u ovisnosti o vremenu) te pretpostavkama na temelju inženjerskih zapažanja.



Slika 6. Shema projektiranja nezavisnih varijabli prema Houbenovom modelu

Na slici 6. relativna dubina razdjelnice (engl. *relative joint depth* - RJD) jest odnos dubine rezanja ploče i debljine betonskog kolnika.



Slika 7. Vlačna naprezanja u betonskom kolniku u trenutku pojave početnih pukotina [47-48]

U sustavnom pristupu pojavljuju se vlačna naprezanja u betonskom kolniku (kao posljedica spriječene deformacije) prema Hookovom zakonu, ali na njih utječe viskoelastično ponašanje betona (relaksacija materijala). Štoviše, zajednička udaljenost između primarnih pukotina je određena tzv. duljinom L_{a1} (slika 7.). Ta udaljenost određuje udaljenost razdjelnica u kojima se pojavljuje prva serija pukotina te način širenja pukotine. Detaljniji podaci mogu se pronaći u Houbenovom radu [47-49].

$$L_{a1}(t) = \frac{E_{cm}(t) \cdot \varepsilon(t)}{\gamma \cdot f} \tag{5}$$

gdje izraz $E_{cm}(t)$ predstavlja modul elastičnosti (MPa) u trenutku pojave pukotina, $\varepsilon(t)$ je maksimalna ukupna spriječena deformacija kolnika u trenutku pojave prvih pukotina (-), izraz γ označava volumensku težinu betona (kN/m^3), a oznaka f predstavlja trenje između betonske ploče i podloge (-).

Pradena i Houben [51] su usporedili Houbenove pretpostavke sa sofisticiranijim modelom kako bi odredili postoje li značajnija odstupanja, s ciljem procjene utjecaja ponašanja betona u ranoj fazi uporabe konstrukcije na konstrukcijska svojstva betonskih kolnika. Osim faktora relaksacije, usporedbom rezultata nisu uočena značajna odstupanja (detaljnije u radu Pradene i Houbena [51-52]). Faktor otpuštanja je poseban zbog nedostatnih podataka eksperimentalnog ispitivanja i nedostatka modela koji su bazirani na otpuštanju u betonu u ranoj fazi uporabe konstrukcije, umjesto puzanju [53].

Osim toga, od nekoliko dostupnih modela (na temelju otpuštanja) zabilježena su značajna odstupanja. Na taj način

Pradena i Houben [52] predložili su novi opći izraz za faktor otpuštanja, tj. izraz koji sadrži konstante kalibracije koje treba prilagoditi u procesu kalibracije. Iako u općenitom stanju (bez kalibracije), predložena jednadžba bila je temelj za relaksaciju materijala, a u svojim istraživanjima su je primijenili Xuan [54], Mbaraga [55] i Wu [56]. Xuan [54] je analizirao proces pojave pukotina u mješavini cementa i recikliranog betona koja se koristi za asfaltnu bazu.

Sličan se proces pojavljuje u istraživanjima koja su provodili Mbaraga [55] i Wu [56], no oni su mješavinu koristili za baze stabilizirane cementom uz dodatak aditiva. Nadalje, Pradena i Houben [57] su napravili preliminarnu usporedbu, na temelju mjerenja koja su provedena na terenu, te zabilježenog utjecaja metode zarezivanja u smanjenju i eliminiranju neraspucanih razdjelnica [58-59].

Najzad, Pradena [22] je definirao jednadžbu relaksacije na temelju mjerenja *in situ* na betonskim kolnicima u Belgiji i Čileu. Stoga kalibrirani model Pradene i Houbena [22] za beton u ranoj fazi uporabljivosti konstrukcije omogućuje procjenu utjecaja betona na konstrukcijska svojstva betonskih kolnika. Nadalje, Pradena [22] je predložio praktičan postupak kalibracije modela koji je koristan agencijama za autoceste, odjelima za transport, gradskim prijevozničkim agencijama i drugim institucijama povezanim s konstrukcijskim svojstvima betonskih kolnika (institucije za normative, organizacije za beton, konzultante, istraživačke skupine, sveučilišta itd.).

5. Zaključak

Neraspucale razdjelnice koje su posljedica ponašanja betona u ranoj fazi uporabe konstrukcije, uzrokuju razliku između efektivne duljine ploče i projektirane duljine ploče. Ponašanje betona u ranoj fazi konstrukcije uzrokuje i široke pukotine koje utječu na konstrukcijska svojstva betonskih kolnika, a osobito na betonske kolnike bez moždanika. Uklještenje čestica agregata najutjecajniji je mehanizam prijenosa opterećenja na takvim vrstama kolnika. Uklještenje čestica agregata ovisi o širini pukotina (u razdjelnicama), što je zapravo posljedica ponašanja betona u ranoj fazi uporabljivosti konstrukcije u kolniku. Stoga je nužno prilikom projektiranja takvih betonskih kolnika uzeti u obzir relevantne rezultate ponašanja betona u ranoj fazi konstrukcije. To je prije svega važno za projektiranje inovativnih kratkih ploča betonskih kolnika bez moždanika, gdje efikasnost prijenosa opterećenja ovisi direktno o širini pukotina u razdjelnicama. Kako bi se procijenili utjecaji ponašanja betona u ranoj fazi uporabljivosti konstrukcije na konstrukcijska svojstva betonskog kolnika, nužno je modelirati proces nastanka i širenja pukotina u betonskom kolniku. Osim toga, dostupne su formule kako bi se izračunao dio procesa stvaranja pukotina, otvaranje pukotina u razdjelnici. Međutim, pri predviđanju otvaranja pukotina u određenom spoju, formule nisu dovoljne za određivanje odnosa u vremenu i prostoru te utjecaja ponašanja grupe ploča. To uzrokuje značajna odstupanja u vrijednostima zabilježenima u modelu i na stvarnom betonskom kolniku. Dakle, nužno je osmisliti novi pristup u kojem način širenja pukotine ne ovisi samo o vremenu i o svojstvima materijala nego i o međudjelovanju skupine razdjelnica, geometriji kolnika, vremenu izgradnje betonskog kolnika, metodi zarezivanja i drugim varijablama. Takvu vrstu pristupa primijenili su autori ovog rada kako bi predvidjeli širinu svake pukotine ili kako bi zabilježili gdje su u betonskim kolnicima prisutne neraspucane pukotine.

Zahvala

Autori zahvaljuju Nacionalnom laboratoriju za ceste u Čileu, Čileanskom institutu za cement i beton, Mr. Lucu Rensu (Federacija belgijske cementne industrije) i Agenciji za ceste i promet provincije Limburg u Belgiji.

LITERATURA

[1] 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.

[2] 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.

[3] IPRF, Joint load transfer in concrete airfield pavements: final report. (Report No. IPRF-01-G-002-05-2). Rosemont, IL: Innovative Pavement Research Foundation, 2011.

[4] 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, https://doi.org/10.1080/10298436.2011.575134

[5] Covarrubias, J.P.: Design of concrete slabs with optimized geometry. 2nd International Conference on Best Practices for Concrete Pavements, Florianopolis, Brazil, 2011.

[6] Covarrubias, J.P.: Design of concrete pavement with optimized slab geometry. Revista Ingeniería de Construcción, 27 (2012) 3, pp. 181-197.

[7] 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.

[8] 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

[9] 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.

[10] AASHTO, Guide for design of pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 1993.

[11] 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.

[12] Du Plessis, L., Strauss, P.J., Perrie, B.D., Rossmann, D.: Accelerated Pavement Testing of Load Transfer through Aggregate Interlock and the influence of Crack Width and Aggregate Type - a case study. International Workshop on Best Practices for Concrete Pavements, Recife, Brazil, 2007.

[13] Roesler, J.R., Wang, D.: An analytical approach to computing joint opening in concrete pavements. 6th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, Chicago, USA, 2008, https://doi.org/10.1201/9780203882191.ch8

[14] Zhang, J., Li, V.: Influence of supporting base characteristics on shrinkage-induced stresses in concrete pavements. Journal of Transportation Engineering, 127 (2001) 6, pp. 455-462, https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2001)127:6(455)

[15] 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, https://doi.org/10.1007/BF02823893

[16] Lee, S.W., Stoffels, S.: Analysis of in situ horizontal joint movements in rigid pavements. Transportation Research Record No. 1778, (2001), pp. 9-16, https://doi.org/10.3141/1778-02

[17] 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, https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:4(444)

[18] Lee, S.W.: A probabilistic model for joint-movements in jointed concrete pavements. KSCE Journal of Civil Engineering, 7 (2003) 2, pp. 141-146, https://doi.org/10.1007/BF02841972

[19] Morian, D., Suthahar, N., Stoffels, S.: Evaluation of rigid pavement joint seal movement. Transportation Research Record No. 1684, (1999), pp. 25-34, https://doi.org/10.3141/1684-04

[20] Zollinger, D.G., Tang, T., Xin, D.: Sawcut Depth Considerations for Jointed Concrete Pavement Based on Fracture Mechanics Analysis. Transportation Research Record No. 1449, (1994), pp. 91-100.

[21] Pradena, M.A., Houben, L.J.M.: Uncracked joints in plain concrete pavements: causes, effects and possibilities of improvements. Journal of Transport Literature, 10 (2016) 1, pp. 40-44, https://doi.org/10.1590/2238-1031.jtl.v10n1a8

[22] 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.

[23] Morian, D., Stoffels, S.: Joint seal practices in the United States, observations and considerations. Transportation Research Record No. 1627, (1998), pp. 7-12, https://doi.org/10.3141/1627-02

[24] Haas, R., Hudson, W.R.: Defining and serving clients for pavements. Transportation Research Record No. 1524, (1996), pp. 1-9, https://doi.org/10.3141/1524-01

[25] Ioannides, A.M.: Analysis of slabs-on-grade for a variety of loading and support conditions. PhD Thesis, University of Illinois, Urbana-Champaign, 1984.

[26] Ioannides, A.M.: Extension of Westergaard solutions using dimensional analysis. 2nd International Workshop on the Design and Evaluation of Concrete Pavements, Siquenza, Spain, 1990

[27] Ioannides, A.M.: Concrete pavement analysis: the first eighty years. International Journal of Pavement Engineering, 7 (2006) 4, pp. 233–249, https://doi.org/10.1080/10298430600798481

[28] Ioannides, A.M., Salsilli, R.A.: Temperature curling in rigid pavements: an application of dimensional analysis. Transportation Research Record No. 1227, (1998), pp. 1-11.

[29] Salsilli, R.: Calibrated mechanistic design procedure for jointed plain concrete pavements. PhD Thesis. University of Illinois, Urbana-Champaign, 1991.

[30] Salsilli, R.: Design manual for industrial floors (in Spanish). Chilean Institute of the Cement and Concrete, Santiago, Chile, 2015.

[31] Raad, L., Marhamo, L.K.: Evaluation of two-layer pavements using dimensional analysis. Transportation Research Record No. 1307, (1991), pp. 99-110.

[32] Khazanovich, L., Yu, T.H., Darter, M.I.: Prediction of critical JPCP stresses in the mechanistic-empirical 2002 design guide. 9th International Symposium on Concrete Roads, Istanbul, Turkey, 2004.

[33] Bordelon, A., Roesler, J., Hiller, J.: Mechanistic-Empirical Design Concepts for Jointed Plain Concrete Pavements in Illinois. (Research Report ICT-09-052). Springfield, IL: Illinois Department of Transportation, 2009.

[34] 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, https://doi.org/10.1080/10298436.2014.943129

[35] Ioannides, A.M., Thompson, M.R., Barenberg, E.J.: Westergaard solutions reconsidered. Transportation Research Record No. 1043, (1985), pp. 13–23.

[36] Ioannides, A.M., Korovesis, G.: Aggregate interlock: a pure-shear load transfer mechanism. Transportation Research Record No. 1286, (1990), pp. 14–24.

[37] Ioannides, A.M., Alexander, D., Hammons, M., Davids, C.: Application of artificial neural networks to concrete pavement joint evaluation. Transportation Research Record No. 1540, (1996), pp. 56–64, https://doi.org/10.3141/1540-08

[38] Cabrera, C.: Calibration of the cracking model of plain concrete pavements implemented in the system GIMPh (in Spanish). Civil Engineering Degree Thesis. Universidad de Chile, Santiago, 1998.

[39] Houben, L.J.M.: Structural design of pavements, part IV: Design of concrete pavements. Lecture notes CT4860, Delft University of Technology, the Netherlands, 2006.

[40] Söderqvist, J.: Design of concrete pavements: design criteria for plain and lean concrete. Bachelor Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2006.

[41] Hiller, J.E.: Development of mechanistic-empirical principles for jointed plain concrete pavement fatigue design. PhD Thesis, University of Illinois, Urbana-Champaign, 2007.

[42] 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 Publics Works, Santiago, Chile, 2012.

[43] 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.

[44] Salsilli, R., Wahr, C.: Trends in Concrete Pavements (in Spanish). Seminar New Challenges and Trends in Concrete Pavements, Chile, 2010.

[45] 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.

[46] Davids, W.G., Mahoney, J.P.: Experimental Verification of Rigid Pavement Joint Load Transfer Modeling with EverFE. Transportation Research Record No. 1684, (1990), pp. 81-89, https://doi.org/10.3141/1684-10

[47] 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. Report 7-08-216-6, Road and Railway Engineering, Delft University of Technology, 2008.

[48] Houben, L.J.M.: Model for transversal cracking (at joints) in plain concrete pavements. Report 7-08-216-5, Road and Railway Engineering, Delft University of Technology, 2008.

[49] Houben, L.J.M.: Transversal cracking in jointed plain concrete pavements for Dutch climatic conditions. Report 7-08-216-7, Road and Railway Engineering, Delft University of Technology, 2008.

[50] 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.

[51] Pradena, M.A., Houben, L.J.M.: Causes and effects of longitudinal shrinkage and temperature stresses on JPCP for Dutch conditions. 10th International Conference on Concrete Pavements, Quebec, Canada, 2012.

[52] 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, https://doi.org/10.3846/bjrbe.2015.06

[53] Atrushi, D.: Tensile and Compressive Creep of Early Age Concrete: Testing and Modelling. Doctoral Thesis, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2003.

[54] Xuan, D.: Cement treated recycled crushed concrete and masonry aggregates for pavements, Doctoral Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2012.

[55] Mbaraga, A.N.: Shrinkage characterisation, behavioural properties and durability of cement-stabilized pavement materials. Doctoral Thesis, Stellenbosch University, Stellenbosch, 2015.

[56] Wu, P.: Cement stabilized materials with use of RoadCem additive, Doctoral Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2015

[57] Pradena, M.A., Houben, L.J.M.: Sustainable Pavements: An Analysis of the Crack Width in Jointed Plain Concrete Pavements with Short Slabs. In Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2014.

[58] Pradena, M.A., Houben, L.J.M.: Innovations in Concrete Pavements for a Sustainable Infrastructure. Proceedings of the 2nd International Conference on Traffic and Transport Engineering, Belgrade, Serbia, 2014.

[59] Pradena, M.A., Houben, L.J.M.: Sustainable Pavements: Influence of the Saw-Cutting Method on the Performance of JPCP. Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, Varna, Bulgaria, 2014, https://doi.org/10.5593/SGEM2014/B62/S26.043