

NUMERICKÁ ANALÝZA VLIVU OBJEMOVÝCH ZMĚN MONOLITICKÝCH BETONOVÝCH DESEK VOZOVKOVÉHO SOUVRSTVÍ NA VLOŽENÉ PREFABRIKOVANÉ ŠTĚRBINOVÉ TROUBY ■ NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE VOLUME CHANGES OF CAST-IN-SITE ROADBED CONCRETE SLABS ON EMBEDDED PRECAST SLIT DRAINS

Petr Tej, Jiří Kolísko, Jan Rašovský

Betonové štěrbinové trouby jsou prefabrikované dílce systému, který se používá jako liniové odvodnění silničních a dálničních staveb a parkovacích, letištních a manipulačních ploch. Prefabrikované dílce se osazují do vozovkových souvrství různých skladeb, jejichž nosnou a roznášecí vrstvou bývají velmi často monolitické betonové desky. Betonové desky v průběhu času mění vlivem smršťování betonu a zatížením změnou teploty svůj objem. Zanedbání dilatace nebo použití nevhodného dilatačního materiálu mezi čelem monolitické betonové desky a vloženými prefabrikovanými troubami způsobuje jejich porušení. Protože se tento odvodňovací systém v posledních letech značně rozšířil, došlo také k nárůstu výskytu poruch štěrbinových trub spojených s jejich chybným zabudováním do vozovkového souvrství. Tento článek analyzuje vliv objemových změn monolitických betonových desek na vložené prefabrikované štěrbinové trouby. ■ Concrete slit tubes are prefabricated units of a system, which is used as a liner drainage in road and highway constructions and in parking, airport and handling areas. Prefabricated components are mounted on roadbed layers of different compositions and the carrier layer is very often a cast-in-site concrete slab. Concrete slabs change over time due to shrinkage, stress and temperature variations in their volume. Failure to dilate or an inappropriate choice of expansion material between the face of monolithic concrete slabs and precast embedded drains are often causes of failure. Since this drainage system in recent years has expanded considerably, there has also been an increase in the occurrence of faults in slit drains associated with their poor incorporation into the roadbed formation. This article analyzes the impact of volume changes of the monolithic concrete slab on inserted precast slit drains.

Betonové desky vozovkového souvrství v průběhu času mění svůj objem. Objemové změny jsou vyvolány smršťováním betonu a zatížením od změny teploty.

Přetvoření od smršťování betonu je

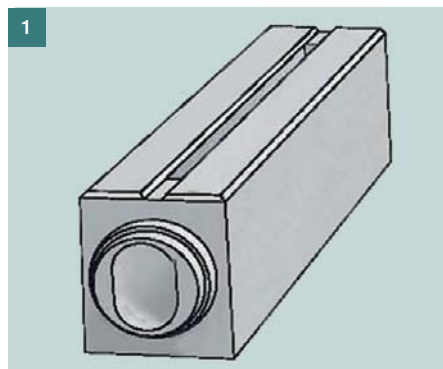
přetvoření nezávislé na napětí, související s chemickými změnami tvrdnoucího betonu v důsledku redukce objemu během hydratace cementu (tzn. objem ztvrdlé cementové pasty je menší než objem vody a cementu před začátkem chemické reakce, tzv. autogenní smršťování). Další jeho složkou je tzv. smršťování z vysychání, které je způsobeno ztrátou vody v betonu. Smršťování je tedy definováno jako časově závislá objemová změna betonového prvku nevystaveného žádným vnějším namáháním při konstantní teplotě.

Teplotní roztažnost materiálu je jev, při kterém se po dodání/odebrání tepla tělesu (po zahřátí/ochlazení tělesa o určitou teplotu) změní délkové rozměry (objem) tělesa.

Oba popsané jevy působí na betonové desky ve vozovkovém souvrství současně. Okamžitě po betonáži se začíná betonová plocha deformovat vlivem smršťování. Jedná se tedy obecně o zmenšení objemu (nejde-li o tzv. bobtnání, které nastává při vlhkosti větší než 95 %). Současně však na betonovou desku působí okolní teplota, která desku ohřívá, nebo ochlazuje, a působí tak zvětšení resp. zmenšení objemu betonové desky. Teplota se mění v denních a ročních cyklech.

Vzhledem ke způsobům namáhání vložených prvků nás zajímá spíše než objemová změna zejména délková změna betonové desky kolmá na vložený prvek. Výsledná změna objemu (déłky) je tedy součtem objemové (déłkové) změny vyvolané smršťováním a objemové (déłkové) změny vyvolané teplotou. Průběh teplot samozřejmě není po výšce desky konstantní, horní povrch bude ohříván (ochlazován) více či méně než povrch spodní. Pro potřeby inženýrské praxe můžeme ale zvolit přibližné řešení a předpokládat průběh teploty konstantní po výšce desky.

Vlivem cyklického zatěžování betonových desek změnami teploty a postup-



ným smršťováním betonu dochází tedy k zvětšování, resp. k zmenšování jejich objemu. V případě, kdy je do betonové desky vložen tuhý prvek, dojde při teplotní expanzi k vzniku tlakového napětí na kontaktu čela betonové desky a vloženého prvku. Není-li použita dilatace mezi vloženým prvkem a čelem betonové desky, bude prvek vystaven zatížení vyvolanému deformací přilehlých betonových desek.

TEPELNÁ ROZTAŽNOST BETONOVÝCH DESEK

Pro beton se uvažuje hodnota teplotního součinitele $\alpha = 10 \cdot 10^{-6}$.

Prodloužení (zkrácení) betonové plochy v daném směru (v tomto případě kolmo na vložené prefabrikované štěrbinové trouby) se vypočte podle známého vztahu:

$$\Delta L = \alpha L \Delta T,$$

kde ΔL je prodloužení (zkrácení) beto-

nové plochy v daném směru, α je součinitel teplotní délkové roztažnosti, L je dilatující délka betonové plochy (obr. 3) a ΔT je rozdíl teplot.

Teoretický příklad

K výpočtu změny délky betonové desky použijeme postupy uvedené v normách ČSN EN 1992-1-1 [1] a ČSN EN 1992-1-1-5 [2].

Odhadnutá tloušťka desky $h_0 = 350$ mm, předpokládáme beton

C30/37, vlhkost 70 % a teplotní roztažnost materiálu $\alpha = 10 \cdot 10^{-6}$.

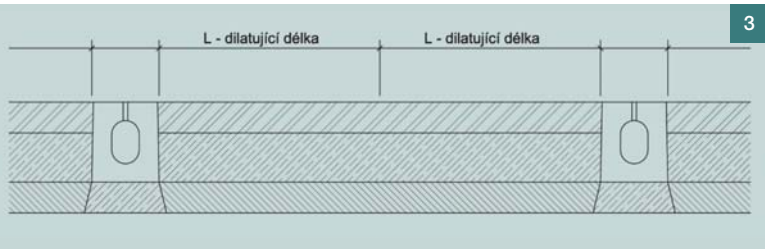
Smrštění v čase 365 dní po betonáži je uvažováno $\epsilon_{cs,365} = -17,18 \cdot 10^{-5}$.

Teplota v lokalitě České Budějovice, dle [2] (max. teplotní rozdíly), typ 3

$$T_{e,max} = T_{max} + 1,5 = 40 + 1,5 = +41,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_{e,min} = T_{min} + 8 = -36 + 8 = -28 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\epsilon = \alpha \Delta T = \pm 69,5 \cdot 10^{-5}$$

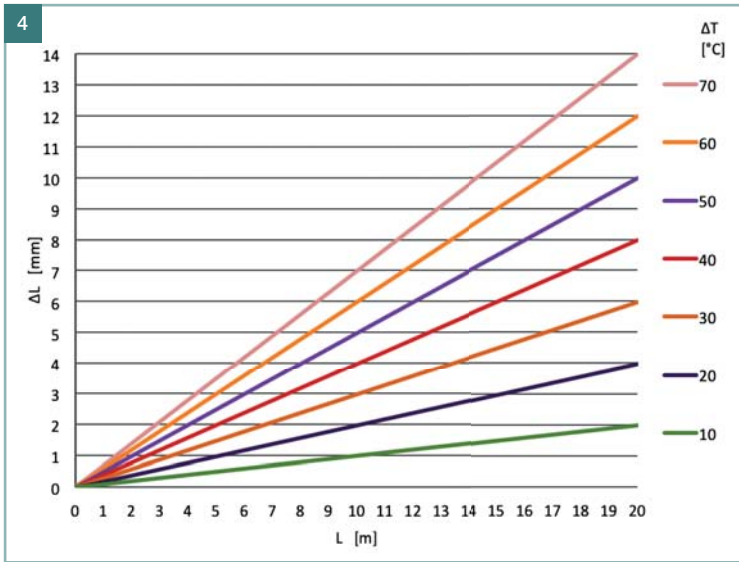


Obr. 1 Typický tvar štěrbinové trouby | Fig. 1 Typical shape of a slit drain

Obr. 2 Porušení štěrbinového žlabu osazeného do vozovkového souvrství | Fig. 2 Failure of a slit drain fitted into roadbed layers

Obr. 3 Dilatující délka vozovkového souvrství | Fig. 3 Dilated length of a roadbed formation

Obr. 4 Prodloužení / zkrácení betonové desky v závislosti na dilatující délce L a změně teploty ΔT | Fig. 4 Elongation / shortening of a concrete slab depending on the dilated length L and temperature change ΔT



Stahlfasern | steelfibres | Strahlmittel | abrasives

Čas pro řešení

KrampeHarex® ocelová a polypropylenová vlákna

Podlahy

Stříkaný beton

Bezpečnostní prvky

Žárovzdorný beton

Prefabrikované dílce

Občanská výstavba

Rychleji :

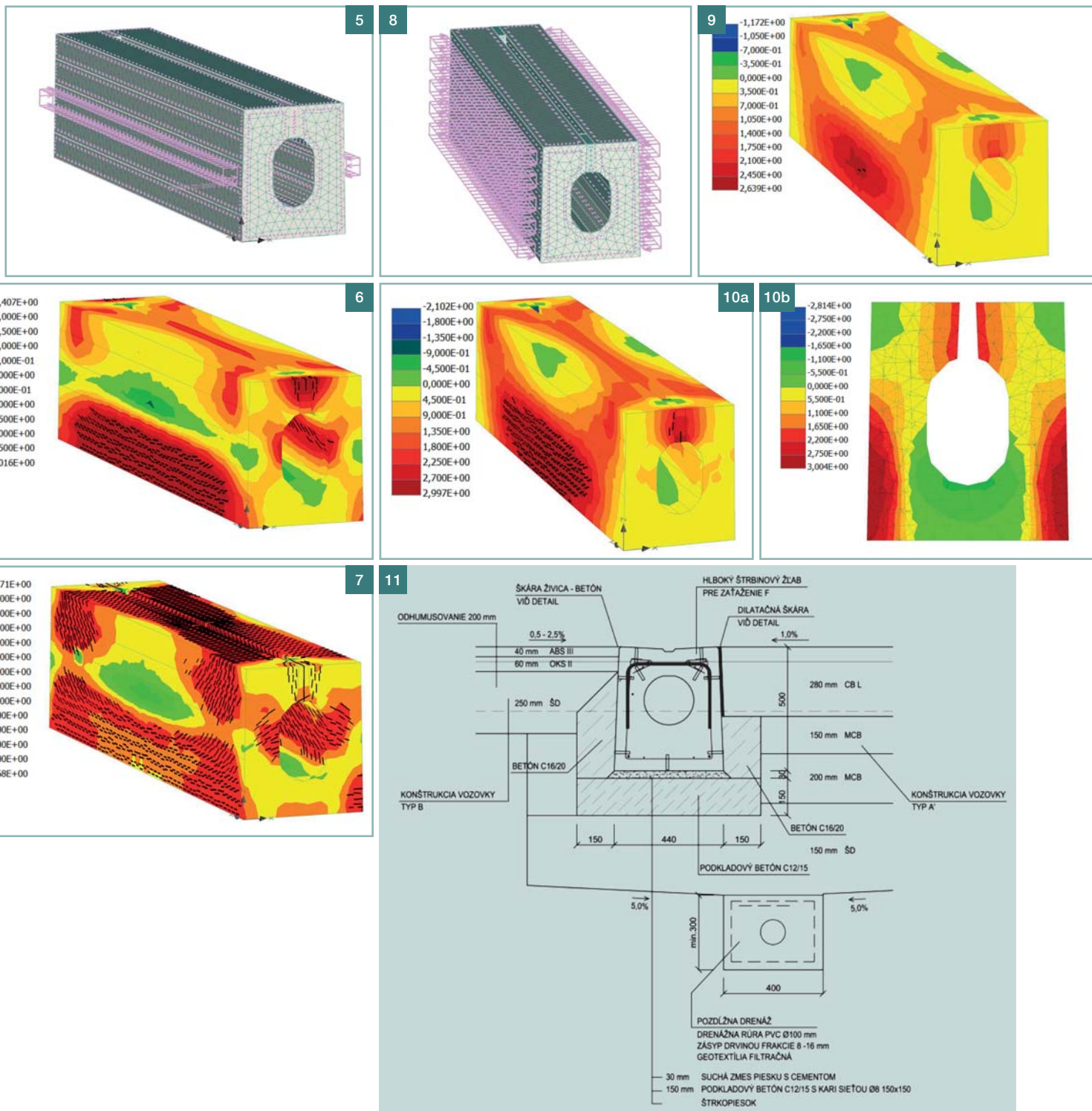
Až 2,5 krát rychleji oproti použití běžné betonářské výztuže.

Lépe :

Vlákna zvyšují pevnosti betonu a jeho požární odolnost.

Hospodárně :

Snížení nákladů na materiál a práci je nespornou výhodou.



Souvrství se tedy při teplotní expanzi a dilatační délce 1 m prodlouží o 0,695 mm. Naopak při teplotní kontrakci se zahrnutím vlivu smršťování je celkové zkrácení na 1 m dilatační délky 0,867 mm. Prodloužení i zkrácení vozovkového souvrství je přímo úměrné dilatační délce. Je tedy třeba počítat s tím, že při délce dilatace 10 m bude prodloužení 6,95 mm a zkrácení 8,67 mm (obr. 4).

POČÍTAČOVÁ ANALÝZA

Pro stanovení maximálního možného

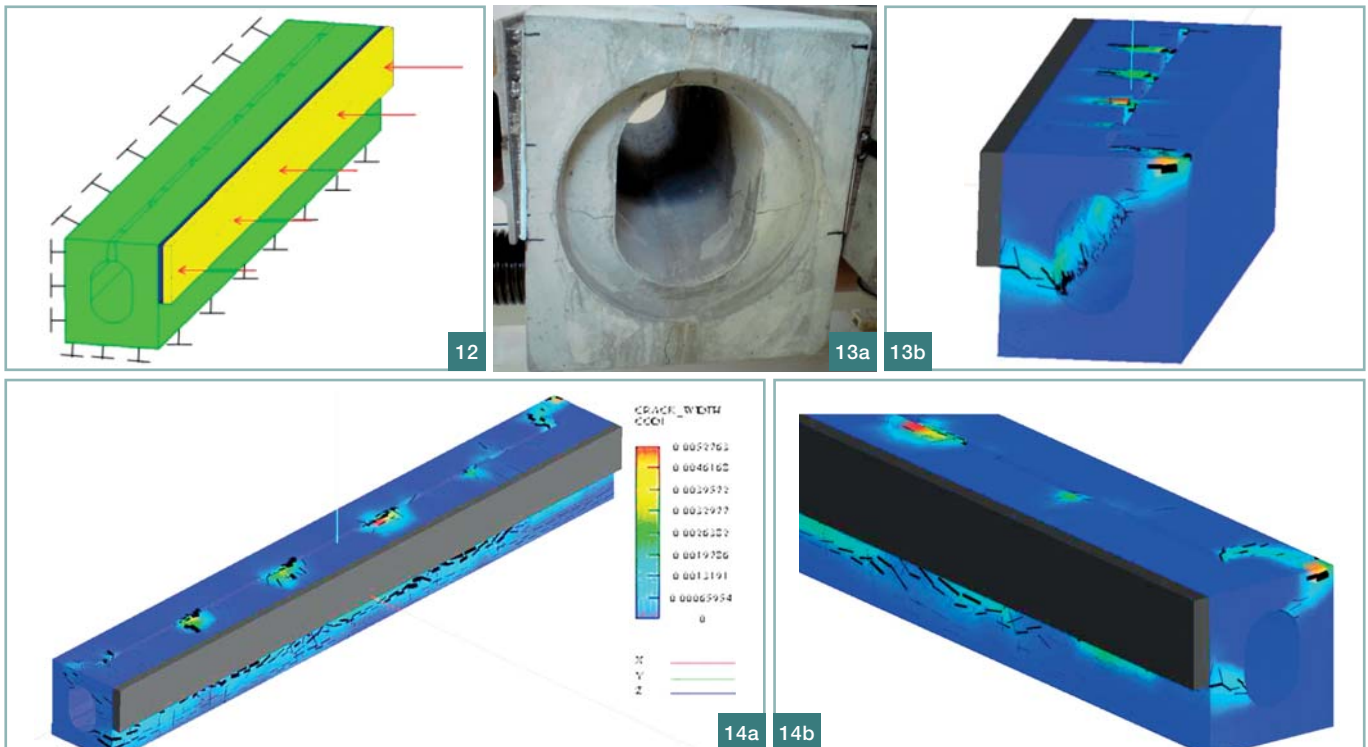
namáhání štěrbinových trub byly sestaveny dva zatěžovací modely. Model 1 (obr. 5) představuje zatížení, které působí na boční stěny štěrbinových trub v polovině jejich výšky pruhem o konstantní hodnotě. Zatížení narůstá v krocích po 50 kN/m². Model 2 (obr. 8) představuje zatížení bočních stěn štěrbinové trouby po výšce konstantním zatížením.

Zvolené modely vystihují možné namáhání štěrbinových trub bočním tlakem vyvozeným okolními vrstvami vozovky. Výsledky analýzy ukazují pro

Model 1 obr. 6 a 7 a pro Model 2 obr. 9 a 10.

Praktický příklad

Na obr. 11 je výkresová dokumentace zabudované štěrbinové trouby. Prefabrikované štěrbinové trouby jsou vloženy do vozovkového souvrství, kde na pravé straně jsou vrstvy cementobetonového krytu tloušťky 280 mm a podkladní vrstvy mezerovitého betonu tloušťky 150 a 200 mm. Mezi prefabrikovanou štěrbinovou troubou a vrstvou cementobetonového krytu je vložena deska



Obr. 5 Model 1, zatížení bočních stěn štěrbinové trouby pruhem konstantního zatížení ve středu boční stěny, zatížení narůstá v krocích po 50 kN/m^2 ■ Fig. 5 Model 1, load applied to the side walls of a slit drain by a stripe of constant load, positioned in the middle of the side walls, the load increases in increments of 50 kN/m^2

Obr. 6 Hlavní maximální napětí [MPa] a trhliny při zatížení 25 kN z obou stran prvku ■ Fig. 6 Maximum principal stress [MPa] and cracks under a load of 25 kN on both sides of the element

Obr. 7 Hlavní maximální napětí a trhliny [MPa] – porušení konstrukce ■ Fig. 7 Maximum principal stress and cracks [MPa] – failure

Obr. 8 Model 2, zatížení bočních stěn štěrbinové trouby po výšce konstantní hodnotou, přírůstek zatížení po 5 kN/m^2 ■ Fig. 8 Model 2, load applied on side walls of a slit drain by a constant value in whole height of the side walls, the load increment 5 kN/m^2

Obr. 9 Hlavní maximální napětí [MPa], zatížení 65 kN/m^2 (náhradní síla $32,5 \text{ kN}$), vznik trhlin ■ Fig. 9 Maximum principal stress [MPa], load of 65 kN/m^2 (substitute force 32.5 kN), formation of cracks

Obr. 10 Hlavní maximální napětí [MPa], zatížení 110 kN/m^2 (náhradní síla 55 kN), a) 3D model, b) svislý řez ve středu prvku ■ Fig. 10 Maximum principal stress [MPa] load of 110 kN/m^2 (substitute force of 55 kN), a) 3D model, b) vertical cross section in the middle of the element

Obr. 11 Část výkresové dokumentace osazení štěrbinové trouby do vozovkového souvrství ■ Fig. 11 Part of the technical drawing of the fitting of slit drain into a roadbed layers

z extrudovaného polystyrenu tloušťky 20 mm . Na levé straně je souvrství tvořeno asfaltovým betonem tloušťky 40 mm , vrstvou obalovaného kameniva tloušťky 60 mm a štěrkodrtí tloušťky 250 mm , přičemž prefabrikovaná trouba je obetonována betonem C16/20. Vzdálenost mezi žlaby je 20 m , tzn. dilatační délka betonové desky je 10 m .

Pro počítačovou analýzu chování prefabrikované betonové štěrbinové trouby byl vytvořen prostorový model (obr. 12) [8]. Spodní a levá boční

plocha byly uvažovány jako vetknuté, vzhledem k osazení trouby do betonového lože a nedilatované skladbě levé strany. Z pravé strany byla trouba zatěžována posunem betonové vrstvy, kterou v modelu představuje ocelová deska, přes dilataci z extrudovaného polystyrenu tloušťky 20 mm .

Pokud by skladba levé strany měla skladbu např. s vrstvou zeminy, byla by její tuhost modelována pomocí pružin. To by v každém případě znamenalo příznivější stav při zatěžování a ke vzniku trhlin by docházelo poma-

Obr. 12 Schéma zatěžování při počítačové analýze s pevným podepřením na levé straně, žlutou barvou je znázorněna ocelová deska, přes kterou je vnášen tlak do štěrbinové trouby, modrá je vrstva extrudovaného polystyrenu tloušťky 20 mm ■ Fig. 12 Loading scheme for a computer analysis with fixed supports on the left side, the yellow colour shows the steel plate through which the pressure is carried to the slit drain, the blue one represents an extruded polystyrene layer of a thickness of 20 mm

Obr. 13 Šířka trhlin na štěrbinové troubě od zatížení posunem ocelové desky přes vrstvu extrudovaného polystyrenu tloušťky 20 mm se zobrazenými trhlinami; zatlačení $6,5 \text{ mm}$; šířka trhlin $5,23 \text{ mm}$, a) experiment, b) detail modelu ■ Fig. 13 Crack width on a slit drain from the loading of a steel plate through a layer of extruded polystyrene of a thickness of 20 mm ; shift of 6.5 mm , crack width of 5.23 mm , a) real test, b) detail of the 3D model

Obr. 14 Šířka trhlin [mm] na štěrbinové troubě od zatížení posunem ocelové desky přes vrstvu extrudovaného polystyrenu tloušťky 20 mm se zobrazenými trhlinami; zatlačení $6,5 \text{ mm}$; šířka trhlin $5,23 \text{ mm}$, a) celý 3D model, b) detail ■ Fig. 14 Crack width [mm] on a slit drain from the loading of a steel plate through a layer of extruded polystyrene of a thickness of 20 mm ; shift of 6.5 mm , crack width of 5.23 mm , a) whole 3D model, b) detail

leji. Výsledná analýza je tedy provedena pro tento konkrétní případ, který se jeví jako nejméně příznivý.

Při počítačové simulaci bylo vnášeno zatížení do štěrbinové trouby přes tuhounou desku, která představuje betonovou desku, přes dilatační vrstvu extrudovaného polystyrenu tloušťky 20 mm . Jak je vidět z grafu na obr. 4, čelo betonové desky se při teplotním rozdílu $\Delta T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ (celoroční teplotní rozdí) posune směrem k štěrbinové troubě o 7 mm (bez uvažování vlivu smršťování). Na obr. 13 a 14 jsou gra-

Literatura:

- [1] ČSN EN 1991-1-1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb, ČNI, 2004
- [2] ČSN EN 1991-1-5: Zatížení konstrukcí – Část 1-5: Obecná zatížení – Zatížení teplotou, ČNI, 2005
- [3] ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, ČNI, 2006
- [4] ČSN EN 1992-2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady, ČNI, 2007
- [5] Bažant Z. P., Baweja S.: Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures: Model B3, ACI Special Publication Creep and Shrinkage of Concrete, 2000
- [6] Bittnar Z., Šejnoha J.: Numerical Methods in Structural Mechanics, ASCE Press, 1996
- [7] CS Beton, s. r. o., Technický katalog – Odvodňovací systémy, 2012
- [8] Tej P., Kolísko J.: Expertní zpráva č. 120 250J, Dilatační spáry šterbinových trub a vozovkového souvrství, knihovna KÚ ČVUT v Praze, 2012

fické výsledky zatěžování. Při posunu desky směrem k šterbinové trubě přes vrstvu extrudovaného polystyrenu o 6,5 mm je již trouba značně poškozena trhlinami.

Příčinou poškození šterbinové trouby je v tomto případě použití nevhodného dilatačního materiálu, extrudovaného polystyrenu. Extrudovaný polystyren se nechová pružně ani poddajně a působí jako tuhá nestlačitelná deska, přes kterou je větší díl zatížení přenesen do šterbinové trouby.

SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZY

Po diskuzi výsledků počítačové simulace chování prefabrikované betonové šterbinové trouby lze shrnout:

Poruchy šterbinových trub mohou být velmi snadno způsobeny deformacemi

betonových desek vozovkového souvrství. Vlivem teplotních expanzí a kontrakcí, s malým podílem smršťování betonu, dochází při nedilatovaném kontaktu k vzniku napětí na kontaktním místě mezi vozovkovým souvrstvem a bočními stěnami šterbinových trub.

Šterbinové betonové trouby jsou vysoce citlivé na boční tlakové namáhání, které snadno způsobí jejich poškození a poruchy.

Poruchy (trhliny) v troubách začnou vznikat již při velmi malém bočním stlačení šterbinové trouby v řádu desetin milimetrů.

Šterbinové trouby jsou vysoce citlivé i na malé narušení funkce dilatací (zapadání spáry tuhým materiálem) nebo na jejich nedostatečné provedení.

Výsledky analýzy jednoznačně prokazují nutnost důsledného provádění dilatačních spár při pokládce šterbinových trub do okolního souvrství, které může vyvolat vodorovné tlaky na trouby.

ZÁVĚR

Hlavním doporučením plynoucím ze závěrů analýz chování prefabrikovaných betonových šterbinových trub je:

- Důsledně provádět dilatační spáry na kontaktní rovině mezi šterbinovými troubami a vozovkovým souvrstvem.
- Potřeba a velikost dilatace okolních ploch u šterbinových trub se musí vždy počítat a projekčně řešit.
- Musí být prokázáno, že užitá dilatační hmota při vyčerpání potřebné dilatační funkce (stlačitelnosti) nedestruuje šterbinové trouby. Musí být výpočtem prokázáno, že užitím navržených dilatačních hmot je vyloučeno větší zatížení šterbinových trub, než je jejich únosnost v příčném zatížení dilatujícími okolními konstrukcemi zpevněných ploch. Jako nevhodný materiál se z tohoto hlediska jeví použití desek z extrudovaného polystyrenu.
- Provedené zkoušky a praktické zku-

šenosti potvrzují, že vhodným materiálem pro vymezení dilatační spáry je expandovaný pěnový polystyren EPS v tloušťce 20 mm s krycí vrstvou proti mechanickému poškození při zasypávání a hutnění z neměkčeného PVC tloušťky 2 mm, nebo pozinkovaného plechu tloušťky 0,7 mm.

- Dilatační spára musí být kryta (shora uzavřena) pružnou nebo tuhoplastickou hmotou, odolnou proti mechanickému poškození. Těsnost hmoty zároveň nesmí umožnit zapadání zeminy a drobných částí do spáry. Těsnící hmota musí navíc být schopná i kladné deformace (protažení), zejména v době těsně po betonáži okolního souvrství, kdy má značný podíl na posunu ve spáře smršťování a mohlo by dojít k otevření kontaktní plochy a k zapadání zeminy.
- Důležité je provádět dilatační spáru důsledně na celou výšku šterbinové trouby, tzn. včetně nosné vrstvy, nejen ve vrchních vrstvách. I když tato vrstva není vystavena velkým teplotním změnám, i tak vyvolá značný tlak na stěnu šterbinové trouby.

Počítačové simulace byly prováděny v programu ATENA verze 4.3.1g, Červenka Consulting.

TAČR TA01010791 Využití polymerních vláken v betonových silničních záchytných systémech.



Ing. Petr Tej, Ph.D.



Doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.
oba: Kloknerův ústav ČVUT v Praze
Šolínova 4, 160 00 Praha 6

Ing. Jan Rašovský
CS Beton, s. r. o.
Litoměřice

Text článku byl posouzen odborným lektorem.



ZVÝHODNĚNÉ PŘEDPLATNÉ PRO STUDENTY, STAVEBNÍ INŽENÝRY DO 30 LET A NOVĚ TAKÉ PRO SENIORY NAD 70 LET

Zvýhodněná cena za roční předplatné (šest čísel) pro studenty, stavební inženýry do 30 let a nově také seniory nad 70 let je 270 Kč bez DPH, 311 Kč s DPH (včetně balného a distribuce). Součástí předplatného na rok 2013 je pro všechny nové zájemce příloha Betonové konstrukce 21. století – Betony s přidanou hodnotou, která vyšla v prosinci 2012 a stávající předplatitelé ji dostali společně s číslem 6/2012.

Kontaktní e-mail: předplatne@betontks.cz

ZASLÁNÍ UKÁZKOVÉHO VÝTISKU ZDARMA

Na našich webových stránkách www.betontks.cz si můžete objednat jeden výtisk zdarma na ukázkou. Přehled všech výtisků naleznete v pdf formátu v archivu, starší výtisky jsou k dispozici v plné verzi, mladší pouze v náhledu (první stránky článků).