

# ANALÝZA KOTEVNÍCH DÉLEK PŘEDPĚTÍ VE VLÁKNOBETONOVÝCH KONSTRUKČNÍCH PRVCÍCH ■ ANALYSIS OF ANCHORAGE LENGTH IN PRESTRESSED FIBRE CONCRETE MEMBERS

Lukáš Kadlec, Vladimír Červenka,  
Vladimír Brejcha, Vladimír Křístek,  
Alena Kohoutková

V rámci rozsáhlého výzkumu byla provedena série zkoušek předpjatých betonových i vláknobetonových prvků. Experimenty byly následně simulovány programem ATENA. Cílem bylo posouzení shody mezi výsledky experimentů a numerických modelů, diskuze vlivu vláken a kritické posouzení konzervativních a zastaralých požadavků norem. ■ Several experiments of prestressed concrete and fibre-concrete members were realized within extensive research. Afterwards, numerical simulations of these experiments were analysed applying the ATENA software. The aim was to reach an agreement between results of the numerical models and the tests, to discuss the influence of fibres and to refer to disagreements with the standard's requirements.

Správné určení přenášeč a kotevní délky je podstatné pro spolehlivý a bezpečný návrh předpjaté konstrukce. Konzervativní doporučení těchto délek podle norem obvykle vedou k hodnotám značně přesahujícím skutečně nutné. Takový návrh je sice bezpečný, avšak ne hospodárný. Zároveň zde není uváděno žádné doporučení, jak zít v úvahu vliv vláken na kotevní délky. Existují dva přístupy, jak posoudit tyto nedostatky a formulovat doporučení lé-

pe vystihující realitu: experimenty a numerické simulace.

V rámci spolupráce dvou pracovišť – ČVUT a SMP CZ, a. s., – byl realizován rozsáhlý experimentální program zaměřený na předpjaté betonové sloupky protihlukových stěn. K výrobě zkušebních vzorků byly použity tři druhy betonu: beton prostý, drátkobeton a vláknobeton. Po dosažení požadované pevnosti betonu byly tyto sloupky předepnuty dvěma 7drátovými lany. Sloupky byly zkoušeny na ohybovou únosnost. Výsledky zkušebních měření poskytly základ pro kalibraci numerických modelů.

## TEORIE

Soudržnost mezi betonem a předpínací výztuží (dále jen soudržnost) je zodpovědná za přenos napětí z výztuže do okolního betonu. Tato soudržnost závisí na mnoha parametrech (např. na pevnosti betonu, výskytu trhlin, krytí výztuže, mezi kluzu výztuže, stupni příčného vyztužení, kvalitě povrchu předpínacích prvků, rychlosti uvolnění předpětí, kvalitě provedení betonáže). Je zřejmé, že predikce funkce soudržnosti je složitý problém.

Soudržnost je vyvozena třemi mechanismy: chemická přilnavost, tření a mechanické uzamčení betonu mezi vruby výztuže.

Chemická přilnavost je ovšem velmi malá a vymizí ihned po menším prokluzu, její vliv se tedy zanedbává.

Síly ze soudržnosti se šíří do okolního betonu, kde jsou vyvažovány kruhovým pásmem tahových napětí (obr. 1).

Soudržné napětí  $\tau_b$  a jeho radiální složka  $\tau_{br}$  jsou ve vztahu (1) [Tepfers 1973]

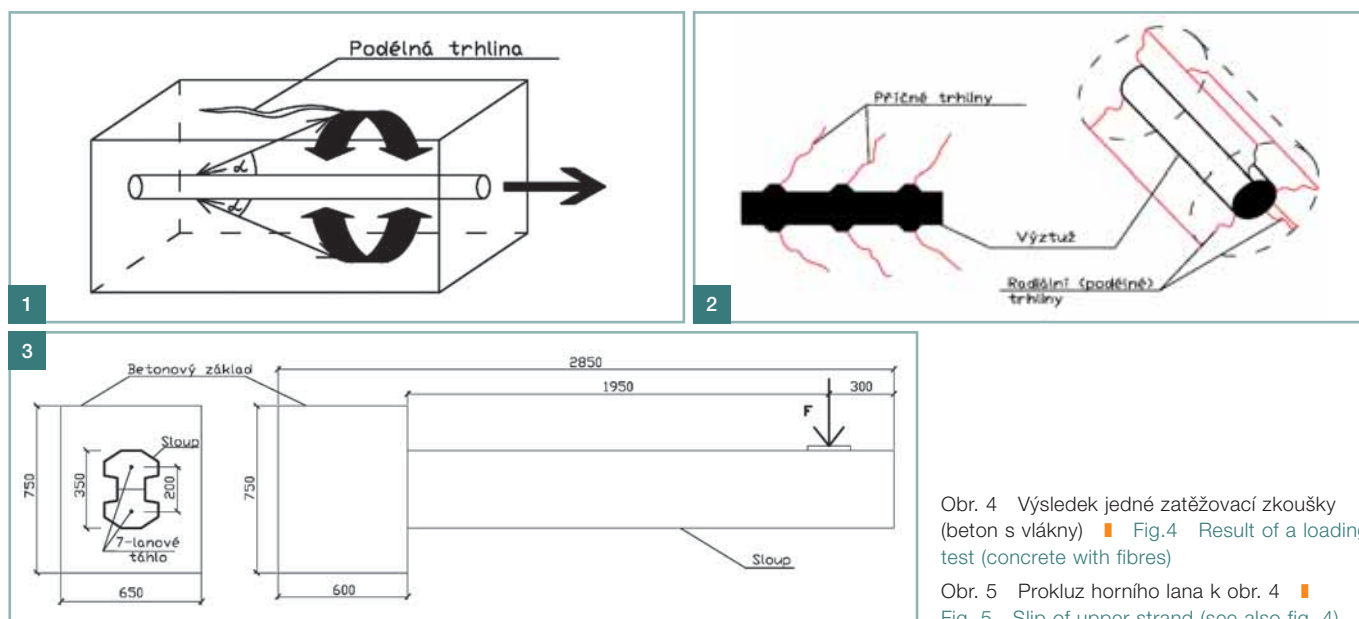
$$\tau_{br} = \tau_b \operatorname{tg} \alpha. \quad (1)$$

Během výroby po uvolnění předpětí (výztuž se zkrátí) je toto radiální napětí ještě zvýšeno díky příčnému rozšíření výztuže. Někdy jsou na čelní stěně viditelné radiální trhliny (Hoyerův efekt). V případě velkých radiálních (podélných) trhlin (obr. 2) může radiální tlak na výztuž vymizet, což vede ke ztrátě soudržnosti; totéž také může nastat, když se nosná výztuž dostane na mez

Obr. 1 Radiální tlaková složka napětí je vyvažována kruhem tahových napětí ■ Fig. 1 Radial bond stress is balanced by tensile ring stress

Obr. 2 Příčné trhliny a radiální (podélné) trhliny ■ Fig. 2 Transverse and radial (longitudinal) cracks

Obr. 3 Zkušební prvek – čelní a boční pohled ■ Fig. 3 Specimen - frontal and longitudinal view



Obr. 4 Výsledek jedné zatěžovací zkoušky (beton s vláknny) ■ Fig. 4 Result of a loading test (concrete with fibres)

Obr. 5 Prokluz horního lana k obr. 4 ■ Fig. 5 Slip of upper strand (see also fig. 4)

Tab. 1 Maximální síla  $F$  dosažená při ohybové zkoušce (obr. 3) ■ Tab. 1 Ultimate force  $F$  reached during a flexural test according to the fig. 3

| Zabetonovaná délka [mm] | Síla $F$ [kN] |      |       |
|-------------------------|---------------|------|-------|
|                         | 600           | 800  | 1 000 |
| Beton                   |               |      |       |
| prostý                  | 42,7          | 41,7 | 43,5  |
| s vlákny                | -             | 42,4 | -     |
| s drátky                | 42,4          | 43,5 | -     |

kluzu. Příčné zúžení totiž po dosažení meze kluzu významně vzroste.

Nárůst napětí v předpínací výztuži v kotevní oblasti je postupný. V případě velkého gradientu těchto sil mohou vzniknout příčné trhliny. Tento jev je výraznější, pokud je použita výztuž s vruby.

Kvalita soudržnosti závisí na rozvoji trhlin. Trhliny ovlivňují rozložení napětí blízko výztuže. Přítomnost radiálního přtlaku na výztuž zajišťuje účinnost funkce tření. Z tohoto důvodu je nutné zahrnout efekt radiálního přtlaku a vliv trhlin do numerického modelu.

### Soudržnost sedmidrátových lan (monostrand)

V dalším textu se budeme zabývat jen sedmidrátovými lany, která byla použita k výrobě sloupků. Podle výsledků studie [2] platí, že při zachování určitých podmínek (dostatečné krytí, kvalitní probetonování, vhodný stupeň předpětí) je napětí v soudržnosti v kotevní oblasti sedmidrátového lana přibližně konstantní. To odpovídá modelu soudržnosti podle mechanismu tření; typické hodnoty jsou  $f_{bk} = (1 \div 2) f_{ctk}$ , kde  $f_{bk}$  je pevnost v soudržnosti a  $f_{ctk}$  je charakteristická pevnost betonu v tahu. Tento předpoklad ověřený sadou experimentů a výpočtových studií budeme dále uvažovat.

### EXPERIMENTY

V rámci projektu FR-TI/496 (Progresivní vláknobetonové stavební prvky a konstrukce) byly navrženy protihlukové stěny s předpjatými sloupky. Použití předpětí se prokázalo z několika hledisek jako výhodnější oproti klasické měkké výztuži. Uspořádání zkoušky je patrné z obr. 3.

### Zkouška na ohybovou únosnost

Sloupky byly předepnuty dvěma sedmidrátovými lany, poté zabetonovány do betonového bloku a odzkoušeny na ohybovou únosnost. Betonový blok představuje vetknutí a vymezuje délku zakotvení. Sloupky byly zkoušeny ve vodorovné poloze řízeným posunem

Tab. 2 Mechanické vlastnosti (průměrné hodnoty ze série zkoušek) ■ Tab. 2 Mechanical properties (average values of several tests)

| Vlastnost                 | Krychelná tlaková pevnost [MPa] | Pevnost v tahu [MPa] | Válcová tlaková pevnost [MPa] | Youngův modul pružnosti [GPa] | Specifická lomová energie [N/m] |
|---------------------------|---------------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Prostý beton              | 93                              | 4,8                  | 80                            | 40                            | 85                              |
| Ocelové drátky Fibrex A-1 | 93                              | 5,2                  | 84                            | 43                            | 1 700                           |
| Umělá vlákna 3M           | 90                              | 4,5                  | 72                            | 38                            | 800                             |

300 mm od konce sloupu. Sedmidrátová lana (15,7 mm) měla mez pevnosti 1 770 MPa a byla předepnuta na napětí 1 375 MPa.

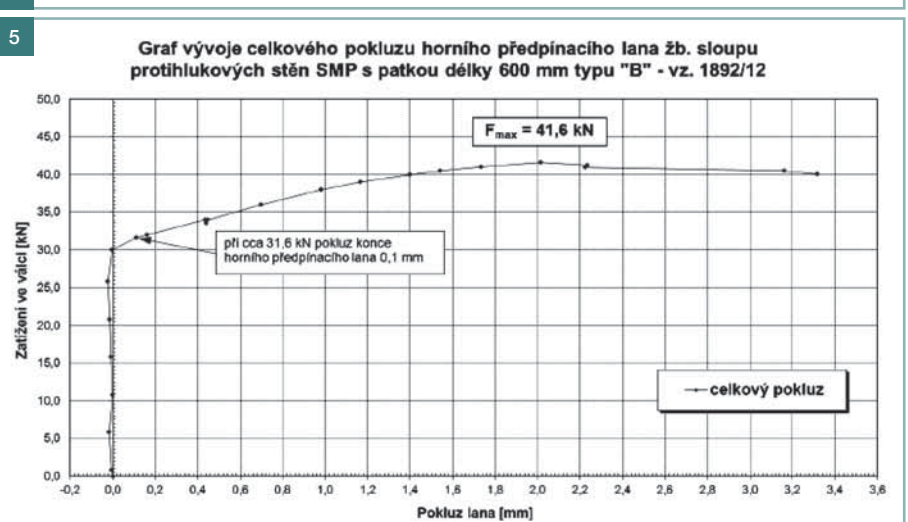
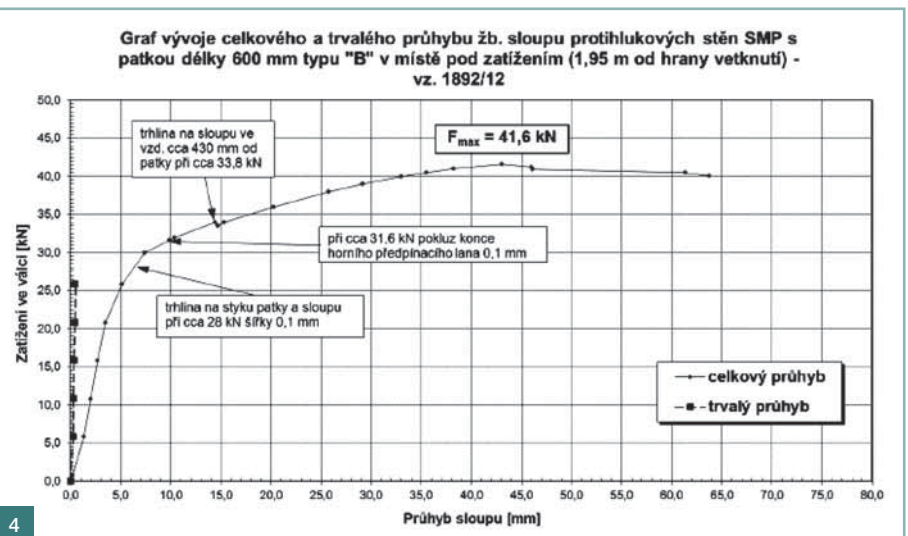
První zkoušky se uskutečnily v roce 2011, kdy bylo odzkoušeno 21 sloupků. Zabetonovaná (kotevní) délka byla 600 (obr. 3), 800 a 1 000 mm. Sloupky byly zhotoveny z prostého betonu, drátkobetonu a vláknobetonu. Výsledky zprůměrované z více zkoušek jsou shrnuty v tab. 1.

U každého druhu betonu byly podrobně odzkoušeny jeho mechanické vlastnosti. Zprůměrované hodnoty pro jednotlivé betony jsou zaznamenány v tab. 2. Naměřené mechanické

vlastnosti betonů umožnily následnou numerickou simulaci zkoušek.

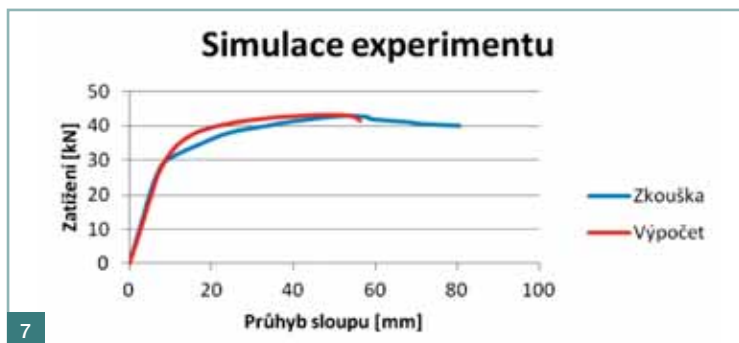
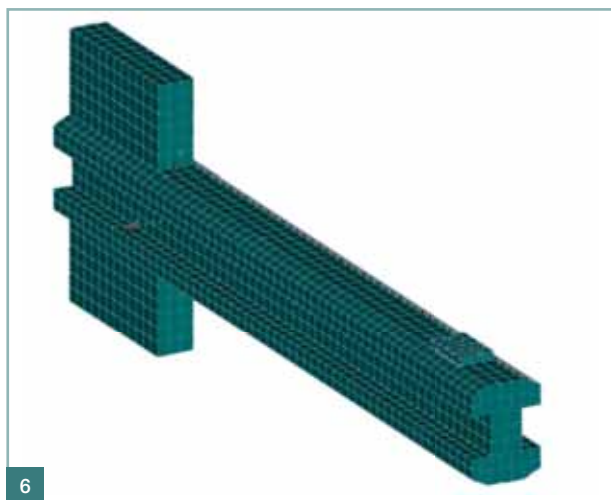
V roce 2012 bylo zhotoveno dalších sedm sloupků. U dvou experimentů byla předpínací lana opatřena epoxidovým nátěrem. Toto ošetření vedlo ke zhoršení soudržnosti s betonem a nebudeme se jím dále zabývat. Všechny vzorky v roce 2012 byly vyrobeny z betonu vyztuženého umělými vlákny a zabetonovaná délka byla 600 mm.

Maximální průměrná dosažená síla byla 41 kN, což je hodnota blízká výsledkům z roku 2011 (tab. 1). Mechanické vlastnosti betonu s vlákny byly blízké hodnotám naměřeným při



Tab. 3 Výsledky pull-out testů ■ Tab. 3 Results of pull-out tests

| Zkouška | Prokluz [mm] | Síla ve výztuži [kN] | Napětí ve výztuži [MPa] | Prokluz [mm] | Síla ve výztuži [kN] | Napětí ve výztuži [MPa] | Pokluz [mm] | Síla ve výztuži [kN] | Napětí ve výztuži [MPa] |
|---------|--------------|----------------------|-------------------------|--------------|----------------------|-------------------------|-------------|----------------------|-------------------------|
| 1       | 0,002        | 215                  | 1 433,33                | 0,1          | 230                  | 1 533,33                | 0,131       | 230                  | 1 533,33                |
| 2       | 0,002        | 161,7                | 1 078                   | 0,1          | 213,8                | 1 425,33                | 0,128       | 219,8                | 1 465,33                |
| 3       | 0,002        | 98                   | 653,33                  | 0,1          | 115,7                | 771,33                  | 0,336       | 149,8                | 998,67                  |



zkouškách v roce 2011 (tab. 2), pouze modul pružnosti byl v tomto případě zjištěn hodnotou 30,5 GPa. Na obr. 4 je ukázán jeden typický průběh zatěžovací zkoušky a na obr. 5 příslušný prokluz horního lana, měřeno na volném konci.

Jako doprovodná zkouška byla přímo měřena kvalita soudržnosti mezi ocelí a betonem. Tyto zkoušky byly provedeny na výřezech konců sloupků délky 600 mm, kdy výztuž byla vytahována z betonového prvku (pull-out test).

#### Diskuze naměřených výsledků

Je nutné uvést, že primárním cílem těchto zkoušek nebylo zjišťování kotevních délek.

Žádná zkouška neskončila kolapsem, nýbrž byla řízeně zastavena a to těsně po dosažení vrcholové únosnosti. Nebyla tedy sledována sestupná větev diagramu až do destrukce vzorku. Nelze tedy okamžitě určit, zda byl či nebyl splněn požadavek dostatečné kotevní délky. Avšak po rozvaze uvedené v dalším odstavci lze prokázat, že kotevní délka byla dostatečná pro všechny zabetonované délky.

S ohledem na stupeň vyztužení předpínací výztuží, mechanické vlastnosti betonu a oceli (pevnosti) i průběh zkoušky je zřejmé, že k selhání zkušebních prvků by došlo v důsledku poruchy funkce předpínací výztuže. Mohou nastat dva způsoby porušení:

- přetržení výztuže (dostatečná kotevní délka),
- vytržení výztuže z betonu (nedostatečná kotevní délka).

V úvodním odstavci byl zmíněn předpoklad, že napětí v soudržnosti mezi betonem a předpínacím lanem je konstantní, a tedy napětí v laně narůstá od volného konce lineárně. Výsledky uvedené v tab. 1 dávají přibližně stejné hodnoty únosnosti sloupku, a proto nutná kotevní délka nemůže být větší než 600 mm. (Pokud by nutná kotevní délka měla být vyšší, např. 750 mm, byla by únosnost sloupku při zabetonování na 800 či 1 000 mm výrazně vyšší než při zabetonování na 600 mm).

Velmi užitečné výsledky mohla přinést zkouška na zjištění soudržnosti mezi ocelí a betonem. Klasický pull-out test by měl skončit buď přetržením výztuže, nebo vytržením výztuže z betonu. I tyto zkoušky však byly zastaveny při poměrně malém prokluzu (tab. 3).

Při ohybové zkoušce sloupku byl též měřen prokluz na volném konci (obr. 5). Zde je vidět, že při prokluzu 0,1 mm únosnost sloupku dosahovala jen asi 78 % výsledné únosnosti sloupku. Přitom maximální únosnost sloupku byla dosažena až při prokluzu lana 2 mm. Z toho je patrné, že zkouška na soudržnost byla přerušena předčasně.

#### NUMERICKÁ SIMULACE

Ohybová zkouška sloupku byla simulována pomocí programu ATENA pro nelineární analýzu metodou konečných prvků.

Pro popis betonu byl zvolen materiál 3D nonlinear cementitious 2, který je schopen velmi výstižně postihnout skutečné chování betonu. Tento křehko-plastický model kombinuje materiálo-

vé vztahy pro tahové chování (s trhlina-mi) a tlakové chování (s plasticitou). Model s trhlinami je založen na klasickém ortotropním popisu rozetřených trhlin. Po dosažení kritéria pro vznik trhliny dochází postupně k poklesu tahového napětí a rozevření trhliny je určeno na základě zákonů lomové mechaniky. V idealizaci byl zvolen model pevného směru trhlin, kdy trhlina je kolmá na hlavní tah v okamžiku vzniku trhliny. Pokud se dále změní směr hlavních tahů, trhlina se nenatáčí a s ohledem na rozevření přenáší jisté smykové napětí.

Napětí v soudržnosti bylo s ohledem na údaje z úvodního odstavce zvoleno konstantní hodnotou a to:

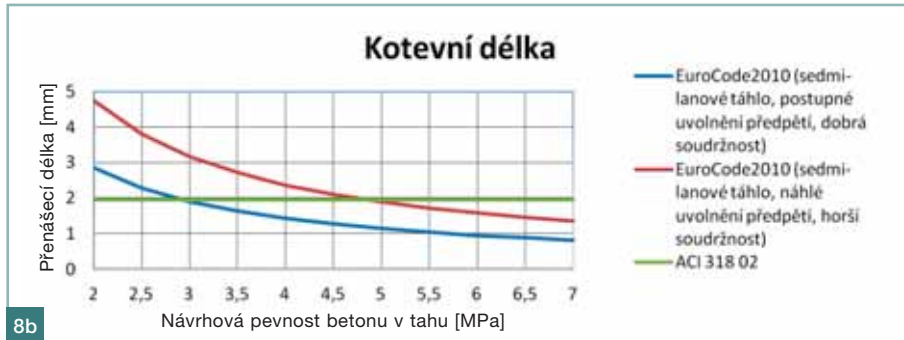
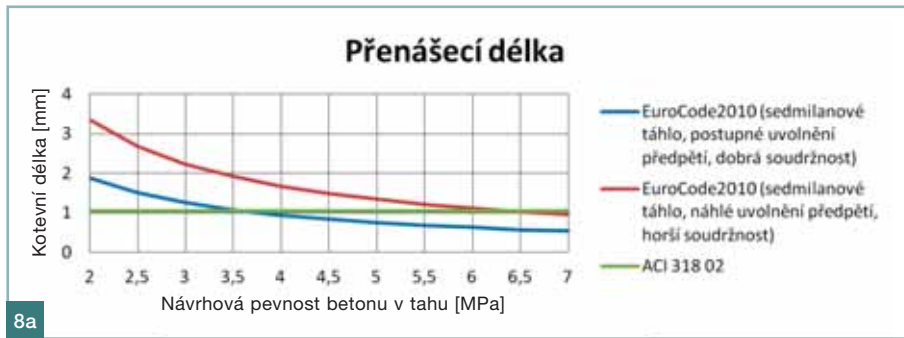
$$f_{bk} = 1,6f_{ctk} = 1,6 \cdot 4,8 = 7,7 \text{ [MPa]}$$

Na obr. 7 je v grafu vykreslen pracovní diagram zkoušky a její numerická simulace programem ATENA. (Jedná se o zkoušku betonu bez rozptýlené výztuže. Pro vlákno/drátkobeton vyšlo srovnání s experimentem obdobně). Shoda výpočtu se zkouškou je dobrá.

Jediný nesoulad je při zatížení 30 kN, kdy dojde u reálného experimentu ke změkčení. Tento jev je způsobený porušením betonu u betonové patky. V našem numerickém modelu jsme pro zjednodušení a urychlení výpočtu modelovali patku z lineárního izotropního materiálu bez trhlin. Numerický model tedy nebyl schopen postihnout porušení patky, což vysvětluje poněkud rozdílnou odezvu modelu oproti skutečnosti.

Kotevní délka v numerickém modelu vyšla cca **550 mm**. Tato hodnota, vzhledem ke zvolenému napětí v sou-





Obr. 6 Model – síť 3D konečných prvků

Fig. 6 Meshed model

Obr. 7 Porovnání experimentu a numerického modelu

Fig. 7 Comparison of the experiment and the model

Obr. 8 a) Přenášečí, b) kotevní délka podle norem

Fig. 8 Transfer and anchorage length according to the Codes

## Literatura:

- [1] *Tepfers R.* (1973): Tensile lap splices with confining reinforcement, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden
- [2] *Bruggeling A. S. G.* (2004): Transmission of prestress by bond, *fib* Commission 9
- [3] *Lundgren K.* (1999): Three-dimensional modelling of bond in reinforced concrete, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden

držnosti, není nijak překvapivá. S uvážením hodnoty napětí v soudržnosti lze snadno tuto kotevní délku ručně spočítat. Význam simulace spočíval v tom, že model je schopný vystihnout rozvoj trhlin a uvážit průběh napětí v soudržnosti. Pokud by sloupek byl významněji porušen trhlinami, vedlo by to ke snížení kvality soudržnosti. Tento aspekt není možno v jednoduchém výpočtu zohlednit.

V úvodu bylo zmíněno, že požadavky norem často výrazně převyšují reálné hodnoty přenášečích a kotevních délek. Grafy na obr. 8 znázorňují požadované přenášečí a kotevní délky podle Eurokódu 2010 a ACI 318 02.

Charakteristická pevnost použitého betonu v tahu byla zhruba 5 MPa, což vede na návrhovou hodnotu 3,3 MPa. Příslušná kotevní délka podle Eurokódu (pro dobré podmínky soudržnosti a postupné uvolnění předpětí) je **1,7 m**. Podle doporučení ACI by pro řešený případ vyšla hodnota ještě vyšší (toto doporučení vůbec nerespektuje návrhovou pevnost betonu v tahu!).

## ZÁVĚR

Na základě výsledků experimentů a nu-

merických simulací lze potvrdit, že požadavky norem na kotevní délky jsou velmi konzervativní – i více než trojnásobně vyšší oproti skutečnosti. Zároveň je ve většině praktických konstrukčních případů rozhodující průřez daleko od kotevní oblasti a v blízkosti kotvení je dostačující i nižší úroveň předpětí. Na druhou stranu podcenění kotevních délek v kritickém průřezu vede na náhlé vyčerpání únosnosti bez předchozího varovného nadměrného průhybu. Kromě toho je kotevní délka citlivá na kvalitu provedení při výrobě. Tu lze těžko měřit a předvídat, a jistá rezerva bezpečnosti je tedy nezbytná. Je otázkou, jak velká by tato rezerva měla být.

Uspořádání experimentu nebylo zcela optimální, aby umožnilo zhodnotit účinnost vláken/drátek. Vyšší lomová energie vláknobetonu omezí rozvoj trhlin, což znamená obecné zlepšení kvality soudržnosti. Pozitivní vliv vláken bude výraznější v případě malého krytí. V případě prostého betonu se radiální trhliny šíří do okolí a snadno způsobí vytržení výztuže. Vysoká lomová houževnatost vláknobetonu omezí jejich rozvoj, a soudržnost pak funguje déle i pod vyšším zatížením.

Uvedené výsledky byly získány v rámci řešení grantového projektu č. 104/11/1301 uděleného Grantovou agenturou České republiky.

Ing. Lukáš Kadlec

e-mail: kady@seznam.cz

ČVUT v Praze, Fakulta stavební

Thákurova 7, Praha 6



Ing. Vladimír Červenka, CSc.,

Ph.D., FEng.

e-mail: vladimir.cervenka

@cervenka.cz



Ing. Vladimír Brejcha, FEng.

e-mail: brejcha@smp.cz

SMP CZ, a. s.



Prof. Ing. Vladimír Křístek,

DrSc., FEng.

e-mail: vladimirkristek@seznam.cz



Prof. Ing. Alena Kohoutková,

CSc., FEng.

e-mail: akohout@fsv.cvut.cz



oba: Fakulta stavební ČVUT v Praze  
Thákurova 7, Praha 6

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

Innovative Solutions – Benefiting Society

12<sup>TH</sup> INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONCRETE ROADS 2014  
September 23–26, 2014 | Prague, Czech Republic



2014  
12<sup>TH</sup> ISCR  
PRAGUE  
CZECH REPUBLIC

Právě teď nastal čas plánování na rok 2014, využijte proto možnost prezentovat Vaši firmu na této mezinárodní konferenci – více informací naleznete na [www.concreteroads2014.org](http://www.concreteroads2014.org).