

SYSTÉM KOTVENÍ PŘEDPJATÉ FRP VÝZTUŽE ■ SYSTEM OF PRESTRESSED FRP REINFORCEMENT ANCHORING

František Girgale, Petr Štěpánek,
David Horák, David Ďurech,
Ivana Laníková

Článek se zabývá problematikou návrhu kotvení oblasti předem předpjatých prvků vyztužených FRP výztuží. Popisuje chování nově vyvinutého kotveního prvku a algoritmy návrhu kotvení oblasti zjednodušenou metodou a srovnává získané výsledky s řešením numerických modelů a provedenými experimenty. ■ The paper deals with the design of anchoring area of pre-stressed members reinforced with FRP reinforcement. It describes the behaviour of newly developed anchoring element and algorithms for design of anchorage area by simplified method and compares the results obtained by the solution of numerical models and the real experiments.

V posledních desetiletích roste využití FRP (fibre-reinforced polymer) kompozitních materiálů v betonových konstrukcích. Vnitřní nekovové výztuže mají mnoho výhod, ovšem stále je zde několik problematických oblastí, které je potřeba vyřešit a zlepšit tím použitelnost tohoto typu výztuže.

Výraznou nevýhodou je nižší modul pružnosti v porovnání s klasickou ocelovou výztuží. Tato vlastnost negativně ovlivňuje průhyby konstrukcí a může způsobit vznik trhlin již při relativně nízké hladině zatížení. I když samy o sobě tyto jevy neovlivňují únosnost konstrukce, mohou značně komplikovat její použití v praxi. Jedním ze způsobů, jak tyto problémy eliminovat, je tuto výztuž předepnout.

Použitím FRP kompozitů jako předpjaté výztuže mnohem lépe využijeme jejich tahové vlastnosti, kdy jsou schopny přenášet velké předpínací síly. Ovšem při návrhu kotvení oblasti se projevuje další

negativní vlastnost kompozitních výztuží a tou je anizotropní chování materiálu výztuže – vzhledem k nízké pevnosti v tlaku kolmo na vlákna je velice obtížné předepnutou výztuž konvenčními způsoby bezpečně zakotvit. Je proto nutné vyvinout spolehlivý způsob zakotvení FRP výztuží, který by umožnil jednoduché a rychlé provádění a přitom si zachoval veškeré výhody použití nekovového systému vyztužení konstrukce.

VYVINUTÝ SYSTÉM KOTVENÍ FRP VÝZTUŽÍ

Stávající stav; princip působení nového systému

Při použití standardních kotveního kuželíků s vroubkovaným povrchem vzniká v kotvené předpínané výztuži současně výrazné příčné stlačení, podélný smyk a osový tah. Vznikající příčné tlakové síly však není možné bezpečně přenést do kompozitní výztuže, proto celá řada výrobců modifikovala (případně zcela vyvinula) vlastní systém kotvení těchto výztuží.

V současnosti se pro kotvení FRP výztuží používají v zásadě dva typy kotven (podrobněji viz např. [1] až [4]). Prvním způsobem je kotvení podobné klasickému systému kotvení ocelových lan, kdy je předpínací síla mezi kotveního kuželíkem a lanem přenášena pomocí smykové síly. Druhý způsob kotvení FRP výztuží využívá k přenesení potřebné předpínací síly mezi kotveního objímkou a lanem soudržnosti epoxidové či jiné injektážní směsi s kotvenou výztuží. Kotvení objímka bývá v těchto případech buď z nekovového materiálu na bázi kompozitu, a nebo jde o kovovou tenkostěnnou trubku z nerezové oceli.

U většiny variant používaných kotven

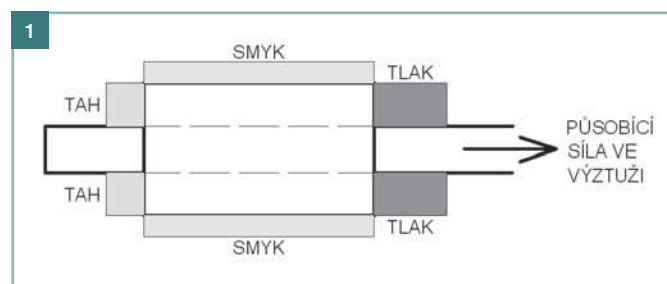
ních prvků se ovšem jedná o použití kovových částí v systému, který byl primárně navržen bez ocelových částí. Z tohoto důvodu bylo na Stavební fakultě VUT v Brně přikročeno k vývoji kotveního prvku [5], [10], [11], jenž by umožnil účinně vnést předpínací sílu do prvku, ale neobsahoval by žádné kovové části.

Princip působení nově vyvinutého kotveního systému [10], [11] je založen na vytvoření dodatečné roznášecí plochy na konci výztuže, která umožní přenos předpínací síly z výztuže do okolního betonu. Tato plocha je vytvořena nalepením jednoho nebo více válečků (vyrobených z polymerů vyztužených FRP vlákny) většího průměru na výztuž. Průměr válečku i jeho délka jsou variabilní. Materiál kotvy má velkou soudržnost s výztuží, čímž je umožněn přenos tahové síly (resp. smykové síly mezi válečkem a výztuží) na kratším úseku. Díky většímu průměru válečku vzniká na výztuži tlačná ploška, která slouží pro přenos tlakové síly do okolního prostředí. Únosnost kotvení výztuže je pak dána kombinací smykové únosnosti povrchu kotveního prvku, otláčení jeho přední strany a tahového namáhání v zadní části kotvy (obr. 1).

Variálně lze kotvení prvky sériově kombinovat – ať už pro zvýšení maximální kotvení síly, nebo pro zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti kotveního systému.

Provedené experimenty

V experimentální fázi vývoje ([5], [6]) byly zkoušeny různé varianty provedení kotveního válečků a různé typy zálivek. Snahou bylo vytvořit takový prvek, který by vyhovoval požadavkům na pevnost v tlaku (otlačení čelní plo-



Obr. 1 Mechanismus kotvení předpínací výztuže s vyznačením působících sil ■ Fig. 1 Working scheme of the anchoring system

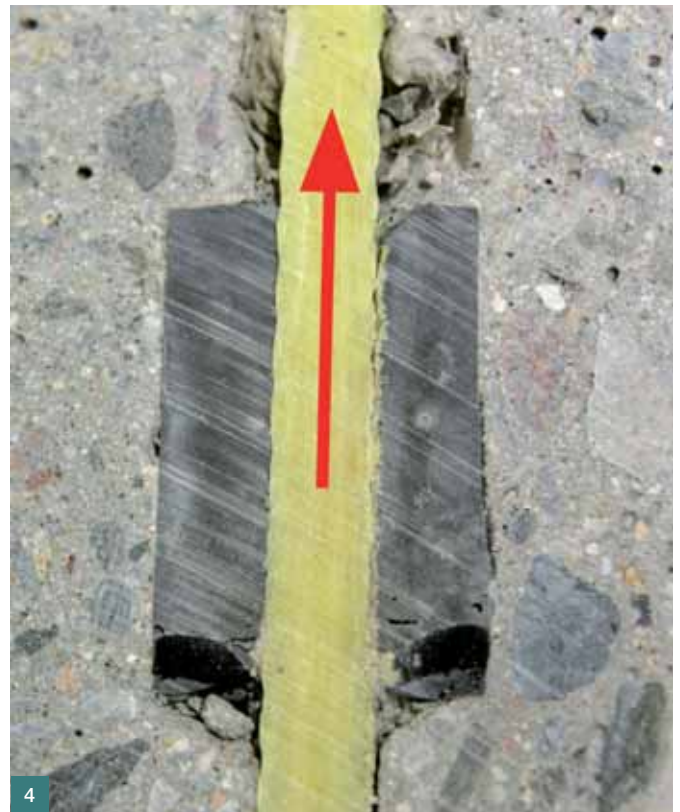
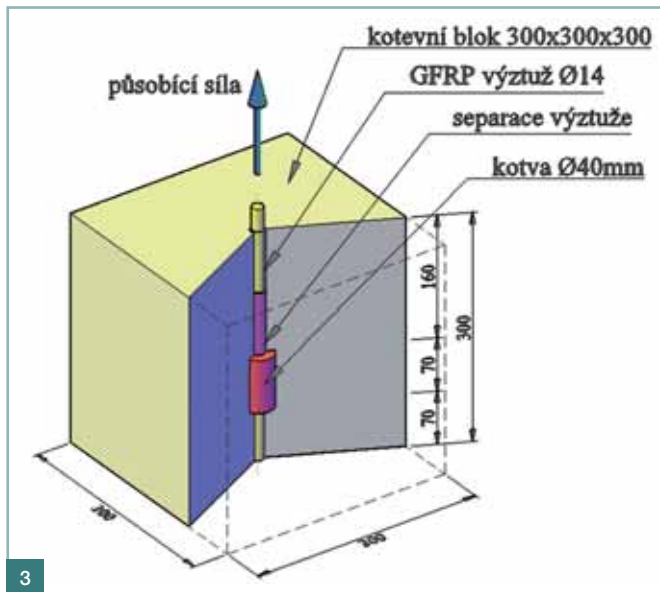
Obr. 2 Příčné roztržení kotveního válečku ■ Fig. 2 Transverse rupture of anchoring roller



Obr. 3 Schéma prvku pro zkoušku kotvení v bloku betonu

Fig. 3 Specimen for the test of anchoring roller in block of concrete

Obr. 4 Typické porušení kotvení trhlinou na rozhraní výztuže a kotvy (v horní části viditelná separace výztuže od betonu) Fig. 4 Characteristic failure of anchor (crack at the interface of reinforcement and anchor)



chy) a dosahoval výborné soudržnosti s nekovovou výztuží. Zároveň byl kladen důraz i na jednoduchost provádění kotvy. Po vyhodnocení řady variant byl zvolen válcový tvar kotvy. Jako závlivková směs byla použita pryskyřice s minerálními plnivými, v případě potřeby doplněná o nekovová vlákna, jež dále zvyšují tahovou pevnost výsledného kotevního prvku (obr. 2).

Další sada experimentů zkoumala chování kotevního systému v případě předem předpjatých konstrukcí, kdy kotevní prvek bude obalen vrstvou betonu, která brání jeho příčnému roztržení. Při tomto způsobu namáhání lze již s použitím jednoho kotevního válečku dosáhnout zakotvení výztuže, které se blíží pevnosti použité GFRP (glass fibre-reinforced polymer) výztuže (napětí od kotvené síly cca 630 MPa; pevnost výztuže 680 MPa). Schéma zkušební vzorku je patrné z obr. 3. Vzhledem k potřebě ověřit pouze únosnost kotevního prvku byla výztuž na kontaktu s betonem separována (separace je patrna v horní části obr. 4). Provedení zkoušky se blíží způsobu zkoušení soudržnosti výztuže s betonem (pull-out testy). Kotevní prvek v tomto případě již není porušen vznikajícími příčnými silami, ale dochází k selhání kontaktu mezi výztuží a válečkem (obr. 4). Na obrázku je také dobře vidět podélné zkrácení kotevního prvku, které je způsobeno kotve-

nou silou (směr působení je vyznačen červenou šipkou).

NÁVRH A POSOUZENÍ KOTEVNÍ OBLASTI

Problematika návrhu a posouzení kotevní oblasti vnitřních předpjatých FRP výztuží je důležitá z hlediska popisu závislosti vnášené předpínací síly na posunu kotvené výztuže. To umožní vyčíslení ztrát ve výztuži při jejím kotvení. Hlavní přenos sil, který má dominantní vliv na únosnost i deformace kotevního systému, probíhá v oblasti hlav jednotlivých kotev, které tvoří „elastické zarážky“ prutu v betonu a působí jako pružiny opřené v hlavě o okolní beton. Působení kotevní oblasti lze proto popsat pomocí tuhostních parametrů jednotlivých komponent. Výsledné rovnice popisují závislost přenášené síly na posunu (přetvoření) jednotlivých míst kotevní oblasti, z čehož lze odvodit velikost ztráty v předpínané výztuži. Také je možno přidávat další prvky do kotevního systému (či upravovat parametry stávajících), aniž by se výrazně změnil postup výpočtu.

Analytické řešení problému, princip výpočtu

Na následujících řádcích je uveden pouze stručný výtah z analytického řešení daného problému. Text neobsahuje všechny teoretické předpoklady výpočtu, jež budou následně uveřejněny

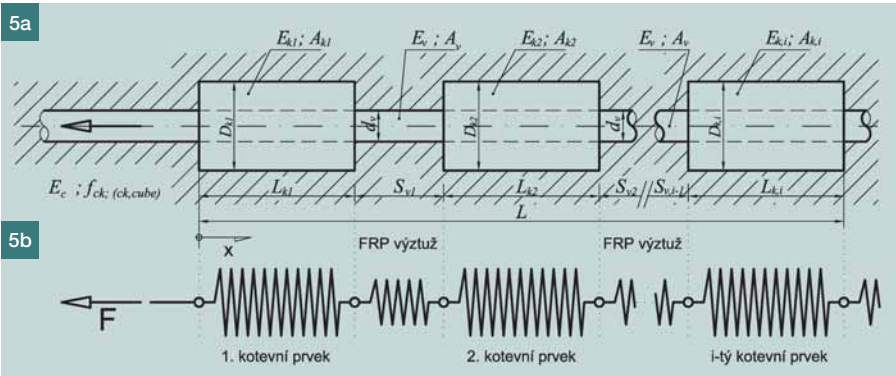
v samostatném textu v teoretičtěji zaměřeném periodiku.

Kotevní systém lze idealizovat jako systém pružin řazených do série (obr. 5), které se společně podílí na přenosu kotvené síly do okolního betonu. Při vnášení síly jsou jednotlivé pružiny postupně aktivovány a každá z nich odebírá sílu úměrnou její aktuální tuhosti. Celková únosnost je dána součtem sil, které přenesou čelní plochy (hlavy) lepených kotev v tlaku, a sil, které přenesou tření mezi pláštěm kotvy a okolním betonem; tah vznikající na konci (patě) kotvy (obr. 1) mezi betonem a kotvou lze zanedbat.

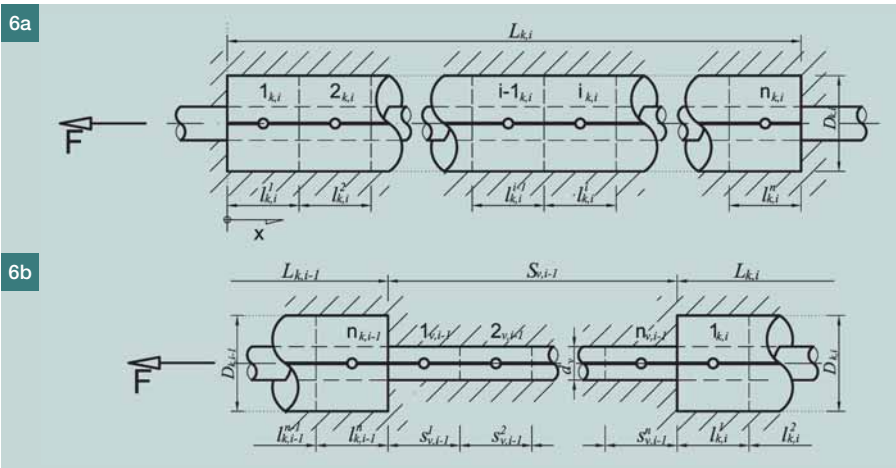
Kotevní systém je složen z:

- výztuže před hlavou první kotvy (dáno: plocha A_v a modul pružnosti E_v);
 - N_k kotevních prvků (dáno: plocha A_k , modul pružnosti E_k a délka kotvy $L_{k,i}$);
 - $N_k - 1$ výztuží mezi kotevními prvky (dáno: plocha A_v , modul pružnosti E_v , vzdálenost mezi kotevními prvky $S_{v,i}$).
- Každý kotevní prvek i výztuž mezi kotvami lze rozdělit na n částí o délce elementu l (obr. 6).

Jednotlivé dílčí elementy kotevního systému (obr. 6) jsou reprezentovány jedním referenčním bodem umístěným v těžišti (tj. pro prutový prvek konstantního průřezu v polovině) elementu a jemu příslušející neznámou deformací (posunem). Na základě známých tuhostních



Obr. 5 Kotevní oblast, a) skutečný tvar, b) idealizace chování; L ; $L_{k,i}$; $D_{k,i}$; $S_{v,i}$; d_v ; popisují geometrii kotevní oblasti; $E_{k,i}$; E_v značí modul pružnosti kotevního prvku respektive kotevné výztuže; $A_{k,i}$; A_v průřezovou plochu kotevního prvku respektive kotevné výztuže a F kotevnou (předpínací) sílu ■ Fig. 5 Anchoring area, a) real anchoring elements, b) idealization of behaviour

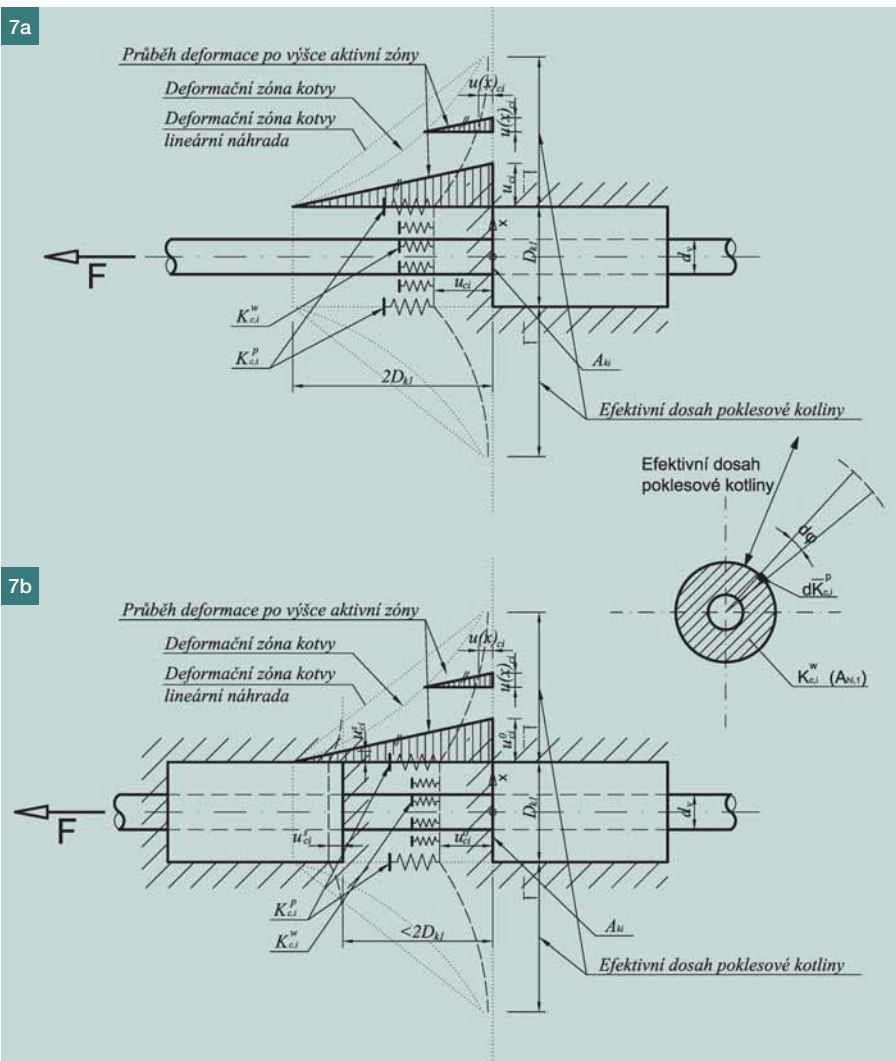


Obr. 6 Princip rozdělení a) kotevního prvku a b) výztuže mezi prvky na konečný počet elementů ■ Fig. 6 Discretization of a) anchoring member and b) reinforcement between members for a finite number of elements

Obr. 7 Idealizace chování betonu v hlavě kotvy [8] ■ Fig. 7 Idealization of concrete behavior at the anchor head [8]

Obr. 8 Pracovní diagram kontaktu výztuže a kotevního prvku ■ Fig. 8 Stress-strain diagram of interface between reinforcement and anchor

Obr. 9 Idealizace působení betonu v hlavě kotvy [8] v blízkosti povrchu ■ Fig. 9 Idealization of concrete behavior at the anchor head near the surface



parametrů jednotlivých komponent kotevního systému (tj. při znalosti E_v , E_k , A_v a A_k) lze určit deformační stav v každém referenčním bodu kotvy.

Výslednou únosností kotevního systému je pak součet únosností všech jeho dílčích částí, tj. součet příspěvků kotev a výztuží mezi kotevními prvky:

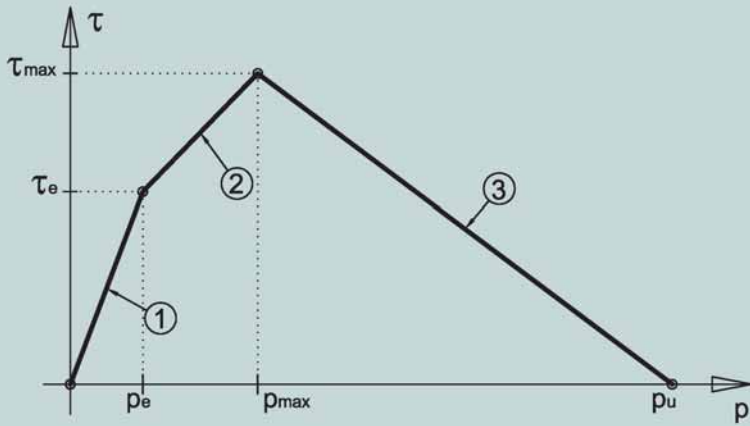
$$N \sum_{i=1}^n F_{k,i} + (N-1) \sum_{i=1}^n F_{v,i} = F, \quad (1)$$

kde $F_{k,i}$ značí únosnost i -tého elementu kotevního prvku; $F_{v,i}$ únosnost i -tého elementu výztuže mezi kotevními prvky a N počet kotevních prvků v kotevním systému.

Pro každou část kotevního systému (N kotevních prvků a $N-1$ výztuží mezi prvky) o n elementech je sestaveno přesně n rovnic spojitosti, jež jsou modifikovány v závislosti na poloze řešených uzlů v kotevním systému. Ty jsou následně zařazeny do celkové (globální) matice podle polohy referenčních bodů v systému.

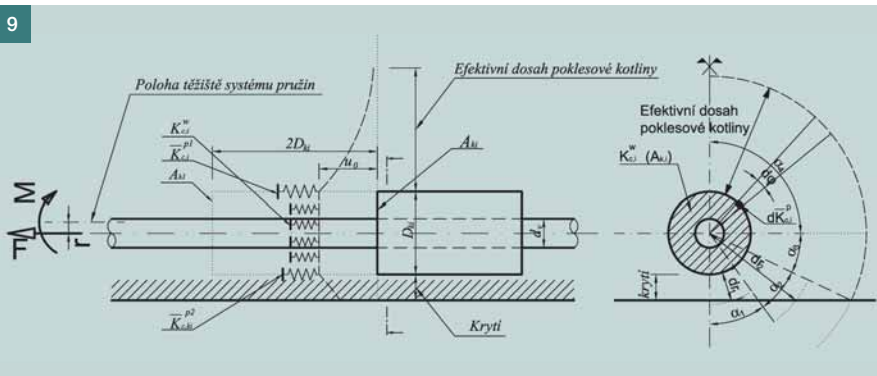
Výsledná soustava rovnic spojitosti obsahuje pouze $n+1$ neznámých posunů u v jednotlivých referenčních bodech (včetně posunu u_0 na počátku). Další hodnoty, které se v rovnicích vyskytují, jsou známy a chovají se jako konstanty. Dosadíme-li ovšem za jeden neznámý parametr posunu konkrétní hodnotu (pro vykreslení pracov-

8



- τ_e napětí v soudržnosti na mezi pružného chování kontaktu
- τ_{max} napětí v soudržnosti při maximální únosnosti kontaktu
- ρ_e posun výztuže při dosažení napětí v soudržnosti na mezi pružného chování kontaktu
- ρ_{max} posun výztuže při dosažení napětí v soudržnosti při maximální únosnosti kontaktu
- ρ_u mezní posun výztuže, při kterém již kontakt nepřenáší žádnou sílu

9



ního diagramu je vhodné zvolit posun kontaktu výztuže v nultém bodu u_0), bude v takto definované soustavě lineárních algebraických rovnic o n řádcích vystupovat již přesně n neznámých (díky volbě pevné hodnoty posunu v určitém referenčním bodě). Tento systém lineárních algebraických rovnic, který má stejný počet rovnic jako neznámých, lze již jednoduše vyřešit.

Výsledkem je vždy přesné exaktní řešení pro konkrétní počáteční posun, a tedy i stanovení odpovídajících posunů pro každý referenční bod oblasti. Z těchto posunů lze dopočítat hodnotu síly přenášenou v dané konfiguraci kotevní oblasti. Při opakované volbě počátečního posunu a řešení soustavy rovnic obdržíme jednotlivé body závislosti přenášené síly na posunu u_0 . Spojnice těchto bodů definuje pracovní diagram kotevní oblasti (podrobněji dále).

Teorie výpočtu kotevní oblasti umožňuje sestavit soustavu rovnic jak pro výpočet jednoho kotevního prvku, tak i pro soustavu dvou a více kotev. Je však nutné zahrnout do výpočtu efektivně i část kotevního systému mezi jednotlivými kotvami (tj. tuhostní parametry výztuže). Samozřejmě je možno při výpočtu uvažovat zjednodušující předpoklady (např. volit pouze jeden referenční bod na celou kotvu apod.), které mají rozdílný vliv na přesnost výsledného ře-

šení. Je vždy nutné volit takový způsob výpočtu, který pro daný konkrétní případ dostatečně přesně vystihne skutečné chování kotevní oblasti.

Určení tuhostních parametrů okolního prostředí

Pro stanovení tuhosti betonu v hlavě kotvy je využito dvou rozdílných přístupů. První je založen na principu působení lokálního zatížení na povrch betonové konstrukce popsaného v platných normativních podkladech (dle [7]) a druhý z popisu interakce hlavy kotvy s okolním prostředím, které je zjednodušeno na působení tuhostních pružin přímo pod hlavou kotvy a účinek smykového roznosu v okolí kotvy (analogie poklesové kotliny [8]).

První způsob je výpočetně jednodušší a postačuje k popisu chování kotevní oblasti, která není ovlivněna okrajovými podmínkami (blízkost povrchu prvku). Druhý způsob přesněji vystihuje chování zatíženého betonu v okolí hlavy kotvy a je vhodnější pro vyčíslení působení kotvy v blízkosti okraje prvku. V dalším textu je uveden výpočet tuhostních parametrů pouze dle obecněji použitelného druhého způsobu řešení.

Tuhost betonu v hlavě kotvy $K_{c,i}$ je stanovena jako součet tuhosti betonu přímo v hlavě kotvy $K_{c,i}^W$ (jež je uvažována v celé ploše konstantně) a při-

spěvku okolního betonu v dosahu poklesové kotliny $K_{c,i}^P$ (který se projeví jako tuhostní pružina působící na linii obvodu kotvy) dle následujícího vztahu:

$$K_{c,i} = K_{c,i}^W + K_{c,i}^P \tag{2}$$

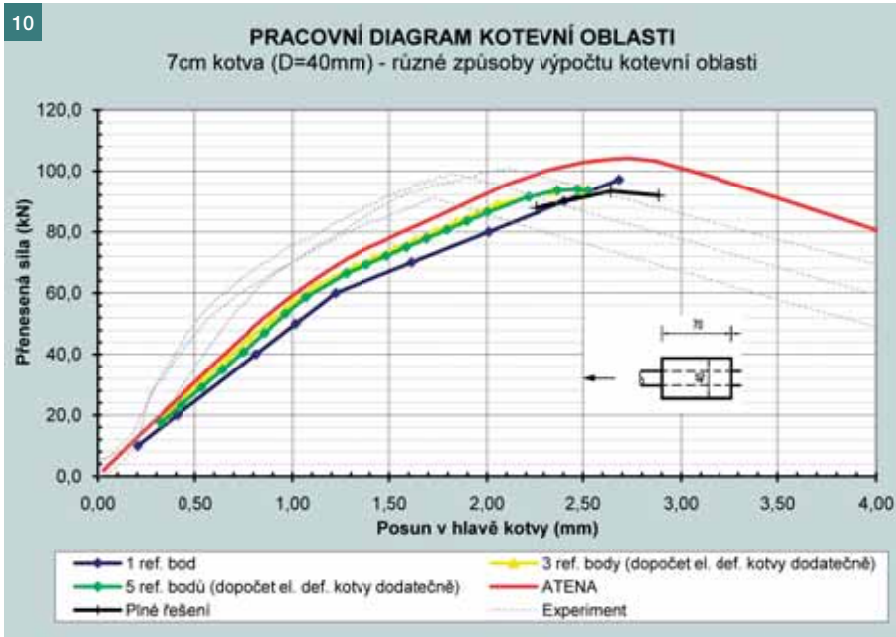
Na obr. 7 je znázorněno jak předpokládané působení betonu pro případ, kdy jsou kotvy od sebe dostatečně vzdáleny a nedochází k jejich vzájemné interakci, tak i chování betonu v případě, kdy k této interakci dochází.

Při výpočtu tuhostních parametrů betonu je samozřejmě možno uvažovat i s časem výstavby a předpokládanou životností stavby (tedy i kotevní oblasti) a modul pružnosti betonu upravit zahrnutím příslušného součinitele dotvarování dle platných norem [7]. Lze tak lehce (pouze úpravou veličiny) provést nový výpočet pro požadované stáří konstrukce.

Tuhost kontaktu je určována dle pracovního diagramu [9] (obr. 8).

Vliv okrajových podmínek na kotvení

Pokud se kotevní oblast nachází v blízkosti okraje betonového prvku, je zřejmé, že výpočet tuhosti betonu v hlavě kotvy již nelze provádět dle předpokladů popsaných výše a je nutno výpočet modifikovat. Ovšem výhodou zvole-

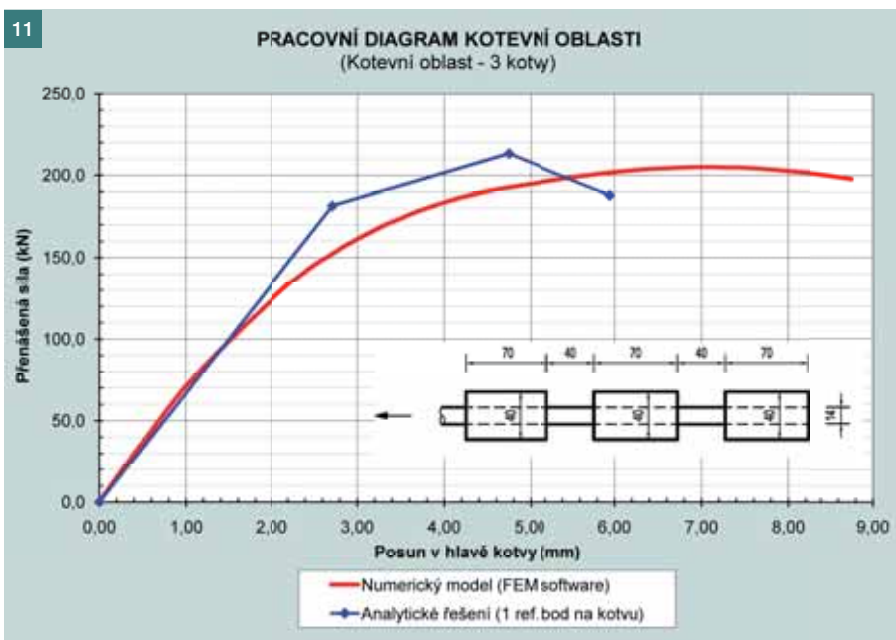


Obr. 10 Kotevní oblast – jedna kotva – srovnání různých metod výpočtu

■ Fig. 10 Anchoring area – one anchor – comparison of different methods of solution

Obr. 11 Kotevní oblast – tři kotvy – srovnání zjednodušeného výpočtu a numerického modelu

■ Fig. 11 Anchoring area – three anchors – comparison of results from simplified calculation and numerical solution



bícím momentem dochází za konstantní síly ke zvýšení uvažovaného přetvoření. Proto je nutno do výpočtu kotevní oblasti s vlivem okrajových podmínek zahrnout součinitel α , který zohledňuje vliv okrajových podmínek na deformaci betonu. Pro prvek kotvený v kontinuu, tj. bez vlivu okrajových podmínek, je $\alpha = 1$; pro výpočet s vlivem okrajových podmínek je vždy $\alpha > 1$.

Součinitel α lze stanovit z analogie protlačení dle vztahu (3)

$$\alpha = 1 + k \frac{ru_i}{W_i}, \quad (3)$$

kde k značí vliv smyku v kritickém řezu; r je excentricita způsobená rozdílnými tuhostmi (obr. 9); u_i obvod kritického řezu, na kterém moment působí, a W_i plastický modul kritického průřezu.

Pracovní diagram kotevní oblasti

Pracovní diagram kotvy (kotevní oblasti), tj. závislost přenesené síly na posunu hlavy první kotvy, lze získat následovně. Postupně volíme počáteční posun výtzuže na počátku kotevního systému u_0 a pomocí podmínek spojitosti deformací obdržíme různé hodnoty síly přenesené kotevními systémem. Budeme-li určovat pracovní diagram (což je výhodné pro sestavení návrhových tabulek typizovaných skladeb kotvení), který je nutný pro návrh kotevní oblasti, je třeba globální matici kotevní oblasti řešit vícekrát.

Vzhledem k definovanému pracovnímu diagramu kontaktu výtzuže a kotvy (obr. 8) je zřejmé, že při dosažení maximální přenesené síly (posun ρ_{max}) i -tým uzlem (τ_{max}), bude v $i-1$ referenčním uzlu posun vyšší a napětí v sou-

ného přístupu je, že stačí pouze upravit konstitutivní vztah popisující vlastnosti betonu a zohlednit vliv blízkého povrchu betonového prvku. Tento efekt lze zahrnout do výpočtu např. stanovením jiné (nižší) tuhosti zohledňující příspěvek smykového roznosu na celkovou tuhost a dosadit ji do výpočtu, který se jinak od předchozího neliší. Hranice, kterou lze dle provedených numerických studií považovat za limitní, je vzdálenost okraje $2D_{ki}$ od kotvy o průměru D_{ki} .

Pro stanovení tuhosti a deformace již nelze využít případ lokálního namáhání dle [7]. Výhodnější je využít modelu interakce hlavy kotvy s okolním prostředím, které je uvažováno působením tuhostních pružin přímo pod hlavou kotvy a účinek smykového roznosu v okolí kotvy (obr. 9).

Oblast přiléhající okraji, kde vzdálenost k lici prvku je menší než $2D_{ki}$, nemožní plné vymizení vznikajícího přetvoření pod hlavou kotvy. Z obr. 9 je patrné, že při výpočtu tuhostních parametrů poklesové kotliny $K_{c,i}^P$ budou hodnoty dosažené v blízkosti okraje nižší. Zavedením rozdílných hodnot tuhostí $K_{c,i}^{P1}$ a $K_{c,i}^{P2}$ pod a nad rovinou rovnoběžnou s povrchem prvku procházející osou prutu můžeme modelovat vliv blízkého okraje. Při předpokladu rovnoměrného rozložení napětí pod hlavou kotvy (a tedy konstantní hodnoty tuhosti $K_{c,i}^W$) je zřejmé, že těžiště systému pružin je posunuto dále od osy prutu a kromě tahové síly musí kotevní oblast přenášet i vznikající momentové namáhání. To lze do výpočtu zahrnout jako zvýšení působící síly, resp. půso-

Literatura:

- [1] *Vistasp M. Karghari*: Use of composite Materials in civil infrastructure in Japan, Baltimore, Maryland; 1998; ISBN 1-883712-50-5
- [2] *Erki M. A., Rizkalla S.H.*: Anchorage for FRP reinforcement, Concrete international, 1993
- [3] *Dolan W. C., Hamilton H. R., Bakis E. C., Nanni A.*: Design recommendations for concrete structures prestressed with FRP tendons – Volume 1, University of Wyoming, Pennsylvania State University, University of Missouri, 2001
- [4] *Horvatits J., Benko V., Kollegger J.*: První použití externích předpínacích kabelů z uhlíkových vláken na zesílení mostu v Rakousku, Beton TKS 4/2006
- [5] *Štěpánek P., Horák D., Prokeš J.*: Nový systém kotvení předepnuté FRP výztuže v betonových prvcích, příspěv. na konf. Betonářské dny 2008, Praha, ISBN 978-80-87158-11-1
- [6] *Štěpánek P., Horák D., Prokeš J.*: New prestressing system for FRP reinforcement in concrete structures, příspěv. na konf. 9th Inter. Symp. on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, Sydney: The University of Adelaide, 2009, ISBN: 978-0-9806755-0-4
- [7] ČSN EN 1992-1-1 (73 1201) Navrhování betonových konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, 2006
- [8] *Kolář V., Němec I.*: Studie nového modelu podloží staveb, nakladatelství ČSAV ACADEMIA, Praha, 1986
- [9] *Girgle F., Štěpánek P., Horák D., Ďurech D., Peslar P.*: Systém kotvení předpjaté FRP výztuže, příspěv. na konf. IDEAS 09, VŠB- TU Ostrava, 2009, ISBN: 978-80-248-2091-0
- [10] Patentová přihláška číslo 2008-475
- [11] Užité vzor 2008-20633

držnosti již bude klesat (větev 3, obr. 8). Naopak v $i+1$ uzlu bude posun nižší. Při zvyšujících se deformacích narůstá v každém aktivním uzlu kotevní oblasti napětí v soudržnosti mezi výztuží a kotevním prvkem do té chvíle, než dle platného pracovního diagramu kontaktu (obr. 8) bude na elementu dosažena plastická únosnost (tj. hodnota maximálního napětí). Při následném dalším zvýšení vstupní deformace (posunu u_0) se maximální napětí posouvá na uzly dále od počátku kotevní oblasti. Nelze tedy například říct, že nejvyšší únosnost systému je ve chvíli, kdy bude plastizovat kontakt prvního elementu. Maximální únosnost kotevního bloku je dosažena ve chvíli, kdy další zvýšení počátečního posunu u_0 a zároveň i posun limitního napětí v sou-

držnosti dále v kotevní oblasti již nevede k nárůstu přenášené síly, ale únosnost začíná naopak klesat. V tuto chvíli je možno ukončit výpočet.

Na obr. 10 je uvedeno srovnání několika možných způsobů řešení kotevní oblasti pouze s jedním kotevním prvkem (průměr 40 mm, délka 70 mm, beton C30/37). Zobrazen je nejjednodušší způsob výpočtu s jedním referenčním bodem pro celou kotvu (tj. sestavena pouze jedna deformační podmínka), výpočet pro $n = 3$ a $n = 5$ elementů na jedné kotvě za předpokladu tuhého chování kotevního válečku (jehož reálné elastické přetvoření je do počteno až po určení posunů v kontaktu při předpokladu lineární změny průběhu síly na kotvě) a v neposlední řadě i plný výpočet bez zjednodušení pro $n = 3$ body. Graf je doplněn srovnáním s numerickým modelem a výsledky experimentálních měření na reálných vzorcích.

Z obr. 11 je patrné srovnání analytického řešení kotevní oblasti se třemi kotevními prvky (průměr 40 mm, délka 70 mm, vzdálenost 40 mm, beton C30/37) s numerickým řešením MKP v programu ATENA. Zobrazen je pouze nejjednodušší (a přesto dostatečně výstižný) způsob výpočtu pro jeden referenční bod na každé kotvě (tj. sestavena pouze jedna deformační podmínka pro jednu kotvu a zanedbán vliv příspěvku tření mezi výztuží a okolním betonem mezi kotevními prvky).

Při návrhu kotevní oblasti je důležité omezit hodnotu maximálního posunu výztuže na počátku první kotvy z hlediska mezního stavu použitelnosti. Přesná hodnota musí být určena přímo pro navrhovaný prvek, neboť vždy záleží na rozponu prvku a na působícím zatížení. Je nutno respektovat maximální dovolené průhyby dle [7] a zároveň navrhnout kotevní oblast tak, aby nedocházelo vlivem posunu výztuže v kontaktu (který se do výpočtu prvku promítá analogicky jako ztráta pokluzem) k velkým ztrátám předpínací síly.

ZÁVĚR

Předepnutím nekovových výztuží lze výrazně zvýšit použitelnost betonových konstrukcí vyztužených právě tímto typem výztuže. Omezuje se vznik trhlin v počátečních fázích zatížení prvků, které mohou působit problémy především z estetického hlediska, i když na samotnou funkčnost a trvanlivost konstrukce – na rozdíl od prvků vyztužených kovovými výztužemi – vliv nemají. Samozřejmě

se zvyšuje únosnost takových konstrukcí a je tak možno navrhovat konstrukce ještě subtilnější. To, spolu s možností použít menší krytí výztuže, znamená značnou úsporu materiálu.

Vyvinutý systém kotvení zachovává veškeré výhody FRP výztuží – neobsahuje žádné kovové části. Proto je možné ho aplikovat na všechny speciální případy, které vyžadují právě použití nekovových výztuží.

Pro plné ověření funkčnosti vyvinutého systému kotvení probíhají další experimenty, které mají za úkol ověřit především chování skupiny kotev, a to jak v masě betonu, tak i jejich působení u okraje. Závěry jsou zpracovávány i další (zejména fyzikálně-nelineární) numerické studie, které zpřesňují získané výsledky.

Tento výsledek byl získán za finančního přispění Grantové agentury České republiky v rámci projektu 103/09/H085 – „Moderní kompozitní konstrukce“. Rovněž bylo využito poznatků získaných při řešení projektu MPO ČR TIP FR-TI1/357 „Betonové konstrukce s nekovovou výztuží se zvýšenou požární odolností a odolností vůči agresivním vlivům“, projektu MPO ČR FI-IM5/136 „Vláknocementové kompozity s nekovovou výztuží RFCC“ a výzkumného záměru MŠMT ČR MSM0021630519 „Progressive reliable and durable load bearing structures“.

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

Ing. František Girgle

tel.: 541 147 871

e-mail: girgle.f@fce.vutbr.cz



Prof. RNDr. Ing.

Petr Štěpánek, CSc.

tel.: 541 147 848

e-mail: stepanek.p@fce.vutbr.cz



Ing. David Horák

tel.: 541 147 872

e-mail: horak.d@fce.vutbr.cz



Ing. David Ďurech

tel.: 541 147 871

e-mail: durech.d@fce.vutbr.cz



Ing. Ivana Laníková, Ph. D.

tel.: 541 147 847

e-mail: lanikova.i@fce.vutbr.cz



všichni: Stavební fakulta VUT v Brně
Ústav betonových a zděných konstrukcí
Veveří 95, 662 37 Brno
www.fce.vutbr.cz