

NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ Z VLÁKNOBETONU ■ DESIGN OF FIBRE CONCRETE STRUCTURAL ELEMENTS

Jiří Krátký, Jan Vodička, Jitka Vašková

V článku jsou pojednány některé aspekty navrhování vláknobetonových (FC) prvků nevyztužených betonářskou výztuží. Mezní stav vzniku makrotrhliny rozděluje chování vláknobetonového prvku na kvazilineárně pružné a na kvaziplastické chování. Zdůrazněny jsou mezní poměrná protažení vláknobetonu po vzniku trhliny umožňující využít reziduálních a popř. i zjednodušených ekvivalentních pevností vláknobetonu konstrukčních prvků při mezním stavu únosnosti a také omezení průhybů při mezních stavech použitelnosti. Návrh prvků z vláknobetonu přes odlišnosti v charakteristikách vlastností vláknobetonu má být co možná kompatibilní s návrhem prvků z běžného betonu. ■ *Some aspects of design considering uncracked and cracked behaviour of fibre concrete (FC) elements without bar reinforcement (plain FC elements) are discussed. ULS of the first macro-cracking is the limit of quasi-linear and quasi-plastic behaviour and design of FC. The ultimate strains of FC in post-cracking stage, residual and equivalent tensile strength and also ultimate deflections of plain FC structural elements are preferably discussed at ULS and SLS. The design of plain FC using appropriate material properties should be compatible with standard design of structural members of plain concrete.*

Vláknobeton je kompozitní materiál s vlákny, ztužujícími betonovou maticí. Základním rozdílem ve vlastnostech vláknobetonu ve srovnání s prostým betonem je schopnost přenášet tahové napětí i po vzniku makrotrhlin, významná je rovněž duktilita vláknobetonu. To umožňuje využít tahové pevnosti vláknobetonu při navrhování vláknobetonových prvků. Využití je ovšem možné pouze u homogenního vláknobetonu se zaručenými vlastnostmi. Takový materiál lze označit jako konstrukční vláknobeton.

Dosud se vláknobeton používá zejména v průmyslových podlahách, tunelových ostěních apod. Širšímu uplatnění vláknobetonu jako konstrukčního materiálu v nosných konstrukčních prvcích brání zejména absence pravidel pro navrhování uvedených prvků. Neexistují ani jednotné postupy zkoušení a posuzování vlastností vláknobetonu, nezbytné jako vstupní parametry pro navrhování. Autoři příspěvku se podílejí na přípravě a vydání Technických podmínek pro zkoušení a navrhování prvků z prostého vláknobetonu, prvků vyztužených betonářskou výztuží i prvků předpjatých.

Základní zásady a podmínky pro navrhování vláknobetonových (FC) konstrukcí jsou uvedeny v Technických podmínkách TP FC 1-1 [1], které navazují a jsou též v souladu s převzatými evropskými normami ČSN EN 1992-1-1 [2] a ČSN EN 206 [3].

PRACOVNÍ DIAGRAM VLÁKNOBETONU PRO TAHOVÉ I TLAKOVÉ NAMÁHÁNÍ PRŮŘEZU

Pro navrhování konstrukcí z vláknobetonu (jako nového stavebního materiálu) je nutné nejprve odvodit jeho základní charakteristiku, tj. vztah mezi napětím vláknobetonu σ_{fc} a jeho poměrným přetvořením ε_{fc} vyjádřený charakteristickým pracovním diagramem nejenom pro tlakové, ale především pro tahové namáhání rozhodujícího průřezu $(\sigma_{fc} - \varepsilon_{fc})_k$.

Pro tlakové namáhání vláknobetonu lze charakteristický pracovní diagram $(\sigma_{fc} - \varepsilon_{fc})_k$ uvažovat jako parabolicko-

rektangulární stejně jako u běžného betonu, avšak s většími mezními hodnotami poměrného stlačení vláknobetonu $\varepsilon_{fc,cu} \geq \varepsilon_{cu}$, které ukazují na větší tlakovou duktilitu vláknobetonu vyjádřenou hodnotou $\varepsilon_{fc,cu}$ při charakteristické pevnosti vláknobetonu v tlaku $f_{fc,ck}$ (obr. 1).

Mnohem větší rozdíly mezi vláknobetonem a běžným betonem se projevují při tahovém namáhání. U běžného betonu se s tahovým namáháním většinou nepočítá pro riziko náhlého porušení tažené oblasti konstrukce. Naopak u vláknobetonu, s ohledem na jeho velkou tahovou duktilitu vyjádřenou poměrným reziduálním přetvořením $\varepsilon_{fc,t, res, i}$ při reziduální charakteristické pevnosti $f_{fc, tk, res, i}$, lze počítat při navrhování vláknobetonové konstrukce i s tahovým namáháním. Pro odvození tahové části charakteristického pracovního diagramu $(\sigma_{fc} - \varepsilon_{fc})_k$ se zpravidla využívá charakteristický diagram odolnosti $(F_R - \delta)_k$ (např. podle obr. 2). Při zvolených průhybech δ_i představuje 5% kvantil statisticky zaručených hodnot odolnosti $F_{R, k}$ naměřených při zkoušce ohybem trámku, jehož rozměry a uspořádání zatížení je považováno za standardní pro určení pevnostních charakteristik vláknobetonu v tažené oblasti zkušebního tělesa (obr. 3).

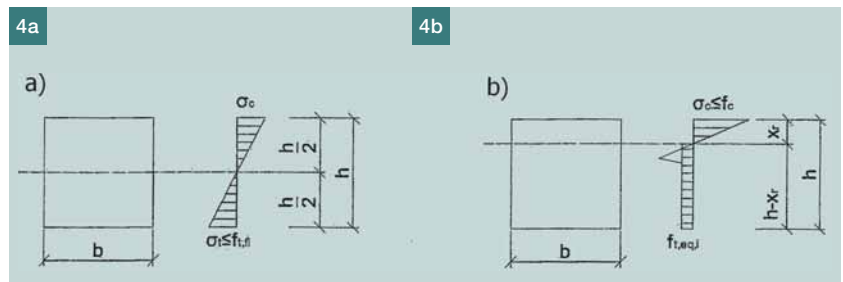
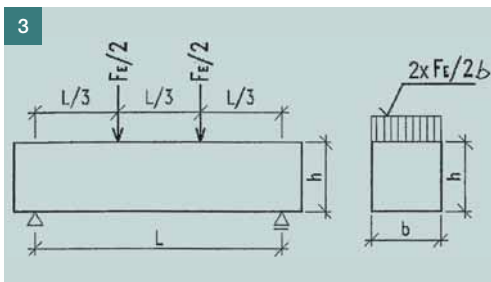
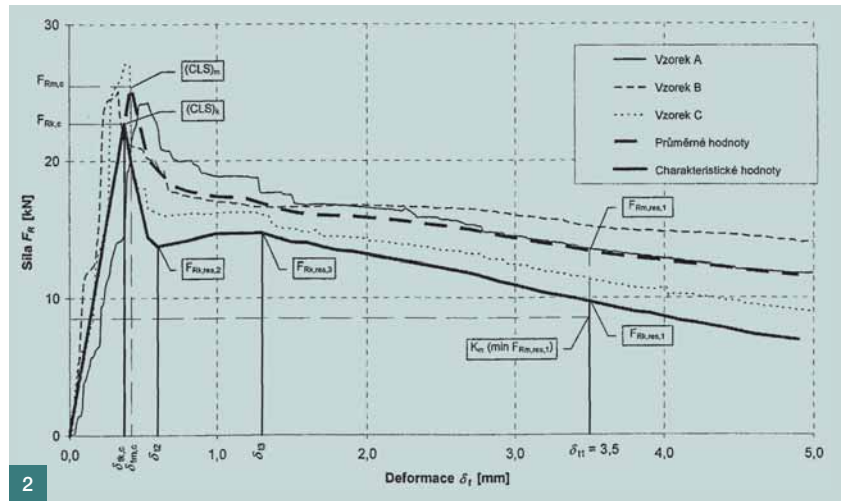
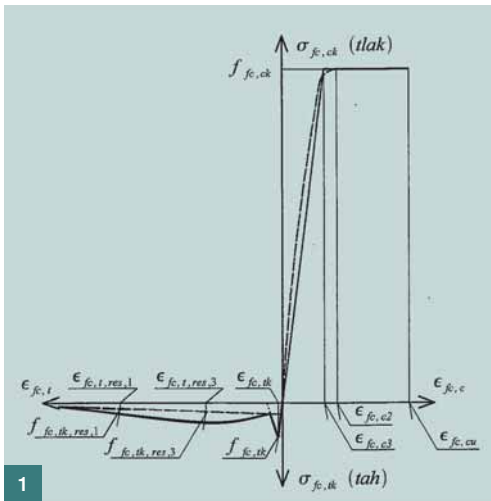
Při lineární závislosti charakteristického ohybového momentu $M_{Rk, i}$ na charakteristické odolnosti $F_{Rk, i}$ i křivosti ohybové čáry $\rho_{t, i}$ standardního trámku na jeho průhybu $\delta_{t, i}$, lze prakticky přímo odvodit z diagramu $(F_R - \delta)_k$ (obr. 2) též závislost momentu a křivosti $(M_R - \rho)_k$. Diagram $(M_R - \rho)_k$ umožňuje určit měnící se charakteristickou ohybovou tuhost $B_{k, i}$ zkušebního trámku při zvoleném přetvoření pomocí vztahu

$$B_{k, i} = \frac{M_{Rk, i}}{\rho_{t, i}}$$

Charakteristický diagram odolnosti pro tahové namáhání (obr. 2) ukazuje základní rozdíl v chování vláknobetonu **do charakteristické meze vzniku makrotrhliny** $(CLS)_k$. Ještě před dosažením této meze se vláknobeton začíná chovat, vlivem vznikajících mikrotrhlin ve struktuře kompozitu, nelineárně, ale s ohledem na malá přetvoření lze tuto část pracovního diagramu nahradit tzv. „**kvazilineárněpružným**“ (QLE) chováním vláknobetonu (obr. 4a).

Po svém vzniku se **makrotrhlina** velmi rychle otevře a její délka se významně prodlouží, přičemž se vlákna v trhlině aktivují a začínou převážně přenášet tahová namáhání v kritickém průřezu. Současně se zmenšuje tlaková část průřezu, neboť neutrální osa x_c se postupně přibližuje k jeho tlakovanému okraji (obr. 4b).

Při zkoušce trámku ohybem, kdy zatížení zkušební tělesa je řízeno konstantní rychlostí přírůstku průhybu v čase, klesá obvykle rychle i síla odolnosti $F_{Rk, res, i}$ (obr. 2) na úroveň, která odpovídá reziduální únosnosti řízené převážně odolností vláken a jejich objemovému stupni ztužení $\rho_{v, f}$ struktury kompozitu [1]. Napjatost zvětšující se tažené části kritického průřezu (obr. 4b) odpovídá obecně tahové části pracovního diagramu vláknobetonu (obr. 1). Tuto napjatost lze, zvláště při namáhání prostým ohybem, výstižně nahradit tzv. rovnoměrnou charakteristickou ekvivalentní pevností $f_{fc, t, eq, i}$ vláknobetonu v dostředném tahu, která předsta-



vuje výpočetní model kvaziplastického (QPL) chování vláken v tažené oblasti kritického průřezu (na obr. 4b šrafovaná plocha).

Při navrhování prvků namáhaných tlakem s velkou výstředností lze obecnou čáru tahového pracovního diagramu nahradit multilineárním diagramem podle obr. 5.

Další možnost zjednodušení pracovního diagramu pro tahové namáhání vláknobetonu (vhodné pro konstrukce namáhané převážně ohybovým momentem) je rozdělit diagram na části:

- do vzniku makrotrhliny, kdy lze uvažovat s QLE chováním vláknobetonu a napětí v prvku počítat pomocí klasické pružnosti s malou duktilitou,
- po vzniku makrotrhliny, kde lze uvažovat QPL chování vláknobetonu při užití rovnoměrného rozdělení charakteristické ekvivalentní pevnosti vláknobetonu v celé tažené oblasti průřezu $f_{fc,tk,eq,i}$ pro 2 až 3 zvolená poměrná přetvoření $\epsilon_{fc,tk,i}$ ($i = 1, 2, 3$). Příklad tohoto pracovního diagramu je uveden na obr. 6.

Charakteristické pracovní diagramy vláknobetonu (FC) se využívají pro stanovení jeho pevnostních tříd v tlaku i tahu,

Obr. 1 Charakteristický pracovní diagram vláknobetonu ($\sigma_{fc} - \epsilon_{fc}$)
 ■ Fig. 1 Characteristic stress-strain diagram and its simplification

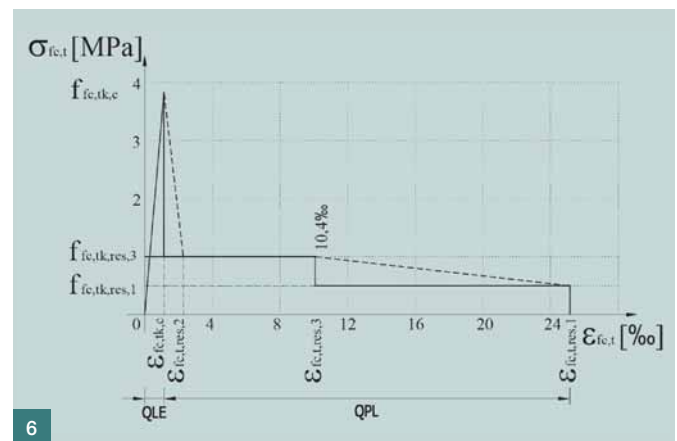
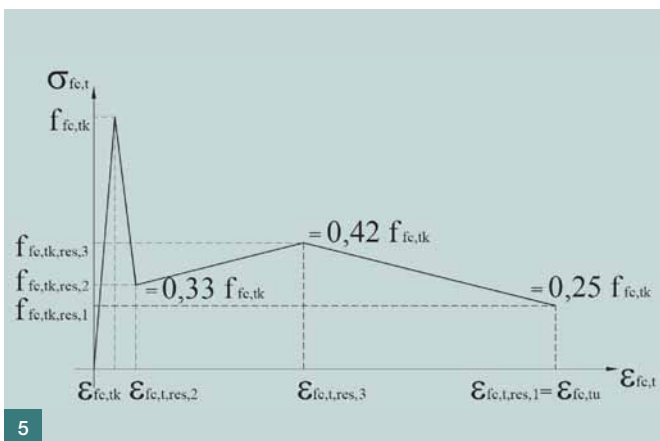
Obr. 2 Průměrný a charakteristický diagram $(F_R - \delta)_m$ a $(F_R - \delta)_k$ odvozené ze zkoušek ohybem drátkobetonových standardních trámků (při $\rho_{Vf} = 0,5\%$)
 ■ Fig. 2 Mean and characteristic $(F_R - \delta)_m$ and $(F_R - \delta)_k$ diagrams obtained by bending tests of standard beams ($\rho_{Vf} = 0,5\%$)

Obr. 3 Uspořádání zkoušky ohybem standardního trámku, $h = b = 150\text{ mm}$, $L = 600\text{ mm}$
 ■ Fig. 3 Standard bending test setup of beam specimen, $h = b = 150\text{ mm}$, $L = 600\text{ mm}$

Obr. 4 Napjatost průřezu standardního zkušebního trámku z vláknobetonu, a) do CLS při QLE chování, b) po CLS při QPL chování
 ■ Fig. 4 Stress distribution in standard beam specimen a) uncracked critical section, quasi-linear elastic behaviour (QLE), b) cracked critical section, quasi-plastic behaviour (QPL)

Obr. 5 Charakteristický pracovní diagram vláknobetonu v tažené oblasti průřezu vyjádřený multilineárním diagramem
 ■ Fig. 5 Tensile part of characteristic stress-strain diagram of fibre concrete with multi-linear distribution

Obr. 6 Tahové části zjednodušených pracovních diagramů vláknobetonu, a) QLE chování, b) QPL chování do $\epsilon_{fc,t,3}$, c) QPL chování do $\epsilon_{fc,t,1}$
 ■ Fig. 6 Tensile part of simplified stress-strain diagrams of fibre concrete a) QLE behaviour, b) QPL behaviour for $\epsilon_{fc,t,3}$, c) QPL behaviour for $\epsilon_{fc,t,1}$



a popř. tříd duktility vláknobetonu nutných pro návrhové ověření spolehlivosti konstrukce podle mezního stavu únosnosti. Třídy vláknobetonu se stanoví podle TP FC 1-1 [1].

Z charakteristického diagramu odolnosti, $(F_R - \delta)_k$ standardního trátku (obr. 2) lze odvodit i další charakteristiky vláknobetonu, jako délku a šířku trhliny, popř. i křivost kvaziplastického kloubu v kritickém průřezu po vzniku makrotrhliny [1].

NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKCÍ Z VLÁKNOBETONU BEZ BETONÁŘSKÉ VÝZTUŽE

Nosné prvky z vláknobetonu nevyztuženého betonářskou výztuží lze považovat za prvky z prostého vláknobetonu. Na rozdíl od prvků z prostého betonu lze u vláknobetonových prvků využít zkouškami zaručených tahových částí charakteristického pracovního diagramu popsaného v předchozím odstavci. Tato skutečnost umožňuje rozšířit navrhování nosných konstrukcí z vláknobetonu na řadu případů, kdy prostý beton pro svou nepatrnou duktilitu a možnost náhlého porušení např. od objemových změn nevyhovuje, a proto se s jeho tahovou pevností obvykle nepočítá.

Konstrukce namáhané ohybem

U homogenního vláknobetonu před vznikem makrotrhliny (kdy lze počítat s QLE chováním průřezů (obr. 4a)) je poměrné protažení okraje průřezu asi trojnásobkem poměrného protažení prostého betonu. Je to způsobeno ztužujícím účinkem vláken, která „přemostují“ vznikající mikrotrhliny ve struktuře betonového kompozitu. Pokud charakteristická pevnost v tahu za ohybu vláknobetonu je schopna přenést napětí od přímých zatížení i objemových změn vláknobetonu, nedojde ke vzniku makrotrhliny a výpočet lze provést podle klasické pružnosti. Většinou se doporučuje, aby tento způsob namáhání průřezu byl zachován při **mezním stavu použitelnosti** konstrukce z prostého vláknobetonu.

Mezní stav únosnosti – spolehlivost konstrukce proti porušení je samozřejmě zajištěna i v případě, že návrhová pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu přenesese též návrhová zatížení přímá a nepřímá.

Pokud mezní stav únosnosti před vznikem makrotrhliny nespňuje tuto podmínku spolehlivosti, je možné zvážit i druhou možnost posouzení únosnosti po vzniku makrotrhliny s uvážením QPL chování konstrukčního prvku ve vznikajícím QPL kloubu v místě makrotrhliny. V tomto případě návrhové ekvivalentní pevnosti $f_{fc,td,eq,i}$ odvozené z pevností residuálních $f_{fc,tk,res,i}$ a odpovídající $\epsilon_{fc,t,i}$ (vyjadřujících návrhovou duktilitu) v tažené oblasti kritického průřezu podle obr. 4b

Literatura:

- [1] TP FC 1-1 Technické podmínky 1: Vláknobeton (FC) – Část 1 Zkoušení vláknobetonu – Vyhodnocení destruktivních zkoušek a stanovení charakteristického pracovního diagramu vláknobetonu pro navrhování vláknobetonových konstrukcí. Zpracovatel: kolektiv Katedry betonových a zděných konstrukcí Fakulty stavební ČVUT v Praze za spolupráce s Ing. Vladimírem Veselým, Betotech, s. r. o.
- [2] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby
- [3] ČSN EN 206-1 Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda

(zpravidla při pružném chování tlačené oblasti) musí splnit podmínku spolehlivosti.

ZÁVĚR

Pro navrhování konstrukcí z prostého vláknobetonu lze též použít ustanovení rozpracovaného návrhu TP FC 2-1 Technické podmínky 2: Navrhování vláknobetonových konstrukcí část 1. Obecná pravidla pro navrhování, která zpracovává kolektiv Katedry betonových a zděných konstrukcí Fakulty stavební ČVUT v Praze.

Příspěvek vznikl za podpory GAČR 103/09/2039 s využitím výsledků GAČR 103/07/1275.

doc. Ing. Jiří Krátký, CSc.
tel.: 224 354 677
e-mail: jiri.kratky@fsv.cvut.cz



doc. Ing. Jan Vodička, CSc.
tel.: 224 354 622
e-mail: jan.vodicka@fsv.cvut.cz



Ing. Jitka Vašková, CSc.
tel.: 224 354 636
e-mail: jitka.vaskova@fsv.cvut.cz



všichni: Katedra betonových a zděných konstrukcí
Fakulta stavební ČVUT v Praze
Thákurova 7, 166 29 Praha 6
<http://concrete.fsv.cvut.cz/>

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

5. ročník odborné konference

PODLAHY A POVRCHOVÉ ÚPRAVY VE STAVEBNICTVÍ 2010

Kulturní centrum Novodvorská, Praha 4, 15. a 16. 9. 2010

Sekce Podlahy

- Návrh podlahy, normalizace, věda a výzkum
- Průmyslové podlahy
- Nosné vrstvy podlah bytové a občanské výstavby
- Povrchy podlah bytové a občanské výstavby
- Teplné a akustické izolace
- Podlahové topení
- Podlahy na terasách, balkónech a v exteriéru

Sekce Povrchové úpravy

- Normalizace, věda a výzkum
- Nátěry (na beton, ocel, dřevo a další podklady)
- Povrchové úpravy v interiérech
- Povrchy fasád včetně soklů
- Zateplování systémy
- Střešní krytiny

Konference je akreditována v programu ČKAIT.

Podrobné informace a on-line přihlášky na www.konferencepodlahy.cz

PODLAHY A POVRCHOVÉ ÚPRAVY

VE STAVEBNICTVÍ '10

Odborný garant:

doc. Ing. Jiří Dohnálek, CSc.
dohnalek@sanacebetonu.cz, tel: +420 602 324 116

Vědecký tajemník:

Ing. Petr Tůma, Ph.D.
petr.tuma@betonconsult.cz, tel: +420 724 080 924

Sekretariát konference:

BETONCONSULT® s.r.o.

V Rovínách 123, 140 00 Praha 4
e-mail: konference@konferencepodlahy.cz
Tel/fax: +420 244 401 879, www.betonconsult.cz