

NAVRHOVÁNÍ BETONOVÝCH PRVKŮ VYZTUŽENÝCH KOMPOZITNÍ VÝZTUŽÍ – NÁVRH NA OHYB ■ DESIGN OF CONCRETE MEMBERS REINFORCED WITH FIBRE-REINFORCED POLYMER BARS – DESIGN FOR FLEXURE

František Girgale, Ondřej Januš,
Anna Matušíková, Petr Štěpánek

Článek navazuje na úvodní příspěvek v minulém čísle [1]. V textu je přehledně zpracována problematika návrhu ohýbaných betonových prvků vyztužených vnitřní kompozitní výztuží a jsou porovnány přístupy dle nejpoužívanějších zahraničních směrnic a norem. Uvedené postupy jsou v závěru textu vzájemně porovnány při řešení jednoduchého ohýbaného prvku, a to jak z hlediska krátkodobé únosnosti, tak především s ohledem na dlouhodobé chování prvku. Teoreticky získané výsledky jsou srovnány s výsledky experimentu. ■ The article is thematically connected with the previous one presented in preceding issue [1]. The text clearly deals with the issue of design of concrete members reinforced with an inner FRP reinforcement under flexural load. Several approaches for assessing the load bearing capacity, inspired by the most widespread and used international standards, are mentioned. Verification of the load bearing capacity of simple members is made according to presented approaches at the end of the text, to be able to compare the differences between the approaches. The comparison is made for both the short-term resistance and the long-term resistance of the members. Finally, theoretically obtained results are compared with the experimental results.

Kompozitní materiály, které vykazují značnou odolnost vůči působení agresivního prostředí, mohou představovat velmi zajímavou alternativu vyztužení průřezu při návrhu betonových konstrukcí. Životnost optimálně navrženého prvku vyztuženého kompozitní výztuží ve vhodné aplikační oblasti je teoreticky neomezená, prakticky ji determinuje kvalita provedení prvku, životnost betonových částí průřezu a míra projektem neočekávaných zatížení. V úvodním článku [1] byly stručně představeny odlišnosti chování vnitřní FRP výztuže (fiber reinforced polymer – kompozitní výztuž) v porovnání s běžnou žebírkovou výztuží a uvedeny její fyzikálně-mechanické vlastnosti. Tento text na něj navazuje a poskytuje teoretický základ pro bezpečný návrh ohýbaných betonových prvků vyztužených tímto perspektivním materiálem. Odlišné typy namáhání a další aspekty návrhu budou publikovány postupně v dalších navazujících textech.

Z důvodu odlišných vlastností kompozitních výztuží [1], zejména v důsledku absence duktilního chování (tj. plastické větve návrhového diagramu FRP výztuže), je nutné upravit postup návrhu používaný pro železobetonové konstrukce a odlišnosti FRP materiálu při návrhu uvážit. V článku jsou uvedeny a vzájemně porovnány postupy návrhu průřezu namáhaného ohybovým momentem dle ve světě nejpoužívanějších přístupů. Jedná se o:

- americkou směrnicí ACI 440.1R-15 – Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars [2],
- kanadskou normu CSA S806-12: Design and Construction of Building Structures with Fibre-reinforced Polymers [3], resp. ISIS Canada – Reinforcing Concrete Structures with FRP [4],
- publikaci *fib* Bulletin No. 40 – FRP Reinforcement in RC Structures [5] s přihlédnutím k *fib* Model Code 2010 [6],
- italskou normu CNR-DT 203/2006: Guide for the design and Construction of Concrete Structures reinforced with FRP Bars [7].

Vzhledem k časově závislému chování FRP výztuže (problematika dotvarování kompozitu byla stručně popsána v [1]) je nutno při výpočtu posuzovat nejen krátkodobou únosnost průřezu, ale též následně ověřit i únosnost prvku s ohledem na dlouhodobou pevnost/odolnost výztuže, která může být v porovnání s krátkodobou významně nižší.

ZÁKLADNÍ PŘEDPOKLADY NÁVRHU PRVKU VYZTUŽENÉHO FRP VÝZTUŽÍ

Výpočet mezního stavu únosnosti ohýbaného prvku vyztuženého FRP výztuží vychází z následujících základních předpokladů, které jsou shodné s předpoklady uváženými při návrhu železobetonového průřezu:

- mezní stav, tj. mezní únosnost průřezu, nastane při dosažení mezního poměrného přetvoření alespoň v jednom materiálu (tj. mezní přetvoření ϵ_{cu} v tlačeném betonu, resp. mezní návrhové přetvoření v tahu $\epsilon_{tu,d}$ ve výztuží),

Obr. 1 Idealizovaný návrhový diagram FRP výztuže [13] ■ Fig. 1 Idealized design stress-strain diagram of FRP reinforcement [13]

Obr. 2 Průběh přetvoření a napětí po výšce průřezu (pozn.: rozdělení napětí uváženo v souladu s [8]) ■ Fig. 2 Strain and stress distribution along the cross section. (Note: stress distribution is in accordance with [8])

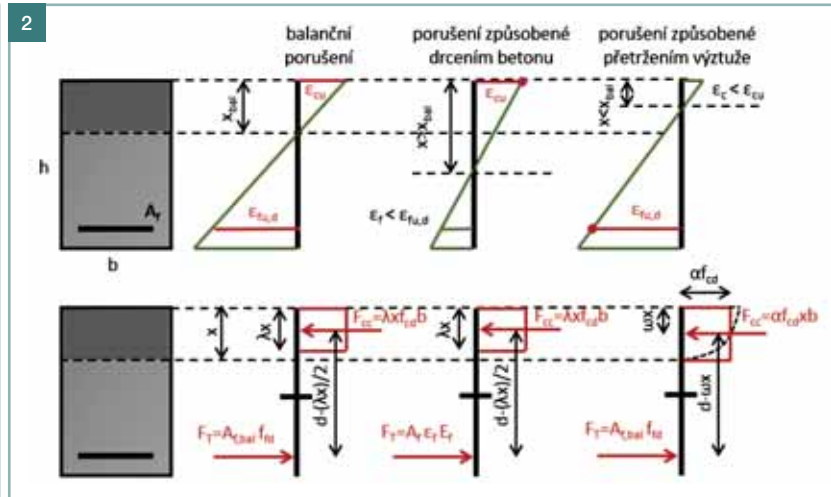
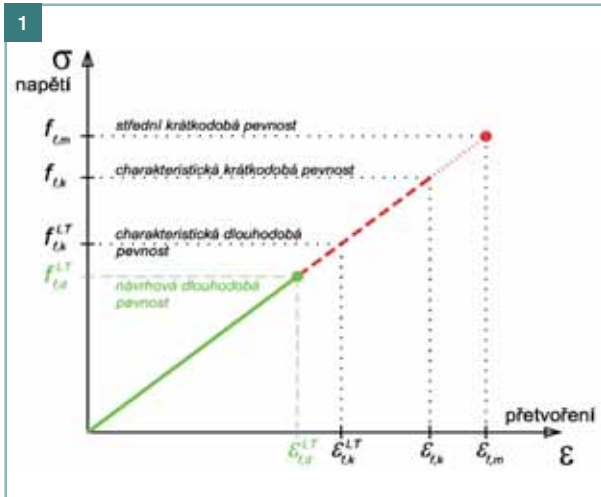
- zachování rovinnosti průřezu – přetvoření vláken průřezu je přímo úměrné jejich vzdálenosti od neutrální osy,
- beton v tahu nepůsobí,
- je zajištěna dokonalá soudržnost mezi FRP výztuží a betonem (poměrné přetvoření výztuže ϵ_s v tahu a poměrné přetvoření v přilehlých vláknech betonu ϵ_c jsou uvážena shodná),
- napětí v tlačené části průřezu se stanoví dle definovaného pracovního diagramu betonu v tlaku.

Navíc je však nutno zavést předpoklady zohledňující specifika návrhu průřezu vyztuženého FRP výztuží. Při návrhu je nutno uvážit, že:

- napětí ve FRP výztuži je předpokládáno lineárně pružné až do porušení. Při návrhu musí být přihlédnuto k omezení napětí ve výztuži s ohledem na působení trvalého zatížení a podmínky prostředí,
- příspěvek únosnosti FRP výztuže v tlaku je zanedbán.

Tyto dva předpoklady jsou odlišné oproti návrhu běžného železobetonového prvku. S ohledem na ortotropní chování FRP výztuže (nelineární chování při působení tlaku) není doposud dostatek relevantních dat pro bezpečný návrh tlačené výztuže. Je tedy doporučeno příspěvek tlačené výztuže k únosnosti průřezu zanedbat. Využitý návrhový diagram FRP výztuže v tahu musí zohlednit reologické jevy probíhající ve výztuži – tj. především dotvarování výztuže a též (je-li to s ohledem na oblast aplikace relevantní) degradaci způsobenou okolním prostředím (podrobněji v [1]). Idealizovaný návrhový diagram FRP výztuže v tahu může být uvážen dle obr. 1.

Zásadní odlišností oproti návrhu železobetonového prvku je absence plastického chování FRP výztuže (obr. 1). Duktilní chování průřezu, které je zajiš-



těno vhodným návrhem plochy betonářské výztuže, není v případě prvků vyztužených FRP výztuží dosažitelné. Křehké chování FRP výztuží při tahovém porušení vyžaduje přehodnocení zažitého přístupu k návrhu vyztuženého průřezu.

STANOVENÍ ÚNOSNOSTI OHÝBANÉHO PRŮŘEZU

Porušení ohýbaného prvku může nastat přetržením výztuže, příp. drcením betonu. Teoretickým případem porušení je současně (balanční) porušení výztuže i betonu, kdy je mezní přetvoření dosaženo v obou materiálech současně. Způsob porušení je determinován realizovanou plochou FRP výztuže v posuzovaném průřezu. Pokud je skutečné vyztužení větší než vyztužení v balančním stavu, poruší se prvek drcením betonu v oblasti tlačných vláken. S ohledem na křehké chování FRP výztuže je tlakové porušení žádoucí (doporučení [3] nebo [5]). Díky nižšímu modulu pružnosti FRP výztuže (ve srovnání s ocelí) souběžně dochází v tažené oblasti k viditelnému rozvoji trhlin. Tahové porušení přetržením FRP výztuže je náhlé a nastává v případě, kdy je skutečná plocha vyztužení menší než balanční plocha vyztužení. V krajních vláknech tlačného betonu není dosaženo mezního přetvoření ϵ_{cu} . Při tomto typu porušení je požadováno zajištění vyšší míry bezpečnosti návrhu [2], [3].

Z předpokladu o rovinnosti průřezu po deformaci a uvážení mezních přetvoření v obou materiálech lze vyjádřit vztah pro určení balanční polohy neutrální osy ve tvaru:

$$x_{bal} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu,d}} d, \tag{1}$$

kde d je účinná výška průřezu, ϵ_{cu} mez-

ní poměrné přetvoření betonu v tlaku a $\epsilon_{fu,d}$ je návrhová hodnota mezního poměrného přetvoření FRP výztuže v tahu. Z předpokladu rovnováhy sil na průřezu lze následně výpočtem stanovit balanční plochu vyztužení $A_{f, bal}$, jejímž porovnáním se skutečně navrženou plochou FRP výztuže A_f lze určit způsob porušení průřezu. Při stanovení balanční plochy vyztužení lze použít rovnoměrné (obdélníkové) rozdělení napětí v tlačené části průřezu, neboť v krajních vláknech průřezu je dosaženo mezního přetvoření. Uvažované chování průřezu je patrné z obr. 2.

Tlakové porušení (porušení způsobené drcením betonu)

V případě, kdy je plocha ohybové výztuže A_f větší než balanční plocha vyztužení $A_{f, bal}$ (obr. 2), je očekáváno porušení průřezu drcením betonu (přetvoření krajních tlačných vláken $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$) a moment na mezi únosnosti M_{Rd} je možno stanovit z podmínky rovnováhy sil dle očekávaného vztahu (notace uvážena v souladu s [8]):

$$M_{Rd} = \lambda x b f_{cd} \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right) = A_f \epsilon_f E_f \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right). \tag{2}$$

Shodně s návrhem železobetonového průřezu značí v rámci vztahu (2) x vzdálenost neutrální osy od krajních tlačných vláken průřezu, b šířku průřezu, λ je součinitel definující efektivní výšku tlačené oblasti průřezu, f_{cd} návrhová válcová pevnost betonu v tlaku, d účinná výška průřezu, A_f a ϵ_f její plocha, resp. přetvoření, FRP výztuže a E_f její modul pružnosti.

Polohu neutrální osy x je možné určit z podobnosti trojúhelníků jako:

$$x = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_f + \epsilon_{cu}} d. \tag{3}$$

Neznámé přetvoření výztuže ϵ_f lze získat zpětným dosazením vztahu (3) do vztahu (2) a následným řešením vzniklé kvadratické rovnice.

Při opomenutí rozdílů v konceptu určení návrhových hodnot a pracovních diagramů (tj. míry bezpečnosti návrhu) lze v případě porušení průřezu drcením betonu konstatovat, že dle všech uváděných přístupů [2] až [7] je mezní únosnost určována shodně.

Tahové porušení (porušení způsobené přetržením výztuže)

Při návrhu železobetonového prvku je díky duktilnímu chování ocelové výztuže možno předpokládat následné plastické chování i v tlačené oblasti průřezu, a tedy lze (v případě zjednodušeného výpočtu) rovnoměrně idealizovat rozdělení napětí po výšce tlačené oblasti.

V případě FRP výztuže ovšem při dosažení mezního návrhového přetvoření v tahu $\epsilon_{fu,d}$ dochází k jejímu náhlému porušení – přetržení. Je zřejmé, že v případě tlačené oblasti nebude dosaženo mezního přetvoření v betonu ϵ_{cu} . Průběh napětí po tlačené betonové části je proto neznámý a nelze ho obecně nahradit obdélníkem.

Směrnice ACI 440.1R-15 [2] nedefinuje požadavky na přesný tvar náhrady rozdělení napětí v tlačené části průřezu, dovoluje však stanovit mezní únosnost průřezu zjednodušeným vztahem (značení ponecháno dle konvence [2]):

$$M_n = A_f f_{tu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right), \tag{4}$$

kde c_b je výška tlačené části průřezu při balančním způsobu porušení (tj. $c_b = x_{bal}$), β_1 součinitel rozdělení napětí (pro běžný beton lze uvážit 0,85

dle [12]) a f_{tu} značí návrhovou hodnotu tahové pevnosti (včetně vlivu prostředí). Výsledky jsou konzervativní, neboť vztah předpokládá nejvyšší možnou výšku tlačené oblasti při tomto typu porušení, tj. i nejmenší velikost ramene vnitřních sil.

V rámci CSA S806-12 [3] (s přihlédnutím k doporučení ISIS Canada [4]) je pro výpočet únosnosti uveden iterační postup a jsou definovány parametry popisující rozdělení napětí v tlačené oblasti. Uvážené rozdělení napětí dle [4] je nelineární a vystihuje skutečný pracovní diagram betonu dané třídy.

Obdobným způsobem přistupují k určení únosnosti průřezu při zjednodušeném (ručním) výpočtu i zbyvajících návrhová doporučení, tj. *fib* Bulletin No. 40 [5] a CNR-DT 203/2006 [7]. Oba předpisy uvádí postup, pomocí kterého je nelineární průběh napětí v tlačené oblasti průřezu převeden na rovnoměrné obdélníkové rozdělení napětí o shodné ploše. V rámci [5] je požadováno využití parabolicko-rektangulárního návrhového diagramu betonu v tlaku.

Je zřejmé, že výpočet velikosti síly v tlačném betonu a polohy jejího těžiště je v zásadě nezávislý na využitém návrhovém předpisu. Tyto pouze zavádějí předpoklady o rozdělení napětí po výšce tlačené oblasti průřezu [4], [5], příp. výpočet zjednodušují [2] a definují redukční součinitele. Výslednice sil v tlačené části průřezu může být samozřejmě stanovena iteračně, numerickým řešením při rozdělení oblasti na konečný počet prvků (vrstev) apod., a to při uvážení rovnováhy sil na průřezu, definovaného návrhového diagramu betonu v tlaku a dalších předpokladů uvedených v kapitole o základních předpokladech návrhu. Výsledný moment únosnosti lze poté určit dle vztahu (značení v souladu s [8]):

$$M_{Rd} = F_{cc} (d - \omega x) = A_f f_{fd} (d - \omega x), \quad (5)$$

kde součinitel ω definuje polohu těžiště výslednice sil v tlačném betonu, F_{cc} je výslednice sil v tlačném betonu a f_{fd} návrhová hodnota meze pevnosti FRP výztuže v tahu.

S ohledem na [5] je při tomto typu porušení průřezu doporučeno při výpočtu uvážit parabolicko-rektangulární návrhový diagram betonu v tlaku dle [8]. Návrhová mezní pevnost výztuže v tahu f_{fd} pak musí být určena se zohledněním časově závislých jevů a působení okolního prostředí.

STANOVENÍ KRÁTKODOBÉ NÁVRHOVÉ HODNOTY ÚNOSNOSTI

S ohledem na skutečnost, že v ČR nejsou klasifikovány třídy kompozitní výztuže, které by definovaly očekávané fyzikální a mechanické charakteristiky, je třeba při návrhu vycházet z údajů dodaných výrobcem ke konkrétní použité FRP výztuži. Zde je nutné upozornit, že výrobce by měl v rámci technického listu výrobku uvést nejen číselnou hodnotu základních (pro návrh nezbytných) charakteristik – tj. tahové pevnosti, mezního přetvoření a modulu pružnosti –, ale především informaci, o jakou hodnotu z hlediska návrhu v souladu s [9] se jedná. Musí být zřejmé, zdali jde o charakteristickou hodnotu (5% kvantil normálního rozdělení), příp. střední hodnotu. V tom případě je nezbytné, aby byla uvedena i směrodatná odchylka. Samozřejmě by měla být informace o zkušebnímu postupu, dle jakého byla charakteristika získána, a jméno organizace certifikující výrobek. V současnosti je platná zkušební norma ISO 10406-1:2015 [10], dle které by měly být FRP výztuže testovány.

Krátkodobá únosnost FRP výztuže je definována jako návrhová hodnota tahové pevnosti ve směru vláken kompozitu, příp. redukováná o vliv okolního prostředí na únosnost, ovšem bez vlivu dlouhodobě působícího zatížení (tj. není uvažováno dotvarování výztuže). Výstížnost všech návrhových modelů je porovnávána v rámci zpracovaného příkladu. Značení veličin v textu kapitoly je ponecháno v původním tvaru dle jednotlivých předpisů.

ACI 440.1R-15

Směrnice [2] zavádí součinitel C_E , který redukuje počáteční krátkodobé vlastnosti s ohledem na vliv prostředí, v kterém bude výztuž umístěna. Návrhová

pevnost FRP výztuží v tahu f_{tu} se určí dle vztahu:

$$f_{tu} = C_E f_{tu}^*, \quad (6)$$

kde C_E je redukční součinitel lišící se v závislosti na typu použitých vláken a okolním prostředí (tab. 1) a f_{tu}^* je zaručená pevnost v tahu (přibližně ekvivalent návrhové pevnosti dle [9]). Návrhový modul pružnosti je roven střední hodnotě dané veličiny, tedy:

$$E_f = E_{f,ave}. \quad (7)$$

Výsledná návrhová hodnota únosnosti průřezu v ohybu M_u je získána redukcí momentu na mezi únosnosti redukčním součinitelem ϕ , kdy platí:

$$M_u = \phi M_n. \quad (8)$$

Redukční součinitel je zaveden především z důvodu zajištění dostatečné rezervy přetvoření (duktility). Velikost redukčního součinitele je závislá na typu porušení. Při porušení drcením betonu je redukční faktor uvážen hodnotou $\phi = 0,65$, která vychází z ACI 318 [12]. V případě porušení přetržením FRP výztuže nabývá hodnoty $\phi = 0,55$. Aby byly zohledněny tolerance při výstavbě a zavedena dostatečná spolehlivost návrhu, redukční faktor pro drcení betonu má být uvažován až od úrovně vyztužení $A_f > 1,4A_{f,bal}$. Pro mezilehlé hodnoty plochy výztuže A_f je možno lineárně interpolovat.

CSA S806-12

Součinitel odolnosti materiálu ϕ_f , který norma [3] zavádí, zohledňuje odlišnosti materiálových vlastností, vliv dlouhodobě působícího zatížení a typ použitých vláken. Dle [3] je pro všechny typy vláken bez rozdílu roven 0,75, avšak při porušení prvku přetržením výztuže definuje požadavek na snížení jejího využití [3]. Norma pro mostní konstrukce CHBDC (Canadian Highway Bridge

Tab. 1 Hodnoty součinitele C_E [2] ■ Tab. 1 Environmental reduction factor C_E [2]

Podmínky	Typ vlákna	C_E
beton na vzduchu a v suchu	CFRP	1,0
	GFRP	0,8
beton v zemině a/nebo vystavený vodě	CFRP	0,9
	GFRP	0,7

Tab. 2 Hodnoty součinitele η_a [7] ■ Tab. 2 Environmental conversion factor η_a [7]

Podmínky	Typ vlákna	Matrice	η_a
beton nevystaven vlhkosti	CFRP	Vinylester nebo epoxid	1,0
	GFRP		0,8
beton vystaven vlhkosti	CFRP	epoxid	0,9
	GFRP		0,7

Design Code, 2006 dle ISIS Canada [4]) však již typ použitých vláken rozlišuje. Definuje rozdílnou hodnotou součinitele ϕ_f :

- $\phi_f = 0,75$ pro CFRP výztuž,
- $\phi_f = 0,50$ pro GFRP výztuž.

Součinitel odolnosti materiálu je zaveden shodně s [2] – tj. dle vztahu (8). Je nutno poznamenat, že norma [3] vychází z novějších poznatků.

fib Bulletin No. 40

Návrhová pevnost FRP výztuže v tahu f_{fd} je v souladu s [5] a [8] určena z charakteristické hodnoty tahové pevnosti dle vztahu:

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f} \quad (9)$$

Součinitel γ_f je pro všechny typy vláken shodný a roven hodnotě 1,25. Charakteristická hodnota tahové pevnosti má být uvážena jako 5% kvantil normálního rozdělení. Únosnost průřezu je dále redukována v souladu s [8] a [9] využitím parciálního materiálového součinitele betonu. Postup v rámci krátkodobé pevnosti neuvažuje s redukcí vlivem okolního prostředí. Tento zavádí až při stanovení dlouhodobé odolnosti/únosnosti.

CNR-DT 203/2006

Charakteristická hodnota mezního poměrného přetvoření FRP výztuže v tahu ε_{fk} je v rámci postupu uvedeného v [7] upravena dvojicí součinitelů. Součinitel η_a zohledňuje (shodně s [2]) vliv prostředí (vlhkosti) (tab. 2). Hodnoty redukčních součinitelů jsou shodné s [2]. Dále je uváženo parciální materiálový součinitel γ_f , jenž je pro FRP výztuž zaveden hodnotou 1,5, která se s ohledem na zkušenosti jeví značně konzervativní (obr. 4). Návrhová hodnota mezního poměrného přetvoření ε_{fd} je pak dána vztahem:

$$\varepsilon_{fd} = 0,9\eta_a \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (10)$$

Koeficient 0,9 v (10) je v normě [7] zaveden z důvodu snížení mezního přetvoření v případě namáhání ohybem.

Stanovení dlouhodobé návrhové hodnoty únosnosti

Dlouhodobé chování FRP výztuže je ovlivněno velikostí dlouhodobě působícího zatížení a okolním prostředím [1]. Všechny návrhové přístupy uvedené v [1] proto omezují hladinu přípustného napětí ve FRP výztuži od dlouhodobě působícího zatížení. Jednotlivými

přístupy stanovená dlouhodobá únosnost jednoduchého ohybaného prvku (shodně s krátkodobou únosností) je uvedena v příkladu na závěr článku.

ACI 440.1R-15

Směrnice [2] požaduje, aby napětí ve výztuži od dlouhodobého zatížení $f_{f,s}$ bylo nižší než maximální krátkodobá hodnota pevnosti výztuže v tahu f_{fu} stanovená dle vztahu (6) a redukována v závislosti na typu FRP výztuže:

- $0,2f_{fu}$ pro GFRP výztuž,
- $0,55f_{fu}$ pro CFRP výztuž.

Směrnici požadované omezení napětí vychází ze zkušeností a pouze omezeně vystihuje skutečné chování výztuže, přičemž je nepřesné především pro výztužné prvky s vysokou počáteční tahovou pevností. Napětí od dlouhodobě působícího zatížení $f_{f,s}$ je uváženo jako suma všech stálých zatížení a dlouhodobě působících proměnných zatížení.

CSA S806-12

Norma [3] přistupuje k omezení napětí ve výztuži obdobně jako směrnice [2]. Odlišná je pouze hladina přípustného dlouhodobě působícího zatížení. Napětí ve výztuži by nemělo překročit následující mezní hodnoty určené z počáteční návrhové tahové pevnosti f_{frpu} :

- $0,25f_{frpu}$ pro GFRP výztuž,
- $0,65f_{frpu}$ pro CFRP výztuž.

Pro GFRP výztuž je navíc požadováno, aby přetvoření výztuže od dlouhodobě působícího zatížení nepřekročilo hodnotu 0,2 %. Tento limit je stanoven v návaznosti na zkušební postupy definované pro ověření spolehlivosti FRP výztuží normou [11]. Shodně s [2] je dlouhodobě působící zatížení uváženo jako suma všech stálých a dlouhodobě působících nahodilých zatížení.

fib Bulletin No. 40

Na rozdíl od podkladů [2] a [3], které omezují maximální působící napětí ve výztuži spíše zvyklostně, je v rámci podkladu [5] vliv dlouhodobě působícího zatížení a okolních podmínek zohledněn komplexněji a v návaznosti na pravidla definovaná v [9]. Redukce dlouhodobé tahové pevnosti je provedena součinitelem $\eta_{env,t}$, který je definován vztahem:

$$\eta_{env,t} = \frac{f_{fk}}{f_{fk,1000h}} \frac{1}{\left(\frac{100-R_{10}}{100}\right)^n}, \quad (11)$$

kde $f_{fk,1000h}$ je dlouhodobá únosnost FRP výztuže v tahu pro čas 1000 h, f_{fk} je krátkodobá charakteristická pev-

nost FRP výztuže v tahu, R_{10} je redukce pevnosti za dekádu logaritmického času a n je součinitel zahrnující vliv prostředí a životnost konstrukce. Součinitel n se stanoví dle vztahu:

$$n = n_{mo} + n_T + n_{SL} + n_d, \quad (12)$$

kde jednotlivé parametry vyjadřující dílčí vlivy jsou uváženy následovně:

- n_{mo} zohledňuje vlhkost prostředí, může nabývat hodnot:
 - -1 – pro suché prostředí – relativní vlhkost (RH) cca 50 %, tj. třída prostředí XC1 dle [8],
 - 0 – konstrukce občas v kontaktu s vodou – RH cca 80 %, tj. třída XC3, XD1, XD3, XS1, XS3),
 - +1 – pro mokré prostředí s RH = 100 %, třídy XC2, XC4, XD2, XS2,
- n_T zohledňuje teplotu prostředí, nabývá hodnot:
 - -0,5 – pro střední roční teplotu v místě obvyklou nižší než +5 °C
 - 0 – teplota +5 až +15 °C,
 - +0,5 – teplota +15 až +25 °C,
 - +1 – teplota +25 až +35 °C,
- n_{SL} zohledňuje předpokládanou životnost konstrukce, nabývá hodnot:
 - +1 – životnost 1 rok,
 - +2 – životnost 10 let,
 - +2,7 – životnost 50 let,
 - +3 – životnost 100 let,
- n_d zohledňuje případnou rozdílnost průměru výztuže oproti testovanému vzorku, může nabývat hodnot:
 - 0 – shodný či větší průměr než byl testovaný,
 - +0,5 – průměr je nižší, cca 75 % testovaného,
 - +1 – průměr je nižší, cca 50 % testovaného.

Očekávané hodnoty součinitele $\eta_{env,t}$ se pohybují v intervalu cca 1,1 až 3 v závislosti na prostředí a požadované životnosti prvku. V případě, že není známa dlouhodobá únosnost FRP výztuže v tahu pro čas 1 000 h expozice v daném prostředí $f_{fk,1000h}$, může být využit konzervativní vztah:

$$\eta_{env,t} = \frac{1}{\left(\frac{100-R_{10}}{100}\right)^{n+2}} \quad (13)$$

Výsledná dlouhodobá únosnost FRP výztuže v tahu f_{fd}^{LT} je dána vztahem:

$$f_{fd}^{LT} = \frac{f_{fk}}{\eta_{env,t} \gamma_f} \quad (14)$$

Mezní přípustné dlouhodobé napětí FRP výztuže v tahu (tj. dlouhodobá únosnost výztuže) pak musí být vyšší nežli účinek kvazistálé kombinace zatížení stanovené v souladu s [9].

Tab. 3 Hodnoty součinitele η_1 [7] ■ Tab. 3 Conversion factor for long-term effects η_1 [7]

Způsob zatěžování	Typ vlákná	Matrice	η_1
kvazistálé a/nebo cyklické (dotvarování, relaxace, únava)	CFRP	Vinylester nebo	0,9
	GFRP	epoxid	0,3

CNR-DT 203/2006

Dlouhodobé účinky zatížení a vliv prostředí jsou v rámci výpočtu dle [7] zohledněny redukcí počáteční tahové pevnosti FRP výztuže součinitelem η_1 , který je závislý na typu vláken (tab. 3).

Výsledná dlouhodobá tahová pevnost FRP výztuže $f_{fd,lim}$ je určena jako:

$$f_{fd,lim} = \eta_a \eta_1 \frac{f_{fk}}{\gamma_f}, \quad (15)$$

kde f_{fk} je charakteristická hodnota pevnosti FRP výztuže v tahu a γ_f je součinitel spolehlivosti FRP výztuže (pro případ dlouhodobých účinků je roven hodnotě 1). Norma [7] připouští s ohledem na dlouhodobé účinky zatížení stanovené z kvazistálé kombinace dle [9] nejvyšší využití CFRP výztuže, pro GFRP výztuž je limit srovnatelný s požadavky normy [3].

SROVNÁNÍ NÁVRHOVÝCH POSTUPŮ

Dle všech uvedených postupů byla pro jednoduchý ohýbaný prvek stanovena mezní ohybová únosnost. Provedené výpočty jsou srovnány s výsledky reálného experimentu. Moment na mezi únosnosti byl stanoven v krátkodobé a dlouhodobé návrhové hodnotě a též i s použitím středních materiálových charakteristik naměřených na reálných vzorcích (pro porovnání s výsledky experimentu).

Geometrie posuzovaného prvku je uvedena na obr. 3. Prvek byl vyroben z betonu třídy C30/37 (střední pevnost stanovená na krychlích cca 48,5 MPa) a vyztužen dvojicí prutů GFRP výztuže průměru 14 mm (tab. 4). Pro stanovení dlouhodobé únosnosti bylo před-

pokládáno vnější mokré prostředí (tj. součinitel C_E a $\eta_a = 0,7$), součinitel $\eta_{env,t}$ dle [5] je uvážen hodnotou 3. Pro jiné aplikační oblasti (požadovanou životnost) by redukční součinitele nabývaly nižších hodnot. Výpočtem stanovené momenty únosnosti jsou uvedeny v tab. 5 a na obr. 4 (zeleně střední hodnoty, modře návrhové krátkodobé, žlutě návrhové dlouhodobé hodnoty únosnosti).

ZÁVĚR

V textu článku jsou uvedeny a vzájemně porovnány nejčastěji využívané návrhové postupy pro dimenzování betonových ohýbaných prvků vyztužených FRP výztuží. Je nutno podotknout, že využití zahraničních návrhových postupů (především ACI 440.1R-15 [2] a CSA S806-12 [3]) s sebou nese nutnost stanovit zatížení dle kompatibil-

ních souvisejících norem. Samozřejmě nelze kombinovat zatížení stanovené v souladu s EN 1991 a únosnost stanovenou dle standardů [2] a [3]. Také stanovení návrhových (dle terminologie [2] zaručených) hodnot materiálů je odlišné. Oproti tomu návrhy dle fib Bulletin No. 40 [5] a CNR-DT 203/2006 [7] jsou kompatibilní s ustanovením v současnosti používaných EN norem.

Výsledky srovnání výpočtů mezní únosnosti jednoduchého ohýbaného prvku dle jednotlivých návrhových postupů nelze zobecňovat, především pro jiné typy porušení a další typy FRP výztuží budou obdržené výsledky odlišné. Závěry jsou však využitelné především v případě nízkého stupně vyztužení prvku, kdy rozhoduje o únosnosti odolnost nejběžněji dostupné GFRP výztuže. Z výsledků je patrné, že nejbezpečnějších (nejkonzervativnějších) hodnot únosnosti je dosaženo při využití směrnice [2], která významně redukuje únosnost průřezu a zároveň též krátkodobou i dlouhodobou tahovou únosnost FRP výztuže.

Tab. 4 Materiálové charakteristiky GFRP výztuže ■ Tab. 4 Material properties of GFRP reinforcement

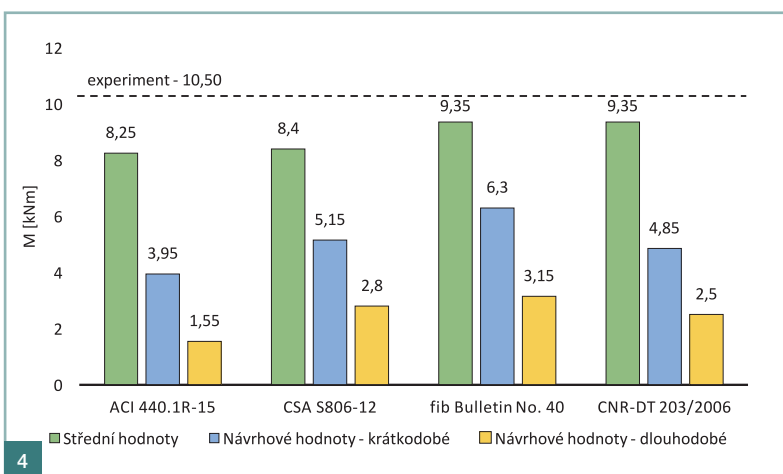
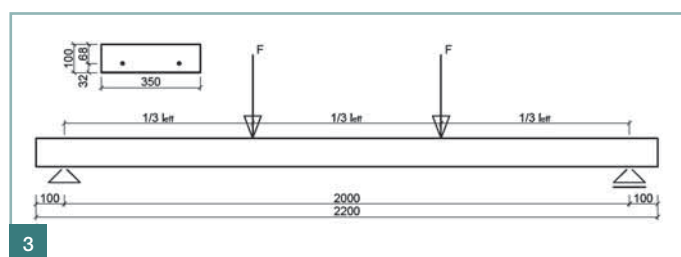
Veličina		Střední hodnoty	Zaručené hodnoty [2] a [3]	Charakteristické hodnoty [5] a [7]
pevnost v tahu	[MPa]	671,30	547,10	603,10
mezní přetvoření	[% _o]	20,98	17,10	18,85
modul pružnosti	[GPa]	cca 40, uvážena střední hodnota		

Tab. 5 Mezní ohybový moment [kNm] stanovený dle [2] až [7], uvedena střední, krátkodobá a dlouhodobá únosnost; výsledek experimentu značí střední hodnotu únosnosti sady vzorků ■ Tab. 5 Ultimate bending moment [kNm] determined according to [2] to [7]; mean, short-term and long-term ultimate moment are stated. The result of the experiment is an average value from set of specimens

Návrhový postup	Střední hodnoty	Návrhové hodnoty		Experiment
		krátkodobé	dlouhodobé	
ACI 440.1R-15	8,25	3,95	1,55	10,50
CSA S806-12	8,40	5,15	2,80	
Bulletin No. 40	9,35	6,30	3,15	
CNR-DT 203/2006	9,35	4,85	2,50	

Obr. 3 Geometrie prvku a poloha břemen při zatěžovací zkoušce ■ Fig. 3 Dimensions of the member and position of applied load during experiment

Obr. 4 Porovnání teoreticky a experimentálně stanovených hodnot únosnosti prvku vyztuženého GFRP výztuží ■ Fig. 4 Comparison of theoretically and experimentally determined load bearing capacity of member reinforced with GFRP reinforcement



Literatura:

- [1] GIRGLE, F., PROKEŠ, J., JANUŠ, O., KOSTIHA, V., ŠTĚPÁNEK, P. Kompozitní výztuž do betonu – perspektivní materiál pro odolné a trvanlivé betonové konstrukce. *Beton TKS*. 2017, roč. 17, č. 2, s. 50–55.
- [2] *ACI 440.1R-15. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars*. Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute (ACI), 2015.
- [3] *CSA S806-12 – Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers*. Canadian Standards Association (CSA), 2012.
- [4] Design Manual No. 3. *Reinforcing concrete structures with fibre reinforced polymers*. Winnipeg: ISIS Canada, 2006. 150 p.
- [5] *fib Bulletin No. 40. FRP reinforcement in RC structures*. Lausanne, Switzerland: International federation for structural concrete, 2007. ISBN 978-2-88394-080-2.
- [6] *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Lausanne, Switzerland: International federation for structural concrete, 2013. ISBN 978-3-433-03061-5.
- [7] *Technical Document CNR-DT 203/2006: Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars*. Rome: ITA, 2007. 39 s.
- [8] ČSN EN 1992-1-1, ed. 2, 73 1201. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [9] ČSN EN 1990, ed. 2, 73 0002. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: ÚNMZ, 2015.
- [10] ISO 10406-1:2015. *Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete – Test methods – Part 1: FRP bars and grids*. Geneva, Switzerland, 2015.
- [11] *CSA S807-10 – Specification for fibre-reinforced polymers*. Canadian Standards Association (CSA), 2010. ISBN 978-1-55491-394-7.
- [12] *ACI 318-14. Building code requirements for structural concrete and commentary*. Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute (ACI), 2014.
- [13] *SKSI: MANUÁL na navrhovanie GFRP výztuže do betónových konštrukcií*. Bratislava: Jaga Group, 2015. ISBN 978-80-8076-117-2.

Především limitní hodnoty dlouhodobé únosnosti vycházejí z velmi konzervativních experimentálních dat a pro některé FRP výztuže jsou značně devalvující. Návrhové postupy [3] a [5] již reflektují nové poznatky a především zkušenosti z aplikace těchto materiálů v reálných stavbách. Stanovení dlouhodobé únosnosti prvku dle [5] navíc umožňuje zohlednit požadované vstupní proměnné (životnost, okolní prostředí apod.) a pružně tak reagovat na požadavky konkrétního projektu. Ve srovnání s [3] či [7] je tento postup vý-

znamně komplexnější a umožňuje zohlednit skutečné vlastnosti využitě FRP výztuže.

Projektant by měl obezřetně přistupovat k informacím o únosnosti a dalších mechanických vlastnostech FRP výztuže definovaných odlišnými výrobci/dodavateli různě. Je nutno především požadovat detailní informace o vlastnostech, způsobu testování a kontrole kvality při výrobě. Existuje značné množství typů FRP výztuží od různých dodavatelů a jejich chování v současné době nelze paušalizovat. Při návrhu využitá FRP výztuž by tak měla být v rámci projektu přesně specifikována.

Při návrhu je třeba věnovat pozornost především dlouhodobé spolehlivosti prvku, správně zohlednit působící činitele ovlivňující životnost výztuže a též i způsob porušení navrhovaného prvku. Je třeba uvážit i požadovanou požární odolnost konstrukce v souladu s platnými předpisy a při návrhu požadavky zohlednit volbou krycí vrstvy, provedením detailů kotvení, příp. sekundární ochranou prvku [1].

Prezentované výsledky byly získány za finanční podpory projektu Technologické agentury ČR TA04010881 „Stanovení dlouhodobé spolehlivosti kompozitních výztuží s ohledem na zvýšení jejich užitečných vlastností“ a interních projektů FAST-S-15-2899 „Využití progresivních FRP materiálů v odolných konstrukcích“ a FAST-J-17-4555 „Únava vnitřních kompozitních výztuží při vysokocyklickém namáhání a jejich soudržnost s betonem“.

Ing. František Girgle, Ph.D.
e-mail: girgle.f@fce.vutbr.cz



Ing. Ondřej Januš
e-mail: janus.o@fce.vutbr.cz



Ing. Anna Matušková
e-mail: matusikova.a@fce.vutbr.cz



prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.
e-mail: stepanek.p@fce.vutbr.cz



všichni: Fakulta stavební VUT v Brně

Text příspěvku byl posouzen odborným lektorem.
The text was reviewed.

INZERCE PRO VÁS!

EDIČNÍ PLÁN
BETON TKS
NA ROK 2017

Číslo	Hlavní téma	Objednání inzerce	Dodání inzerce	Datum vydání
1/2017	Sakrální stavby	16. 1. 2017	24. 1. 2017	15. 2. 2017
2/2017	Materiály a technologie	15. 3. 2017	24. 3. 2017	13. 4. 2017
3/2017	Sanace a rekonstrukce	15. 5. 2017	24. 5. 2017	15. 6. 2017
4/2017	Mosty	14. 7. 2017	24. 7. 2017	15. 8. 2017
5/2017	Pozemní stavby	15. 9. 2017	22. 9. 2017	16. 10. 2017
6/2017	Dopravní stavby	15. 11. 2017	24. 11. 2017	15. 12. 2017

CENÍK

Formát	Umístění	Cena v Kč
A4	4. strana obálky	80 000,-
A4	3. strana obálky	50 000,-
A4	vnitřní strana	35 000,-
1/2 A4	vnitřní půlstrana	20 000,-
1/3 A4	vnitřní třetina strany	15 000,-
1/4 A4	vnitřní čtvrtstrana	12 000,-
1/6 A4	inzerát nebo tisková zpráva	8 000,-
1/8 A4	inzerát nebo tisková zpráva	6 000,-
	propagační článek – za každou celou stranu	30 000,-
	vkład vlastních propagačních materiálů	8 000,-

Ceny jsou uvedeny bez DPH.

Způsob placení: inzerce a PR články jsou placeny na základě faktury vystavené po jejich vytištění v časopise. Klient obdrží současně s fakturou dva výtisky časopisu, v případě zájmu lze přobjednat větší množství.

SLEVY:

při opakování inzerátu v rámci ročníku - 10 %
pro členy SVC ČR, SVB ČR, ČBS ČSSI a SSBK - 15 %
při objednání inzerce do konce ledna - 10 %
při objednání celoroční inzerce (6 ks) - 5 %
Jiné možnosti či kombinace po dohodě s redakcí.

PŘÍRÁŽKY:

přesné umístění +10 %
grafické zpracování +10 %

TECHNICKÉ ÚDAJE

PRE-PRESS

zlom	InDesign	přibalit použitá písma a obrázky
inzerce	Acrobat	režim CMYK, formát PDF
grafika	Photoshop (bitmapa)	režim CMYK, formát TIFF
		min. rozlišení 300 b/p monochromatický režim, formát TIFF
médiá	Illustrator (vektory)	min. rozlišení 600 b/p
	CD, DVD, USB flash	režim CMYK, formát AI PC / MAC

TISK

čistý formát (maketa)	210 x 297 mm
barevnost	4 barvy (CMYK)
technologie tisku	plochy offset
papír obálka	250 g/m ² lesklá křída/lamino
papír vnitřní strany	150 g/m ² matná křída
tiskový rastr / rozlišení	175 lpi / 3810 dpi

Nepoužívejte prosím formát Corel, ale export pro AI (všechny texty v křivkách, obrázky ve CMYK režimu).
Není možné použít inzeráty z PowerPointu a Wordu.

PŘÍJEM INZERCE

Beton TKS, s. r. o.
Na Zámecké 9, 140 00 Praha 4
tel.: 602 839 429, e-mail: redakce@betontks.cz

www.betontks.cz