EXPERIMENTÁLNÍ A NUMERICKÁ ANALÝZA ŽELEZOBETONOVÝCH PRVKŮ ZESÍLENÝCH KOMPOZITNÍMI LAMELAMI

Valeriia Kazmina, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika. valeriia.kazmina@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Tento článek popisuje diplomovou práci zaměřenou na problematiku zesilovaní konstrukcí pomocí vláknových kompozitů. Předmětem práce byla první fáze grantového projektu "Systém uhlíkových lamel nové generace se zvýšenou požární odolností pro zesilování stávajících konstrukcí". Cílem práce bylo analyzovat vliv zesílení uhlíkovými lamelami na chování železobetonových prvků za běžných teplot. Článek je rozdělen do dvou částí. První část popisuje návrh experimentu, výrobu a testování zkušebních těles a návrh budoucího experimentu. Druhá část práce je věnována popisu a výsledkům nově vytvořeného výpočetního nástroje, založeného na numerické analýze průřezu s využitím metody moment– křivost. Do podoby výpočetního nástroje je algoritmus implementován v jazyce Python.

KLÍČOVÁ SLOVA

uhlíkové lamely • FRP • zesilování železobetonových prvků • experimenty • moment-křivost

ABSTRACT

This article focuses on the description of diploma thesis focused on structures strengthened using fibre reinforced composites. The subject of the thesis was the first phase of a grant project "New generation carbon plates with increased fire resistance for strengthening of existing structures". The aim of the thesis was to analyse the effect of FRP reinforcement on the behaviour of reinforced concrete structural elements at normal temperature. The article is divided into two parts. The first part contains the design of the experiment, manufacturing and testing of test specimens and design of future experiment. The second part of the article is devoted to a newly created computational tool for numerical analysis of reinforced elements. The computational tool is based on numerical analysis of the cross-section using the moment–curvature method. The algorithm is implemented in Python as a computational tool.

KEYWORDS

carbon plates • FRP • strengthening of reinforced concrete elements • experiments • moment-curvature

1. ÚVOD

Tento článek shrnuje experimentální program a výsledky dosažené v rámci diplomové práce (Kazmina 2024). Problematika modernizace stávajících stavebních konstrukcí je významným a dlouhodobým tématem, který se zkoumá v posledních desetiletích. Postupné zhoršování stavu pozemních a dopravních staveb může být způsobeno množstvím faktorů, jako je stárnutí, negativní vlivy prostředí, nedostačující původní návrh, který v dnešní době nevyhovuje současným požadavkům a normám, nekvalitní provedení, nedostatečná údržba a mimořádné události, které jsou vyvolané buď činností člověka nebo přírodními jevy. (fib Bulletin No. 14. 2001)

Většina těchto konstrukcí je stále provozuschopná, ale mohou se například měnit podmínky užívaní nebo se očekává zvětšení působícího zatížení. Méně časově a technologicky náročné je zesílit stávájící konstrukce než bourat a stavět konstrukci novou. Je ale třeba věnovat pozornost správnému návrhu zesílení a jeho kvalitnímu provedení.

V poslední době došlo k významnému pokroku v oblasti materiálů, metod a technologií pro zesilování železobetonových konstrukcí. Jedna z nejmodernějších variant, která je dnes považována za velmi perspektivní v oblasti stavebnictví, je využití vláknových kompozitů s vnějším lepením – FRP EBR (z angl. externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement). Vláknové kompozity s vnějším lepením lze využívat k zesílení buď převážně tlačených prvků nebo prvků namáhaných smykem a kroucením (fib Bulletin No. 14. 2001), ale předmětem této práce je výzkum zesílení ohýbaných prvků.

2. EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA

Předmětem popisované práce byla první fáze grantového projektu "Systém uhlíkových lamel nové generace se zvýšenou požární odolností pro zesilování stávajících konstrukcí".

"Cílem projektu je zavedení systému vysoce odolných lamel poskytujících různou úroveň protipožární ochrany do praxe a tím zvýšit odolnost stávající infrastruktury a zabezpečit ochranu života a zdraví osob při zachování stávajících užitných vlastností stavebního objektu. Současné lamely mají nulovou požární odolnost. Řešení projektu spočívá ve zvýšení požární odolnosti a zajištění vysoké odolnosti lepených lamel vůči vysokým teplotám pomocí pokročilých materiálů." (Grantová přihlaška 2022)

Hlavním cílem tohoto projektu je tedy analyzovat vliv zesílení uhlíkovými lamelami na chování železobetonových prvků za vysokých teplot, což ale nebylo předmětem popisované práce. V rámci experimentální části práce byl navržen, proveden a vyhodnocen

^{*} Školitel: Ing. Radek Štefan, Ph.D., FEng.

experiment, jehož hlavním cílem bylo analyzovat vliv zesílení uhlíkovými lamelami na chování železobetonových prvků za běžných teplot. Experiment je unikátní v tom, že byl přímo navržen pro účely daného projektu, v rámci kterého bude nutné zkoušet velké množství nezesílených i zesílených prvků za běžné teploty i za vysokých teplot. Tento typ experimentu není definován v žádném normovém předpisu a není pro něj zaveden žádný osvědčený postup. Práce tedy představuje první krok nezbytný k tomu, aby mohlo být dále v projektu přistoupeno k analýze za vysokých teplot.

2.1. Návrh experimentu

Pro analýzu vlivu zesílení uhlíkovými lamelami na chování železobetonových prvků byly provedeny experimenty na železobetonových trámcích o velikosti 100 mm × 160 mm × 1000 mm. Hlavní ohybová výztuž trámků byla o průměru $\emptyset_s = 6$ mm, smyková výztuž byla také o průměru $\emptyset_{tr} = 6$ mm s roztečí 90 mm. Vyztužení vzorků je patrné z Obr. 1. Krytí výztuže se uvažovalo jako c = 15 mm.



Obr. 1: 3D model trámku s vyznačenými místy měření průhybů při čtyřbodovém ohybu (Chylík 2023)

V rámci experimentu bylo zkoušeno a vyhodnoceno 9 trámků, 3 bez zesilovaní a 6 se zesílením uhlíkovými lamelami. Všechny vzorky byly zkoušeny za běžné teploty.

Zkoušení trámků pobíhalo jak čtyřbodovým ohybem, tak tříbodovým ohybem. Trámek se umístil z obou stran na dvě podpory ve vzdálenosti 55 mm od kraje a následně byl zatěžován silou, která se v místě působení na trámek rozdělila v případě čtyřbodového ohybu na dvě stejně velké síly ve vzdálenosti mezi sebou 300 mm.

V první fázi experimentálního programu řešeného grantového projektu byly analyzovány běžně dostupné lamely Sika.

V dalších fázích experimentálního programu projektu budou zkoušeny nově vyvinuté lamely a bude také probíhat zkoušení zesílených prvků vystavených vysokým teplotám. Tyto fáze nebyly předmětem popisované práce.

Při zkoušení trámků se měřila síla a průhyb po celou dobu zatěžování. Měření průhybu probíhalo pomocí inkrementálních snímačů dráhy, umístěných v polovině rozpětí a pod působícím zatížením, jak je znázorněno na Obr. 1.

2.2. Výroba zkušebních těles

Nejdříve probíhalo vyvázaní armokošů z předem připravených položek. Byla použita standardní žebírková betonářská výztuž třídy B500B. Po osazení armokošů do bednicích forem (Obr. 2) probíhala výroba betonové směsi. Byl zvolen beton s nižší pevností, aby simuloval dříve využívané, méně kvalitní konstrukční betony. Trámky se ve staří 28 dní zesílily (Obr. 3) podle postupu popsaného v manuálu od výrobce. Jako zesilující prvek byla použita komerčně dostupná lamela Sika CarboDur S 512 o tloušť ce 1,2 mm a o šířce 50 mm. Lamela byla z uhlíkových vláken vyztužených polymery CFRP (z angl. carbon fiber reinforced polymer).



Obr. 2: Armokoše

Obr. 3: Zesílené trámky

2.3. Zkoušky únosnosti v ohybu a zhodnocení

Jako první byly zkoušeny 3 trámky bez zesílení pro následné porovnání se zesílenými trámky. Zkoušení probíhalo v elektromechanickém lisu, zatěžování bylo řízené přírůstkem deformace (0,2 mm/min). Zkoušení se provádělo do dosažení únosnosti (porušení) trámku.

Trámky bez zesílení byly vždy porušeny vhodným způsobem, tzn. v ohybu (viz Obr. 4).



Obr. 4: Nezesílený trámek po porušení zkoušený na čtyřbodový ohyb

Následně byly zkoušeny 3 trámky se zesílením. U zesílených trámků byla prokázaná vysoká tuhost v ohybu, násobně vyšší než ve smyku. U zesílených trámků ale k požadovanému způsobu porušení nedocházelo. Vzhledem k odlišnému průběhu posouvající síly při tříbodovém a čtyřbodovém ohybu byl pro porovnání způsobů porušení zkoušen zesílený trámek na tříbodový ohyb. Nezávisle na způsobu zkoušení v místě největšího smykového napětí vždy nastávalo odchlípnutí ohybové lamely, což znamenalo dřívější selhání zkušebního tělesa ve smyku než v ohybu (viz Obr. 5, Obr. 7). Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto další 3 trámky zesílit ve smyku, což ale stejně nepomohlo a nenastalo porušení požadovaným způsobem (viz Obr. 5, Obr. 7).

Na grafu na Obr. 6 je vidět porovnání průběhů zatěžování trámků při zkoušení na čtyřbodový ohyb.

Z grafu na Obr. 6 je patrné, že zesílené trámky (T4, T5, T11, T12) přenesly větší zatěžovací sílu a vykazovaly menší průhyby než trámky bez zesílení (T1, T2, T3).

Průměrná hodnota maximální zatěžovací síly nezesílených trámků (T1, T2, T3) zkoušených na čtyřbodový ohyb činila 33,1 kN. Průměrná hodnota průhybu při dosažení maximální zatěžovací síly



Obr. 5: Zesílené trámky zkoušené na čtyřbodový ohyb po porušení



Obr. 6: Porovnání průběhů trámků zkoušených na čtyřbodový ohyb

byla 7,68 mm. Ohybový moment odpovídající průměrné hodnotě maximální zatěžovací síly pro nezesílené trámky T1,T2 a T3 byl $M_R = 4,88$ kNm.

U trámků zesílených v ohybu (T4, T5) zkoušených na čtyřbodový ohyb byla průměrná hodnota maximální zatěžovací síly 47,4 kN. Průměrná hodnota průhybu při dosažení maximální zatěžovací síly byla 2,8 mm. Ohybový moment odpovídající průměrné hodnotě maximální zatěžovací síly pro trámky zesílené v ohybu T4 a T5 byl $M_R = 6,99$ kNm.

U trámků se zesílením v ohybu a smyku (T11, T12) zkoušených na čtyřbodový ohyb činila průměrná hodnota maximální zatěžovací síly 50,3 kN. Průměrná hodnota průhybu při dosažení maximální zatěžovací síly byla 2,4 mm. Ohybový moment odpovídající průměrné hodnotě maximální zatěžovací síly pro trámky zesílené v ohybu a smyku T11 a T12 byl $M_R = 7,42$ kNm.

Na grafu na Obr. 8 lze vidět porovnání průběhů zatěžování trámků zkoušených na tříbodový ohyb.

Pro trámek zesílený v ohybu T6 zkoušený na tříbodový ohyb byla maximální zatěžovací síla 46,18 kN. Hodnota průhybu při dosažení této síly byla 3,49 mm. Ohybový moment odpovídající maximální zatěžovací síle pro trámek zesílený v ohybu T6 byl $M_R = 10,27$ kNm

Pro trámek zesílený v ohybu a smyku T10 zkoušený na tříbodový ohyb byla maximální zatěžovací síla 36,18 kN. Hodnota průhybu při dosažení této síly byla 2,78 mm. Ohybový moment odpovídající maximální zatěžovací síle pro trámek zesílený v ohybu a smyku T10 byl $M_R = 8,05$ kNm.



Obr. 7: Zesílené trámky zkoušené na tříbodový ohyb po porušení



Obr. 8: Porovnání průběhů trámků zkoušených na tříbodový ohyb

2.4. Návrh budoucího experimentu

Pro následnou analýzu chování prvků zesílených v ohybu je vhodné pro další experimenty upravit zkušební tělesa tak, aby byly vlastnosti lamely lépe využity. Je potřeba, aby zkušební těleso nebylo náchylné ke smykovému porušení, čehož lze docílit nižší výškou vzorku nebo menší roztečí smykové výztuže.

Jelikož jsou již zkušební trámky pro další sérii experimentů vyrobeny, bude využita možnost zkoušet průřez otočený o 90°. Další důležitou úpravou navrženou pro další experimenty je zvetšení délky kotvení. To bude realizováno tak, že lamela bude nalepena na celou délku trámku a podepření bude upraveno tak, aby ne-docházelo ke kontaktu podpory a lamely.

Také je možné zvážit použití dalších zesilujících prvků pro řádné zakotvení lamely.

3. NUMERICKÁ ANALÝZA

V práci byl vytvořen a popsán výpočetní nástroj pro numerickou analýzu zesílených prvků. Výpočetní nástroj byl verifikován a validován porovnáním výsledků numerických výpočtů s daty změřenými a popsanými v rámci experimentální části práce. Výpočetní nástroj bude následně sloužit pro další vědecké a výzkumné účely v rámci řešeného grantového projektu – např. pro návrh dalších experimentů, předběžnou analýzu velkorozměrových zkoušek, rozšíření funkcionality výpočetního nástroje pro analýzu prvků vystavených vysokým teplotám apod. Výpočetní nástroj je založen na numerické analýze průřezu s využitím metody moment-křivost. Výpočetní algoritmus je implementován do podoby výpočetního nástroje v jazyce Python (Pilgrim & Willison 2009).

3.1. Popis výpočetního algoritmu

3.1.1. Stanovení křivky moment-křivost

Prvním krokem numerické analýzy prvku je analýza průřezu s využitím metody moment–křivost. Metoda je založená na stanovení tzv. *pracovního diagramu průřezu* (křivka závislosti moment– křivost), který popisuje chování průřezu při namáhání ohybem. Metodu lze využít i pro analýzu prvků zatížených kombinací normálové síly a ohybového momentu (viz např. Sura et al. (2012), Štefan et al. (2019)), zde jsou ale analyzovány čistě ohýbané prvky.

Křivka moment–křivost pro analyzovaný průřez je sestrojena numericky pomocí jednotlivých bodů, viz Obr. 9. Body jsou stanoveny tak, že se pro příslušnou hodnotu křivosti stanoví odpovídající moment vnitřních sil na analyzovaném průřezu.



Obr. 9: Princip sestrojení křivky moment-křivost

Výpočet momentu vnitřních sil pro zadanou hodnotu křivosti probíhá iteračně. Princip výpočtu je znázorněn na Obr. 10.



Obr. 10: Analýza průřezu

3.1.2. Materiálové vlastnosti

Pro příslušná přetvoření se stanoví napětí v jednotlivých materiálech. K tomu jsou využity pracovní diagramy materiálů znázorněné níže. V celé numerické části, tedy i v definici pracovních diagramů, je uvažována znaménková konvence: tlak +, tah –.

Pro pracovní diagram betonu (viz Obr. 11) v tlaku je použit model popsaný v normě ČSN EN 1992-1-1 (2011), čl. 3.1.5. Pro pracovní diagram betonu v tahu je uvažován lineární vztah až do porušení, sestupná větev není uvažována (viz např. DIANA (2017)).



Obr. 11: Pracovní diagram betonu uvažovaný v numerickém modelu

Pracovní diagram výztuže je uvažovaný tak, aby co nejlépe vystihoval skutečný pracovní diagram změřený v rámci experimentální části. Je uvažován bilineární pracovní diagram výztuže s rostoucí větví (Obr. 12).



Obr. 12: Pracovní diagram výztuže uvažovaný v numerickém modelu

Pracovní diagram lamely je uvažovaný jako lineární (pružný) až do porušení – do dosažení mezního přetvoření. Je uvažována pouze tahová oblast pracovního diagramu, chování lamely v tlaku je odlišné a pro řešené případy není nutné chování v tlaku definovat (lamela je vždy tažená). Pracovní diagram lamely je znázorněn na Obr. 13

3.1.3. Výpočet průhybu

V rámci experimentů byly zaznamenány pro zkušební trámky závislosti působící síly na průhybu trámku. Aby bylo možné porovnat výsledky stanovené pomocí numerického modelu s experimentálně změřenými daty, je potřeba rozšířit model o výpočet průhybu analyzovaného prvku. Výpočet průhybu uprostřed rozpětí analyzovaného prvku se stanoví pomocí numerické integrace křivosti přes polovinu rozpětí prvku ze vztahu (1). Tato metoda je podrobně popsána např. v publikaci (Collins & Mitchell 1997) a aplikována např. v pracích (Kazmina 2024, Ismail et al. 2018, Lingga et al. 2019).



Obr. 13: Pracovní diagram lamely uvažovaný v numerickém modelu

$$y = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{y''_i \cdot x_i + y''_{i+1} \cdot x_{i+1}}{2} \cdot (x_{i+1} - x_i) \right), \tag{1}$$

kde *i* je číslo bodu na rozhraní proužků, na které je rozdělena polovina rozpětí analyzovaného prvku, a *n* je celkový počet proužků (viz Obr. 14).



Obr. 14: Princip výpočtu průhybu uprostřed trámku – čtyřbodový ohyb

3.2. Výsledky a diskuze

Výpočetním postupem popsaným v kapitole 3.1.1 a s využitím materiálových parametrů popsaných v kapitole 3.1.2 jsou stanoveny pracovní diagramy průřezů pro nezesílený i zesílený prvek.

Moment únosnosti pro nezesílený prvek je $M_R = 4,29$ kN.

Moment únosnosti pro zesílený prvek je $M_R = 15,93$ kN.

Na Obr. 15 je vidět odlišnost v chování nezesíleného a zesíleného prvku.

Výpočetním postupem popsaným v kapitole 3.1.3 jsou stanoveny závislosti síla-průhyb pro analyzované prvky.



Obr. 15: Porovnání pracovních diagramů průřezu pro nezesílený a zesílený prvek

Na Obr. 16 je vykreslen numerickým modelem stanovený graf závislosti síla–průhyb, který je porovnán s experimentálně změřenými daty pro trámky T1, T2 a T3.

Podle numerického modelu je síla, při které by se měl porušit nezesílený prvek v čtyřbodovém ohybu, $F_{4b} = 29,09$ kN. V rámci experimentální části byla určena průměrná hodnota maximální zatěžovací síly nezesílených trámků T1, T2 a T3 $F_{4b} = 33,1$ kN.



Obr. 16: Graf závislosti síla–průhyb pro nezesílené prvky vystavené čtyřbodovému ohybu, porovnání výsledků numerického modelu s experimentálně změřenými daty pro trámky T1, T2 a T3.

Na Obr. 17 je vykreslen numerickým modelem stanovený graf závislosti síla–průhyb pro čtyřbodový ohyb, který je porovnán s experimentálně změřenými daty pro zesílené trámky T4, T5, T11 a T12.

Na Obr. 18 je vykreslen numerickým modelem stanovený graf závislosti síla-průhyb pro tříbodový ohyb, který je porovnán s experimentálně změřenými daty pro zesílené trámky T6 a T10.

Síla, při které by se měl porušit zesílený prvek v čtyřbodovém ohybu, je podle numerického modelu $F_{4b} = 108,03$ kN. Síla, při které by se měl porušit zesílený prvek v tříbodovém ohybu, je podle numerického modelu $F_{3b} = 71,61$ kN.



Obr. 17: Graf závislosti síla–průhyb pro zesílené prvky vystavené čtyřbodovému ohybu, porovnání výsledků numerického modelu s experimentálně změřenými daty pro trámky T4, T5, T11 a T12.



Obr. 18: Graf závislosti síla–průhyb pro zesílené prvky vystavené tříbodovému ohybu, porovnání výsledků numerického modelu s experimentálně změřenými daty pro trámky T6 a T10.

Odlišnosti v maximální momentové únosnosti průřezu mohou být způsobeny zejména mírně odlišnými materiálovými charakteristikami výztuže (mez kluzu a mez pevnosti). Vyšší únosnost dosaženou v experimentu oproti výpočtu lze vysvětlit příspěvkem smykové tuhosti, která nebyla v numerických výpočtech uvažována. V numerickém modelu je uvažována dokonalá soudržnost lamely a trámku a také dokonalé zakotvení lamely zesilující v ohybu. V experimentech došlo k vytržení lamely v kotevních oblastech smykovým porušením betonu ve vrstvě přilehlé ke kontaktu s lepidlem. Smykové napětí v místě tohoto spoje bylo větší než smyková únosnost betonu.

4. ZÁVĚR

Cílem popisované práce bylo analyzovat vliv zesílení uhlíkovými lamelami na chování železobetonových prvků, navrhnout metodiku experimentální a numerické analýzy zesílených prvků v místních podmínkách a porovnat experimentální výsledky s numerickými výsledky.

Z hlediska experimentální analýzy lze konstatovat, že navržený experiment a dostupné technické vybavení lze úspěšně využít k experimentálnímu ověřování chování zesílených prvků. Nedílnou a rozsáhlou součástí této práce byla výroba zkušebních těles, návrh a následná optimalizace zkušebního postupu. Na základě výsledků dosažených v práci byly navrženy úpravy experimentu, které budou využity v dalších fázích řešeného grantového projektu.

PODĚKOVÁNÍ

Článek vznikl za podpory projektu TAČR FW06010142 a projektů Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS23/033/OHK1/1T/11 a SGS24/039/OHK1/1T/11.

References

Chylík, R. (2023), 'Schéma výztužení'.

- Collins, M. & Mitchell, D. (1997), *Prestressed concrete structures*, Department of civil engineering university of Toronto.
- DIANA (2017), 'DIANA-10.1 User's Manual Material Library'.
- fib Bulletin No. 14. (2001), Technical report: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. The International Federation for Structural Concrete.
- Grantová přihlaška (2022), Systém uhlíkových lamel nové generace se zvýšenou požární odolností pro zesilování stávajících konstrukcí. TAČR projekt č. FW06010142.
- Ismail, A., Attar, M. & El-Karmoty, H. (2018), 'Theoretical analysis of beams combining ultra high strength concrete and normal strength concrete', *International Design Journal* 8, 439–453.
- Kazmina, V. (2024), Experimentální a numerická analýza železobetonových prvků zesílených kompozitními lamelami, Diplomová práce, ČVUT v Praze. URL: https://dspace.cvut.cz/handle/10467/113884
- Lingga, N., Saeed, Y., Yosefani, A. & Rad, F. (2019), 'Concrete beams with fully corroded steel repaired with cfrp laminates', *ACI Symposium Publication* 333, 1–10.
- Pilgrim, M. & Willison, S. (2009), *Dive Into Python 3*, Vol. 2, Springer.
- Sura, J., Štefan, R. & Procházka, J. (2012), 'Analýza štíhlých železobetonových sloupů metodou založenou na jmenovité křivosti', *Stavební obzor* 10, 294–298.
- Štefan, R., Sura, J., Procházka, J., Kohoutková, A. & Wald, F. (2019), 'Numerical investigation of slender reinforced concrete and steel-concrete composite columns at normal and high temperatures using sectional analysis and moment-curvature approach', *Engineering Structures* 190, 285–305.
- ČSN EN 1992-1-1 (2011), ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, ed. 2., Praha: Český normalizační institut.