

NUMERICKÁ ANALÝZA ŽELEZOBETONOVÝCH PRVKŮ ZESÍLENÝCH KOMPOZITNÍMI LAMELAMI PRO UPRAVENÁ USPOŘÁDÁNÍ EXPERIMENTŮ

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

Příspěvek navazuje na již prezentovanou analýzu první verze uspořádání experimentů zaměřených na zkoušení zesílených prvků. V rámci příspěvku jsou numericky simulovány různé varianty nových uspořádání experimentů. Numerické simulace jsou tvořeny pomocí výpočetního nástroje založeného na metodě moment–křivost. Následně jsou výsledky numerické simulace porovnány s výsledky experimentů pro analyzování vlivu úprav uspořádání experimentů a stanovení úrovně využití jednotlivých prvků. Pro verifikaci výpočetního nástroje jsou výsledky numerických simulací porovnány s ručními výpočty.

KLÍČOVÁ SLOVA

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

ABSTRACT

This paper continues the analysis of the initial version of experimental setups focused on testing reinforced structural elements. This paper presents simulations of various modified experimental setups. The numerical simulations are performed using a computational tool based on the moment–curvature method. The simulation results are then compared with experimental data to assess the impact of the experimental setup modifications and to evaluate the utilization level of individual elements. To verify the computational tool, the numerical results are also compared with hand calculations.

KEYWORDS

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

1. ÚVOD

V rámci diplomové práce (Kazmina 2024a) a příspěvku (Kazmina 2024b) byly navrženy, realizovány a numericky simulovány tři uspořádání experimentů, které měly za cíl analyzovat vliv zesílení uhlíkovými lamelami na chování železobetonových prvků za běžných teplot. Během těchto experimentů však nebylo dosaženo požadovaného způsobu porušení. Na základě numerické analýzy bylo zjištěno, že zkušební vzorky nebyly plně využity. V rámci těchto experimentů docházelo k porušení vzorků v místě kotevní oblasti zesilujícího prvku. Z tohoto důvodu byla uspořádání experimentu upravena a následně realizována v rámci diplomové práce (Malínková 2025).

Příspěvek představuje numerickou simulaci chování železobetonových prvků s externím zesílením pro nová upravená uspořádání experimentů popsaná v diplomové práci (Malínková 2025). Cílem tohoto příspěvku je analyzovat vliv úprav kotevní oblasti zesilujícího prvku a porovnat výsledky s předchozími uspořádáními experimentů, která byla realizována a popsána v rámci diplomové práce (Kazmina 2024a) a příspěvku (Kazmina 2024b).

2. UPRAVENÁ USPOŘÁDÁNÍ EXPERIMENTŮ

V této kapitole jsou popsána upravená uspořádání experimentů realizovaná v rámci diplomové práce (Malínková 2025). Cílem úpravy uspořádání experimentů bylo dosažení požadovaného způsobu porušení včetně plného využití zkušebních vzorků. Tato uspořádání experimentů jsou v kapitole 3 numericky simulována. Výsledky experimentů jsou porovnány se stanovenými numerickými simulacemi. Pro hodnocení vlivu úpravy kotevní oblasti jsou současně výsledky také porovnány s výsledky předchozích uspořádání experimentů realizovaných a popsáných v rámci diplomové práce (Kazmina 2024a) a příspěvku (Kazmina 2024b).

Jednou z úprav pro zajištění dostatečné délky kotevní oblasti byly úpravy krajních podpor (válnů) tak, aby nedocházelo k přitlačování uhlíkové lamely v místě uložení. Oba krajní válce byly uprostřed vysoustruženy v šířce 60 mm (Malínková 2025). Níže jsou popsána uspořádání experimentů s novými způsoby úpravy kotevní oblasti.

Jako zesilující prvek byla na vzorcích použita komerčně dostupná lamela Sika CarboDur S 512 o tloušťce 1,2 mm a o šířce 50 mm. Lamela byla z uhlíkových vláken vyztužených polymery CFRP.

2.1. Trámky

V této kapitole jsou popsány experimenty provedené v práci (Malínková 2025). Tyto experimenty byly provedeny na stejných železobetonových trémkách jako v práci (Kazmina 2024a), a to pro možnost zhodnocení vlivu úprav uspořádání experimentů. Číslování uspořádání začíná číslem 4, protože uspořádání 1 až 3 byla použita a popsána v práci (Kazmina 2024a).

2.1.1. Uspořádání experimentu 4

V tomto uspořádání experimentu na rozdíl od předchozích (popsáných v diplomové práci (Kazmina 2024a)) byly dané vzorky zkoušeny tzv. „naležato“ pro snížení náchylnosti na smykové porušení.

Pro analýzu vlivu rozdílných rozpětí byly tyto vzorky zkoušeny s různým rozpětím podpor, proto je uspořádání experimentu 4 rozděleno

* Školitel: Ing. Radek Štefan, Ph.D., FEEng.

na 4a a 4b. Zkoušení probíhalo pomocí čtyřbodového ohybu do dosažení únosnosti (porušení) vzorků (viz Obr. 1). V uspořádání experimentu 4a byl zkoušen trámek T13 s rozpětím podpor 900 mm. V uspořádání experimentu 4b byl zkoušen trámek T14 s rozpětím podpor 700 mm. V kapitolách 3.1.1 a 3.1.2 jsou popsány a analyzovány výsledky experimentů.



Obr. 1: Zesílené trámky po porušení zkoušené na čtyřbodový ohyb – Uspořádání experimentu 4 (Malínková 2025)

2.1.2. Uspořádání experimentu 5

V tomto uspořádání experimentu byly zkoušeny trámky TT1 a TT2. Rozpětí podpor bylo 860 mm. Vzorky byly zkoušeny tzv. „nastojato“. Zkoušení probíhalo pomocí čtyřbodového ohybu do dosažení únosnosti (porušení) vzorků (viz Obr. 2).

Pro zabránění vytržení lamely v kotevních oblastech smykovým porušením betonu bylo v tomto uspořádání experimentu použito řešení: *opatření uhlíkovou tkaninou (Tenax HTA 40 E13 3K 200 tex), která zkušební prvek zesilovala ze 3 stran ve tvaru „U“* (Malínková 2025).



Obr. 2: Zesílené trámky po porušení zkoušené na čtyřbodový ohyb – Uspořádání experimentu 5 (Malínková 2025)

2.2. Deskové prvky

V této kapitole jsou popsány experimenty provedené v práci (Malínková 2025). Tyto experimenty byly provedeny na jiných vzorcích než v práci (Kazmina 2024a). Tyto experimenty byly provedeny na deskových prvcích z prostého betonu o velikosti 180 mm × 50 mm × 1100 mm. Střední pevnost betonu v tlaku byla $f_{cm} = 54$ MPa. Zkoušení probíhalo pomocí třibodového ohybu do dosažení únosnosti (porušení) vzorků. Rozpětí podpor bylo 800 mm.

2.2.1. Uspořádání experimentu 6

V tomto uspořádání experimentu byly provedeny experimenty na třech deskových prvcích (D1, D2, D3) s externím zesílením bez doplňujících úprav kotevních oblastí (viz Obr. 3). V kapitole 3.2.1 jsou popsány a analyzovány výsledky experimentů.

2.2.2. Uspořádání experimentu 7

V tomto uspořádání experimentu byly provedeny experimenty na dvou deskových prvcích (D4 a D5) s externím zesílením a za-



Obr. 3: Zesílený deskový prvek po porušení zkoušený na třibodový ohyb – Uspořádání experimentu 6 (Malínková 2025)

betonováním kotevních oblastí (viz Obr. 4) pro zabránění předčasnému kolapsu konstrukce z důvodu odlepení lamely v místě kotvení. V kapitole 3.2.2 jsou popsány a analyzovány výsledky experimentů.



Obr. 4: Zesílený deskový prvek po porušení zkoušený na třibodový ohyb – Uspořádání experimentu 7 (Malínková 2025)

3. NUMERICKÁ SIMULACE

V této kapitole jsou představeny numerické simulace chování zesílených prvků pro různá uspořádání experimentů, která jsou popsána v kapitole 2. Následně jsou numerické simulace porovnány s výsledky experimentů. Pro verifikaci numerické simulace byly stanoveny hodnoty i ručním výpočtem.

Numerické simulace a ruční výpočty jsou provedeny postupem popsaným v diplomové práci (Kazmina 2024a) a příspěvku (Kazmina 2024b).

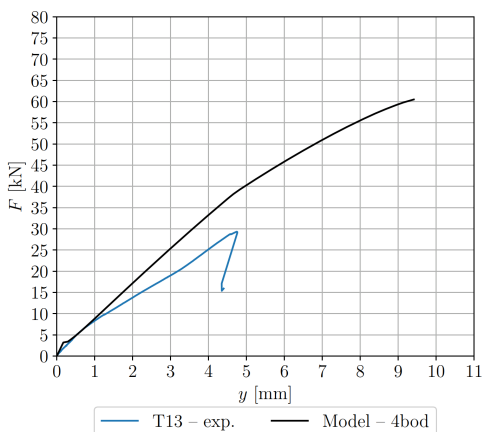
3.1. Trámky

3.1.1. Porovnání a zhodnocení výsledků pro uspořádání experimentu 4a

Na základě výsledků experimentu byla určena průměrná hodnota maximální zatěžovací síly trámku jako $F_{Abod} = 29,32$ kN (viz Obr.5). Ohybový moment odpovídající průměrné hodnotě maximální zatěžovací síly je $M_R = 4,39$ kNm. Na Obr.5 je vykreslen numerickým modelem stanovený graf závislosti síla–průhyb, který je porovnán s experimentálně změřenými daty pro trámek T13.

Na základě porovnání výsledků získaných numerickým modelem a ručním výpočtem (poslední sloupec v Tab. 1), kde poměr hodnot je roven 97,6 %, lze říci, že numerický model poskytuje spolehlivé výsledky (model je verifikován).

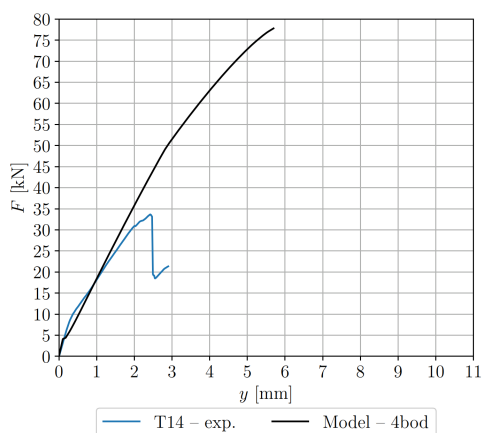
Porovnání výsledků numerické analýzy s experimentálními daty je uvedeno v Tab. 1. Jelikož únosnosti bylo dosaženo porušením smykem, a nikoliv ohybem, hodnoty únosnosti získané pomocí numerických metod opět neodpovídají experimentálním datům, stejně jako u dřívějších uspořádání, viz (Kazmina 2024b). Jak je patrné z Tab. 1, bylo dosaženo pouze 48,3 % využití z hlediska únosnosti v ohybu.



Obr. 5: Graf závislosti síla—průhyb (porovnání výsledků numerického modelu s experimentálně změřenými daty pro trámek T13)

3.1.2. Porovnání a zhodnocení výsledků pro uspořádání experimentu 4b

Na základě výsledků experimentu byla určena průměrná hodnota maximální zatěžovací síly trámku jako $F_{4bod} = 33,66$ kN (viz Obr.6). Ohybový moment odpovídající průměrné hodnotě maximální zatěžovací síly je $M_R = 4,93$ kNm. Na Obr.6 je vykreslen numerickým modelem stanovený graf závislosti síla—průhyb, který je porovnán s experimentálně změřenými daty pro trámek T14.



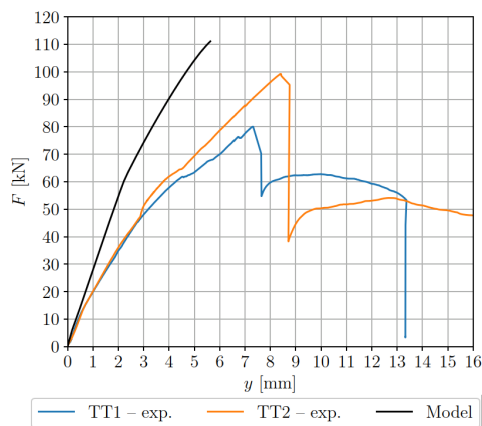
Obr. 6: Graf závislosti síla—průhyb (porovnání výsledků numerického modelu s experimentálně změřenými daty pro trámek T14)

Na základě porovnání výsledků získaných numerickým modelem a ručním výpočtem (poslední sloupec v Tab. 1), kde poměr hodnot je roven 97,6 %, lze říci, že numerický model poskytuje spolehlivé výsledky (model je verifikován).

Porovnání výsledků numerické analýzy s experimentálními daty je uvedeno v Tab. 1. Jelikož únosnosti bylo opět dosaženo porušením smykem, hodnoty únosnosti získané pomocí numerických metod opět neodpovídají experimentálním datům. Jak je patrné z Tab. 1, bylo dosaženo pouze 43,3 % využití z hlediska únosnosti v ohybu.

3.1.3. Porovnání a zhodnocení výsledků pro uspořádání experimentu 5

Na základě výsledků experimentu byla určena průměrná hodnota maximální zatěžovací síly trámku jako $F_{4bod} = 89,65$ kN (viz Obr.7). Ohybový moment odpovídající průměrné hodnotě maximální zatěžovací síly je $M_R = 12,56$ kNm. Na Obr.7 je vykreslen numerickým modelem stanovený graf závislosti síla—průhyb, který je porovnán s experimentálně změřenými daty pro trámky TT1 a TT2.



Obr. 7: Graf závislosti síla—průhyb (porovnání výsledků numerického modelu s experimentálně změřenými daty pro trámky TT1 a TT2)

Na základě porovnání výsledků získaných numerickým modelem a ručním výpočtem (poslední sloupec v Tab. 1), kde poměr hodnot je roven 97,6 %, lze říci, že numerický model poskytuje spolehlivé výsledky (model je verifikován).

Porovnání výsledků numerické analýzy s experimentálními daty je uvedeno v Tab. 1. V tomto uspořádání experimentu se skutečná únosnost vzorků nejvíc přiblížila numerickému modelu, avšak stále nebylo dosaženo únosnosti stanovené pomocí numerického modelu z důvodu nežádoucího způsobu porušení. Jak je patrné z Tab. 1, bylo dosaženo pouze 80,6 % využití z hlediska ohybu.

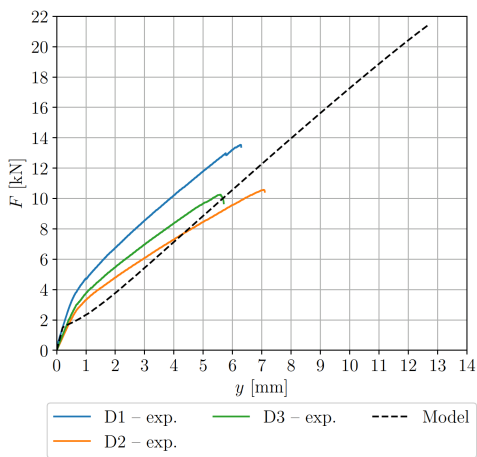
3.2. Deskové prvky

3.2.1. Porovnání a zhodnocení výsledků pro uspořádání experimentu 6

Na základě výsledků experimentu byla určena průměrná hodnota maximální zatěžovací síly deskových prvků jako $F_{3bod} = 11,45$ kN (viz Obr.8). Ohybový moment odpovídající průměrné hodnotě maximální zatěžovací síly je $M_R = 2,29$ kNm. Na Obr.8 je vykreslen numerickým modelem stanovený graf závislosti síla—průhyb, který je porovnán s experimentálně změřenými daty pro deskové prvky D1, D2, D3.

Na základě porovnání výsledků získaných numerickým modelem a ručním výpočtem (poslední sloupec v Tab. 1), kde poměr hodnot je roven 98,6 %, lze říci, že numerický model poskytuje spolehlivé výsledky (model je verifikován).

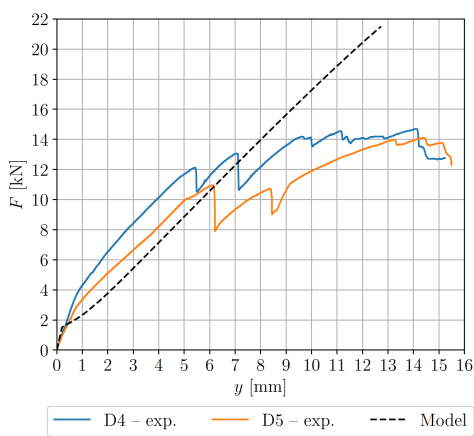
Porovnání výsledků numerické analýzy s experimentálními daty je uvedeno v Tab. 1. Jelikož únosnosti bylo opět dosaženo porušením smykem, hodnoty únosnosti získané pomocí numerických metod opět neodpovídají experimentálním datům. Jak je patrné z Tab. 1, bylo dosaženo pouze 53,9 % využití z hlediska únosnosti v ohybu.



Obr. 8: Graf závislosti síla—průhyb (porovnání výsledků numerického modelu s experimentálně změřenými daty pro deskové prvky D1, D2, D3)

3.2.2. Porovnání a zhodnocení výsledků pro uspořádání experimentu 7

Na základě výsledků experimentu byla určena průměrná hodnota maximální zatěžovací síly deskových prvků jako $F_{3bod} = 14,39$ kN (viz Obr.9). Ohybový moment odpovídající průměrné hodnotě maximální zatěžovací síly je $M_R = 2,88$ kNm. Na Obr.9 je vykreslen numerickým modelem stanovený graf závislosti síla—průhyb, který je porovnán s experimentálně změřenými daty pro deskové prvky D4 a D5.



Obr. 9: Graf závislosti síla—průhyb (porovnání výsledků numerického modelu s experimentálně změřenými daty pro deskové prvky D4 a D5)

Na základě porovnání výsledků získaných numerickým modelem a ručním výpočtem (poslední sloupec v Tab. 1), kde poměr hodnot je roven 98,6 %, lze říci, že numerický model poskytuje spolehlivé výsledky (model je verifikován).

Porovnání výsledků numerické analýzy s experimentálními daty je uvedeno v Tab. 1. Jelikož únosnosti bylo opět dosaženo porušením smykem, hodnoty únosnosti získané pomocí numerických metod opět neodpovídají experimentálním datům. Jak je patrné z Tab. 1, bylo dosaženo pouze 66,8 % využití z hlediska únosnosti v ohybu.

| Experimentální uspořádání | | Model | Experiment | Ruční výpočet | Experiment/Model | Ruční výpočet/Model |
|---------------------------|-----------------|--------|------------|---------------|------------------|---------------------|
| 1 | M_R [kNm] | 4,29 | 4,88 | 4,24 | 113,8% | 98,8% |
| | F_{4bod} [kN] | 29,09 | 33,1 | 28,75 | | |
| 2a | M_R [kNm] | 15,93 | 6,99 | 15,55 | 43,9% | 97,6% |
| | F_{4bod} [kN] | 108,03 | 47,4 | 105,42 | | |
| 2b | M_R [kNm] | 15,93 | 7,42 | 15,55 | 46,6% | 97,6% |
| | F_{4bod} [kN] | 108,03 | 50,3 | 105,42 | | |
| 3a | M_R [kNm] | 15,93 | 10,27 | 15,55 | 64,5% | 97,6% |
| | F_{3bod} [kN] | 71,61 | 46,18 | 69,89 | | |
| 3b | M_R [kNm] | 15,93 | 8,05 | 15,55 | 50,5% | 97,6% |
| | F_{3bod} [kN] | 71,61 | 36,18 | 69,89 | | |
| 4a | M_R [kNm] | 9,08 | 4,39 | 9,45 | 48,3% | 97,6% |
| | F_{4bod} [kN] | 60,53 | 29,32 | 63 | | |
| 4b | M_R [kNm] | 9,08 | 3,93 | 9,45 | 43,3% | 97,6% |
| | F_{4bod} [kN] | 77,83 | 33,66 | 81 | | |
| 5 | M_R [kNm] | 15,93 | 12,56 | 15,55 | 80,6% | 97,6% |
| | F_{4bod} [kN] | 111,16 | 89,65 | 108,49 | | |
| 6 | M_R [kNm] | 4,31 | 2,29 | 4,25 | 53,9% | 98,6% |
| | F_{4bod} [kN] | 21,57 | 11,45 | 21,24 | | |
| 7 | M_R [kNm] | 4,31 | 2,88 | 4,25 | 66,8% | 98,6% |
| | F_{4bod} [kN] | 21,57 | 14,39 | 21,24 | | |

Tab. 1: Porovnání výsledků uspořádání experimentu (šedě jsou uspořádání experimentu popsána v diplomové práci (Kazmina 2024a) a příspěvku (Kazmina 2024b))

4. ZÁVĚR

Cílem příspěvku bylo simulovat chování zesílených prvků pomocí výpočetního nástroje, porovnat experimenty s numerickými simulacemi a s ručními výpočty a analyzovat, jak velké bylo procento využití prvků z hlediska únosnosti v ohybu. Na základě porovnání numerických simulací s ručními výpočty lze konstatovat, že numerický nástroj poskytuje realistické výsledky, přičemž průměrná odchylka se pohybovala mezi 1,4 % až 4,1 % (Tab. 1). Numerický model byl tímto verifikován a lze uvažovat, že poskytuje přesné výsledky. Na základě porovnání výsledků experimentů u různých uspořádání lze říci, že úpravy kotevní oblasti významně zvyšují únosnost a tuhost zkušebních vzorků – viz uspořádání 5 versus uspořádání 1 až 3 v Tab. 1. Z výsledků uspořádání experimentu 5 vyplývá, že aplikace uhlíkové tkaniny ve tvaru „U“ zlepšila využití prvku až na úroveň 80,6 % z hlediska únosnosti v ohybu. Oproti tomu, využití prvků z hlediska ohybu bylo v předchozí etapě, kde nebyl kladen takový důraz na zajištění kotvení zesilujícího prvku, pouze 69,9 % (Tab. 1). Z výsledků uspořádání experimentu 6 a 7 vyplývá, že zabetonování kotevní oblasti rovněž zlepšuje využití prvků z hlediska únosnost v ohybu, ale méně než při využití uhlíkové tkaniny ve tvaru „U“, viz Tab. 1.

PODĚKOVÁNÍ

Článek vznikl za podpory projektu TAČR FW06010142 a projektu Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS25/037/OHK1/1T/11.

References

- Kazmina, V. (2024a), Experimentální a numerická analýza železobetonových prvků zesílených kompozitními lamelami, Diplomová práce, ČVUT v Praze.
URL: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/113884>
- Kazmina, V. (2024b), 'Experimentální a numerická analýza železobetonových prvků zesílených kompozitními lamelami', *Proceedings of PhD Workshop* 6, 26–31.
- Malínková, L. (2025), Experimentální analýza kotevních oblastí betonových prvků zesílených kompozitními materiály, Diplomová práce, ČVUT v Praze.
URL: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/120959>