

EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ REOLOGICKÉHO MODELU B4 NA REÁLNÉ KONSTRUKCI

*Radek Vašátko, **

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

ABSTRAKT

Pro stanovení působení betonové konstrukce jsou důležité dlouhodobé objemové změny betonu. K jejich predikci se používají reologické modely (např. Model Code 2010, model B3, model B4). Ty jsou ale většinou odvozeny z měření na laboratorních vzorcích, za přesně známých laboratorních podmínek měření. Měření na konstrukcích skutečné velikosti při reálných podmínkách je poměrně málo.

Cílem příspěvku je experimentální ověření reologického modelu B4 na reálné konstrukci budovy. Strunové tenzometry byly osazeny do dvou sloupů v podzemních podlažích osmipodlažní budovy a do čtyř zkušebních válců. Naměřené hodnoty deformací byly porovnány s hodnotami predikovanými modelem B4. Dále se článek zabývá aktualizací modelu B4 a porovnáním naměřených hodnot s aktualizovaným modelem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Dotvarování a smršťování • Strunový tenzometr • Model B4

ABSTRACT

Long-term deformations of the concrete are important for determination of behavior of concrete structures. For prediction of the long-term deformations, rheological models are used (Model Code 2010, model B3, model B4). The models are usually derived from measurements on laboratory specimens under exactly known conditions. There are only few measurements performed on real structures under real conditions.

Objective of this paper is experimental verification of model B4 at real building structure. Vibrating wire strain gauges have been installed in two columns at underground floors of eight-storey office building and in four laboratory specimens placed in the building. Measured strains have been compared with values predicted by model B4. Furthermore, the paper deals with update of model B4 and with comparison of measured values with updated model.

KEYWORDS

Creep and Shrinkage • Vibrating wire strain gauge • Model B4

1. POPIS EXPERIMENTU

1.1. Popis objektu

Objekt Palmovka Open Park III, ve kterém byly tenzometry osazeny, leží v Praze 8 na Palmovce. Celý komplex se skládá ze dvou hlavních objektů a dvou menších mezilehlých částí – spojovacího krčku a navazující haly. Hlavní budovy mají tři podzemní a osm nadzemních podlaží.



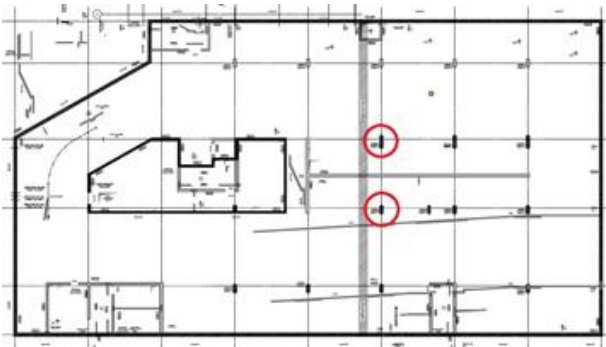
Obrázek 1: Vizualizace budovy Palmovka Open Park III.

Podzemní část objektu je rozsahem větší, než nadzemní část. Objekt má v suterénu půdorysný tvar obdélníku (se zkoseným rohem) o vnějších rozměrech cca 65x35 m. V nadzemních podlažích se obrys domu redukuje na obdélník velikosti 65x22 m. Ve třetím nadzemním podlaží přibývá vykonzolovaná část 5,5x41,0 m. Dům je ukončen plochou střechou, kraj střechy je lemován atikami. Spodní stavba objektu je navržena jako bílá vana. Nosnou konstrukci objektu tvoří nosný železobetonový kombinovaný skelet – kombinace nosných stěn a sloupů a monolitických stropních desek. Konstrukce objektu je řešena jako jeden dilatační celek.

* Školitel: prof. Ing. Jan L. Vitek, CSc., FEng.

1.2. Umístění tenzometrů

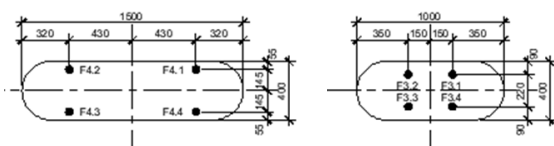
K měření byly použity strunové tenzometry EDS-20V-E. Tenzometry byly osazeny do dvou sloupů (F3 a F4) ve druhém podzemním podlaží. Do každého z těchto sloupů byly ve svislém směru osazeny čtyři tenzometry. Umístění tenzometrů je zobrazeno na obrázcích níže. Další čtyři tenzometry byly osazeny do zkušebních válců (ø150 mm, výška 300 mm), které byly vyrobeny ze stejného betonu jako sloupy. Tyto válce byly umístěny v prostředí stavby.



Obrázek 2: Půdorys budovy s vyznačenou polohou tenzometrů.



Obrázek 3: Řez budovou s vyznačenou polohou tenzometrů.



Obrázek 4: Příčný řez sloupem F4 (vlevo) a F3 (vpravo).

1.3. Průběh měření

Betonáž sloupu F4 proběhla dne 31.1.2017. Měření deformací probíhalo první týden po betonáži každý den, poté po dobu asi jednoho měsíce 2x týdně a od druhého měsíce probíhalo přibližně 1x týdně. Po prvním roce měření byl interval prodloužen na cca 1 měření za měsíc. Betonáž sloupu F3 proběhla dne 23.2.2017. Frekvence měření byla obdobná jako u sloupu F4. Při každém měření deformací sloupu byla

zároveň měřena deformace válců. Válce byly ale v čase cca 500 dní od začátku měření ztraceny (pravděpodobně odstraněny stavebními dělníky). Od této doby probíhalo pouze měření deformací sloupů.

1.4. Měření relativní vlhkosti okolního prostředí

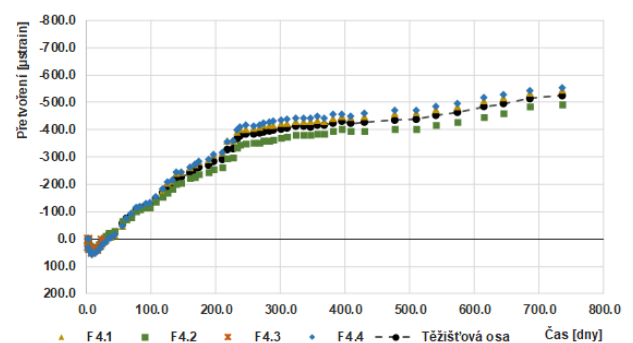
Pro správnou predikci deformací betonu pomocí reologických modelů je nezbytné znát relativní vlhkost okolního prostředí. V prostředí stavby ale nebylo možné provést její dlouhodobé měření. Na základě průběžného vyhodnocování naměřených deformací vzniklo podezření, že relativní vlhkost v okolí jednotlivých sloupů může být různá. Proto proběhlo u obou sloupů krátkodobé měření relativní vlhkosti (cca 4 dny), jehož cílem bylo ověření hodnot předpokládaných ve výpočtu.

2. NAMĚŘENÉ HODNOTY

Dále se článek z důvodu jeho maximálního rozsahu zabývá pouze sloupem F4 a zkušebními válci betonovanými současně s tímto sloupem.

2.1. Přetvoření sloupu F4

Na obrázku níže je zobrazen časový průběh deformací naměřených na jednotlivých tenzometrech osazených ve sloupu F4. Tenzometr F4.3 přestal několik dní po začátku měření fungovat. Dále je na obrázku vidět hodnota deformace v těžišťové ose sloupu. Ta byla určena v čase, kdy fungovaly všechny 4 tenzometry, jako průměr hodnot naměřených na všech 4 tenzometrech. Od doby, kdy přestal tenzometr F4.3 fungovat, byl přírůstek deformací určen pouze z tenzometrů F4.2 a F4.4 – tyto tenzometry jsou ve sloupu umístěny ve středové souměrnosti. Zahrnutí deformací z tenzometru F4.1 by způsobilo, že by byly zobrazeny deformace mimo těžišťovou osu sloupu.



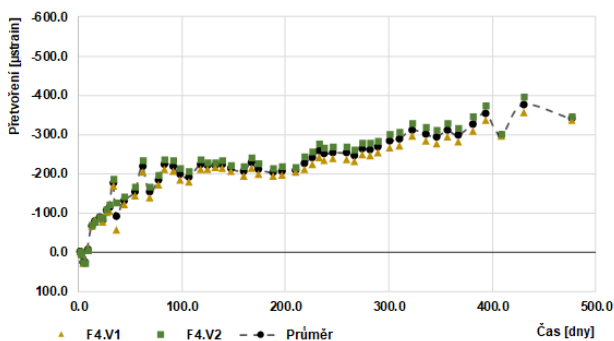
Obrázek 5: Naměřené přetvoření tenzometrů F4.1 až F4.4 a přetvoření v ose sloupu F4.

Na začátku měření si můžeme všimnout nabývání objemu betonu sloupu, které přetrvává po dobu asi 9 dní. Tento fenomén byl pozorován i při jiných experimentech realizovaných na Katedře betonových a zděných konstrukcí (Vinkler, Vítek 2015). Poté dochází k obratu trendu a objem betonu se začne zmenšovat vlivem smršťování a dotvarování sloupu. V čase cca 210 dní je patrný rychlejší nárůst přetvoření

– v tomto čase došlo ke kompletnímu odstojkování stropní desky nad sloupem, a tedy ke vnesení největší části zatížení. Dále dochází už jen k mírnému nárůstu deformací, které jsou způsobeny především dotvarováním betonu.

2.2. Přetvoření zkušebních válců F4.V1 a F4.V2

Naměřené hodnoty deformací jednotlivých válců a jejich průměr jsou zobrazeny v grafu níže. Na začátku měření si opět můžeme všimnout nabývání objemu betonu. V porovnání se sloupem F4 trvá tento jev kratší dobu, přibližně 4 dny. To je pravděpodobně dáno rychlejším vysycháním válců, díky kterému smršťování začne převládat nad nabýváním objemu dříve než u sloupu.

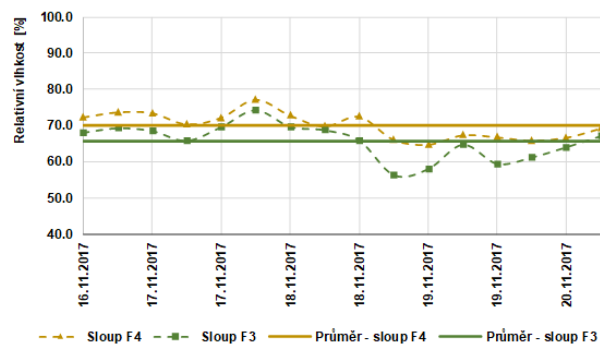


Obrázek 6: Naměřené přetvoření válců F4.V1 a F4.V2 a jejich průměr.

Dále dochází ke smršťování válců, které se ke konci měření ustálilo mezi 350 μ strain až 400 μ strain. Výkyvy přetvoření na konci měření jsou způsobeny změnami vlhkosti okolního prostředí. V průběhu měření si můžeme všimnout několika větších výkyvů v naměřených deformacích – např. v čase cca 35 dní nebo cca 70 dní. Tyto změny jsou připisovány velkým změnám relativní vlhkosti okolního prostředí a vztlínání srážkové vody, která se během výstavby několikrát dostala až ke zkušebním válcům a ke sloupu F4. U sloupu tyto výkyvy naměřeny nebyly, což je způsobeno rozdílnými proporcemi válců a sloupu.

2.3. Relativní vlhkost okolního prostředí

Na následujícím obrázku můžeme vidět časový průběh naměřené relativní vlhkosti okolního prostředí obou sloupů. Měření probíhalo ve dnech 16.11.2017 až 20.11.2017, tj. ve stáří 289-292 dní sloupu F4, resp. ve stáří 266-269 dní sloupu F3. V okolí sloupu F4 byla zjištěna relativní vlhkost 70,1 % (s variačním koeficientem 4,9 %), u sloupu F3 byla zjištěna relativní vlhkost 65,7 % (variačním koeficientem 7,2 %). Relativní vlhkost okolního prostředí byla během měření u sloupu F3 asi o 5 % nižší než u sloupu F4.



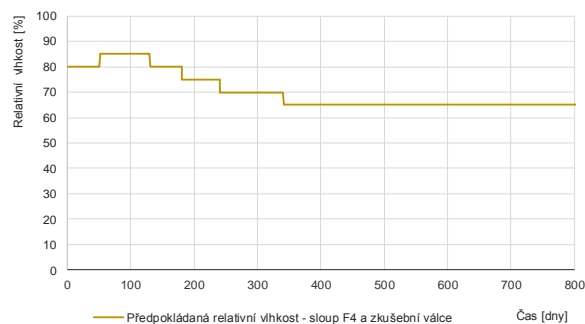
Obrázek 7: Naměřená relativní vlhkost okolního prostředí u jednotlivých sloupů.

3. VÝPOČET DEFORMACÍ PODLE MODELU B4

3.1. Vstupní data

Obecně lze říci, že model B4 je komplexnější než většina ostatních reologických modelů. Kromě pevnostní třídy betonu, typu cementu, náhradního rozměru prvku a doby ošetřování betonu, zahrnuje model B4 také obsah cementu v betonové směsi, vodní součinitel, poměr kameniva a cementu, tvar prvku, teplotu okolního prostředí a objemovou hmotnost betonu.

Vstupní data pro výpočet deformací byla odvozena ze známého složení použitého betonu ($a = 1695 \text{ kg/m}^3$, $c = 470 \text{ kg/m}^3$ a $w = 155 \text{ kg/m}^3$), ze známého typu použitého cementu (42,5 R), ze známé pevnostní třídy betonu (C50/60) a ze známé geometrie sloupů a válců. Zatížení sloupů bylo převzato z konečně-prvkového modelu. Výsledky z tohoto modelu byly poskytnuty projektantem stavby (HSD statika s.r.o.). Časovému vývoji zatížení se podrobněji věnuje následující kapitola.



Obrázek 8: Předpokládaná relativní vlhkost okolního prostředí.

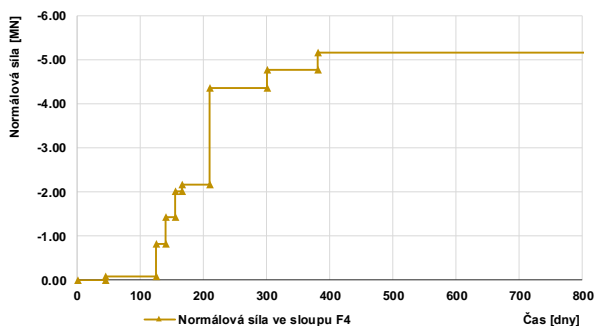
Předpokládaná relativní vlhkost okolního prostředí, resp. její časový průběh, byl určen odhadem na základě provedení měření, běžné relativní vlhkosti v Praze v průběhu roku, běžné relativní vlhkosti v budovách, zkušenosti a přítomnosti zateklé srážkové vody u sloupů a válců. Předpokládaný časový průběh relativní vlhkosti okolního prostředí je zobrazen na obrázku níže.

3.2. Postup výstavby a jeho vliv na zatížení sloupů

Výstavba nosné konstrukce probíhala přibližně deset měsíců, v současné době je budova již dokončena

K vnášení zatížení do sloupů docházelo postupně. Několik týdnů po betonáži sloupů byla stropní deska nad nimi hustě podstojkována, zatímco probíhala betonáž dalších pater. Normálová síla od tíhy sloupů v dalších patrech byla tedy vnesena vždy při jejich betonáži. Vlastní tíha stropních desek byla do sloupů vnášena postupným probíráním stojek, přičemž většina jejich vlastní tíhy byla vnesena až při kompletním odstojkování stropní desky nad sloupem ve druhém podzemním podlažím.

Celková normálová síla od stálého zatížení ve sloupu F4 je -5,17 MN, což odpovídá normálovému napětí v betonu -8,7 MPa. Časový vývoj normálové síly ve sloupu je zobrazen na následujícím obrázku.



Obrázek 9: Předpokládaný časový vývoj normálové síly ve sloupu F4.

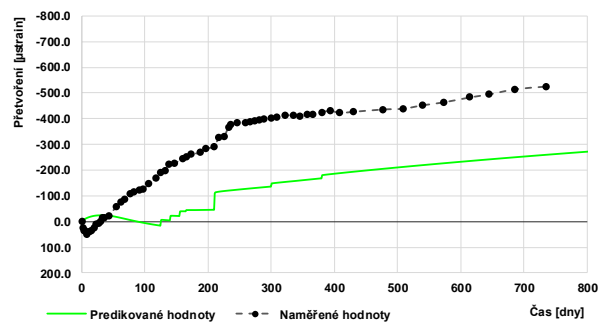
3.3. Vliv výztuže

Do výpočtu přetvoření sloupů je zahrnutý vliv jeho vyztužení. Výpočet je proveden pomocí časové diskretizace s krokem o velikosti 1 den. Vlivem dotvarování s smršťováním betonu dochází k nárůstu deformace betonu. Díky spolupůsobení výztuže a betonu se v čase přenáší část síly z betonové části průřezu do betonářské výztuže – to znamená, že napětí v betonu v čase klesá, zatímco napětí ve výztuži roste.

4. POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A PREDIKOVANÝCH HODNOT DEFORMACÍ

4.1. Přetvoření sloupů F4

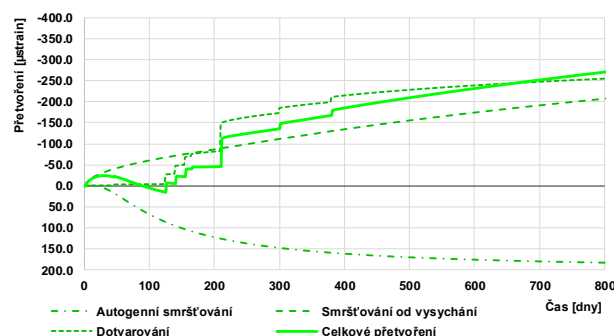
Na obrázku níže je zobrazeno porovnání naměřených hodnot s hodnotami predikovanými modelem B4. Na první pohled si můžeme všimnout, že naměřené a predikované hodnoty se zcela liší. Při hlubším zkoumání je ale vidět, že sklon křivek je od času přibližně 200 dní stejný. Největší nesoulad mezi oběma křivkami (jak z hlediska hodnot přetvoření, tak z hlediska sklonu křivky) se odehrává do času přibližně 100 dní. Z toho lze usuzovat, že predikce dotvarování sloupů odpovídá naměřeným hodnotám, zatímco v predikci smršťování (především autogenního) model B4 tak přesný není.



Obrázek 10: Porovnání naměřených a predikovaných hodnot přetvoření sloupů F4.

Naměřené hodnoty přetvoření sloupů jsou po dvou letech od betonáže přibližně dvojnásobné v porovnání s predikovanými hodnotami.

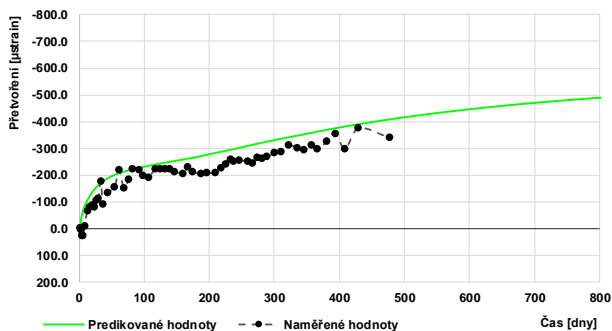
Pokud budeme model B4 zkoumat podrobněji a celkovou predikovanou deformaci rozložíme na její jednotlivé části (autogenní smršťování, smršťování od vysychání a dotvarování) pak zjistíme, že pro danou betonovou směs model B4 predikuje kladné autogenní smršťování o konečné velikosti přibližně 200 μ strain. Vzhledem k tomu, že predikovaná hodnota smršťování od vysychání je v současné době přibližně -200 μ strain, dochází k vzájemnému vyrušení účinku autogenního smršťování a smršťování od vysychání. Celková deformace by tedy v současnosti měla odpovídat přibližně hodnotě od dotvarování sloupů. Takový výsledek se zdál být zvláštní a proto byl konzultován s autory modelu B4. Od autorů modelu bylo zjištěno, že model B4 obsahuje nepřesnost v autogenním smršťování a v současnosti se připravuje aktualizace modelu – podrobněji viz další kapitoly.



Obrázek 11: Rozložení celkové deformace na jednotlivé části.

4.2. Přetvoření zkušebních válců F4.V1 a F4.V2

Na dalším obrázku můžeme vidět porovnání naměřených hodnot deformací zkušebních válců s hodnotami predikovanými modelem B4. Můžeme vidět, že model B4 je v případě zkušebních válců mnohem výstižnější než v případě sloupů F4. To je pravděpodobně způsobeno tím, že model B4 je odvozen z měření na vzorcích s náhradním rozměrem 12 mm – 120 mm.



Obrázek 12: Porovnání naměřených a predikovaných hodnot přetvoření zkušebních válců.

Do tohoto rozsahu náhraniho rozměru zkušební válec spadá (náhradní rozměr zkušebního válce je 75 mm), zatímco sloup s náhradním rozměrem cca 330 mm leží zcela mimo tento interval.

5. AKTUALIZACE MODELU B4

Komunikací s autory modelu B4 bylo zjištěno, že se v současné době připravuje aktualizace modelu B4, resp. výpočtu autogenního smršťování podle tohoto modelu. Do modelu bude také nově přidána složka přetvoření od nabývání objemu betonu. Celková deformace se tedy bude skládat ze čtyř složek: z autogenního smršťování, které bude mít vždy zápornou hodnotu, ze smršťování od vysychání, z nabývání objemu betonu a z dotvarování.

Konečná hodnota autogenního smršťování se bude určovat na základě složení betonové směsi. Protože jsou ale tyto údaje často předem nedostupné, bude možné hodnotu alternativně určit na základě pevnostní třídy betonu.

Předběžně aktualizované vzorce pro výpočet deformací podle modelu B4 byly poskytnuty autorovi tohoto článku. Než bude aktualizace modelu dokončena, byl doporučen následující postup:

1. Pro malé prvky, jako jsou zkušební válce, se mají do výpočtu deformací zahrnout pouze 3 složky deformace: smršťování od vysychání, nabývání objemu betonu a dotvarování.
2. Pro masivní prvky, jako je např. sloup, se mají do výpočtu deformací zahrnout všechny 4 složky deformace, tedy včetně autogenního smršťování (vypočteného podle aktualizovaného vzorce)

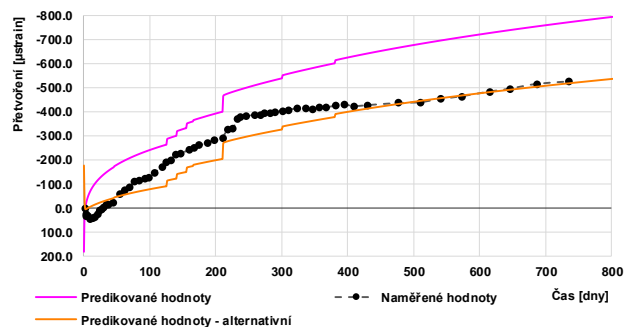
Porovnání naměřených hodnot deformací a hodnot predikovaných předběžně aktualizovaným modelem B4 je zobrazeno na následujících obrázcích.

5.1. Přetvoření sloupu F4

Na první pohled si můžeme všimnout, že predikované hodnoty deformací, vypočtené podle obou nových přístupů, se významně liší. Hodnota autogenního smršťování určená na základě složení betonové směsi je v čase 800 dní přibližně -510 µstrain, zatímco hodnota určená na základě pevnostní

třídy (alternativní predikovaná hodnota) je ve stejném čase přibližně -240 µstrain. Rozdíl těchto hodnot tvoří rozdíl mezi fialovou a oranžovou křivkou.

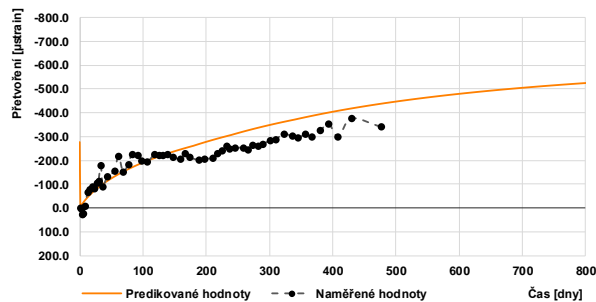
V zásadě můžeme říci, že hodnoty predikované na základě pevnostní třídy betonu (alternativní predikovaná hodnota) se velmi dobře shodují se skutečně naměřenými hodnotami, a to zejména v druhé polovině měření, kde je shoda téměř 100%.



Obrázek 13: Porovnání naměřených a predikovaných hodnot přetvoření sloupu F4 podle aktualizovaného modelu B4.

5.2. Přetvoření zkušebních válců F4.V1 a F4.V2

Vzhledem k tomu, že podle postupu doporučeného do dokončení aktualizace modelu B4 se nemá do přetvoření malých prvků zahrnovat vliv autogenního smršťování, je na dalším obrázku zobrazena pouze jedna křivka predikované deformace (jako součet smršťování od vysychání a nabývání objemu betonu).



Obrázek 14: Porovnání naměřených a predikovaných hodnot přetvoření zkušebních válců podle aktualizovaného modelu B4.

Shoda mezi naměřenými a predikovanými hodnotami je poměrně dobrá, ale nedosahuje takové přesnosti, jako v případě sloupu F4. To může být ale způsobeno tím, že některá vstupní data byla odhadnuta (především časový průběh relativní vlhkosti okolního prostředí).

Obecně lze říci, že model B4 je po jeho aktualizaci mnohem výstižnější, a to zejména u masivních prvků.

6. ZÁVĚR

Tento článek je zaměřen na porovnání hodnot deformací naměřených na reálné konstrukci a hodnot predikovaných

reologickým modelem B4. Bylo zjištěno, že původní model B4 predikoval správně hodnoty přetvoření na malých vzorcích, zatímco na masivních sloupech byl zcela nepřesný. Po aktualizaci modelu B4 došlo k výraznému zvýšení shody, a to zejména u masivních sloupů, kdy je shoda mezi naměřenými a predikovanými hodnotami v druhé polovině měření téměř 100%.

Popsaný experiment ukazuje, že měření deformací na reálných konstrukcích za reálných podmínek je nezbytnou součástí ověření platnosti reologických modelů. Proto je nutné rozšířit databázi deformací naměřených na reálných konstrukcích tak, aby mohly být reologické modely ověřovány a případně aktualizovány.

PODĚKOVÁNÍ

V článku jsou využity výsledky výzkumného centra CESTI (projekt č. TE01020168) podporovaného TAČR a výsledky projektu č. 16-04454S podporovaného GAČR. Ve výpočtech byly použity vstupy poskytnuté projektantem stavby HSD Statika s.r.o. Všem zmíněným velmi děkujeme za poskytnutou podporu.

Reference

- Bazant, Z.P. (2015), *Model B4 for creep, drying shrinkage and autogenous shrinkage of normal and high-strength concretes with multi-decade applicability*, RILEM Technical Committee TC-242-MDC.
- Rasoolinejad, M., Rahimi-Aghdam, S., Bazant, Z.P. (2018), Statistical filtering of useful concrete creep data from imperfect laboratory tests, in 'Materials and Structures', Vol. 51, pp. 153.
- Rasoolinejad, M., Rahimi-Aghdam, S., Bazant, Z.P. (2019), Prediction of Autogenous Shrinkage in Concrete from Material Composition or Strength Calibrated by a Large Database, as Update of Model B4, in 'Materials and Structures manuscript', Vol. 52, pp. 33.
- HSD statika s.r.o. (2016), *Technická zpráva – stavebně konstrukční část objektu, Administrativní objekt Palmovka Park III.*
- Vinkler, M., Vitek, J. (2015), *Drying shrinkage of concrete elements*