# SLOUPY Z VYSOKOPEVNOSTNÍHO BETONU V OBCHODNÍM DOMĚ MAGNUM ▮ HIGH-STRENGTH CONCRETE COLUMNS IN THE DEPARTMENT STORE MAGNUM

**Miloš Zich**

Článek popisuje dlouhodobé chování sloupů z vysokopevnostního betonu, navržených v objektu obchodního domu „Pasáž Magnum“ v Brně na ulici Česká. Jsou porovnávány naměřené a vypočtené hodnoty poměrného přetvoření betonu. ▮ The long-term behavior of columns made of high-strength concrete in the department store “Passage Magnum” in Brno, Česká street is described in this article. The measured and calculated values of concrete strain are compared.

1

## POPIS OBJEKTU

Stavba obchodního domu „Pasáž Magnum“ je situována v samém centru Brna na pěší zóně ulice Česká (obr. 1). Jedná se o stavbu tvaru L na místě původních domů v ulicích Česká 10 a Jakubská 3.

Objekt je rozčleněn do dvou hmot. První se skládá z tří podlaží obchodních prostor a čtvrtého podlaží s velkoplošnou kanceláří a zázemím obchodu. Druhá hmota terasovitě ustupuje, jedná se o páté až sedmé patro s kancelářemi. V suterénu stavby je umístěno technické zázemí objektu, částečně v historické části a dále zde jsou podzemní garáže pro dvacet devět osobních automobilů.

Stavba je založena na železobetonové monolitické vodostavebné tzv. „bílé vaně“ a velkoprůměrových vrtaných pilotách. Po obvodu je provedena trysková injektáž pro zajištění stability sousedních objektů a stěn stavební jámy.

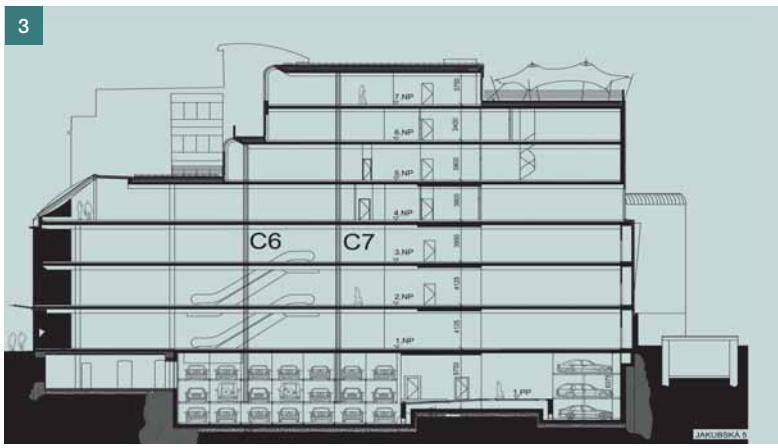
Stropní konstrukce jsou tvořeny monolitickými železobetonovými deskami, obvykle se zesílením (hlavicemi) v místě sloupů. Desky jsou podporovány po obvodu monolitickými stěnami a uvnitř železobetonovými sloupy. Prostorová tuhost objektu je zajišťována obvodovými stěnami a komunikačním jádrem, blíže viz [1] a [2].

Vlivem ustupujících horních podlaží dochází k rozdílnému zatížení vnitřních sloupů. Zejména je to patrné u sloupů C6 a C7 (obr. 2 a 3). Sloup C7 je nejvíce zatížený sloup objektu, přenáší zatížení z osmi podlaží (svislá síla od výpočtového zatížení je cca 8 MN). Sloup C6 přenáší zatížení z šesti podlaží, je tedy i méně zatížený (cca 5,5 MN).

Z důvodu prostorových požadavků v suterénu budovy na umístění výtahů garážového stání bylo nutno navrhnout sloupy omezených rozměrů. Sloup C7 je navržen v půdorysných rozměrech 450 x 600 mm, sloup C6 v rozměrech 350 x 600 mm. Pro zvýšení únosnosti bylo rozhodnuto o použití vysokopevnostního betonu (HSC). Jednalo se o jedno z prvních využití vysokopevnostního monolitického betonu v budově pozemních staveb u nás.

Z důvodu využití kapacity přepravního zařízení betonu a z důvodu experimentálních bylo dodavatelem stavby rozhodnuto provést oba sloupy v 1. PP z betonu třídy C80/95, i když ze statických důvodů postačovala pevnost nižší.

2



3

V době výstavby objektu nebyly s touto technologií výraznější zkušenosti. Proto byla návrhu i realizaci sloupů věnována všemi zúčastněnými (investorem, projektantem, dodavatelem) patřičná pozornost. Bylo navrženo podrobné ověření vlastností navrženého betonu i skutečného chování sloupů C6 a C7, které bylo zaměřené zejména na sledování poměrných přetvoření betonu.

## VYBAVENÍ MĚŘICKÝM ZAŘÍZENÍM

Ve sledovaných sloupech byl v 1. PP osazen vždy jeden strunový tenzometr Gage Technique. V hotové konstrukci byly tenzometry osazeny 1,4 m (resp. 1,65 m) nad podlahou (obr. 4). Tenzometry jsou umístěny svisle, měří tak přetvoření v podélné ose sloupu. Čidla jsou upevněna k betonářské výztuži pomocí vázacího drátu (obr. 5). Od jednotlivých tenzometrů vedou přípojné kabely, zabetonované ve sloupu, směrem k základové desce, kde jsou kabely vyvedeny na povrch pro možnost napojení tenzometrické ústředny. V místě tenzometrů je současně měřena teplota betonu zabudovanými odporovými čidly. Měření poměrného přetvoření a teplot bylo prováděno Ústavem betonových a zděných konstrukcí FAST VUT v Brně ve spolupráci s Ústavem stavebního zkušebnictví.

Součástí sledování bylo i ověření skutečných materiálových vlastností betonu. Ve spolupráci s dodavatelem betonové směsi a Ústavem technologie stavebních hmot a dílců VUT v Brně byly provedeny zkoušky krychelné pevnosti betonu na krychlích 1o hraně 150 mm ve stáří dva, sedm a 28, 90 a 180 dní, dále zkoušky hranolové pevnosti betonu v tlaku na trámcích rozměrů 400 x 100 x 100 mm ve stáří 28 dní a stanovení modulů pružnosti betonu na třech hranolech o rozměrech 400 x 100 x 100 mm ve stáří 187 dní.

Betonáž sloupů a instalace tenzometrů proběhla 1. června

5

6

Obr. 1 Pohled z ulice Česká ▮ Fig. 1 Street view Česká

Obr. 2 Půdorys 1. PP, sledované sloupy C6 a C7 ▮ Fig. 2 Ground-basement plan, the monitored columns C6 and C7

Obr. 3 Podélný řez budovou ▮ Fig. 3 Longitudinal section of the building

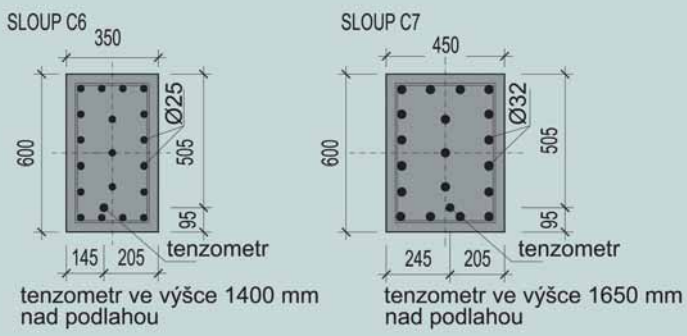
Obr. 4 Umístění tenzometrů ▮ Fig. 4 Position of the strain gauges

Obr. 5 Osazení strunových tenzometrů Gage Technique ve sloupu C6 ▮ Fig. 5 Strain gauges fixed in the column C6

Obr. 6 Sloupy po odbednění 8. června 2005 ▮ Fig. 6 Demolded columns June 8th, 2005

Obr. 7 Pohled na dokončené sloupy ▮ Fig. 7 View of the completed columns

4




7

2005. Od tohoto okamžiku se uskutečnilo šestnáct měření poměrného přetvoření. První měření bylo odečteno ještě na nezabetonovaných sloupech. V různých stádiích výstavby objektu bylo odečteno celkem jedenáct měření. Další měření (čtyři) proběhla v letech 2007, 2009 a 2010. Po dokončení nosné konstrukce v lednu 2006 následovalo provedení podlah a obvodových plášťů. Spodní podlaží byla dokončena v roce 2006, horní, ustupující podlaží ke konci roku 2007.

Sloupy budovy byly během výstavby podrobně sledovány, byla zaznamenávána data o průběhu výstavby (obr. 6 a 7), o výstavbě stropních desek, o vneseném zatížení, aby bylo posléze možné provést upřesněnou časovou analýzu chování sloupů [3], [7].

## VÝPOČTOVÝ MODEL

Pro porovnání naměřených a vypočtených hodnot poměrného přetvoření byly v programu TDA [4] vytvořeny prutové výpočetní modely obou sloupů (obr. 8). Modely reprezentují výseky sloupů v 1. PP jednotkové délky. Příčný řez je vždy tvořen dvěma konečnými prvky reprezentující beton a betonářskou výztuž, lze tak sledovat přerozdělení sil mezi výztuží a betonem. Oba prvky mají totožné těžiště. Průřezové charakteristiky sloupů jsou uvedené v tab. 1. Výsek je zatížen osovou silou v těžišti průřezu. Model nezohledňuje geometrické imperfekce a vliv vzpěru.

V tab. 2 jsou na základě naměřených hodnot stanoveny parametry betonu uvažované ve výpočtu přetvoření. Reologický model byl zvolen dle normy EC2 [5]. Vlhkost vzduchu byla uvažována po dobu výstavby průměrnou hodnotou 70 % a po dokončení nosné konstrukce hodnotou 50 % (hodnota byla ověřena měřením).

Síly do sloupů jsou převzaty ze statického výpočtu projektanta stavby [2]. Jedná se v podstatě o svislé reakce v místě sloupů, stanovené pomocí deskových výpočetních modelů jednotlivých podlažích (řešených výpočetním programem Nexis 32 [4]). V modelech bylo v místech sloupů a stěn uvažováno prosté podepření. Ve sloupech se tedy předpokládal vznik pouze normálových sil.

Model TDA respektuje postupnou výstavbu sloupů. Zatížení je postupně aplikováno v čase skutečného vnesení. Jedná se o výpočtový model vystihující dlouhodobé chování (reologii). Z toho důvodu je uvažováno jen stálé zatížení. Nahodilé zatížení je uvažováno nulovou hodnotou. Je to samozřejmě problematická otázka, neboť v době měření se nedá

Tab. 1 Průřezové charakteristiky sloupů ▮ Tab. 1 Cross-sectional characteristics of the columns

| Charakteristika | Sloup C6 | Sloup C7 |
|---|---|---|
| rozměry (a; b) [m] | 0,35; 0,6 | 0,45; 0,6 |
| plocha průřezu (a.b) [m$^2$] | 0,21 | 0,27 |
| průměr výztuže ($d_s$) [m] | 0,025 | 0,032 |
| počet kusů ($n_s$) | 19 | 19 |
| plocha výztuže ($A_s$) [m$^2$] | 0,009326 | 0,015280 |
| plocha betonu ($A_c$) [m$^2$] | 0,200673 | 0,254719 |
| náhradní tloušťka ($h_o$) [m] | 0,211 | 0,243 |
| procento vyztužení [%] | 4,65 | 6 |

Tab. 2 Parametry betonu ▮ Tab. 2 Parameters of concrete

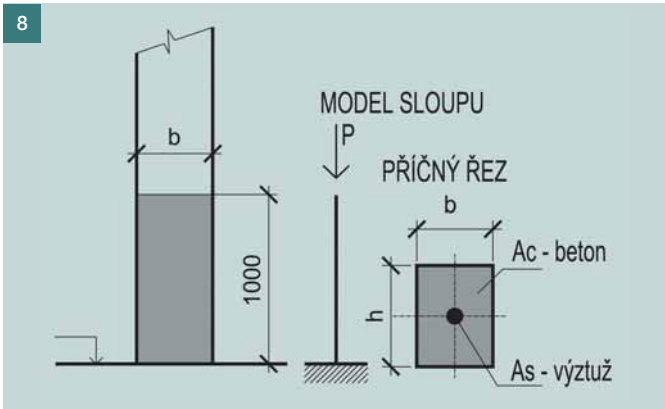
| Charakteristika | Hodnota |
|---|---|
| objemová hmotnost betonu [kg/m$^3$] | 25 |
| tečnový modul pružnosti $E_c$ [MPa] | 42 707 |
| charakteristická válcová pevnost v tlaku $f_{ck}$ v čase 28 dní [MPa] | 70,5 |
| součinitel *s* | 0,25 |
| vlhkost vzduchu [%] | 70 (50) |

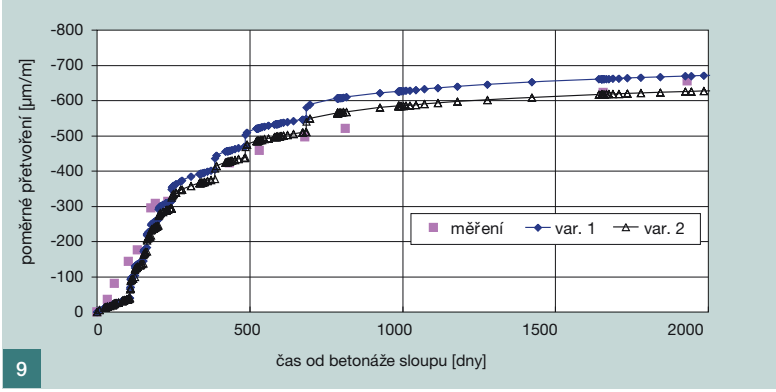
Obr. 8 Schéma výpočtového modelu ▮ Fig. 8 Scheme of the calculation model

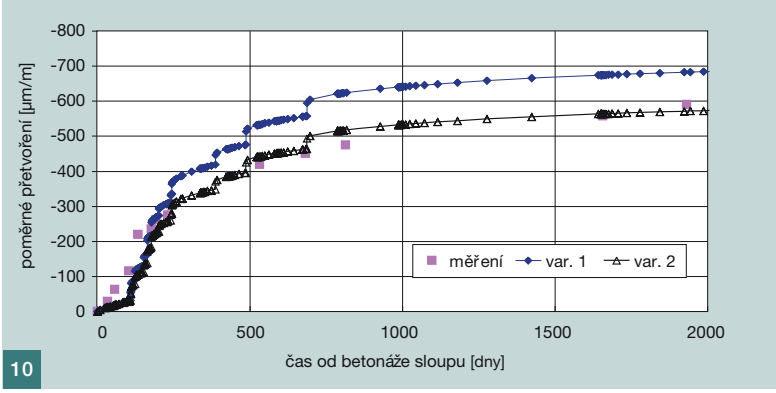
Obr. 9 Průběh poměrného přetvoření betonu ve sloupu C6 ▮ Fig. 9 The course of concrete strain of the column C6

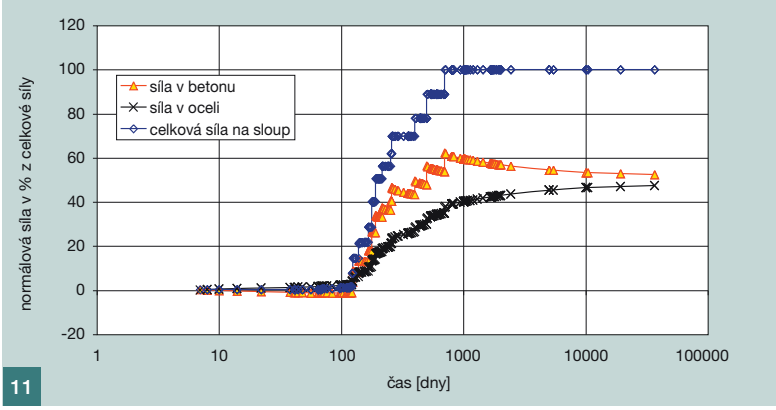
Obr. 10 Průběh poměrného přetvoření betonu ve sloupu C7 ▮ Fig. 10 The course of concrete strain of the column C7

Obr. 11 Průběh normálové síly v betonu a ve výztuži – sloup C7, varianta výpočtu 1 ▮ Fig. 11 The course of the normal force in the concrete and in the reinforcement – column C7, variant calculation 1



v budově nahodilé zatížení vyloučit. Při měření tam vždy nějaké je, část ho působí i dlouhodobě (nábytek, část skladovaných věcí apod.) a podílí se na zvýšení dotvarování betonu. Hodnota nahodilého dlouhodobého zatížení je tedy značně neznámá hodnota. Stanovit velikost zatížení v okamžiku měření v celé budově je velice obtížné (nejsou např. přístupná všechna patra). Lze tedy jen odhadovat možnou chybu neuvažováním nahodilého zatížení. Pro kancelářské a obchodní plochy se uvádí např. dlouhodobá složka nahodilého zatížení mezi 30 až 60 % z celkového nahodilého zatížení (viz např. součinitel $\psi_2$ v EN 1991 aj.). U obou sloupů tvoří v našem případě nahodilé zatížení 23 % z celkového zatížení. Dlouhodobá složka nahodilého zatížení je poté cca 7 až 14 % celkového zatížení. Tyto hodnoty ukazují na případnou chybu výpočtového modelu neuvažováním nahodilého zatížení, kterou je při vyhodnocování měření nutno mít v patrnosti.

## SROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH DAT

Na obr. 9 a 10 jsou uvedeny průběhy naměřeného a vypočteného poměrného přetvoření betonu sloupů C6 a C7 pro dvě varianty výpočtů:

Ve **variantě 1** je zatížení do sloupů uvažováno dle hodnot uvedených v projektu [2], tedy při uvažování prostého podepření desek sloupy a obvodovými stěnami.

Ve **variantě 2** jsou síly ve sloupech uvažovány za předpokladu, že deskové modely jednotlivých podlaží jsou plně vetknuty do obvodových stěn. Došlo tak ke zmenšení sil z jednotlivých podlaží a k celkovému snížení normálové síly; u sloupu C6 o 9 % a u sloupu C7 o 25 %.

Oba obrázky ukazují vcelku dobrou shodu naměřených a vypočtených hodnot u obou sloupů v počátečních fázích výstavby. Přibližně do stáří sloupů 300 dní jsou výsledky obou variant výpočtů vyhovující. Odpovídá to přibližně času dokončení nosné konstrukce budovy. V okamžiku, kdy je konstrukce postupně zatěžována ostatním stálým zatížením (obvodové pláště, příčky, podlahy, podhledy, vzduchotechnika apod.) a začíná působit nahodilé zatížení, se výsledky výpočtů a měření u varianty 1 rozcházejí. Výrazně je to patrné u sloupu C7. V dalším textu jsou objasněny důvody, proč tomu tak je.

### Nejasné statické působení celé budovy

Statický výpočet [2], z kterého byly převzaty síly na sloupy, nerespektoval prostorové působení budovy. Výpočet s prostým uložením desek je z hlediska namáhání desek proveden na straně bezpečné. Ve skutečnosti jsou železobetonové desky, uložené ve spodních podlažích na železobetonových stěnách a v horních podlažích na zděných stěnách, vždy alespoň částečně vetknuty do stěn. Tím dochází k jinému přerozdělení vnitřních sil v deskách i reakcí do podpor. Z toho důvodu byla námi uvažována **varianta 2**, která předpokládá po obvodě plně vetknuté desky. Bylo tak zmenšeno zatížení na vnitřní sloupy a dosaženo lepší shody naměřených a vypočtených hodnot.

Vhodnější by bylo sestavit prostorový výpočetní model a analyzovat celou budovu s respektováním skutečné tuhosti podpor. Prostorová tuhost budovy je zajištěna tuhými stěnami, přesto by z tohoto modelu vznikly ohybové momenty ve sloupech, které by mohly dále ovlivnit výsledky srovnání.

Prostorový model by měl zohlednit postupnou výstavbu konstrukce, tedy postupnou betonáž jednotlivých desek a jejich odbedňování, tím i změnu statického schématu. V železobetonových konstrukcích vznikají trhliny (v důsledku zatížení, smršťování, teplot apod.), tím též dochází k přerozdělení sil do sloupů. To je v současném stavu poznání železobetonových konstrukcí na celkovém modelu budovy velmi obtížně zohlednitelné.

### Neznalost skutečné velikosti zatížení a změny v průběhu výstavby

V průběhu výstavby bylo změněno dispoziční a konstrukční uspořádání horních dvou ustupujících podlaží. Podlaží v původním projektu více

Literatura:
[1] *Hirnšal Z., Molnár J., Archtex, s. r. o.:* Pasáž Magnum Česká 10 – Jakubská 3, Brno, Souhrnná zpráva – projektu architektonicko stavební řešení, Brno, 2005
[2] *Hladík P.:* Pasáž Magnum Česká 10 – Jakubská 3, Brno, Prováděcí projekt statiky, Brno, 2005
[3] *Zich M.:* Projekty sledování jejich realizace a analýza dlouhodobého chování betonových konstrukcí, habilitační práce, VUT FAST Brno, 2011
[4] ESA PrimaWin – Reference Manual, SCIA Software, Scientific Application Group, Belgium, 2004
[5] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby, Český normalizační institut, 2006
[6] *Zich M.:* Sledování mostu z vysokopevnostního betonu, časopis Beton TKS 4/2010, str. 82–83, ISSN 1213-3116
[7] *Valdhans L.:* Projekt vícepodlažní budovy v Brně na ul. Česká, diplomová práce, VUT FAST Brno 2006

ustupovala, v nové variantě (ocelová konstrukce) je zatížení menší a více rozneseno do obvodových stěn. Z toho důvodu má sloup C7 ve skutečnosti menší zatížení, než bylo původně projektováno. Též došlo ke změnám skladeb podlah a příček, část horních podlaží byla dokončována postupně v ne zcela jasných časech. Zjistit skutečné změny zatížení v budově je z důvodu rozdílných vlastníků a nájemců velmi obtížné. Ostatní stálé zatížení je v modelu uvažováno zjednodušeně ve čtyřech časech skokovými impulsy, ve skutečnosti bylo vnášeno postupně.

### Průběh smršťování vysokopevnostního betonu

Další neznámou může být průběh smršťování a dotvarování vysokopevnostního betonu, kdy normové vztahy uvažované dle EC2 [5] nemusí pro tento beton zcela odpovídat. Složení betonu (v našem případě i použití mikrosiliky a jiných chemických přísad) může velmi výrazně ovlivnit (negativně i pozitivně) průběh smršťování a dotvarování. Vhodné by proto bylo mít k dispozici i zkušební vzorky pro sledování smršťování a dotvarování v laboratoři obdobně jako v případě mostů [3].

Na celkových rozdílech naměřených a vypočtených hodnot přetvoření se tedy vzájemně podílí kombinace všech tří důvodů. Někdy se mohou sečítat, jindy vzájemně odečítat. Jejich celkové zohlednění je ale v současném stavu poznání značně omezené. Uvedený výpočet je třeba chápat jako základní studijní materiál, upozorňující na řadu problémů s modelování a sledováním skutečného chování železobetonových sloupů budov – nejen z vysokopevnostního betonu. Výpočet je pochopitelně možno v budoucnu dále upřesňovat.

Je též třeba upozornit, že obdobně jako i u jiných ocelobetonových konstrukcí dochází i u železobetonového sloupu k přerozdělení vnitřních sil mezi betonem a betonářskou výztuží. Na obr. 11 je proto uveden průběh normálových sil stanovených pro **variantu 1** v jednotlivých částech sloupu C7. V obrázku je zobrazena poměná velikost síly od stálého zatížení působící na sloup v procentech k celkové síle. Po dokončení výstavby (cca 700 dní) beton přenášel cca 63 % z celkové síly a výztuž 37 %. V dalším průběhu životnosti se síly v obou částech postupně vyrovnávají. Ve sto letech zůstává v betonu 53 % z celkové síly a ve výztuži 47 %. Při dimenzování je tedy třeba počítat se zvýšením namáhání výztuže v důsledku dotvarování a smršťování betonu.

## ZÁVĚR

Realizace sloupů představovala v roce 2005 jednu z prvních aplikací monolitického vysokopevnostního betonu v pozemním stavitelství u nás. Do té doby se HSC beton používal jen u prefabrikátů a mostních staveb, viz např. [6]. Z toho důvodu se přistoupilo k návrhu a realizaci dlouhodobého sledování této konstrukce, které probíhá již cca šest let. Za tuto dobu se podařilo vytvořit soubor informací o průběhu výstavby, zatížení, měření a vyhodnotit chování sloupu s vlivem postupné výstavby a reologických jevů. Z doposud provedené analýzy plynou následující závěry a doporučení:

- Návrh sloupu z vysokopevnostního betonu umožnil zmenšení rozměrů sloupu a z hlediska investora i výhodnější využití suterénních prostor budovy. Tato varianta se ukázala jako vhodná a méně pracná alternativa k betonovým sloupům s tuhými ocelovými vložkami.
- Požadovaná pevnost betonu byla z experimentálních důvodů oproti skutečnému požadavku projektu zvýšena na C80/95. Realizace sloupu z vysokopevnostního betonu přímo na stavbě byla možná. Ukázalo se ale, že není jednoduché této pevnosti dosáhnout. Ve skutečnosti jde dle provedených zkoušek o beton o jednu třídu nižší.
- Srovnání naměřených a vypočtených hodnot bylo vcelku úspěšné. Výsledky ukázaly na problematiku sledování budov a její rozdíly oproti sledování mostů. Jde zejména o odlišnosti v ne zcela staticky „čistém“ schématu budovy oproti obvykle jasnému statickému působení u mostů [6] a o rozdíly ve znalosti skutečné velikosti zatížení. Statický systém budov je obvykle nepřehledný a obtížně vystihnutelný modelováním. U budov často dochází ke změnám zatížení v průběhu výstavby i po jejím dokončení, část nahodilého zatížení působí dlouhodobě apod. U mostů bývá zatížení po jeho dokončení vždy jasné a prochází navíc mnoha kontrolami (např. zkoušky objemové hmotnosti).
- Použitý reologický model dle EN 1992 se ukázal jako dostatečně vyhovující pro analýzu navržených sloupů z vysokopevnostního betonu.
- Sledování konstrukce má samo o sobě význam pro včasné odhalení případných poruch a může to nepochybně přispět k lepšímu pochopení dlouhodobého chování obdobných konstrukcí. Dosavadní práce prováděné v rámci sledování sloupů potvrzují správnost projektového řešení a dobrou kvalitu stavebních prací.

## INFORMACE O OBJEKTU

| | |
|---|---|
| Investor | Magnum Invest, s. r. o., Brno |
| Dodavatel nosné konstrukce | Brestt, s. r. o., Brno |
| Projektant statické části | Ing. Pavel Hladík |
| Realizace | 2005 až 2007 |

Prezentované výsledky byly získány též za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím MPO ČR v rámci projektu FI-IM5/128 „Progresivní konstrukce z vysokohodnotného betonu“ a za finančního přispění MŠMT ČR, projekt 1M0579, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS. Autor dále děkuje investorovi stavby firmě Magnum Invest, s. r. o., za vstřícný přístup k návrhu sloupů a k jejich sledování.

Ing. Miloš Zich, Ph.D.
Ústav betonových a zděných konstrukcí FAST VUT v Brně
Veveří 95, 662 37 Brno
tel.: 541 147 860, e-mail: zich.m@fce.vutbr.cz

Text článku byl posouzen odborným lektorem.