

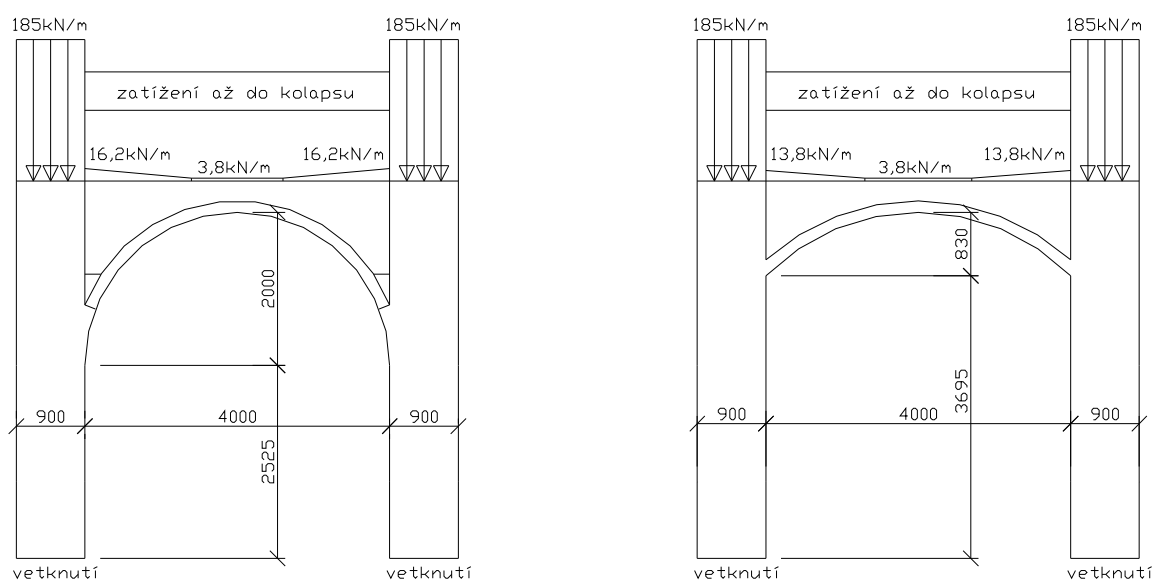
Cíle řešení

Tento grant byl zaměřen na rekonstrukci historických kleneb. Jednou z možností rekonstrukce kleneb je její nadbetonování vrstvou vyztuženého betonu. Jako jedna z mála sanačních metod nenarušuje spodní líc klenby, její použití je tedy vhodné u památkově chráněných objektů. Tato metoda byla například použita při sanaci klenby nad Vladislavským sálem na Pražském hradě. V současné literatuře ale není dosud uspokojivě ověřen vliv nadbetonování na statické působení klenby zejména s uvažováním proměnlivých reologických vlastností betonu. Cílem projektu je vytvořit studijní materiál pro studenty Fakulty stavební ČVUT i pro odbornou veřejnost, který objasní vliv nadbetonování klenby na její statické působení a zhodnotí vhodnost použití této sanace. Součástí studijního materiálu bude i popis dalších způsobů rekonstrukce kleneb.

Způsob řešení

V komerčním softwaru Atena byly vytvořeny numerické modely zvolených typů kleneb pro různé druhy zatížení. Software Atena byl zvolen z toho důvodu, že v něm lze modelovat konstrukci v pružné i plastické oblasti včetně znázornění rozvoje trhlin a že je možno konstrukci zvolna přitěžovat. Jedná se o fyzikálně nelineární výpočet metodou konečných prvků. U všech modelů bylo nastavena stejná velikost čtvercových prvků v jednotlivých oblastech. Stěny byly děleny na prvky o velikosti 150 mm, v místě uložení klenby byla síť zhuštěna na 75 mm. Vlastní klenba byla členěna na prvky velikosti 25 mm a nadbetonávka byla dělena na prvky velikosti 12,5 mm.

Z důvodu hojného rozšíření byla modelována **klenba valená a segmentová**. Uvažovaná geometrie včetně spojitých zatížení u nezesílených kleneb je zachycena na obr. 1. Pro výpočet byl modelován výšek 1 m konstrukce a byl řešen za podmínek rovinné napjatosti.



Obr. 1: Klenba valená

Klenba segmentová

Pro obě klenby byly vytvořeny následující modely:

- klenba nezesílená s rovnoměrným užitným zatížením
- klenba nezesílená s nesymetrickým užitným zatížením (Na levé polovině modelu bylo uvažováno užité zatížení poloviční hodnotou.)
- klenba zesílená rubovou skořepinou tl. 50 mm rovnoměrně zatížená užitným zatížením
- klenba zesílená rubovou skořepinou tl. 50 mm nesymetricky zatížená užitným zatížením
- klenba zesílená rubovou skořepinou tl. 50 mm s uvažováním vlivu smrštění betonu a rovnoměrně zatížená užitným zatížením
- klenba zesílená rubovou skořepinou tl. 50 mm s uvažováním vlivu smrštění betonu a nesymetricky zatížená užitným zatížením
- klenba zesílená rubovou skořepinou tl. 50 mm, která je s cihelnou klenbou spřažena trny, s uvažováním vlivu smrštění betonu a rovnoměrně zatížená užitným zatížením
- klenba zesílená rubovou skořepinou tl. 50 mm, která je s cihelnou klenbou spřažena trny, s uvažováním vlivu smrštění betonu a nesymetricky zatížená užitným zatížením
- klenba zesílená rubovou skořepinou tl. 100 mm rovnoměrně zatížená užitným zatížením
- klenba zesílená rubovou skořepinou tl. 100 mm nesymetricky zatížená užitným zatížením
- klenba zesílená rubovou skořepinou tl. 100 mm s uvažováním vlivu smrštění betonu a rovnoměrně zatížená užitným zatížením
- klenba zesílená rubovou skořepinou tl. 100 mm s uvažováním vlivu smrštění betonu a nesymetricky zatížená užitným zatížením
- klenba zesílená rubovou skořepinou tl. 100 mm, která je s cihelnou klenbou spřažena trny, s uvažováním vlivu smrštění betonu a rovnoměrně zatížená užitným zatížením
- klenba zesílená rubovou skořepinou tl. 100 mm, která je s cihelnou klenbou spřažena trny, s uvažováním vlivu smrštění betonu a nesymetricky zatížená užitným zatížením

Výztuž a její uspořádání bylo převzato z literatury. Hlavní podélná výztuž byla uvažována jako 6ØR6, kotvení prahu do stěn bylo uvažováno jako 2ØR12 v každé úrovni, spřahující trny byly uvažovány jako RØ10 o hustotě 4ks/m².

Uložení pat stěn bylo uvažováno pevné, neposuvné, bez možnosti pootočení, tomu by u skutečné konstrukce odpovídalo založení na skalních horninách (R1-R3).

Klenby byly zatěžovány postupně až do kolapsu konstrukce (výpočtu). Jednotlivé **druhy zatížení** byly voleny tak, aby pokud možno odpovídaly skutečné konstrukci.

Vlastní tíha konstrukce

Vlastní tíha konstrukce byla zadána pomocí objemové tíhy jednotlivých materiálů a geometrií konstrukce.

Zatížení stěn

Stěny byly zatíženy svislým rovnoměrným zatížením o velikosti 185 kN/m². Toto zatížení bylo určeno z předpokladu, že modelovaná klenba se nalézá v přízemí pětipatrového domu s trémovými stropy nad 2. až 5. NP a se sedlovou střechou pokrytou keramickou krytinou. Tloušťka stěn se po výšce v každém podlaží zmenšuje o 150 mm. Excentricita zatížení byla zanedbána.

Zatížení násypem

Pro každý typ klenby byl určen vlastní zatěžovací obrazec násypem. Vyšlo se z předpokladu, že úroveň podlahy zůstane zachována po provedení rubové skořepiny a proto se měnila výška násypu a tím i obrazec zatížení násypem.

Zatížení smrštěním

Velikost zatížení smrštěním byla vypočtena dle ČSN EN 1992-1-1 ve dvou časových úrovních.

Nová norma ČSN EN 1992-1-1 vychází z evropských standardů a zavádí následující vztahy pro smršťování v čase t

$$e_{cs} = e_{cd} + e_{ca}, \quad (1)$$

kde e_{cd} je poměrné smršťování od vysychání

$$e_{cd}(t) = \frac{(t-t_s)}{(t-t_s) + 1265\sqrt{h_d^3}} k_h e_{cd0} \quad (2)$$

T_s je stáří betonu na začátku vysychání v dnech

Pro $h_d < 0,1\text{m}$ $k_h = 1$, pro $h_d > 0,5\text{m}$ $k_h = 0,7$

$$e_{cd0} = 0,85 \left[(220 + 110\alpha_1) \exp(-\alpha_2 \frac{f_{cm}}{10}) \right] \cdot 10^{-6} [1,55 - 1,55RH^3], \quad (3)$$

$\alpha_1 = (3-6)$, $\alpha_2 = (0,13-0,11)$ podle cementu S, N, R

f_{cm} je střední hodnota pevnosti v tlaku (MPa), RH je relativní vlhkost 0-1

e_{ca} je poměrné autogenní smršťování

$$e_{ca}(t) = [1 - \exp(-0,2\sqrt{t})] e_{ca\infty}, \quad e_{ca\infty} = 2,5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad (4)$$

Pro určení velikosti smrštění byly uvažovány následující hodnoty:

Zesílení je uvažováno betonem C20/25. Pro provádění betonu máme tyto technologické údaje - ošetřování je 10 dní, plné zatížení je vneseno ve 40 dnech, relativní vlhkost je 0,5, cement typu N. Normové materiálové charakteristiky jsou $f_{ck} = 20$, $f_{cm} = 28$ MPa. Sledujeme danou zesílenou klenbu ve 40 a 365 dnech. Napětí od zatížení bez vedlejších vlivů je $\sigma_c = -1$ MPa. Z tloušťky nabetonávky určíme náhradní rozměr $h_d = 0,1\text{m}$.

Výpočet deformace od smršťování:

Smršťování v $t = 40$ dní

$$\epsilon_{cs} = 0,42 \cdot 0,543 \cdot 10^{-3} + 0,717 \cdot 0,025 \cdot 10^{-3} = 0,23 \cdot 10^{-3} + 0,018 \cdot 10^{-3} = 0,248 \cdot 10^{-3}$$

(Bažant $\epsilon_{cs} = 0,24 \cdot 10^{-3}$, ČSN 731201 $\epsilon_{cs} = 0,1 \cdot 10^{-3}$)

$$\epsilon_{cc} = 2,3,17 \cdot 0,456 \cdot 0,0,04 \cdot 10^{-3} = 0,0$$

Smršťování v $t = 365$ dní

$$\epsilon_{cs} = 0,899 \cdot 0,543 \cdot 10^{-3} + 0,978 \cdot 0,025 \cdot 10^{-3} = 0,488 \cdot 10^{-3} + 0,0245 \cdot 10^{-3} = 0,512 \cdot 10^{-3}$$

(Bažant $\epsilon_{cs} = 0,63 \cdot 10^{-3}$, ČSN 731201 $\epsilon_{cs} = 0,35 \cdot 10^{-3}$)

$$\epsilon_{cc} = 2,3,17 \cdot 0,456 \cdot 0,797 \cdot 0,04 \cdot 10^{-3} = 0,1 \cdot 10^{-3}$$

Pro zadání do modelu byla velikost smrštění mírně zaokrouhlena směrem dolů s přihlédnutím k modelu B3. Bylo uvažováno smrštění o velikosti 0,025% po 40 dnech a 0,05% po 1 roce.

Užitné zatížení

Užitné zatížení bylo uvažováno jako rovnoměrné na celé ploše klenby s plynulým nárůstem až do kolapsu. V nesymetricky zatížených modelech bylo uvažováno užitné zatížení na levé polovině klenby poloviční hodnotou.

Zatížení dotvarováním

Zatížení dotvarováním nebylo v modelech uvažováno z toho důvodu, že smršťování betonu brání spojení s cihelnou klenbou a beton je vlivem smršťování namáhán tahem. V tažené betonové konstrukci k dotvarování nedochází.

Předpoklad o chování konstrukce při vyplňování žádosti o grant nebyl správný, dotvarování betonu se u rubové skořepiny nanesené přímo na očištěný povrch klenby neuplatňuje.

Posloupnost vnášení zatížení do modelu byla obecně následující (není rozepisováno dělení jednotlivých zatížení do výpočtových kroků):

1. Vlastní tíha
2. Zatížení stěn

Dům je postaven a je provedena zesilující rubová skořepina

3. Násyp

Klenba s rubovou skořepinou je zasypána.

4. 50% smrštění

Po 40 dnech proběhne významná část smrštění.

5. Užitné zatížení o velikosti 3 kN/m²

Místnost je po opravě a je užívána.

6. 50% smrštění

Po jednom roce proběhne celé smrštění.

7. Užitné zatížení až do kolapsu

V průběhu životnosti zesílené klenby dojde k jejímu náhodnému přetížení.

Byla změněna posloupnost vnášení zatěžování oproti záměru uvedeném v Způsobu řešení v přihlášce projektu, protože nebyla zjištěna možnost vložení rubové skořepiny na částečně zdeformovanou a porušenou klenbu v žádném z uvažovaných programů (Atena/Adina). V obou programech je nutno od začátku výpočtu konstrukci uvažovat jako celek.

Ve výpočtech byly uvažovány následující **materiály**:

Výztuž R10505

Materiálový model: CCReinforcement

Beton C20/25

Materiálový model: SBETA materiál

Zdivo CP15/MVC2,5

Materiálový model: SBETA materiál

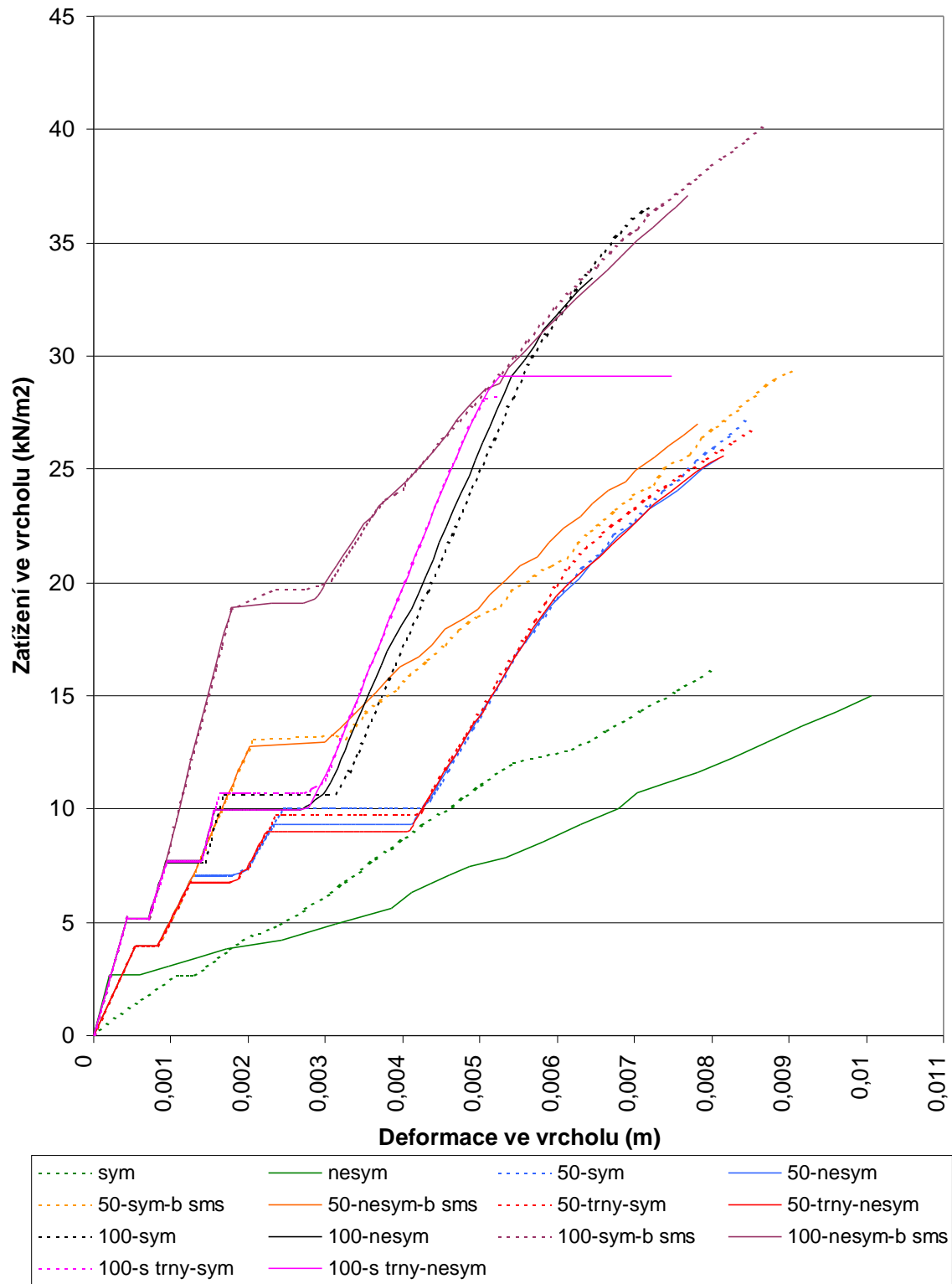
Jednotlivé vytvořené modely byly spočítány (Obr.2).

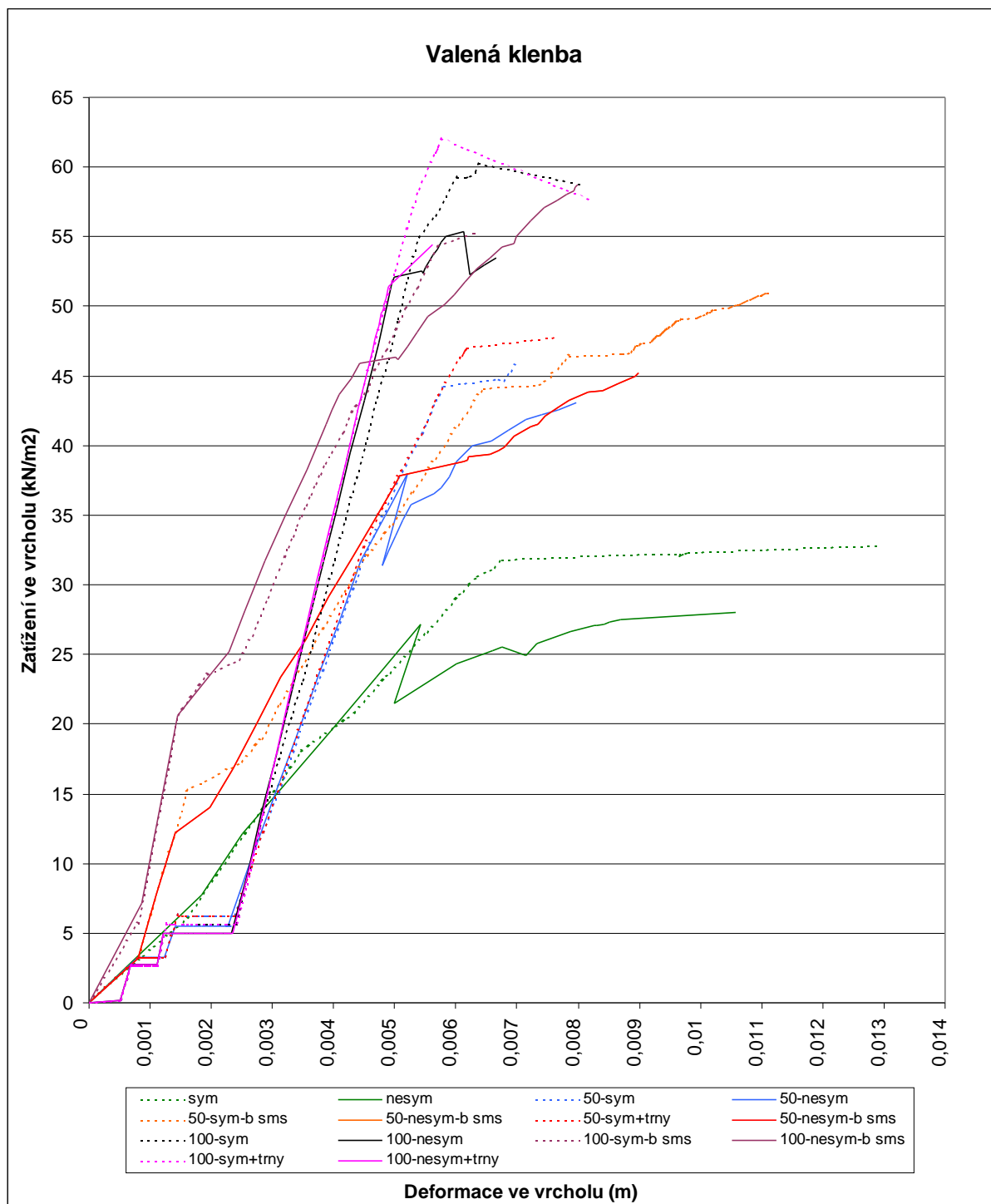


Obr. 2 Trhliny v modelu segmentové klenby zesílené 50 mm rubovou skořepinou v posledním spočteném kroku, zatížení nesymetrické, uvažován vliv smrštění

U každého modelu byly v průběhu výpočtu sledovány deformace (ve vrcholu a obou patách klenby) a zatížení (na levé i pravé části klenby). Z výsledků výpočtů byly vytvořeny grafy sledující závislost velikosti deformace ve vrcholu na zatížení. Grafy byly vůči sobě porovnány a vyhodnoceny.

Segmentová klenba





Výsledky

Z hodnot získaných numerickým modelováním vyplývá, že rubové skořepiny zvýší únosnost klenb o několik desítek procent. Konkrétní nárůst únosnosti zesílené klenby závisí na tloušťce provedené rubové skořepiny a na druhu zatížení, viz tabulka 1. Při posuzování únosnosti nelze zanedbat vliv smršťení, protože smršťení snižuje únosnost zesílené konstrukce o 15-20%.

[kN/m ²]	Klenba + násyp	Klenba + 50 mm vyztuženého betonu + násyp			Klenba + 100 mm vyztuženého betonu + násyp		
%		7,05			7,7		
Stálé zatížení	6,5	7,05			7,7		
Uvažované zatížení	Zdivo 150mm	bez smrštění	se smrštěním	s trny a se smrštěním	bez smrštění	se smrštěním	s trny a se smrštěním
Valená symetricky zatížená	32,84	51,02	46,10	47,77	65,30	60,25	62,10
		55	40	45	99	83	89
Valená nesymetricky zatížená	28,06	45,21	43,09	41,16	58,74	55,40	57,70
		61	53	47	109	97	105
Segmentová symetricky zatížená	16,17	29,45	27,21	26,67	40,06	36,58	28,26
		82	68	65	148	126	75
Segmentová nesymetricky zatížená	15	27	25,49	25,62	37,06	33,47	29,13
		90	70	70	147	123	94

Tab.1 Zatížení při kolapsu klenby a hrubý nárůst únosnosti klenby v procentech

Ze spočítaných modelů vyplývá, že vložená rubová skořepina ztužuje celou konstrukci a částečně brání vzdalování podpor klenby (stěn) od sebe. Zavedeme-li do výpočtu vliv smrštění, vodorovný posun podpor se zmenší. Porovnáme-li tento jev u valené a segmentové klenby, tak u segmentové klenby je zmenšení vodorovných posunů výraznější. To je dáno tvarem klenby a její tuhostí odpovídající vodorovnému posunu v podpoře. Valená klenba včetně vyztužení, které kopíruje tvar, je méně tuhá než segmentová.

Spřažení trny nemá výrazný vliv na únosnost klenby, pokud je dosaženo spřažení nadbetonávky s cihelnou klenbou při betonáži na očištěný rub klenby s vyškrábanými spárami mezi cihlami.

Použitá literatura:

- [1] Bažant Z., Klusáček L.: Statika při rekonstrukcích objektů, VUT, 2004
- [2] Vaněk T.: Rekonstrukce staveb, SNTL, 1985
- [3] Vinař J.: Konstrukce historických staveb, STOP, 2006
- [4] Witzany J.: Poruchy a rekonstrukce zděných budov, ČKAIT, 1999
- [5] Fajman P.: Některé problémy při vytváření statického modelu kleneb, Stavba 1997/3
- [6] ČSN EN 1992-1-1

Poděkování

Prezentované výsledky byly vytvořeny díky podpoře grantu FRVŠ G1 874/2006.