

Zatěžovací zkoušky a numerické modelování drátkobetonových segmentů

M.Hilar

3G Consulting Engineers s.r.o. a FSv ČVUT v Praze, Praha, ČR

P. Vítek

Metrostav a.s., Praha, ČR

J. Vítek

Metrostav a.s. a FSv ČVUT v Praze, Praha, ČR

R. Pukl

Červenka Consulting, Praha, ČR

ABSTRAKT: Pro mechanizovanou ražbu pomocí plnoprofilových tunelovacích štítů (technologie TBM) je zpravidla aplikováno segmentové tunelové ostění z prefabrikovaného železobetonu. V současné době jsou v praxi stále častěji využívány segmenty z prefabrikovaného drátkobetonu bez tradiční prutové výztuže. V České republice nyní probíhá výzkum zaměřený na problematiku drátkobetonových segmentů, v rámci výzkumu byl proveden soubor experimentálních zatěžovacích zkoušek segmentů.

Provedené experimentální testování drátkobetonových a železobetonových segmentů přineslo velké množství velmi cenných informací. Přirozeně nejdůležitější byly informace o únosnosti segmentů (velikost maximálního zatížení, které segmenty přenesou) a o použitelnosti segmentů (vznik prvních trhlin, propagace trhliny přes celou tloušťku segmentu) při různých způsobech zatěžování. Jednalo se o první ucelený soubor experimentálních výsledků na moderních tunelových segmentech skutečné velikosti v ČR. Ukazuje se, že odezva na zatížení segmentů má zcela jiný charakter než u malých vzorků (tj. testovací trámce délky 70 cm). Nelze tedy výsledky experimentu na malých vzorcích aplikovat na celé konstrukce jednoduchými výpočetními postupy (teorie pružnosti).

Na základě provedených zkoušek byly provedeny i zpětné numerické výpočty pomocí metody konečných prvků v programu ATENA, které umožnily odvození některých důležitých parametrů zkoušeného materiálu. Pro zodpovědnou numerickou analýzu je třeba využít dostatečně sofistikované analytické vybavení zohledňující energetické principy modelování rozvoje trhlin. Realizovaný komplexní soubor experimentů vedl k získání dat pro výpočty, kterými by bylo možné spolehlivě modelovat odezvu reálných prvků na požadované zatížení.

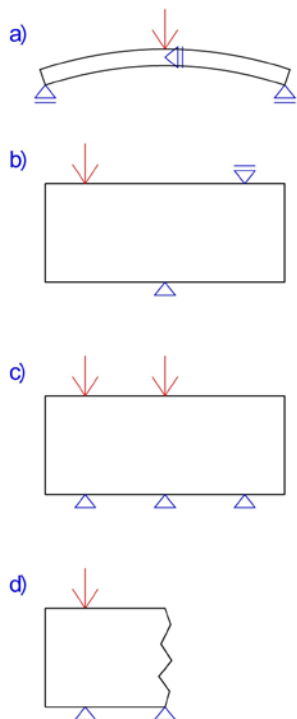
Po zohlednění výsledků provedeného výzkumu bylo rozhodnuto, že vyrobené drátkobetonové segmenty splňují veškeré požadavky kladené na ostění pražského metra. Mohly být proto vyrobeny a smontovány prstence (v počtu 10 prstenců tj. 15 bm tunelu) zkušebního úseku ostění v trase A pražského metra z drátkobetonových segmentů (s dávkováním drátků 40 kg/m³). Dané ostění bylo instalováno na traťovém tunelu uvedené stavby v červnu 2012.

1 PROVEDENÝ SOUBOR ZKOUŠEK

Kromě testování malých vzorků zejména trámců, jejichž testování se běžně realizuje již řadu let, byl nyní uskutečněn komplexní soubor testů na reálných prvcích skutečné velikosti. Přestože jsou segmenty tunelového ostění vystaveny účinkům řady zatěžovacích stavů (např. manipulace, skladování, doprava, instalace, definitivní zatížení, atd.), jsou v praxi zaváděna opatření, aby rozhodující pro dimenzování prefabrikátů byly jen některé z nich. Zásadním návrhovým zatížením je přirozeně zatížení horninovým masivem. Vzhledem k vodonepropustnosti segmentového ostění může hrát významnou roli také hydrostatický

tlak, zejména pokud je hladina podzemní vody nad úrovní tunelu. Uvedená zatížení působí po celou dobu životnosti konstrukce. Dalším významným zatěžovacím faktorem je přítlak tunelovacího štítu, který je zatlačován do horninového masivu pomocí hydraulických lisů zapřených o smontované prstence ostění. Jedná se sice o dočasný stavební stav a krátkodobé zatížení, které by z hlediska co nejušpornějšího návrhu nemělo být podstatné. Avšak s ohledem na mnohdy předpokládané vysoké hodnoty přítlačné síly stroje (závisejí na predikovaných geotechnických vlastnostech horninovém masivu) hraje daný za-

těžovací stav často rozhodující roli při návrhu segmentů. I vzhledem k tomuto faktu je třeba posuzovat technologii TBM jako celek, potřebná vyšší únosnost ostění je kompenzována řadou výhod. Pro simulaci rozhodujících návrhových stavů byly navrženy 3 typy zkoušek (obr. 1):



Obrázek 1. Prováděné zkoušky (a – ohyb segmentu kolmo na rovinu segmentu, b – ohyb segmentu v rovině segmentu, c – prostý tlak na segment dvěma břemeny, d – prostý tlak jedním břemenem na zbytky segmentů)

A. Simulace zatížení horninovým masivem:

Segment je zatěžován ohybem a to v rovině kolmé na plochu segmentu. Segment se ukládá ve tvaru klenby (obrácené "U") na posuvné podpory a zatěžuje se ve vrcholu klenby přímkovým zatížením. Posuvné podpory znamenají namáhání prostým ohybem bez vlivu normálové síly (obr. 1a). Ačkoliv ve skutečnosti jsou tunelová ostění namáhána normálovou silou, pro účel zkoušení byl zvolen staticky jednodušší model, aby výsledky byly snáze interpretovatelné a poskytly vhodnější podklady pro numerickou analýzu. Kombinaci s normálovým zatížením ostění lze následně relativně snadno modelovat v numerickém výpočtu.

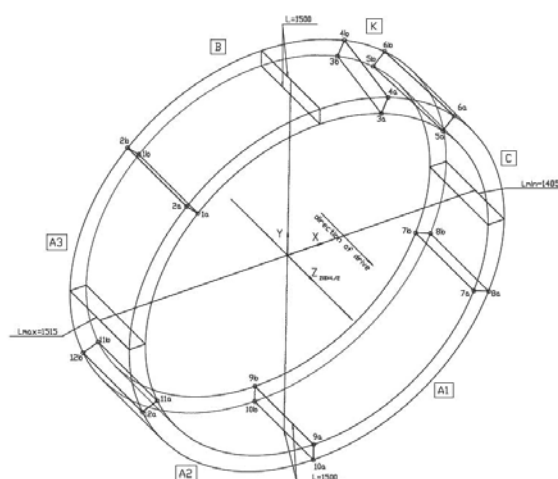
B. Simulace zatížení axiálními lisy štítu - ideální stav:

Jak již bylo zmíněno, zatížení lisy štítu zajišťujícími potřebný přítlak stroje na čelbě je pro návrh segmentů jeden z rozhodujících zatěžovacích stavů. Je zapotřebí mít jasnou informaci o tom, při jakém zatížení vznikají trhliny a kdy se propagují

na plnou tloušťku ostění. Přestože segment může být dostatečně únosný, trhlinka procházející celou tloušťkou segmentu znamená vodopropustnost ostění, což přirozeně není přijatelné. Zkouška je uspořádána tak, že segment je zatěžován tlakem ve střednicové ploše. S ohledem na možnosti zatěžovacího zařízení (maximální síla 10 MN - 1000 t) byla zkouška koncipována ve dvou variantách a to zatížení jedním břemenem (obr. 1b - s možností dosažení celkové únosnosti prvku) a zatížení dvěma břemeny (obr. 1c - bez možnosti dosažení únosnosti prvku).

C. Simulace zatížení axiálními lisy štítu - nerovnoměrné uložení segmentu:

Segmenty v prstencích ostění jsou provázány vazbou podobně jako cihelné zdivo, což přináší řadu výhod včetně zvýšení tuhosti ostění. Při zatížení tunelovacím štítem je zatěžovací síla přenášena do dvou segmentů předcházejícího prstence. Pokud dojde k tomu, že segmentové ostění není smontováno geometricky přesně, tak je segment zatěžovaný lisy podepřen nerovnoměrně. V posuzovaném případě je jeden segment vystaven 3 působitím zatížení (simulace 3 lisů) a uložen na 3 podporách. S ohledem na fakt, že se v podstatě jedná o staticky neurčitou konstrukci, při poklesu podpory je prvek namáhán ohybem. Tomu je přizpůsobena i zkouška, kdy je segment zafixován na dvou podporách, krajní je vynechána, a zatížen jedním břemenem působícím ve střednicové rovině v krajním působišti (obr. 1d). Prvek je tedy zatížen jako vysoká konzola.



Obrázek 2. Geometrie segmentů v prstenci ostění

2 PARAMETRY ZKOUŠENÝCH SEGMENTŮ

Pro výrobu prefabrikovaných segmentů určených pro zatěžovací zkoušky byly využity formy používané k výrobě segmentů pro mechanizovanou

ražbu traťových tunelů prodloužení trasy A pražského metra. Geometrie segmentů je patrná z obr. 2. Prstenec ostění má vnitřní průměr 5,3 m, vnější průměr 5,8 m, mocnost ostění (segmentů) je 0,25 m, délka jednoho prstence (šířka segmentů) je 1,5 m. Všechny prstence mají shodný tvar. Svislé průměty osazených prstenců mají tvar lichoběžníků, přičemž natočením vzájemným prstenců kolem jejich osy lze zajistit vedení v přímém směru i změnu směru tunelu (směrové a výškové oblouky). Tři největší segmenty (A1, A2 a A3) mají rovnoběžné ložné hrany, dva další segmenty obdobné velikosti (B a C) jsou na straně klenáku zkosené, závěrečný uzavírací segment (K – klenák) je zkosený na dvou ložných stranách a má přibližně třetinovou velikost. Segmenty jsou vzájemně spojovány šrouby (v podélném i příčném směru), proto má každý segment otvory a kapsy pro umístění šroubů. Vodotěsnost ostění je zajišťována pomocí pryžových pásek, které jsou osazeny do obvodových drážek každého segmentu. Prostor mezi rubem prstence a lícem výrubu se při dalším záběru souběžně začerpává výplňovou maltou.

Během výstavby je každý prstenec ostění zatížen pomocí 16 dvojic hydraulických lisů umístěných v zadní části tunelovacího štítu. Lisy jsou po obvodu prstence rozmístěny rovnoměrně (úhel rotace 22,5°). Na pět velkých segmentů působí vždy 3 dvojice lisů, na klenák působí pouze jedna dvojice lisů. Pro účely zkoušek byly vyrobeny dva prstence segmentů z drátkobetonu bez prutové výztuže s dávkováním drátků v betonu 40 kg/m³ a 50 kg/m³. Pro porovnání byly také zkoušeny běžné železobetonové segmenty vyztužené 105 kg/m³ prutové výztuže. Při zkouškách byly zaznamenávány hodnoty působících sil, velikosti deformací měřené osazenými potenciometrickými snímači dráhy a signály z odporových tenzometrů nalepených na povrch segmentů.

Při zkouškách byl používán hydraulický zkušební stroj Amsler 10000 kN 1523 (metrologické číslo KÚ S 07 010 M). Při všech provedených zkouškách byly zaznamenávány hodnoty působících sil, velikosti deformací měřené osazenými potenciometrickými snímači dráhy NOVOTECHNIK TR10 a TR25. Dále byly zaznamenávány signály z odporových tenzometrů Mikrotechna typu X350 s délkou mřížky 100 mm nalepených na povrch segmentů. Pro sběr dat byla využita měřicí ústředna PEEKEL Autolog 2100.



Obrázek 3. Segment zatížený ohybem kolmým na rovinu segmentu

3 ZATÍŽENÍ OHYBEM KOLMO NA ROVINU SEGMENTU

Při dané zkoušce byly segmenty zkoušeny v ohybu kolmo na rovinu segmentu, zkouška simulovala namáhání ohybovými momenty při manipulaci, dopravě, skladování a při zatížení tlakem horninového masivu. Segmenty byly položeny zakřivenou částí nahoru (obr. 3), spodní hrany byly podloženy kluznými podporami, které umožňovaly vodorovný pohyb a zabraňovaly svislému pohybu. Rovnoměrné zatížení segmentů po celé délce vrcholu klenby vyvolávalo řízenou svislou deformaci. To znamená, že zatěžovací síla vnášená hydraulickým válcem byla upravována tak, aby deformace na pístu zatěžovacího lisu byla postupně rovnoměrně zvyšována. Zatěžovací síla tedy nejprve rostla a po vzniku trhlin byla snižována až do vyčerpání kapacity (tj. do okamžiku rozlomení). Celý sofistikovaný systém byl řízen počítačem se speciálním softwarem. Nespornou výhodou zatěžování „řízenou deformací“ bylo získání celého pracovního diagramu včetně postupné větve. K ukončení zkoušky bylo přistoupeno teprve tehdy, když prvek neunesl svoji vlastní tíhu. Daným způsobem byly zkoušeny 4 drátkobetonové segmenty A3. Výsledky zkoušek jsou patrné z tab.1.

Tabulka 1. Výsledky zatížení segmentů ohybem kolmým na rovinu segmentu (zatěžováno kontinuálně, neodtěžováno)

Segment	Množství drátků (kg/m ³)	Maximální dosažená působící síla (kN)
A3 - S1	40	115
A3 - S2	50	106
A3 - S3	40	124
A3 - S4	50	154

Před dosažením maximální zatěžovací síly se v pásu proměnné šířky na spodní ploše segmentu začaly objevovat drobné trhliny, které se postupně rozvíjely a následně se lokalizovaly do jediné trhliny (obr. 4 a 5). Ta se postupně rozevírala, čemuž odpovídal příslušný pokles zatěžovací síly. Během rozvírání trhliny bylo možné přímo v trhlíně sledovat postupné vytahování drátků. Bylo zaznamenáno typické šíření trhlin v betonu s rozptýlenou výztuží, kdy se v těsném okolí nejdříve namáhaného průřezu vytváří řada velmi tenkých trhlin, z nichž se jedna později propaguje dále.

Rovněž je zajímavé, že nevyšší a nejnižší únosnosti bylo dosaženo na vzorcích vyztužených 50 kg/m³, zatímco vzorky vyztužené 40 kg/m³ vykazují podobnou únosnost. Hodnoty byly získány vždy jen na dvou vzorcích, nelze je proto považovat za statisticky významné. Přesto se nabízí vysvětlení, že beton s množstvím 50 kg/m³ drátků je již obtížněji mísitelný, lze tedy obtížněji zajistit rovnoměrné rozptýlení drátků, a proto dochází k většímu rozptýlení v únosnosti. Zřejmě v případě realizovaných zkoušek byl testován jeden segment s velmi vhodným a druhý segment s velmi nevhodným rozptýlením drátků. Záměrně je použit termín vhodný místo rovnoměrný. Vysoká únosnost může být dána soustředěním drátků při dolním povrchu prvku - tedy v tažené oblasti. To může být způsobeno např. intenzivní vibrací. Nejedná se tedy o jev veskrze příznivý, neboť lze usuzovat, že naopak únosnost při opačném směru namáhání (tah v horní části prvku) bude úměrně snížena. Ve skutečnosti jsou segmenty namáhány v obou směrech.



Obrázek 4. Segment zatížený ohybem kolmým na rovinu segmentu po porušení (pohled zespoda)



Obrázek 5. Segment zatížený ohybem kolmým na rovinu segmentu po porušení (boční pohled)

4 ZATÍŽENÍ ZBYTKŮ SEGMENTŮ PROSTÝM TLAKEM

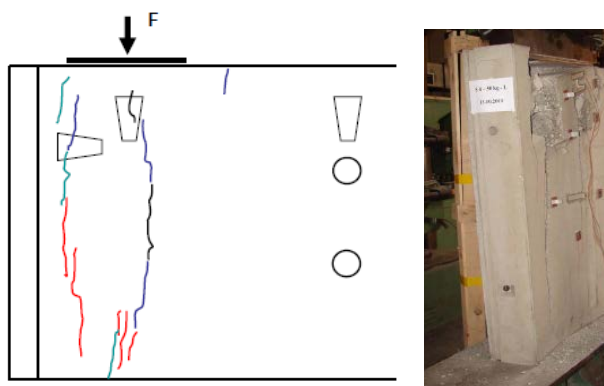
Při dané zkoušce byly zkoušeny zbytky segmentů, které vznikly při ohybovém zatěžování segmentů kolmo na rovinu segmentů. Zbytky segmentů byly zatěžovány prostým tlakem ve svislém směru. Působící síla byla zvyšována s přírůstkem 600 kN a mezi jednotlivými zatěžovacími stupni byl zbytek segmentu odtížen na hodnotu 200 kN (pouze v případě segmentu K byl přírůstek 300 kN a odtěžováno bylo na 90 kN). Zbytek segmentu byl zatěžován až do vyčerpání kapacity. Daným způsobem bylo zkoušeno 6 zbytků segmentů a jeden segment K. Výsledky zkoušek jsou patrné z tab.2.

Na rozdíl od předchozí zkoušky byl segment zatěžován ve svislé poloze, a proto byl dobře pozorovatelný vznik trhlin na vnitřním i vnějším líci segmentu. První trhliny se lokalizují na vnitřním povrchu nad nikou pro šroub. Dále se trhliny šíří nikou většinou podél jedné hrany. Je evidentní, že oslabení nikou působí nepříznivě a vede k lokalizaci napětí do hran. Lze tedy konstatovat, že hranatý tvar nik je nevhodný, oblý tvar by byl vhod-

nější. Během dalšího zatěžování se trhliny rozvíjely směrem dolů v jednom nebo více pásech pod nikou nebo mírně stranou. Postupně se všechny trhliny rozevíraly, teprve pak se výrazně lokalizovala jedna z nich, kde následně nastalo rozštípnutí prvku příčnými tahy (obr. 6).

Tabulka 2. Výsledky zatěžování zbytků segmentů prostým tlakem (L – levá část, P – pravá část)

Segment	Množství drátků (kg/m ³)	Síla při vzniku první trhliny (kN)	Síla při vzniku trhliny přes celou tloušťku (kN)	Max. dosažená síla (kN)
K	50	4200	4200	7247
S1 – L	40	6000	6000	6600
S2 – L	50	4800	4800	7500
S3 – L	40	6000	6000	6600
S3 – P	40	6000	6000	7480
S4 – L	50	5400	6000	8300
S4 – P	50	6000	6600	7900

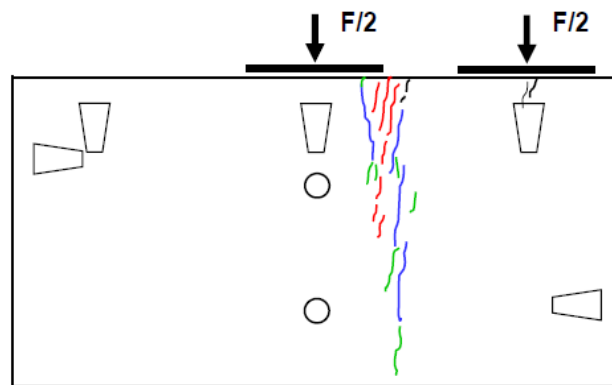


Obrázek 6. Rozštípnutí zbytku segmentu příčnými tahy

5 ZATÍŽENÍ V PROSTÉM TLAKU DVĚMA BŘEMENY

Při dané zkoušce byly segmenty zkoušeny v tlaku, zkouška simulovala zatížení ostění lisy tunelovacího štítu, při kterém je směr působící síly rovnoběžný s podélnou osou tunelové trouby. Zkoušky byly provedeny s působením dvou sil (simulace dvou lisů pomocí masivního roznášecího nosníku – obr. 7). Vzhledem ke způsobu uložení segmentu do zkušebního stroje působily síly svisle. Segmenty byly na vozík zkušebního stroje položeny včetně sololitových desek bez těsnících pásek. Na horní tlačnou plochu byla osazena 1 deska z novoduru tloušťky 9 mm a 1 deska z ocelového plechu P20 odpovídající dosedacím plochám lisů štítu. Působící síly byly navyšovány v rovnoměrných přírůstcích 1200 kN, po každém navýšení zatěžovací síly byly segmenty odtíženy na 400 kN. Síly byly navyšovány až do vyčerpání kapacity segmentu. Během zkoušky byly zaznamenávány vzniklé trhliny. Celkem byly zkoušeny 2 drátko-

betonové segmenty A3. Výsledky zkoušek jsou patrné z tab. 3.



Obrázek 7. Segment zatížený v prostém tlaku dvěma břemeny

Tabulka 3. Výsledky zatěžování drátkobetonových segmentů prostým tlakem

Segment	Uspořádání	Množství drátků kg/m ³	Vznik první trhliny (kN)	Síla při vzniku trhliny přes celou tloušťku (kN)	Max. dosažená síla (kN)
A3-S5	2x F/2	40	3600	6000	9000
A3-S6	2x F/2	50	3600	6000	9300

Uspořádání zkoušky bylo obdobné jako v předchozím případě, proto byl obdobný i charakter porušení. Zásadní výhodou této zkoušky byla možnost sledování namáhání segmentu v prostoru mezi zatěžovanými místy. Pro tento prostor byl charakteristický vznik tahových namáhání. Trhliny (nejčastěji jedna malá trhlina) se v této části objevily v raných fázích zatěžování. S rostoucím zatížením se již trhlina nerozevírala, omezovala se výhradně na okraj segmentu a rovněž nebyla významná pro snížení únosnosti prvku. Vznik trhliny mezi zatěžovacími místy byl pouze lokální záležitostí a to přesto, že tato trhlina vznikala jako jedna z prvních. Další rozvoj trhlin byl prakticky identický s případem, kdy bylo zatěžo-

váno jen jedno místo, pouze probíhal téměř paralelně pod oběma zatěžovacími místy. Obvykle byl rozvoj trhlin v okolí jednoho zatěžovacího místa o jeden zatěžovací krok zdržen za druhým místem, což na rozdíl od teorie odpovídalo nahodilostem materiálových charakteristik i náhodné excentricitě zatížení. Zkouška končila možnostmi zatěžovacího stroje, který vyvine celkové zatížení do 9 MN, tedy na jedno zatěžovací místo připadala maximální síla 4,5 MN, což je nižší hodnota oproti únosnosti segmentu.

6 ZKOUŠKY ŽB SEGMENTŮ V PROSTÉM TLAKU

Při dané zkoušce byly zkoušeny v tlaku železobetonové segmenty. Zkouška simulovala zatížení ostění lisy tunelovacího štítu, při kterém je směr působící síly rovnoběžný s podélnou osou tunelové trouby. Některé zkoušky byly provedeny s působením jedné síly (simulace jednoho lisu), některé zkoušky byly provedeny s působením dvou sil (simulace dvou lisů). Vzhledem ke způsobu uložení segmentu do zkušebního stroje působily síly svisle. Segmenty byly na vozík zkušebního stroje položeny včetně sololitových desek bez těsnící gumy (pouze segment K byl zkoušen s těsněním) a na horní tlačnou plochu byla osazena 1 deska z novoduru tloušťky 9 mm a 1 deska z ocelového plechu P20 odpovídající dosedacím plochám lisů štítu. Působící síly byly navyšované v rovnoměrných přírůstcích, po každém navýšení zatěžovací síly byly segmenty odtíženy. Síly byly navyšované až do vyčerpání kapacity segmentu, při čemž během zkoušky byly zaznamenávány vznikající trhliny. Celkem bylo zkoušeno 7 železobetonových segmentů (2 x A1, A2, A3, K, B, C), všechny zkoušené segmenty byly vyztužené 105 kg/m³ prutové výztuže. Uspořádání zkoušek a výsledky zkoušek jsou patrné z tab. 4.

I když je tento příspěvek zaměřen především na segmenty s rozptýlenou výztuží, tak je jisté na místě uvést také porovnání se zkouškami železobetonových prvků. Zkoušky byly uspořádány identicky jako v případech drátkobetonových segmentů. Hodnoty zatížení při vzniku trhlin procházejících celou tloušťkou prvku jsou u železobetonových i drátkobetonových segmentů téměř shodné. Rovněž únosnost klasického železobetonového segmentu je srovnatelná s drátkobetonovým, nicméně způsob porušení je zcela odlišný. Železobetonový segment byl ve všech dosud testovaných případech porušen v ploše rovnoběžné se střednicovou plochou. Došlo tedy k delaminaci materiálu, kdy se při vyčerpání únosnosti oddělila krycí vrstva a uvnitř prvku vzniklo jádro beto-

nu sevřeného výztuží (obr. 8). Při krytí výztuže 5 cm a tloušťce segmentu 25 cm mělo jádro tloušťku pouhých 15 cm.

Tabulka 4. Výsledky zatěžování železobetonových segmentů prostým tlakem

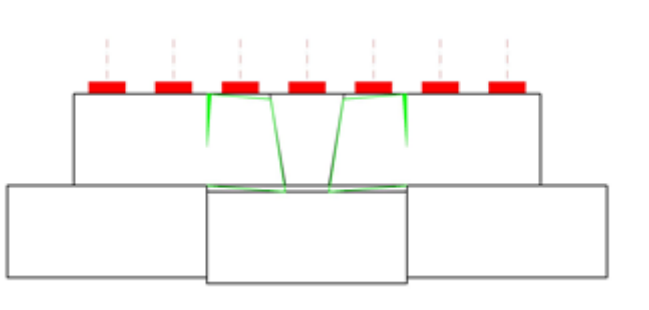
	Uspořádání	Výztuž kg/m ³	Přírůstek síly (kN)	Snižování síly na (kN)	Vznik první trhliny (kN)	Trhlina přes celou tloušťku (kN)	Max. síla (kN)
K	1x F	105	300	90	3300	3300	5868
B	1x F	105	600	200	5400	5400	8448
C	2xF/2	105	1000	300	6000	6000	8608
A1	1xF	105	600	200	4800	4800	7235
A2	2xF/2	105	1200	400	4800	5800	-
A1	1x F	105	600	200	5400	5400	7260
A3	2xF/2	105	1200	400	6000	7200	8960



Obrázek 8. Delaminace železobetonových segmentů zatížených prostým tlakem

7 ZATÍŽENÍ OHYBEM V ROVINĚ SEGMENTU

Při dané zkoušce byly segmenty zkoušeny v ohybu v rovině segmentu, zkouška simulovala zatížení ostění lisy tunelovacího štítu při nerovnoměrném podložení segmentů (tj. simulace posunuté geometrie předchozího prstence) (obr. 9). Segmenty byly zatíženy jedním břemenem umístěným na kraji segmentu. Opačný okraj segmentu byl uchycen, aby bylo zabráněno svislému posunu. Dále byl segment nesymetricky podložen na straně uchycení tak, aby zatěžovaná polovina segmentu nebyla podepřena. Působící síla byla zvyšována s přírůstkem 100 kN bez odtěžování až do vyčerpání kapacity. Daným způsobem bylo zkoušeno 6 segmentů A (4 drátkobetonové se 40 a 50 kg/m³ drátků, 2 železobetonové se 105 kg/m³ výztuže). Výsledky zkoušek jsou patrné z tab.5.

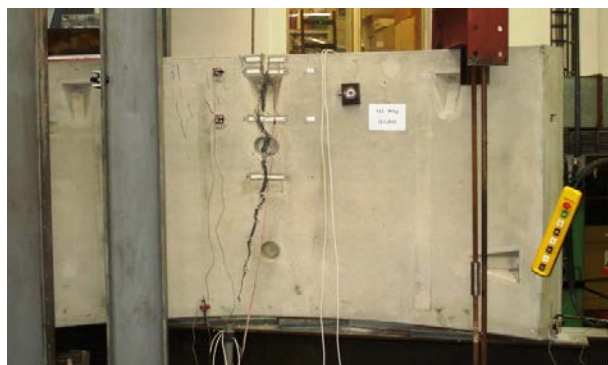
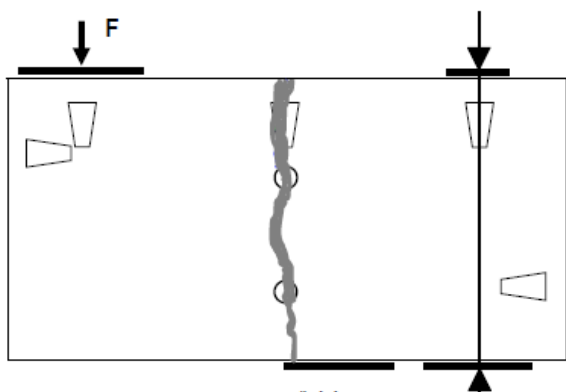


Obrázek 9. Grafické znázornění nerovnoměrného podepření segmentů

Tabulka 5. Výsledky zatížení segmentů ohybem v rovině segmentu

Segment	Výztuž kg/m ³	Vznik první trhliny (kN)	Vznik trhliny přes celou tloušťku (kN)	Max. dosažená síla (kN)
A3-S11	50	200	400	500
A3-S12	50	300	560	753
A3-S13	40	300	530	629
A3-S14	40	300	500	610
A1-S15	105	300	370	610
A2-S16	105	200	350	991

Uvedené zkoušky byly charakteristické nízkými hodnotami sil při nichž začaly vznikat trhliny. Trhliny se lokalizovaly v prostoru nad nikou pro šroub a pak se dále šířily směrem dolů. U segmentů vyrobených z drátkobetonu bylo možné pozorovat vznik řady nepatrných trhlin z nichž se jedna postupně rozevírala a následně došlo ke ztrátě únosnosti (obr. 10). Železobetonové segmenty byly porušeny odlišně, vznikla jedna trhлина, která se rozevírala a začala se větvit teprve při dosažení vysokého zatížení. Meze únosnosti nebylo dosaženo, avšak takto zatížený prvek by byl zcela nevyhovující (s ohledem na rozevření trhlin v ostění).



Obrázek 10. Porušení drátkobetonového segmentu zatížením ohybem v rovině segmentu

Charakter odezvy na zatížení byl u zkoušených materiálů zcela odlišný, ovšem z hlediska použitelnosti lze považovat materiály za srovnatelné.

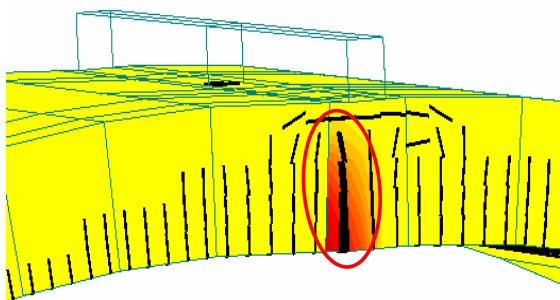
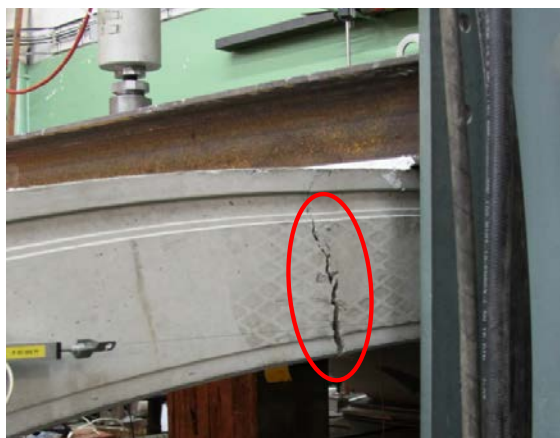
Obecně lze v případě obou materiálů konstatovat, že segmenty jsou křehké a náchylné na porušení již při nízkých silách. Vznik trhlin při 300 kN a propagace trhlin na plnou tloušťku segmentu při 500 kN znamená v porovnání s návrhovým zatížením 2400 kN značné problémy použitelnosti segmentů. Tomu odpovídá deformace (průhyb ohýbaného prvku) cca 1 mm při vzniku trhlin a cca 2 mm při vzniku trhlin na plnou tloušťku prvku, což jsou hodnoty velmi nízké. Průhyb na mezi únosnosti drátkobetonových prvků se pohyboval kolem 6 mm. Tuhost ostění jako podpory pro přítlak stroje je poměrně nízká, neboť se mohou dotlačovat spoje těsněné gumovými pásky. Z výsledků experimentu vyplývá, že rozdíl v poloze (zatlačení) dvou sousedních segmentů 1-2 mm znamená tedy značné riziko vzniku trhliny v segmentu, která při propagaci na celou tloušťku segmentu může ovlivnit vodonepropustnost ostění. Během ražby je proto nezbytné zajistit rovnoměrné podepření zatěžovaných segmentů, což znamená co nejpřesnější instalaci ostění, aby nedošlo ke vzniku trhlin. Uvedený faktor by měl být také zohledněn při návrhu uspořádání segmentů, které může být v porovnání s posuzovaným uspořádáním výhodnější.

8 ZPĚTNÉ NUMERICKÉ VÝPOČTY

Modely tunelových segmentů zkoušených v Kloknerově ústavu ČVUT byly souběžně analyzovány metodou konečných prvků s využitím nelineárních materiálových modelů betonu, výztuže a drátkobetonu. Pro numerickou simulaci odezvy a porušování segmentů podrobených různým typům zatížení dle výše uvedených schémat byl použit komerční software ATENA.

Nelineární numerická analýza modelu segmentu umožňuje podrobně sledovat porušování zkoumaného vzorku, zejména vznik a rozvoj tahových trhlin, stanovit jeho únosnost, duktilitu a další jevy během procesu zatěžování, a zachytí rovněž pokritické chování modelu po překročení mezního zatížení. Přitom je možno průběžně vyhodnocovat řadu charakteristik modelu, jako jsou pole hlavních napětí či přetvoření v betonu či drátkobetonu, šířky trhlin, plastické protažení výztuže apod. Takové podrobné sledování odezvy zkoušeného dílce je v reálném experimentu prakticky nerealizovatelné.

Byly analyzovány tunelové segmenty zhotovené jak z klasického železobetonu, tak i z drátkobetonu s různým obsahem drátků. Mechanické vlastnosti betonu a drátkobetonu byly získány z doprovodných materiálových zkoušek, u drátkobetonu zčásti zpětnou identifikací z výsledků zkoušek drátkobetonových trámčů ve čtyřbodovém ohybu.



Obrázek. 11. Porovnání lokalizace trhlin při experimentu a počítačové simulaci, drátkobetonový segment zatížený ohybem kolmým na rovinu segmentu

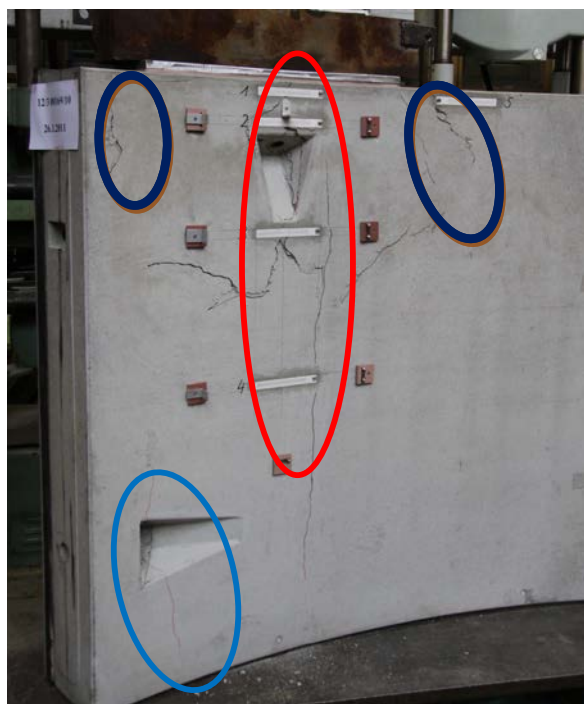
Numerická analýza a její výsledky byly v souvislosti s realizovaným experimentálním programem využity v několika souvislostech:

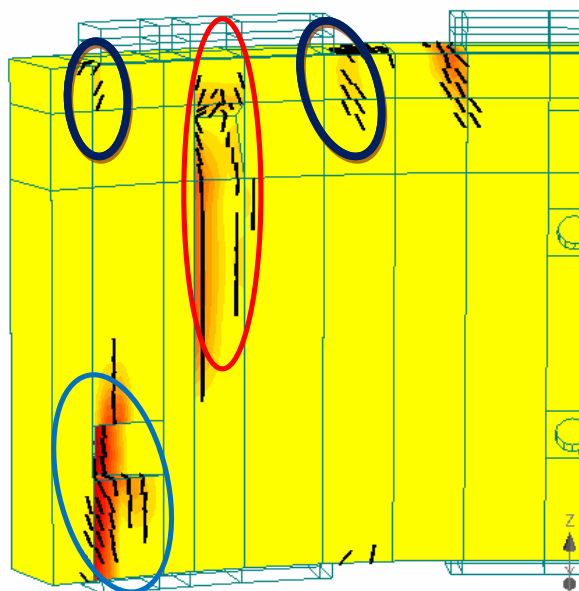
1. Bylo ověřeno, že materiálové charakteristiky drátkobetonu získané z doprovodných zkou-

šek umožňují dobře vystihnout chování konstrukčních dílců vyrobených z drátkobetonu.

2. Při dosažené velmi dobré shodě numerické analýzy s provedenými experimenty bylo možné na numerickém modelu podrobněji sledovat odezvu chování těles a materiálu, zejména ve fázi jeho poškozování.
3. Na modelech bylo možno vzájemně porovnat chování a charakter porušování segmentů vyrobených z klasického železobetonu a z drátkobetonu, případně vliv množství přidávaných ocelových drátků.
4. Složitější experimenty (zatížení ohybem v rovině segmentu) byly nejprve simulovány na numerickém modelu, aby se předem stanovily potřebné charakteristiky (tuhosti, zatěžovací kapacita) zatěžovacího mechanismu a uložení tělesa.

Na obr. 11 a 12 jsou prezentovány numerické modely pro jednotlivé varianty uspořádání zatěžovacích zkoušek, získané odezvy modelů (zatěžovací křivky), a způsoby porušení modelu segmentu. Porovnání s výsledky experimentů ukazuje vynikající shodu numerické simulace se skutečností.





Obrázek 12. Porovnání lokalizace trhlin při experimentu a počítačové simulaci, železobetonový segment zatížený prostým tlakem

9 ZÁVĚR

Provedené experimentální testování drátkobetonových a železobetonových segmentů přineslo velké množství velmi cenných informací. Přírodně nejdůležitější byly informace o únosnosti segmentů (velikost maximálního zatížení, které segmenty přenesou) a o použitelnosti segmentů (vznik prvních trhlin, propagace trhliny přes celou tloušťku segmentu) při různých způsobech zatěžování. Výsledky výzkumu prokázaly, že ostění vyrobené z drátkobetonu ve specifikovaných podmínkách může nahradit ostění železobetonové. Z hlediska mezního stavu použitelnosti lze spatřovat určité výhody ve větším rozptýlení trhlin, což vede k menšímu riziku ovlivnění vodopropustnosti.

Obdobně byly také značným přínosem zkušenosti s technologií výroby drátkobetonových segmentů, která v porovnání s tradičními železobetonovými segmenty přináší řadu problémů, které bylo nutné vyřešit. Obecně lze konstatovat, že množství drátků 50 kg/m^3 a 40 kg/m^3 vede k mechanickým vlastnostem, které jsou srovnatelné. S ohledem na malé množství zkoušek nelze výsledky věrohodně statisticky vyhodnotit a porovnat. Lze však usuzovat, že při použití většího množství drátků nastávají větší problémy s rovnoměrným rozptýlením drátků v betonu. Tento technologický problém je nutné řešit během běžné velkovýroby betonu s využitím profesionálních dávkovacích a rozptylovacích zařízení pro drátky. Drátky během výroby betonových vzorků pro experimenty byly dávkovány ručně, kdy lze jen stěží za-

jistit reprodukovatelnost výrobku se stejným výsledkem.

V oboru segmentového ostění se jednalo o první ucelený soubor experimentálních výsledků na moderních tunelových segmentech skutečné velikosti v ČR. Ukazuje se, že odezva na zatížení segmentů má zcela jiný charakter než u malých vzorků (tj. testovací trámce délky 70 cm). Nelze tedy výsledky experimentu na malých vzorcích aplikovat na celé konstrukce jednoduchými výpočetními postupy (teorie pružnosti).

Na základě provedených zkoušek byly provedeny i zpětné numerické výpočty pomocí metody konečných prvků v programu ATENA (Havlásek a kol. 2011), které umožnily odvození některých důležitých parametrů zkoušeného materiálu. Pro zodpovědnou numerickou analýzu je třeba využít dostatečně sofistikované analytické vybavení zohledňující energetické principy modelování rozvoje trhlin. Realizovaný komplexní soubor experimentů vedl k získání dat pro výpočty, kterými by bylo možné spolehlivě modelovat odezvu reálných prvků na požadované zatížení. Výsledky experimentu podpořily fakt, že na návrh segmentů je třeba pohlížet velmi komplexně a vzít v úvahu řadu návrhových faktorů. Úzký a jednostranný pohled na problematiku vede k zanedbání některých vlivů, které pak mohou komplikovat proces provádění i dosažení požadovaných užitných vlastností prefabrikovaného ostění tunelu.

Po zohlednění výsledků provedeného výzkumu bylo rozhodnuto, že vyrobené drátkobetonové segmenty splňují veškeré požadavky kladené na ostění pražského metra. Mohly být proto vyrobeny a smontovány prstence (v počtu 10 prstenců tj. 15 bm tunelu) zkušebního úseku ostění v trase A pražského metra z drátkobetonových segmentů (s dávkováním drátků 40 kg/m^3). Dané ostění bylo instalováno na traťovém tunelu uvedené stavby v červnu 2012 (obr. 13). Po prohlídce osazeného zkušebního úseku bylo ověřeno, že na daných segmentech nevznikly žádné trhliny.

Tento příspěvek byl zpracován s podporou grantů GAČR P104/10/2023, TAČR TA01011816 a TA01031840



Obrázek 13. Segmentové ostění trat'ového tunelu trasy A pražského metra

REFERENCE

[1] Vokáč, M.; Bouška, P.: Experimentální zkoušky segmentů prefabrikovaného ostění metra, Kloknerův ústav ČVUT v Praze, 2011

[2] Vokáč, M.; Bouška, P.: Experimentální zkoušky segmentů z drátkobetonu prefabrikovaného ostění metra, Kloknerův ústav ČVUT v Praze, 2011

[3] Hilar, M., Beňo, J.: Segmentová ostění tunelů z drátkobetonu. Tunel 3/2012.

[4] Vodička, J., Krátký, J., Hilar, M., Ráček, V.: Structural SFRC for Precast Segments of the Tunnel Lining. 8th Central European Congress on Concrete Engineering "Durability of Concrete Structures". Plitvice 2012.

[5] Hilar, M., Vítek, J., Vítek, P.: Testing of SFRC Tunnel Segments. Proceedings of the World Tunnelling Congress, Bangkok 2012, s. 311-313.

[6] Sajdlová, T., Pukl, R.: Identifikace materiálových parametrů pro nelineární modelování drátkobetonových konstrukcí. Betonářské dny 2011.

[7] Havlásek, P., Pukl, R., Červenka, V.: Počítačová simulace testů železobetonových a drátkobetonových tunelových segmentů. Betonářské dny 2011.

[8] Froněk, M.: Ostění tunelů z vláknobetonových segmentů. Bakalářská práce. FSv ČVUT v Praze. 2011.

[9] Vítek, P., Šebesta, B.: Segmentové ostění tunelů metra. Betonářské dny 2010.