

EXPERIMENTÁLNÍ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY DRÁTKOBETONOVÝCH A ŽELEZOBETONOVÝCH PREFABRIKOVANÝCH SEGMENTŮ PRO OSTĚNÍ TUNELŮ

EXPERIMENTAL LOADING TESTS OF STEEL FIBRE REINFORCED AND TRADITIONALLY REINFORCED PRE-CAST CONCRETE SEGMENTS FOR TUNNEL LININGS

MATOUŠ HILAR, PETR VÍTEK

1 ÚVOD

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 (Hilar, Beňo, 2012). V České republice nyní probíhá výzkum zaměřený na problematiku drátkobetonových segmentů, aby danou technologii bylo možné využít i na českých tunelech. V úvodních fázích výzkumu byla vyrobena a odzkoušena řada vzorků pro porovnání a výběr vhodného složení drátkobetonové směsi (Vodička a kol., 2012). Byl porovnáván vliv různého dávkování drátků i různých typů drátků na výsledné chování drátkobetonu. Vlastnosti vzorků byly laboratorně zkoušeny a vyhodnoceny (pevnost v prostém tlaku zkoušená na krychlích, ohybová pevnost zkoušená na trámčích). Některé parametry drátkobetonu byly zpětně odvozovány pomocí pokročilého numerického modelování metodou konečných prvků v programu ATENA (Sajdlová, Pukl, 2011). V Kloknerově ústavu ČVUT v Praze byly zkoušeny železobetonové a drátkobetonové segmenty (Vokáč, Bouška, 2011). Výsledky provedených zkoušek jsou prezentovány v následujícím článku.

2 TYPY ZKOUŠEK

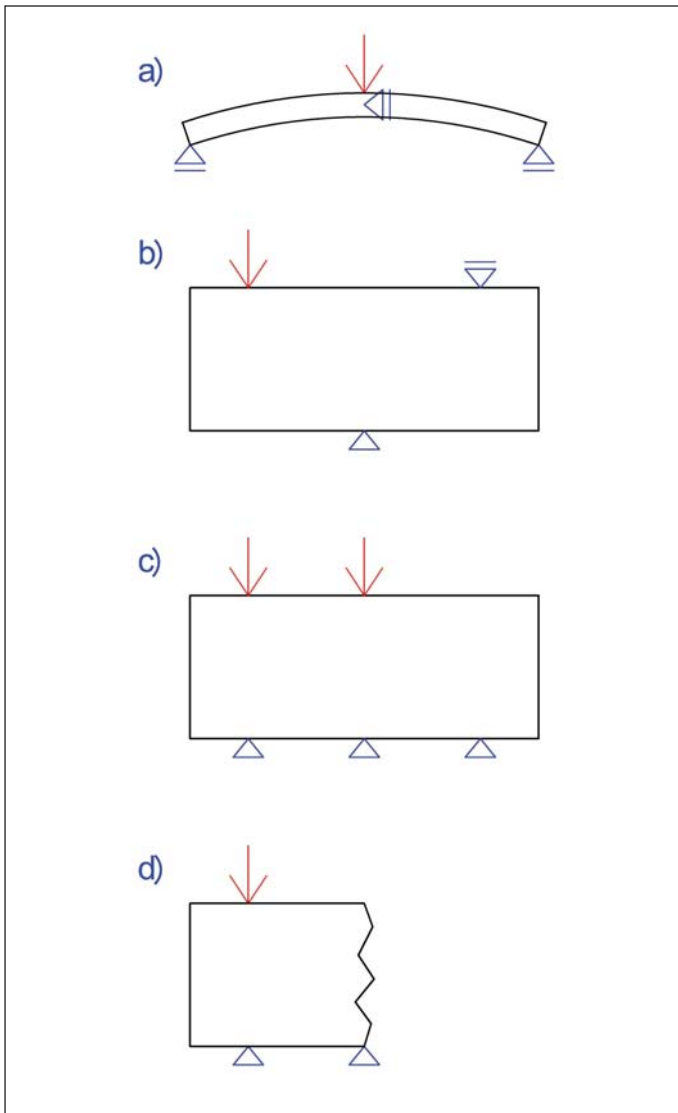
Kromě testování malých vzorků zejména trámčů, jejichž testování se běžně realizuje již řadu let, byl nyní uskutečněn komplexní soubor testů na reálných prvcích skutečné velikosti. Přestože jsou segmenty tunelového ostění vystaveny účinkům řady zatěžovacích stavů (např. manipulace, skladování, doprava, 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 horninového masivu) hraje daný zatěžovací stav často rozhodující roli při návrhu segmentů. I vzhledem k tomuto faktu

1 INTRODUCTION

Segmental tunnel lining is usually applied to mechanised tunnelling using full-face tunnelling shields (the TBM technology). Pre-cast steel fibre reinforced segments are currently used in praxis, containing no traditional rod reinforcement (Hilar, Beňo, 2012). In the Czech Republic, there is a research underway focused on problems of steel fibre reinforced segments so that this technology can be applied even to Czech tunnels. A variety of samples were produced and tested in the initial phases of the research, serving for the comparison and selection of suitable composition of steel fibre reinforced concrete mixture (Vodička et al., 2012). The influence of different dosing of steel fibres on the resultant behaviour of steel fibre reinforced concrete was subjected to comparison. The properties of steel fibres were laboratory tested and assessed (unconfined compressive strength tested on cubes, flexural strength tested on beams). Some parameters of steel fibre reinforced concrete were derived backward by means of advanced numerical modelling using the Finite Element Method in the ANTENA simulator (Sajdlová, Pukl, 2011). Traditionally reinforced concrete segments and SFRC segments were tested by the Klokner's Institute of the Czech Technical University in Prague (Vokáč, Bouška, 2011). The results of the completed tests are presented in the paper below.

2 TYPES OF TESTS

Apart from the testing of small samples, first of all beams, the testing of which has been commonly conducted for a number of years, a comprehensive set of tests on real elements with real sizes was carried out at present. Although segments of tunnel linings are exposed to effects of a range of loading cases (e.g. handling, storing, transport, installation, final loading), measures are being introduced in praxis designed to make only some of them deciding for the dimensioning of the pre-cast elements. Naturally, the load induced by rock mass is the principal design load. With respect to the waterproofing capacity of a segmental lining, even the hydrostatic pressure can play important role, first of all when the water table is above the tunnel level. The above-mentioned loading cases are in action throughout the design life of the structure. Another significant loading factor is the thrust of a tunnelling shield, which is pressed into rock mass by means of hydraulic rams pushing against assembled lining rings. It is true that this is a temporary construction condition and short-term loading, which should not be significant as far as the as economic as possible design is concerned.



Obr. 1 Provádění 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

Fig. 1 Conducted tests – a) segment bending perpendicularly to the segment plane, b) segment bending in the segment plane, c) unilateral pressure on the segment induced by two loads, d) unilateral pressure induced by a single load acting on remains of segments

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):

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). Ačkoli ve skutečnosti jsou tunelová ostění namáhána normálovou silou, pro účel zkoušení byl zvolen staticky jednodušší model, aby výsledky byly snáze interpretovatelné a poskytlly vhodnější podklady pro numerickou analýzu. Kombinaci s normálovým zatížením ostění lze následně relativně snadno modelovat v numerickém výpočtu.

B) Simulace zatížení axiálními lisami štítu – ideální stav:

Jak již bylo zmíněno, zatížení lisami štítu zajišťujícími potřebný přítlak stroje na čelbě je pro návrh segmentů jeden z rozhodujících zatěžovacích stavů. Je zapotřebí mít jasnou

However, with respect to the anticipated high values of the thrust force of the machine (depending on the predicted geotechnical properties of rock mass), the particular loading case often plays the deciding role in designing segments. It is also with respect to this fact that the full-face TBM technology must be assessed as a whole; the required higher loading capacity is compensated for by numerous advantages.

The following three types of tests were proposed for the simulation of deciding design conditions (see Fig. 1):

A) Simulation of the rock mass induced loading:

A segment is loaded by bending in a plane perpendicular to the segment surface. The segment is placed in the position of a vault (inverted 'U') on movable supports; a linear load acts on the top of the vault. The movable supports mean that only a pure bending load acts, without the influence of a normal force (see Fig. 1a). Despite the fact that tunnel linings are in reality loaded by normal forces, a statically simpler model was chosen for the purpose of the testing, so that the results were easier to interpret and provided more suitable grounds for a numerical analysis. A combination containing the normal loading acting on the lining can be subsequently relatively easily modelled in a numerical calculation.

B) Simulation of loading induced by axial rams on the shield – an ideal condition:

As mentioned above, the loading induced by rams on the shield providing the required thrust of the machine against the excavation face is one of the loading cases deciding for the segment design. It is necessary to have clear information about the load under which cracks start to develop and the moment at which they start to propagate throughout the lining thickness. Despite the fact that the loading capacity of a segment can be sufficient, a crack running throughout the segment thickness means that the lining is permeable for water, which naturally is unacceptable. The test is arranged in a way where the segment is loaded by a pressure inside the central plane. With respect to the capability of the loading equipment (maximum force of 10 MN – 1000 t), the test was composed in two variants, namely with the loading by a single load (see Fig. 1b) with the possibility of reaching the total load-bearing capacity of the element, and the loading by two loads (see Fig. 1c) without the possibility of reaching the loading capacity of the element.

C) Simulation of loading induced by axial rams on the shield – non-uniform bearing of the segment:

Segments in lining rings are bonded in a way similar to brickwork. This system brings many advantages, including the increase in the rigidity of the lining. When the loading by the tunnelling shield is being applied, the loading force is transmitted to two segments of the previous ring. If the state occurs where the segmental lining is not assembled geometrically accurately, the segment being loaded by rams is supported non-uniformly. In the case being assessed, one segment is exposed to loading in 3 points (the simulation of 3 rams) and is placed on 3 supports. With respect to the fact that a statically indeterminate structure is in substance in question, the element is loaded by bending when a support drops. The test is adjusted to this fact. The segment is fixed on two supports and the side support is omitted; it is loaded by a single load acting in the central plane in the end point of application (see Fig. 1d). The element is therefore loaded as a high cantilever.

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.

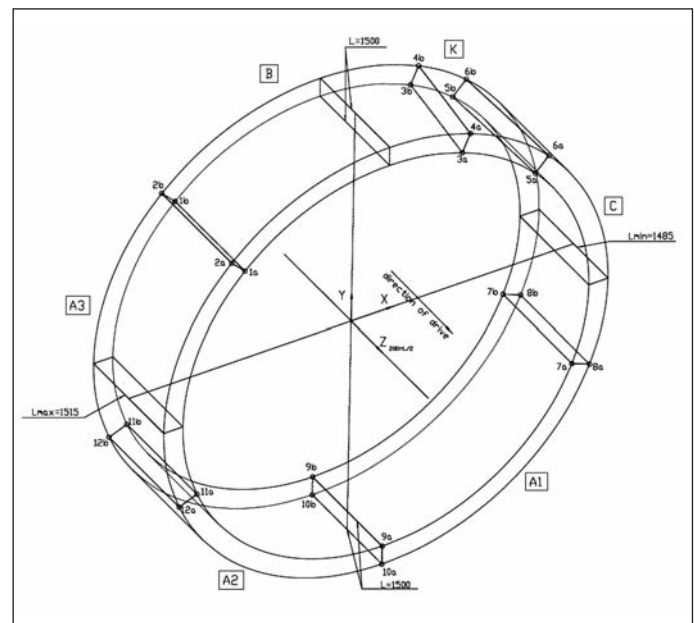
C) Simulace zatížení axiálními lisy štítu – nerovnoměrné uložení segmentu:

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 zatěžován 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 přízpusobena 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.

3 ZKOUŠENÉ SEGMENTY

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 pásků, 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.



Obr. 2 Geometrie segmentů v prstenci ostění
Fig. 2 Geometry of segments in a lining ring

3 TESTED SEGMENTS

The pre-cast segments for the loading tests were produced using moulds for the production of segments for mechanised excavation of running tunnels of the Prague metro Line A extension. The geometry of the segments is presented in Fig. 2. The lining ring has the inner diameter of 5.3 m and outer diameter of 5.8 m and thickness (of segments) of 0.25 m. One lining ring is 1.5 m long (the width of one segment). The shape of all segments is identical. Vertical views of completed rings are trapezoidal. The straight alignment of the tunnel as well as changes in its direction (horizontal and vertical curves) can be secured by rotating the rings against each other around the axis. Three largest segments (A1, A2 and A3) have parallel edges of radial joints, whilst other two segments of a similar size (B and C) are angled on the key side and the closing segment (the key) has angled radial edges on both sides and its size is about one third of the other segments. The segments are interconnected with bolts (both longitudinally and transversally). For that reason each segment has holes and boxes for the installation of bolts. The waterproofing of the lining is secured by means of rubber gaskets installed in peripheral grooves in each segment. The annular gap between the outer side of the ring and the excavated tunnel wall is concurrently backfilled with grout.

During the course of the construction, each lining ring is loaded by 16 pairs of hydraulic rams located in the rear section of the tunnelling shield. The rams are uniformly distributed around the circumference (the angle of rotation of 22.5°). Each of the five large segments is loaded by 3 pairs of rams, whilst only one pair of rams acts against the key. Two rings were produced for the testing purposes using steel fibre reinforced concrete (SFRC) without traditional reinforcement, with the doses of steel fibres of 40 kg/m³ and 50 kg/m³. Common steel bar reinforced concrete segments with 105 kg/m³ of the reinforcement were also tested to allow comparison. The values of the acting forces, the magnitude of deformations measured by installed potentiometric path transducers and signals from the strain gauges glued to the surface of segments were recorded during the testing.

A hydraulic testing press Amsler 10000 kN 1523 (metrology number KÚ S 07 010 M) was used for the testing. The



Obr. 3 Segment zatížený ohybem kolmým na rovinu segmentu
Fig. 3A segment loaded by bending perpendicular to the segment plane

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.

4 ZATÍŽENÍ SEGMENTŮ 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 zabráňovaly 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

values of acting forces, the magnitude of deformations measured by installed potentiometric path NOVOTECHNIK TR10 a TR25 were recorded during all tests. In addition, signals from X350-type Mikrotechna strain gauges with the grid length of 100 mm, which were glued to the surface of segments, were recorded. A PEEKEL Autolog 2100 data logger was used for data collection.

4 SEGMENT LOADING BY BENDING PERPENDICULAR TO SEGMENT PLANE

During the course of the particular test, segments were subjected to bending perpendicular to the segment plane. The test simulated the loading by bending moments during handling, transport, storing and loading by the pressure induced by ground mass. Segments were placed with the curved surface upward (see Fig. 3); bottom edges were supported by sliding supports allowing horizontal movement and preventing vertical movement. The uniformly distributed load, acting on segments throughout the length of the top of the vault, induced controlled vertical deformation. This means that the loading force introduced by the hydraulic cylinder was adjusted with the aim of regular, evenly increasing of the deformation on the loading ram cylinder. This means that the loading force initially grew and subsequently, after the origination of cracks, was reduced until the capacity was exhausted (i.e. until the moment of breaking). The entire sophisticated system was controlled by a computer with a special software. Undisputable advantage of the loading through “controlled deformation” was the fact that a complete diagram, including the descending branch, was obtained. The decision to terminate the test was made only when the element no more supported its own weight. The above procedure was applied to 4 steel fibre reinforced segments A3. The test results are presented in Table 1.

Petty cracks started to appear in a strip with variable width on the bottom face of the segment before the maximum loading force was reached. They gradually developed and subsequently localised themselves in a single crack (see Figures 4 and 5). This crack gradually opened, with a corresponding decrease in the loading force. It was possible during the course of the process of the crack opening to directly observe steel fibres being gradually pulled out. Typical spreading of cracks in the SFRC was registered, characterised by a number of thin cracks developing in the close vicinity of the most stressed cross section and one of them later propagating itself further.

Tab. 1 Výsledky zatížení segmentů ohybem kolmým na rovinu segmentu
Table 1 Results of segments loading by bending perpendicular to the segment plane

Segment Segment	Množství drátků (kg/m ³) Amount of steel fibres (kg/m ³)	Přírůstek síly (kN) Increments in force (kN)	Snižování zatížení na hodnotu (kN) Load decreasing to the value of (kN)	Maximální dosažená působící síla (kN) Maximum acting force reached (kN)
A3 – S1	40	kontinuálně continually	neodtěžováno not unloaded	115
A3 – S2	50	kontinuálně continually	neodtěžováno not unloaded	106
A3 – S3	40	kontinuálně continually	neodtěžováno not unloaded	124
A3 – S4	50	kontinuálně continually	neodtěžováno not unloaded	154

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

Table 2 Results of uniaxial compression of the remainders of segments (L – left-hand part, R – right-hand part)

Segment	Množství drátků (kg/m ³),	Přírůstek síly (kN)	Snižování zatížení na hodnotu (kN)	Síla při vzniku první trhliny (kN),	Síla při vzniku trhliny přes celou tloušťku segmentu (kN)	Maximální dosažená působící síla (kN)
Segment	Amount of steel fibres (kg/m ³)	Increments in force (kN)	Load decreasing to the value of (kN)	Forignation of first crack (kN)	Force at the origination of crack throughout segment thickness (kN)	Maximum acting force reached (kN)
K	50	300	90	4200	4200	7247
S1 – L	40	600	200	6000	6000	6600
S2 – L	50	600	200	4800	4800	7500
S3 – L	40	600	200	6000	6000	6600
S3 – P	40	600	200	6000	6000	7480
S4 – L	50	600	200	5400	6000	8300
S4 – P	50	600	200	6000	6600	7900

deformací“ bylo získání celého pracovního diagramu včetně sestupné 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.

Před dosažením maximální zatěžovací síly se v pásu průměrné 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 rozvíření trhliny bylo možné přímo v trhlíně sledovat postupné vytahování drátků. Bylo zaznamenáno typické šíření trhlín v betonu s rozptýlenou výztuží, kdy se v těsném okolí nejvíce namáhaného průřezu vytváří řada velmi tenkých trhlín, 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 rozptylu 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.

5 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. 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 trhlín na

Another interesting thing is that the highest and lowest values of the loading capacity were reached on samples reinforced with 50 kg/m³ of fibres, whilst samples reinforced with 40 kg/m³ exhibit similar loading capacity. The values were always obtained only on two samples, it is therefore impossible to consider them to be statistically significant. In spite of that, an explanation offers itself that concrete with the amount of steel fibres of 50 kg/m³ is already more difficult to mix and it is therefore more difficult to secure even dispersing of steel fibres and large scattering of the loading capacity values therefore occurs. It is likely that, in the case of the conducted tests, one segment with very favourably dispersed fibres was tested, whilst the dispersion in the other segment was very unfavourable. The term ‘favourable’ is used instead of ‘even’ on purpose. The high loading capacity can be caused by the concentration of steel fibres at the bottom surface of the element, i.e. in the tensioned area. This may be caused, for example, by intense vibration. It is therefore not an entirely favourable phenomenon because of the fact that it is possible to presume on the contrary that the loading capacity in the case of the opposite direction of loading (tensioning in the upper part of the element) will be proportionally reduced. In reality, segments are loaded in both directions.



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

Fig. 4 A segment loaded by bending perpendicular to the segment plane (plan of the underside)



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

Fig. 5 A segment loaded by bending perpendicular to the segment plane after becoming disturbed (side view)

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

6 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 těsnicích pásků. Na horní tlačnou plochu byla osazena jedna deska z novoduru tloušťky 9 mm a jedna deska z ocelového plechu P20 odpovídající dosedacím plochám lisů štítu. Působící síly byly navyšovány v rovnoměrných přírůstcích, po každém navýšení zatěžovací síly byly segmenty odtíženy. Síly byly navyšovány až do vyčerpání kapacity segmentu. Během zkoušky byly zaznamenávány vzniklé trhliny. Celkem byly zkoušeny 2 drátkobetonové segmenty A3. Výsledky zkoušek jsou patrné z tab. 3.

Tab. 3 Výsledky zatěžování drátkobetonových segmentů prostým tlakem
Table 3 Results of uniaxial compression of SFRC segments

Segment	Uspořádání	Množství drátků (kg/m ³)	Přírůstek síly (kN)	Snižování zatížení na hodnotu (kN)	Vznik první trhliny (kN)	Vznik trhliny přes celou tloušťku segmentu (kN)	Maximální dosažená působící síla (kN)
Segment	Arrangement	Amount of steel fibres (kg/m ³)	Increments in force (kN)	Load decreasing to the value of (kN)	Origination of first crack (kN)	Origination of crack throughout segment thickness (kN)	Maximum acting force reached (kN)
A3 – S5	2 x F/2	40	1200	400	3600	6000	9000
A3 – S6	2 x F/2	50	1200	400	3600	6000	9300



Obr. 6 Rozštípnutí zbytku segmentu příčnými tahy

Fig. 6 A segment remain split by transverse tensions

5 LOADING BY UNIAXIAL COMPRESSION APPLIED TO REMAINS OF SEGMENTS

The particular testing was conducted on the remains of segments which originated during the segment loading by bending perpendicular to the segment plane. The remains of the segments were loaded by uniaxial compression in the vertical direction. The acting force was being increased with 600 kN increments and the remaining segment was unloaded between individual loading stages down to the value of 200 kN. The remainder of the segments was loaded until the loading capacity was exhausted. This particular method was applied to the testing of 6 remainders of segments and one segment K. The testing results are presented in Table 2.

In contrast to the previous test, the segment was loaded in a vertical position; the origination of cracks on both the inner and outer surface of the segment was therefore well observable. First cracks are localised on the inner surface, above the



Obr. 7 Segment zatížený v prostém tlaku dvěma břemeny
Fig. 7 A segment loaded by unilateral pressure induced by two loads

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 trhlinka) se v této části objevily v raných fázích zatěžování. S rostoucím zatížením se již trhlinka 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 trhlinka vznikala jako jedna z prvních. Další rozvoj trhlin byl prakticky identický s případem, kdy bylo zatěžováno 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 možností 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.

7 KOMPARATIVNÍ ZKOUŠKY ŽELEZOBETONOVÝCH SEGMENTŮ ZATÍŽENÍM 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

bolt box. Subsequently the cracks propagate themselves through the box, along one edge. It is evident that the weakening by the box acts in an unfavourable way and leads to the localisation of stress to edges. It is therefore possible to state that the angular shape of the boxes is improper; a rounded shape would have been more proper. During the course of further loading the cracks developed downward, in one or more strips under the box or slightly aside. All cracks were gradually opening and only then did one of them significantly localise itself. The element subsequently got split by transverse tensions in that particular location (see Fig. 6).

6 LOADING BY UNIAXIAL COMPRESSION INDUCED BY TWO LOADS

During this particular test, segments were tested in compression; the test simulated the loading induced on the lining by rams of the tunnelling shield, where the direction of the acting force is parallel with the longitudinal axis of the tunnel tube. The tests were carried out with two forces acting (the simulation of two rams by means of a solid distribution beam – see Fig. 7). Taking into consideration the placement of the segment in the testing machine, the forces acted vertically. The segments were placed on the carriage of the testing machine including solit boards without sealing gaskets. One 9 mm thick hardened PVC plate and one steel sheet P20 plate matching the area of contact of the shield rams were fitted to the upper compressed surface. The acting forces were increased in equal increments; after each increasing of loading forces, the segments were unloaded. The forces were increased until the loading capacity of the segment was exhausted. The cracks which originated during the test were recorded. In total, two SFRC segments A3 were tested. The testing results are presented in Table 3.

The test arrangement was similar to that used in the previous case, the character of the disturbance was therefore also similar. The principal advantage of this test was that it was possible to observe the segment stressing in the space between the points being subjected to loading. This space was characterised by the origination of tensile stresses. Cracks (most frequently one small crack) appeared in this part during the early phases of the loading process. The crack no more opened with the increasing load; it restricted itself solely to the edge of the segment. In addition, it was not significant for the reduction of the element load-bearing capacity. The origination of the crack between the points of loading was only a local matter, despite the fact that this crack originated as one of the first cracks. The subsequent development of cracks was virtually identical with the case where only a single point was loaded, with the only difference that it ran nearly in parallel under both loading points. The development of cracks in the surroundings of one loading point was usually delayed for one loading step. As opposed to theory, it corresponded to the accidental nature of material characteristics and the accidental eccentricity of the loads. The test ended when the capacity of the loading machine (the total load force of 9 MN) was exhausted. At that moment the maximum force attributed to one loading point reached 4.5 MN, which value is lower than the loading capacity of the segment.

7 COMPARATIVE UNIAXIAL COMPRESSION LOADING TESTS OF TRADITIONALLY REINFORCED CONCRETE SEGMENTS

These compression tests were conducted on traditionally reinforced concrete segments. The test simulated the lining loading by rams of the tunnelling shield, where the direction

Tab. 4 Výsledky zatěžování železobetonových segmentů prostým tlakem
Table 4 Results of uniaxial compression of traditionally reinforced concrete segments

Segment	Uspořádání	Množství drátků (kg/m ³)	Přírůstek síly (kN)	Snižování zatížení na hodnotu (kN)	Vznik první trhliny (kN)	Vznik trhliny přes celou tloušťku segmentu (kN)	Maximální dosažená působící síla (kN)
Segment	Arrangement	Amount of steel fibres (kg/m ³)	Increments in force (kN)	Load decreasing to the value of (kN)	Origination of first crack (kN)	Origination of crack throughout segment thickness (kN)	Maximum acting force reached (kN)
K	1 x F	105	300	90	3300	3300	5868
B	1 x F	105	600	200	5400	5400	8448
C	2 x F/2	105	1000	300	6000	6000	8608
A1	1 x F	105	600	200	4800	4800	7235
A2	2 x F/2	105	1200	400	4800	5800	–
A1	1 x F	105	600	200	5400	5400	7260
A3	2 x F/2	105	1200	400	6000	7200	8960



of the acting force is parallel with the longitudinal tunnel tube axis. Some tests were carried out with the action of a single force (the simulation of a single ram), some tests were conducted with two forces acting (the simulation of two rams). Taking into consideration the system of the placement of the segment in the testing machine, the forces acted vertically. The segments were placed on the carriage of the testing machine including sololit boards without sealing gaskets (with the exception of segment K, which was tested with gaskets on it). One 9 mm thick hardened PVC plate and



Obr. 8–11 Delaminace železobetonových segmentů zatížených prostým tlakem
Figures 8–11 Delamination of traditionally reinforced concrete segments loaded by unilateral pressure

Tab. 5 Výsledky zatížení segmentů ohybem v rovině segmentu
Table 5 Results of segment loading by bending in the segment plane

Segment	Množství drátků (kg/m ³),	Přírůstek síly (kN)	Snižování zatížení na hodnotu (kN)	Vznik první trhliny (kN),	Vzniku trhliny přes celou tloušťku segmentu (kN)	Maximální dosažená působící síla (kN)
Segment	Amount of steel fibres (kg/m ³)	Increments in force (kN)	Load decreasing to the value of (kN)	Origination of first crack (kN)	Origination of crack throughout segment thickness (kN)	Maximum acting force reached (kN)
A3 – S11	50	100	neodtěžováno	200	400	500
A3 – S12	50	100	neodtěžováno	300	560	753
A3 – S13	40	100	neodtěžováno	300	530	629
A3 – S14	40	100	neodtěžováno	300	500	610
A1 – S15	105	100	neodtěžováno	300	370	610
A2 – S16	105	100	neodtěžováno	200	350	991

působily síly svísele. 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 jedna deska z novoduru tloušťky 9 mm a jedna deska z ocelového plechu P20 odpovídající dosedacím plochám lisů štítu. Působící síly byly navyšovány v rovnoměrných přírůstcích, po každém navýšení zatěžovací síly byly segmenty odtíženy. Síly byly navyšovány až do vyčerpání kapacity segmentu, přičemž během zkoušky byly zaznamenávány vznikající trhliny. Celkem bylo zkoušeno 7 železobetonových segmentů (2xA1, 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 článek zaměřen především na segmenty s rozptýlenou výztuží, tak je jistě namístě 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 rovnoběžně se střednicovou plochou. Došlo tedy k delaminaci materiálu, kdy se při vyčerpání únosnosti oddělila krycí vrstva a uvnitř prvku vzniklo jádro betonu sevřeného výztuží (obr. 8–11). Při krytí výztuže 5 cm a tloušťce segmentu 25 cm mělo jádro tloušťku pouhých 15 cm.

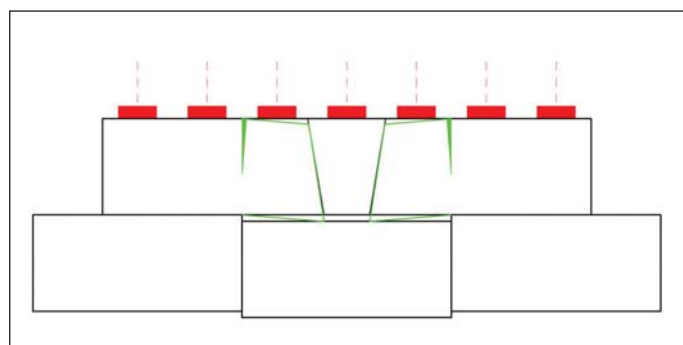
8 ZATÍŽENÍ SEGMENTŮ OHYBEM V ROVINĚ SEGMENTU

Při dané zkoušce byly segmenty zkoušeny v ohybu v rovině segmentu, zkouška simulovala zatížení ostění lisu tunelovacího štítu při nerovnoměrném podložení segmentů (tj. simulace posunuté geometrie předchozího prstence – obr. 12). 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.

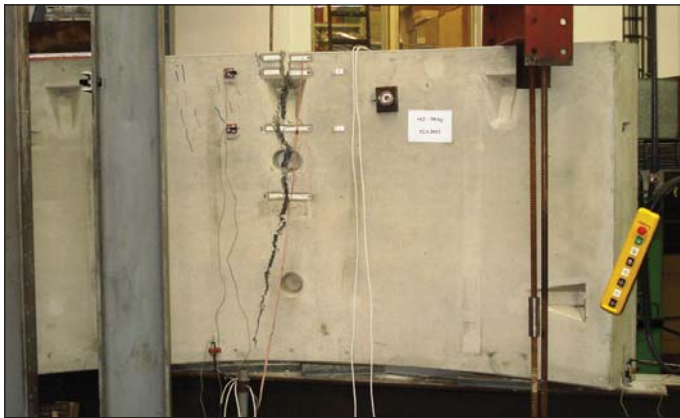
Uvedené zkoušky byly charakteristické nízkými hodnotami sil, při nichž začaly vznikat trhliny. Trhliny se lokalizovaly v prostoru nad nikou pro šroub a pak se dále šířily směrem

one steel sheet P20 plate matching the area of contact of the shield rams were fitted to the upper compressed surface. The acting forces were increased in equal increments; after each loading forces increasing, the segments were unloaded. The forces were increased until the loading capacity of the segment was exhausted. The cracks which originated during the test were recorded. In total, 7 traditionally reinforced concrete segments (2xA1, A2, A3, K, B, C) were tested. All of the tested segments were reinforced with 105 kg/m³ of steel bars. The arrangement of tests and testing results are presented in Table 4.

Even though this paper is first of all focused on steel fibre reinforced concrete segments, it is certainly in order to present the comparison with the tests of steel bar reinforced concrete elements. These tests were carried out identically with the tests of the SFRC segments. The values of the loading applied at the moment of the origination of cracks running throughout the thickness of the element are nearly identical for both the steel bar reinforced concrete segments and steel fibre reinforced concrete segments. Even the load-carrying capacity of the traditionally reinforced concrete segment is comparable with that of a SFRC segment; nevertheless, the failure mode is totally different. The traditionally reinforced concrete segment was in all tested cases disturbed in the plane parallel with the central plane. It means that the material became delaminated, with a cover layer separated after the load-carrying capacity was exhausted and a core of concrete clamped between reinforcing bars originated inside the element (see Figures 8-11). At the concrete cover to the reinforcement of 5 cm and the thickness of the segment of 25 cm, the core was a mere 15 cm thick.



Obr. 12 Grafické znázornění nerovnoměrného podepření segmentů
Fig. 12 Graphical depiction of non-uniform support of segments



Obr. 13 a 14 Porušení drátkobetonového segmentu zatíženého ohybem v rovině segmentu

Figures 13 and 14 Steel fibre reinforced concrete segment disturbed by loading by bending in the segment plane

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. 13 a 14). Železobetonové segmenty byly porušeny odlišně, vznikla jedna trhlina, která se rozevírala a začala se větvit teprve při dosažení vysokého zatížení (obr. 15). Meze únosnosti nebylo dosaženo, avšak takto zatížený prvek by byl zcela nevyhovující (s ohledem na rozevření trhlin v ostění).

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

8 SEGMENT LOADING BY BENDING IN THE SEGMENT PLANE

During this particular test, segments were subjected to bending in the segment plane. The test simulated the tunnel lining loading by rams of the tunnelling shield at a uniform support of segments (i.e. the simulation of the shifted geometry of the previous ring – see Fig. 12). The segments were loaded by a single load acting on the segment edge. The opposite edge of the segment was clamped so that vertical shifting was prevented. In addition, the segment was supported non-symmetrically on the side of the clamping so that the segment half exposed to loading was not supported. The acting force was increased with 100 kN increments, without unloading, until the load-bearing capacity was exhausted. This procedure was used for the testing of 6 segments A (4 steel fibre reinforced concrete segments with 40 and 50 kg/m³ of fibres, 2 traditionally reinforced concrete ones with 105 kg/m³ of reinforcement). The results are presented in Table 5.

The above-mentioned tests were characterised by low values of forces at which cracks started to originate. The cracks localised themselves in the area above the box for a bolt and continued to extend downwards. It was possible at the segments produced from steel fibre reinforced concrete to observe the origination of numerous minute cracks; one of them gradually opened and, subsequently, the load-carrying capacity got exhausted (see Figures 13 and 14). The traditionally reinforced concrete segments were disturbed in a different way. One crack originated and started to open; it started to branch out only when a high load value was reached (see Fig. 15). Failure limits were not reached, but the element loaded in this way was completely unsatisfactory (with respect to the extension of cracks in the lining).

The character of the response of the tested materials to the loading was totally different, but the materials can be considered to be comparable as far as the serviceability is concerned.

In general, it is possible to state in the case of both materials that the segments are brittle and susceptible to fracturing even when loaded by small forces. The origination of cracks at 300 kN and the propagation of cracks to throughout thickness of the segment at 500 kN, if compared with the design load of 2400 kN, means significant problems with the serviceability of segments. The deformation (the deflection of the element subjected to bending) of about 1 mm on the origination of cracks and about 2 mm on the origination of cracks running throughout the element thickness, which values are very low, corresponds to this information. The deflection at the failure load of the SFRC elements varied around 6 mm. The rigidity of the lining providing support for the machine thrust forces is relatively low because the rubber gaskets sealing the joints can be subject to creeping. It follows from the results of the experiment that the difference in the position (pushing in) of two neighbouring segments of 1-2 mm means significant risk of the origination of a crack in the segment, which may affect the waterproofing capacity of the lining in the case it propagates throughout the segment thickness. It is therefore necessary during the course of the excavation to secure uniform support of the segments being subjected to loading, which means that the lining has to be installed as accurately as possible so that the origination of cracks is prevented. In addition, the above-mentioned factor should be taken into consideration when the arrangement of segments is being designed – which can

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 těsně 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.

9 ZÁVĚR

Provedené experimentální testování drátkobetonových a železobetonových segmentů přineslo velké množství velmi cenných informací. Přírozeně 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/m³ a 40 kg/m³ 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 zajistit 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 trávce 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



Obr. 15 Porušení železobetonového segmentu zatíženého ohybem v rovině segmentu

Fig. 15 Traditionally reinforced concrete segment disturbed by loading by bending in the segment plane

be more advantageous if compared with the arrangement being assessed.

9 CONCLUSION

The completed experimental testing of SFRC segments and traditionally reinforced concrete segments brought a big amount of very precious information. Naturally, the information on the load-bearing capacity of segments (the magnitude of the maximum load the segments can carry) and on the serviceability of the segments (the origination of first cracks, crack propagation throughout the segment thickness) at various manners of loading is of the highest importance. The results of the tests proved that a lining produced from steel fibre reinforced concrete in specified conditions can replace traditionally reinforced concrete segments. As far as the limit state of serviceability is concerned, it is possible to consider the greater scattering of cracks, leading to the smaller risk of influencing the waterproofing capacity, to be certain advantage.

Similarly significant contribution lied in the experience with the technology of the production of SFRC segments, which, in comparison with traditionally reinforced concrete segments, brings numerous problems which had to be solved. In general, it is possible to state that the amount of steel fibres of 50 kg/m³ and 40 kg/m³ leads to mechanical properties which are comparable. Because of the small number of tests it is not possible to credibly statistically assess and compare the results. However, it is possible to conclude that bigger problems with the dispersion of steel fibres in concrete occur when a greater amount of fibres is used. This technological problem has to be solved during common large-volume production of concrete using professional steel fibre dosing and dispersion equipment. During the course of the production of concrete samples for experiments, steel fibres were dosed manually; at this process it was therefore difficult to secure reproducibility of the product with an identical result.

In the field of segmental linings this was the first comprehensive set of results of experiments on modern real-size tunnel lining segments in the Czech Republic. It has turned out that the character of the response to segment loading



Obr. 16 Segmentové ostění tratového tunelu trasy A pražského metra
Fig. 16 Segmental lining of a running tunnel on the Line A of Prague metro

na problematiku vede k zanedbání některých vlivů, které pak mohou komplikovat proces provádění i dosažení požadovaných užitečných 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 drátek 40 kg/m³). Dané ostění bylo instalováno na tratovém tunelu uvedené stavby v červnu 2012 (obr. 16). Po prohlídce osazeného zkušebního úseku bylo ověřeno, že na daných segmentech nevznikly žádné trhliny.

Výsledky byly získány za finanční podpory z prostředků Grantové agentury České republiky (GAČR) v rámci projektu 104/10/2023 „Vývoj a ověření vlastností vláknobetonu splňujícího současné požadavky pro prefabrikovaná ostění dopravních tunelů“.

DOC. ING. MATOUŠ HILAR, Ph.D.,
matous.hilar@fsv.cvut.cz,

FSv ČVUT v Praze a 3G Consulting Engineers, s. r. o.,
DR. ING. PETR VÍTEK, petr.vitek@metrostav.cz,
METROSTAV, a. s.

Recenzoval: Ing. Pavel Polák

completely differs from the character determined in the cases of small samples (i.e. testing beams 70 cm long). It is therefore impossible to apply results of experiments on small samples to complete structures using simple calculation procedures (the theory of elasticity).

Even backward calculations using the Finite Element Method in the ANTENA program (Havlásek et al., 2011) were carried out on the basis of the completed tests. Owing to them the deriving of some important parameters of tested materials was possible. A responsible numerical analysis requires the use of sufficiently sophisticated analytical equipment taking into account energetic principles of modelling the development of cracks. The completed comprehensive set of experiments led to the obtaining of data for calculations which could be used for reliable modelling of the response of real elements to the required loading. The experiment results supported the fact that a segment design must be viewed in a very comprehensive manner and a range of design factors must be taken into consideration. A narrow and one-sided view of the problems leads to neglecting of some influences, which may subsequently complicate the process of the execution of pre-cast tunnel lining and reaching required end-use properties of the lining.

The conclusion was made after taking into account the results of the completed research that the produced SFRC segments meet all requirements placed on the lining of Prague metro. For that reason lining rings were produced and assembled (10 rings, i.e. 15 lm of the tunnel) on a trial section on the alignment of the Line A of Prague metro, using steel fibre reinforced concrete segments (with dosing of steel fibres of 40 kg/m³). This lining was installed on a running tunnel of the above-mentioned construction in June 2012 (see Fig. 16). It was verified after the inspection of the completed trial section that no cracks originated on the particular segments.

The results were obtained with financial support from the means of the Grant Agency of the Czech Republic (the GACR) within the framework of the project No. 104/10/2023 “The development and verification of properties of fibre reinforced concrete meeting current requirements for pre-cast lining of transport tunnels”.

DOC. ING. MATOUŠ HILAR, Ph.D.,
matous.hilar@fsv.cvut.cz,

FSv ČVUT v Praze a 3G Consulting Engineers, s. r. o.,
DR. ING. PETR VÍTEK, petr.vitek@metrostav.cz,
METROSTAV, a. s.

LITERATURA / REFERENCES

- Vokáč, M., Bouška, P. *Experimentální zkoušky segmentů prefabrikovaného ostění metra*. Kloknerův ústav ČVUT v Praze, 2011
- Vokáč, M., Bouška, P. *Experimentální zkoušky segmentů z drátkobetonu prefabrikovaného ostění metra*. Kloknerův ústav ČVUT v Praze, 2011
- Hilar, M., Beňo, J. Segmentová ostění tunelů z drátkobetonu. *Tunel* 3/2012
- 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
- Hilar, M., Vítek, J., Vítek, P. *Testing of SFRC Tunnel Segments*. *Proceedings of the World Tunnelling Congress*. Bangkok, 2012, s. 311–313
- Sajdllová, T., Pukl, R. *Identifikace materiálových parametrů pro nelineární modelování drátkobetonových konstrukcí*. Betonářské dny, 2011
- Havlásek, P., Pukl, R., Červenka, V. *Počítačová simulace testů železobetonových a drátkobetonových tunelových segmentů*. Betonářské dny, 2011
- Froněk, M. *Ostění tunelů z vláknobetonových segmentů*. Bakalářská práce. FSv ČVUT v Praze, 2011
- Vítek, P., Šebesta, B. *Segmentové ostění tunelů metra*. Betonářské dny, 2010.