

SEGMENTOVÁ OSTĚNÍ TUNELŮ Z DRÁTKOBETONU

STEEL FIBRE REINFORCED SEGMENTAL TUNNEL LININGS

MATOUŠ HILAR, JAROSLAV BEŇO

1 ÚVOD

Drátkobeton je nový konstrukční stavební materiál, který v současné době stále častěji začíná nahrazovat standardní beton a železobeton. Rovnoměrně rozptýlené drátky ztužují strukturu prostého betonu a mění tak křehký prostý beton na houževnatý drátkobeton. Vhodným výběrem drátků, jejich zakomponováním do čerstvého prostého betonu při jeho výrobě, optimálním složením čerstvého betonu a optimálním postupem výroby je možné vyrobít prefabrikované drátkobetonové dílce ostění (obr. 1), kterými je možné nahradit standardní železobetonové dílce. Využití drátkobetonu pro segmentová ostění tunelů je obecně ve světě rostoucí trend vzhledem k možným výhodám oproti běžným železobetonovým segmentům (chování, trvanlivost, požární odolnost, jednoduchá výroba, nižší spotřeba oceli, atd.). Problematika využití drátkobetonu pro segmentová ostění tunelů je podrobněji probrána v následujícím článku.

2 SEGMENTOVÁ OSTĚNÍ

Vývoj moderních tunelovacích metod a materiálů zásadně zefektivnil, atraktivně a v neposlední řadě zrychlil výstavbu podzemních konstrukcí. Počet realizovaných staveb rok od roku stoupá. V závislosti na geologických podmínkách, výšce nadloží, hladině podzemní vody, průměru tunelu a jeho délce se v dnešní době především používá buď tzv. konvenční ražba (zpravidla NRTM), nebo mechanizovaná ražba pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů (technologie TBM).

S prováděním mechanizovaných ražeb pomocí štítů úzce souvisí realizace definitivní konstrukce ostění, která je budována bezprostředně na místě ražby přímo za tunelovacím strojem. Toto ostění kruhového tvaru je tvořeno prstenci, které jsou zpravidla složeny z prefabrikovaných železobetonových segmentů, jednotlivé dílce jsou umísťovány do požadované pozice pomocí erektoru (hydraulické rameno v zadní části tunelovacího stroje). Jeden prstenec bývá většinou složen z několika tvarově shodných dílců, závěrečný dílec (klenák) bývá většinou tvarově odlišný. Během výstavby jsou jednotlivé dílce spojovány pomocí šroubů a prostor mezi ostěním a horninovým masivem bývá vyplňován injektážní směsí.



Obr. 1 Ostění tunelu z prefabrikovaných betonových segmentů (Herka, Schepers 2012)

Fig. 1 Tunnel lining consisting of pre-cast concrete segments (Herka, Schepers 2012)

1. INTRODUCTION

Steel fibre reinforced concrete is a new structural material. It has recently started to more frequently replace standard concrete and steel bar reinforced concrete. Uniformly dispersed wires (steel fibres) reinforce the structure of plain concrete and, in doing so, convert the brittle concrete to tough steel fibre reinforced concrete. It is possible by means of the proper selection of wires, their incorporation into fresh plain concrete during its production, optimal composition of fresh concrete and optimal production procedure to produce pre-cast steel fibre reinforced concrete lining segments (see Fig. 1), which can replace standard steel bar reinforced concrete segments. Owing to their benefits if compared with common steel bar reinforced concrete segments (the behaviour, durability, fire resistance, simple production, lower consumption of steel), the use of steel fibre reinforced concrete (SFRC) for segmental linings of tunnels has become a worldwide growing trend. Problems of the use of steel reinforced fibre concrete for segmental tunnel linings are discussed in more detail in the paper below.

2. SEGMENTAL LININGS

The development of modern tunnelling methods and materials significantly increased the effectiveness and attraction of the construction of underground structures and, at last but not least, accelerated the construction process. The number of completed structures year by year grows. Nowadays, the preferred tunnelling methods are either the conventional excavation method (usually the NATM) or mechanised driving by means of full-face tunnelling machines (TBM technology), depending on geological conditions, the height of overburden, the level of water table, the tunnel diameter and its length.

Mechanised tunnel excavation by means of shields is closely associated with the construction of the final lining. The lining is installed immediately during the excavation, behind the tunnelling machine. This circular lining is formed by rings, which usually consist of pre-cast steel bar reinforced concrete segments. Individual segments are installed to required positions by means of an erector (a hydraulic arm at the back end of the machine). One ring is usually made up of several segments identical in the shape; the shape of the closing segment (the key) is usually different. During the construction, individual segments are usually connected with bolts and the space between the lining and ground mass is usually backfilled with grouting mix.

Pre-cast concrete segments can be installed after the required strength is reached. The lining of tunnels driven by full-face tunnelling machines is circular. This geometry is advantageous in terms of the prevention of the development of higher bending moments. In common geotechnical conditions the segments are therefore subjected first of all to compression (normal) forces.

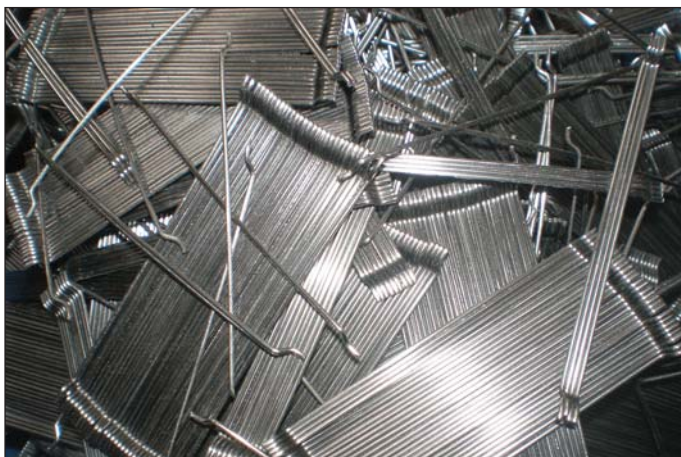
However, this does not apply during the construction process. The segments have to resist stressing by bending moments when they are being removed from moulds (see Fig. 2), during the storage (see Fig. 3) and transport. They have to further resist temperature stresses; first of all they have to resist the high stresses induced just after they are incorporated into the tunnel lining by hydraulic cylinders shifting the shield ahead. The last of the above-mentioned stresses is usually the deciding factor for the segment design.



Obr. 2 Manipulace se segmenty během výroby
Fig. 2 Segments handling during production

Segmenty z prefabrikovaného betonu mohou být instalovány po dosažení požadované pevnosti. Ostění tunelů ražených plnoprofilovými tunelovacími stroji je kruhové, což je výhodný tvar z hlediska zamezení vzniku vyšších ohybových momentů. V běžných geotechnických podmínkách jsou tedy segmenty tvořící prstencové kruhové ostění tunelu namáhány především tlakovými normálovými silami.

To však neplatí během výstavby. Segmenty musí odolávat namáhání ohybovými momenty během vyndávání z forem (obr. 2), během skladování (obr. 3) a přepravy, dále musí odolávat silám vzniklým teplotním namáháním dílců, zejména však musí odolávat velkému zatížení hned po zabudování do ostění tunelu, které je vyvozeno hydraulickými lisami posouvající štít vpřed. Poslední ze zmiňovaných namáhání bývá často rozhodující pro návrh segmentů.



Obr. 4 Ocelová vlákna (drátky) používaná pro drátkobeton (délka 60 mm)
Fig. 4 Steel fibres (wires) used for SFRC (the length of 60 mm)



Obr. 3 Skladování prefabrikovaných železobetonových segmentů
Fig. 3 Storage of pre-cast steel bar reinforced concrete segments

3. STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE SEGMENTS

Steel fibre reinforced concrete (SFRC) is concrete with an admixture of short steel fibres (wires) – (see Fig. 4). Even though SFRC has been known for a longer time, its use for the lining of tunnels is relatively new. Uniformly dispersed short wires reinforce a plain concrete structure, thus converting brittle plain concrete into tough SFRC. It is possible by properly selecting the wires, incorporating them into fresh plain concrete during its production and ensuring optimum composition of fresh concrete and optimum production procedure to produce pre-cast SFRC lining segments, which can replace standard steel bar reinforced concrete segments.

The length of wires should correspond approximately to three times the maximum size of aggregate grains. The reason is the requirement for the bridging of the cracks which are formed just on the borders of individual grains and for the prevention of pulling of a wire from concrete when these cracks originate. The ends of the wires are usually bent, widened etc. The most widely spread is the type with bent ends. During the process of the pulling of the wire from concrete the bent end has to deform until it is absolutely straight. Owing to this property the resistance to the pull-out is significantly increased. Wires glued together by water-soluble glue are sometimes used because the dosing process is simpler. The bunches of wires are dissolved during mixing and are uniformly distributed in the concrete mix.

Polypropylene fibres cannot be used for the reinforcement of load-bearing concrete structures because their modulus of elasticity is low (lower than concrete) and they significantly deform even under small loads. In addition, they lose mechanical properties at 50°C and melt at 165°C. Nevertheless, polypropylene fibres can be added to steel fibre reinforced concrete or steel bar reinforced concrete to increase fire resistance.

SFRC segments are usually produced using concrete grade C40-C60. It is very important to ensure uniform distribution of steel fibres, good bond between the fibres and concrete and sufficient workability of the mix. The dosing of fibres is determined by means of McKee theory; the minimum dosage, measured in kg/m³ of concrete, depends on their length and thickness (the aspect ratio). The spacing between fibres determines the density of fibres, thus also the quality of reinforcement; it should not be lower than 0.45 of the fibre length.

4. COMPARISON OF STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE SEGMENTS AND STEEL BAR REINFORCED CONCRETE SEGMENTS

The cost of production of SFRC segments is slightly lower than that of steel bar reinforced concrete segments despite the fact that the material (steel fibres) is more expensive than classical steel

3 DRÁTKOBETONOVÉ SEGMENTY

Drátkobeton je beton s příměsí krátkých ocelových vláken (drátků) – obr. 4. Ačkoli je drátkobeton znám již delší dobu, jeho použití jako ostění tunelu je poměrně nové. Rovnoměrně rozptýlené krátké drátky ztužují strukturu prostého betonu a mění tak křehký prostý beton na houževnatý drátkobeton. Vhodným výběrem drátků, jejich zakomponováním do čerstvého prostého betonu při jeho výrobě, optimálním složením čerstvého betonu a optimálním postupem výroby je možné vyrobit prefabrikované drátkobetonové dílce ostění, kterými je možné nahradit standardní železobetonové dílce.

Délka drátků by měla odpovídat přibližně trojnásobku maximální velikosti zrna kameniva. Důvodem je dostatečné překlenutí trhlin, které se tvoří právě na hranicích jednotlivých zrn a zabránění vytrhnutí drátku z betonu při vzniku těchto trhlin. Aby byla zajištěna dostatečná odolnost proti vytrhnutí, bývají konce drátků ohnuté, rozšířené, apod. Nejběžnější je typ s ohnutými konci. Během vytrhávání drátku z betonu se musí ohnutý konec deformovat až do zcela rovného tvaru, čímž je odolnost proti vytrhnutí výrazně zvýšena. Díky jednoduššímu dávkování se někdy používají drátky splepené vodou rozpustným lepidlem. Tyto svazky se během míchání rozlepí a rovnoměrně rozmístí v betonové směsi.

Polypropylenová vlákna nemohou být použita jako výztuž nosných betonových konstrukcí, protože mají nízký modul pružnosti (nižší než beton) a i při nízkém zatížení se značně deformují. Navíc ztrácí mechanické vlastnosti při 50 °C a při 165 °C tají. Polypropylenová vlákna je však možné do drátkobetonu či železobetonu přidávat, a to z důvodu zvýšení požární odolnosti.

Pro výrobu drátkobetonových segmentů se většinou používá beton třídy C40–C60. Velmi důležité je zajistit rovnoměrné rozmístění drátků, dobrou soudržnost drátků s betonem a dostatečnou zpracovatelnost směsi. Dávkování vláken se určuje pomocí teorie McKee, minimální množství vláken v kg/m³ betonu závisí na jejich délce a tloušťce. Vzdálenost mezi vlákny určuje hustotu drátků a tím kvalitu vyztužení a neměla by být nižší než 0,45 délky vlákna.

4 SROVNÁNÍ DRÁTKOBETONOVÝCH A ŽELEZOBETONOVÝCH SEGMENTŮ

Výrobní náklady drátkobetonových segmentů vycházejí mírně lépe než železobetonových, přestože vlastní materiál (ocelové drátky) je dražší než klasická betonářská výztuž. Úspory vznikají především díky nižším nárokům na práci, manipulaci a skladování. Počet segmentů poškozených při montáži je nižší. Dochází také k úspoře vlastní oceli, což má pozitivní vliv na redukci emisí vznikající při její výrobě.

Deformace drátkobetonu při dosažení pevnosti betonu v tahu nevzroste skokově, ale díky rovnoměrně rozmístěným drátkům



Obr. 5 Vytržení drátků z betonu při úplném porušení
Fig. 5 Steel fibres pulled out of concrete at total failure

bars. Savings originate first of all owing to lower demands for work, handling and storing. The number of segments damaged during the installation is lower. As a result, steel itself is saved, which has a positive influence on the reduction of emissions originating during its production.

When the concrete tensile strength is reached, the deformation of steel fibre reinforced concrete does not grow stepwise; instead, the deformation grows slowly owing to the uniformly distributed steel fibres. The cause of this is that the fibres are activated continuously and are step-by-step pulled out of concrete (see Fig. 5). The size of cracks remains relatively small. But the tensile strength (flexural) is significantly lower than it is in the case of steel bar reinforced concrete.

The behaviour of steel bar reinforced concrete is different. When the tensile concrete strength is reached, the deformation starts to grow until the reinforcement is fully activated. This is why the cracks which develop are wider than they are in the case of steel fibre reinforced concrete. Nonetheless, deformations then get settled and grow approximately linearly until the yield strength of steel is reached. It is significantly higher than the tensile strength of SFRC. For that reason a SFRC lining is suitable first of all to low bending stress conditions, where circular linings consisting of pre-cast segments generally belongs. If there is a threat of the origination of higher bending stress in the segments, it is necessary to provide the steel fibre reinforced concrete segments even with classical steel bar reinforcement.

Lining segments are stressed by large loads induced by hydraulic cylinders on tunnelling machines. Careless handling may result in delivering blows to the segments. Steel bar reinforced concrete segments are completely unreinforced on the surfaces, at edges and corners so that the minimum concrete cover is ensured. However, stresses in the segments are the most critical in these places. If a blow or excessive loading occurs, parts of the steel bar reinforced segments crumble and are broken off. Damaged segments have to be repaired or replaced so that the design life length of the structure is guaranteed. This work is very unpleasant in terms of time, finances and technology.

The use of steel fibres instead of classical steel bar reinforcement can be an advantageous alternative. Steel fibres are uniformly dispersed through the segment and the minimum concrete cover required to prevent corrosion is irrelevant. The orientation of steel fibres in the space is chaotic, which means that the transfer of tensile stresses is possible in all directions. As a result the resistance of segments to breaking off, crumbling and blows is significantly increased (see Fig. 6).

It is dangerous for SFRC segments if the tensile strength of the steel fibre reinforced concrete is exceeded. In such a case the SFRC segments also suffer from breaking off. From this point of view, it is first of all necessary to prevent the origination of geometrical inaccuracies both during the production and, first of all, during the lining installation, so that the bending moments acting on the lining are as small as possible.

Reinforcing bars are usually placed into steel bar reinforced concrete segments in the form of a reinforcement cage (see Fig. 7). It consists of steel mesh mats on the inner and outer surfaces of the segment, which are separated by stirrups welded to them. The main function of steel mesh is to withstand the stresses which originate during the production, storage, transport and installation. The shape of the reinforcement cage must be circular; it must fit into the casting mould without problems and must respect the minimum concrete cover. The ratio of reinforcement of steel bar reinforced concrete segments reaches values usually ranging from 65 to 120 kg/m³. By contrast, a SFRC segment is reinforced only by homogeneously distributed and omni-directionally oriented steel fibres. This provides trouble-free transfer of tensile forces in all directions. There is therefore no labour consumption associated with the preparation and placement of the



Obr. 6 Odlamování hran železobetonových segmentů při zatížení lisy štítu (Herka, Schepers 2012)

Fig. 6 Edges of steel bar reinforced concrete segments breaking off when loaded by shield jacks (Herka, Schepers 2012)

narůstá deformace pozvolna. To je způsobeno průběžným aktivováním drátků a jejich postupným vytrháváním z betonu (obr. 5). Velikost trhlin zůstává nízká. Celková pevnost v tahu (ohybu) je však výrazně nižší než u železobetonu.

Chování železobetonu je odlišné. Při dosažení pevnosti betonu v tahu nastane nárůst deformace až do plné aktivace výztuže. Tak vzniknou větší trhliny než u drátkobetonu. Nicméně poté se deformace ustálí a rostou přibližně lineárně až do dosažení meze kluzu oceli. Ta je výrazně vyšší než pevnost drátkobetonu v tahu. Proto je drátkobetonové ostění vhodné především do podmínek s nízkým ohybovým namáháním, kam kruhové ostění z prefabrikovaných segmentů obecně patří. Pokud hrozí vznik většího ohybového namáhání segmentů, tak je nutné drátkobetonové segmenty opatřit i klasickou prutovou výztuží.

Segmenty jsou namáhány velkými zatíženími způsobenými hydraulickými lisami tunelovacích strojů. Neopatrnou manipulací může docházet k narázům do segmentů. Železobetonové segmenty jsou kvůli zajištění minimálního krytí výztuže při povrchu, hranách a rozích zcela nevyztuženy. Jejich namáhání je však v těchto místech nejkritičtější. Pokud dojde k nárazu nebo nadměrnému zatížení, pak se části železobetonových segmentů drolí a odlamují. Aby byla zaručena návrhová životnost konstrukce, musí se poškozené segmenty opravit nebo vyměnit, což je časově, finančně a technicky velmi nepřijemné.

Použití ocelových drátků namísto klasické betonářské výztuže může být výhodnou alternativou. Drátky jsou po dílci rovnoměrně rozptýleny, minimální krytí výztuže pro zamezení koroze není relevantní. Orientace drátků je v prostoru chaotická, což umožňuje přenos tahových napětí všemi směry. Tím se výrazně zvyšuje odolnost segmentů proti odlamování, drolení a nárazu (obr. 6).

Nebezpečné pro drátkobetonové segmenty je, pokud je překročena pevnost v tahu drátkobetonu. Pak se drátkobetonové dílce také odlamují. Z tohoto hlediska je především nutné zabránit vzniku geometrických nepřesností, jak při výrobě, tak především při instalaci ostění, aby ohybové momenty působící na ostění byly co nejnižší.

Do železobetonových segmentů se zpravidla umísťuje výztuž ve formě tzv. ocelového armokoše (obr. 7). Ten se skládá z výztužných sítí při vnějším a vnitřním povrchu segmentu oddělených přivařenými tržníky. Hlavní funkcí výztužných sítí je odolat napětím vzniklým při výrobě, skladování, přepravě a montáži. Tvar výztužného koše musí být kruhový, musí se bez problémů vejít do odlévací formy a respektovat minimální krytí výztuže. Vyztužení železobetonových segmentů dosahuje hodnot zpravidla mezi 65 a 120 kg/m³. Drátkobetonový dílec je oproti tomu vyztužen pouze homogenně rozmístěnými drátky, všesměrně orientovanými. Tím dochází k bezproblémovému přenosu tahových sil všemi směry. Pracnost

reinforcement cage required. The production is simpler. The dosage equipment mixes the fibres into concrete and the mixture is cast into the mould. The consumption of steel mostly reaches 30 – 50 kg/m³, which is significantly less than in the case of steel bar reinforced concrete segments.

Quality of concrete (low porosity and permeability) is fundamental for good protection against corrosion. It can be achieved by low water/cement ratio, plasticisers or by using cinder. The higher quality of concrete the better resistance of concrete to carbonation and chloride ion and sulphate aggression. The advantage of steel fibre reinforced concrete over steel bar reinforced concrete is the impossibility of the origination of corrosion. Steel fibres are dispersed in the mixture uniformly; they usually do not touch one another and are completely surrounded and protected by alkali environment formed by concrete. The spreading of corrosion is therefore prevented. In addition, this system minimises the risk of defects caused by the volume of steel increasing during the process of corrosion. Steel fibres are subjected to corrosion on the structure surface and may cause unappealing tinting of the concrete surface. However, from the structural point of view, this plays no role at all. If it is required for aesthetic reasons to exclude the corrosion even on the structure surface, it is possible to use galvanised fibres.

Homogeneously and omni-directionally distributed steel fibres are capable of transmitting stresses in all directions. The steel fibres effectively prevent the opening of plastic cracks, e.g. caused by shrinking, which fact has a positive influence on the service life of the structure (the width of cracks is reduced by adding steel fibres).

5. PREVIOUS APPLICATION OF STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE SEGMENTS

Initial attempts to use steel fibre reinforced concrete as a structural material in construction of tunnels took place in the first half of the 1970s, when several trial applications of SFRC were conducted. More significant increase in the use of SFRC for pre-cast segmental linings began in 1982. Several water supply tunnels where this system of lining was used were built in southern Italy and on Sicily (about 20 km in total). This technology proved itself well; SFRC was used for the construction of a transport tunnel for the first time in 1992 on the extension of Neapol metro, Italy.

The research into SFRC segments conducted in Czechoslovakia (Krátký et al., 1999) is also worth mentioning. Series of tests on the circular pre-cast lining of a main sewer tunnel with the diameter of 3.6 m were carried out in 1984 - 1988. The ring consisted of six 200 mm thick segments with tongued and grooved joints. The batches of steel fibres were relatively great (98 kg/m³); the fibres were smooth and straight. The tests were conducted both on the individual segments and on complete rings. It was verified by the tests that the required load-bearing capacity was exceeded several times and was comparable with steel bar reinforced concrete segments. Several times higher reliability as far as mechanical damaging is concerned was proved by the tests in the area of joints between individual segments. The same increase was proved even in the area of segment edges. These facts unambiguously confirmed that the necessity for repairs was significantly reduced.

Since the initial tests and applications, SFRC segments have been successfully installed on several tens of projects (Vandewalle 2005, Froněk 2011), first of all within the framework of the European Union, but also in other places of the world (Australia, the USA, Brazil etc.). In the majority of cases smaller-diameter tunnels are still in question (water, gas or heat supply tunnels); in some cases even metro sections (London, Barcelona, Napoli, Sao Paulo, Madrid, Genova) or railway tunnels (Channel

s přípravou a umístěním výztužného koše tudíž zcela odpadá. Výroba je jednodušší, dávkovací zařízení namíchá vlákna do betonu a směsí se poté vyplní forma. Spotřeba oceli dosahuje většinou 30–50 kg/m³, což je výrazně méně než u železobetonových segmentů.

Základem dobré ochrany proti korozi je kvalita betonu (malá pórovitost a propustnost), která se dá dosáhnout malým vodním součinitelem, plastifikátory nebo použitím popílku. Čím je beton kvalitnější, tím lépe odolává karbonataci a agresí chloridových iontů a sulfátů. Výhodou drátkobetonu oproti železobetonu je nemožnost vzniku koroze. Drátky jsou ve směsi rozmístěny nerovnoměrně, zpravidla se nedotýkají navzájem, jsou zcela obklopeny a chráněny alkalickým prostředím betonu. Šíření koroze je tímto účinně zabráněno. Navíc se tím i minimalizuje nebezpečí poruch v důsledku nárůstu objemu korodující oceli. Drátky na povrchu konstrukce korodují a mohou způsobovat neestetické zbarvení povrchu betonu. Ze statického hlediska to však nehraje vůbec žádný význam. Pokud z estetických důvodů není žádoucí, aby ke korozi nedocházelo ani na povrchu konstrukce, tak je možné využít pozinkovaných vláken.

Homogenně a všesměrně rozmístěné drátky dokážou přenášet tahová napětí ve všech směrech. Drátky účinně zabráňují rozevírání plastických trhlin například od smršťování, což má pozitivní vliv na životnost konstrukce (přidáním drátků se šířka trhlin zmenší).

5 DOSAVIDNÍ APLIKACE DRÁTKOBETONOVÝCH SEGMENTŮ

První pokusy o využití drátkobetonu jako konstrukčního materiálu při výstavbě tunelů začaly v první polovině 70. let 20. století, kdy proběhlo několik zkušebních použití segmentového ostění z drátkobetonu. V roce 1982 nastal výraznější nárůst využití drátkobetonu pro prefabrikované segmentová ostění tunelů. V jižní Itálii a na Sicílii bylo vybudováno několik vodovodních tunelů právě s tímto systémem ostění (celkem cca 20 km). Tato technologie se osvědčila a v roce 1992 byl poprvé použit drátkobeton pro výstavbu dopravního tunelu. Jednalo se prodloužení neapolského metra v Itálii.

Za zmínku stojí i výzkum drátkobetonových segmentů v Československu (Krátký a kol., 1999). V letech 1984–1988 byly provedeny série zkoušek na prefabrikovaném ostění sběrné kanalizační štol kruhového průřezu o průměru 3,6 m. Prstenec byl složen ze šesti dílů o tloušťce 200 mm, navzájem spojených na pero a drážku. Dávkovalo se poměrně hodně drátku (98 kg/m³), drátky byly hladké a přímé. Byly provedeny zkoušky jednotlivých segmentů i celých prstenců. Zkouškami bylo ověřeno několikanásobné překročení požadované únosnosti a únosnost srovnatelná s železobetonovými segmenty. Zkouškami oblasti styku jednotlivých prvků byla doložena mnohonásobně vyšší spolehlivost proti mechanickému poškození. Stejně zvýšení bylo prokázáno i v oblasti hran prvků. Tyto skutečnosti jednoznačně potvrdily podstatné snížení potřebných oprav.

Od té doby prvních zkoušek a aplikací byly drátkobetonové segmenty úspěšně nasazeny na několika desítkách projektů (Vandewalle, 2005, Froněk, 2011), především v rámci Evropské unie, ale i jinde ve světě (Austrálie, USA, Brazílie, atd.). Převážně se stále jedná o tunely menších profilů (vodovodní, plynovodní či teplovodní tunely), v některých případech jde o úseky metra (Londýn, Barcelona, Neapol, Sao Paulo, Madrid, Janov) nebo o železniční tunely (Channel Tunnel Rail Link, Oenzberg, atd.). Nicméně se již začínají objevovat první aplikace drátkobetonových segmentů pro silniční tunely – Brisbane Airport Link vnitřního profilu 11,34 m (Harding a Chappell, 2012), Yokohama Circular Route Northern Section vnitřního profilu 11,5 m (Tsuno a kol., 2011). Přehled některých projektů se základními údaji je uveden v tab. 1 (Froněk, 2011).



Obr. 7 Ocelové armokoše pro železobetonové segmenty
Fig. 7 Steel reinforcement cages for steel bar reinforced concrete segments

Tunnel Rail Link, Oenzberg, etc.) have these segments. Nevertheless, first applications of SFRC segments to road tunnels have begun to appear - Brisbane Airport Link with the inner diameter of 11.34 m (Harding and Chappell 2012), Yokohama Circular Route Northern Section with the inner diameter of 11.5 m (Tsuno et al. 2011). An overview of some projects with basic data is presented in Table 1 (Froněk 2011).

6. CONCLUSION

Steel fibre reinforced concrete as a material has some advantageous properties regarding prefabricated production of lining segments for tunnels driven by full-face tunnelling shields, from which the possible benefits of SFRC segments mentioned below, compared with steel bar reinforced concrete segments, follow:

- The possibility of reducing the cost of the tunnel lining structure
- Simpler and quicker production (the production and placement of reinforcement cages is left out)
- Lower requirements for space during production (smaller areas required for the storage of steel bar reinforcement)
- Saving of steel (saving of energy and reduced production of CO₂)
- Simpler installation of tunnel equipment (without the risk of hitting steel bars by drilling)
- Reduced risk of breaking off of corners and edges of segments during handling (lower requirements for repairs)
- Lower requirements for maintenance during the service life
- Longer service life is expected (no risk of corrosion of reinforcement)

For the above-mentioned reasons, steel fibre reinforced concrete was used for segmental linings on a range of tunnelling projects. They mostly related to tunnels with smaller profiles (water, gas or heat supply tunnels) and, in some cases, to metro sections (London, Barcelona, Napoli). The most extensive application of SFRC segments was experienced at tunnels for the high-speed rail link between Paris and London (the Channel Tunnel Rail Link - CTRL), where 2 x 24 km of single-track tunnels with the lining consisting of pre-cast SFRC segments without using common steel bar reinforcement were constructed by means of full-face tunnelling machines.

At the moment, the Faculty of Civil Engineering of the Czech Technical University in Prague is conducting, in collaboration with Metrostav a.s., research into SFRC segments for tunnel linings. Loading tests of SFRC segments are being conducted in the Klokner Institute within the framework of the research (see Fig. 8). Results of some tests are being compared with the tests on steel bar reinforced concrete segments used during the

Tab. 1 Přehled některých projektů tunelů s drátkobetonovými segmenty
Table 1 Overview of some tunnelling projects lined with SFRC segments.

Název projektu Project name	Země Country	Účel Purpose	Rok Year	Celková délka [km] Total length [km]	Vnitřní profil [m] Inner diameter [m]	Tloušťka ostění [mm] Thickness of lining [mm]	Množství drátků [kg/m ³] Amount of wires [kg/m ³]	Prutová výztuž Steel bar reinforcement
1 Abatemarco	Itálie Italy	Vodovodní Water supply		18,0	3,5		40	ne no
2 Fanaco	Itálie Italy	Vodovodní Water supply			4,8	3	200	
3 Neapolské metro Napoli metro	Itálie Italy	Metro Metro	1995	5,2	5,8	300	40	ne no
4 Metro Janov Janov Metro	Itálie Italy	Metro Metro			6,2		25	ano yes
5 Barcelona - linie 9 Barcelona - line 9	Španělsko Spain	Metro Metro	2014	43,0	12	350	30 a 25	ano yes
6 Madrid metro Madrid metro	Španělsko Spain	Metro Metro			10		25	ano yes
7 Heathrow - zavazadlový Heathrow - baggage	Velká Británie Great Britain	Zavazadlový Baggage	1995	1,4	4,5	150	30	ne no
8 Jubilee Line Extension	Velká Británie Great Britain	Metro Metro	1999	2,4	4,45	200	30	ne no
9 Channel Tunnel Rail Link	Velká Británie Great Britain	Železniční Railway	2007	48,0	7,15	350	30	ne no
10 Heathrow - HexEx	Velká Británie Great Britain	Železniční Railway	2008	3,2	5,675	220	30	ne no
11 Heathrow - PiccEx	Velká Británie Great Britain	Metro Metro	2008	3,2	4,5	150	30	ne no
12 Heathrow - SWOT	Velká Británie Great Britain	Vodovodní Water supply	2006	4,0	2,9	200	30	ne no
13 Prodloužení DLR DLR Extension	Velká Británie Great Britain	Železniční Railway	2009	3,6	5,3	250		
14 Portsmouth	Velká Británie Great Britain	Vodovodní Water supply		8,0	2,9			
15 Sorenberg	Švýcarsko Switzerland	Plynovodní Gas supply	2002	5,2	3,8	250	40	ne no
16 Oenzberg - TBM	Švýcarsko Switzerland	Železniční Railway	2004	0,1	11,4	300	30	ano yes
17 Oenzberg - štít Oenzberg - shield	Švýcarsko Switzerland	Železniční Railway	2004	1,0	11,4	300	60	ne no
18 Hachinger	Německo Germany	Vodovodní Water supply	1998	7,0	2,2	180		
19 Hofoldingner	Německo Germany	Vodovodní Water supply	2007	17,5	2,9	180	40	ne no
20 Wehrhahnlinie Düsseldorf	Německo Germany	Metro Metro	2014		8,3		30	ne no
21 Teplovod v Kodani Heat supply, Copenhagen	Dánsko Denmark	Teplovodní Heat supply	2009	3,9	4,2	300	35	ne no
22 Kanalizace Big Walnut Big Walnut sewer	USA USA	Kanalizační Sewer	2008	4,8	3,7		35	ano yes
23 San Vicente	USA USA	Vodovodní Water supply	2006	13,2	2,6	177	30	ne no
25 Brightwater East	USA USA	Kanalizační Sewer	2010	4,2	5		35	ne no
26 Brightwater Central	USA USA	Kanalizační Sewer	2010	9,7	4,7	325	40	ne no
27 Brightwater West	USA USA	Kanalizační Sewer	2010	6,4	3,7	325	35	ne no
28 La Esperanza	Ekvádor Equador	Vodovodní Water supply	2002	15,5	4	200	30	ne no
29 Sao Paulo metro	Brazílie Brazil	Metro Metro		1,5	8,43	350	35	
30 Gold Coast	Austrálie Australia	Průmyslový / vodovodní Industrial / Water supply	2008	4,2	2,8	200	30	ne no
31 Hobson Bay	Nový Zéland New Zealand	Kanalizační Sewer	2009	3,0	3,7	250	40	ne no
32 Lesotho Highlands	Jižní Afrika South Africa	Vodovodní Water supply	1995	0,1			50	ne no
33 STEP Abu Dhabi	Spojené Arabské Emiráty United Arab Emirates	Kanalizační Sewer	2014	15,6	5,5		30	ano yes
34 Štoly MRT Line MTR line adits	Singapur Singapore	Technologický Technological		1,4	5,8		30	ne no
36 Brisbane Airport Link	Austrálie Australia	Silniční Road		4	11,34	400		

6 ZÁVĚR

Drátkobeton jako materiál má z pohledu prefabrikované výroby segmentů ostění pro tunely ražené plnoprofilovými tunelovacími štíty některé výhodné vlastnosti, z nichž pramení následující možné výhody drátkobetonových segmentů oproti segmentům železobetonovým:

- možnost snížení ceny konstrukce ostění tunelu,
- jednodušší a rychlejší výroba (odpadá výroba a osazení armo-košů),
- nižší nároky na prostor při výrobě (menší plochy potřebné pro skladování výztuže),
- úspora oceli (úspora energie a omezení produkce CO₂),
- jednodušší osazení vybavení tunelu (odpadá nebezpečí navrtání výztuže),
- snížení nebezpečí ulamování rohů a hran segmentů při manipulaci (nižší nároky na opravy),
- nižší nároky na údržbu během doby životnosti,
- předpoklad delší životnosti (odpadá nebezpečí koroze výztuže).

Z uvedených důvodů byl drátkobeton pro segmentová ostění využit na řadě projektů. Převážně se jednalo o tunely menších profilů (vodo- vodní, plynovodní či teplovodní tunely), v některých případech šlo o úseky metra (Londýn, Barcelona, Neapol). Nejrozsáhlejší využití drátkobetonových segmentů bylo na tunelech pro vysokorychlostní železnici Paříž – Londýn (projekt Channel Tunnel Rail Link – CTRL), kde bylo pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů postaveno 2x24 km jednokolejných tunelů, jejichž prefabrikované ostění bylo složeno z drátkobetonových segmentů bez použití běžně užívané ocelové výztuže.

V současné době provádí FSv ČVUT ve spolupráci firmou Metrostav, a. s., výzkum drátkobetonových segmentů pro tunelová ostění. V rámci výzkumu jsou realizovány zatěžovací zkoušky drátkobetonových segmentů Kloknerově ústavu (obr. 8), výsledky některých zkoušek jsou porovnávány se zkoušením železobetonových segmentů využívaných při výstavbě prodloužení trasy V.A pražského metra. O výsledcích zkoušek bude pojednáno v dalším článku v časopise Tunel.

Tento příspěvek byl zpracován s podporou grantů GAČR P104/10/2023, TAČR TA01011816 a studentského grantu SGS 161 - 820370A.

DOC. ING. MATOUŠ HILAR, Ph.D.,

matous.hilar@fsv.cvut.cz,

FSv ČVUT a D2 Consult Prague, s. r. o.,

ING. JAROSLAV BEŇO, jaroslav.beno@fsv.cvut.cz,

FSv ČVUT a Metrostav, a. s.

Recenzoval: doc. Dr. Ing. Jan Pruška



Obr. 8 Zatěžovací zkouška drátkobetonového segmentu prováděná v Kloknerově ústavu

Fig. 8 Loading test of a SFRC segment carried out in the Klokner Institute

construction of the extension of 5th section of the Line A of Prague metro. The test results will be dealt with in another paper in TUNEL journal.

This paper was carried out with the support provided by grants GAČR P104/10/2023, TAČR TA01011816 and the student grant SGS 161 - 820370A.

DOC. ING. MATOUŠ HILAR, Ph.D.,

matous.hilar@fsv.cvut.cz, FSv ČVUT a D2 Consult Prague,

s. r. o.,

ING. JAROSLAV BEŇO, jaroslav.beno@fsv.cvut.cz,

FSv ČVUT a Metrostav, a. s.

LITERATURA / REFERENCES

King, M. R. The Design and Use of Steel Fiber Reinforced Concrete Segments. *Proceedings Rapid Excavation and Tunnelling Conference 2005*.

Maidl, B. *Steel Fibre Reinforced Concrete*. Ernst & Sohn, 1995.

Moyson, D. *Precast Tunnel Segments with Steel Fibre Reinforced Concrete – A State of the Art*. Bekaert Publication.

Rivaz, B. *Steel fiber reinforced concrete (SFRC): The use of SFRC in precast segment for tunnel lining*. WTC 2008, Agra, India. 2008.

Schnütgen, B. Design of Precast Steel Fibre Reinforced Tunnel Segments'. In *Proc., RILEM TC 162-TDF Workshop*. Bochum (Germany). 2003.

Vandewalle, M. *Tunnelling is an Art*. 2005.

Woods, E., Shuttleworth, P., Fesq, C. Steel Fiber Reinforced Tunnel Linings. *Proceedings Rapid Excavation and Tunnelling Conference 2005*.

Tsuno, K., Ochiai, E., Matsubara, K., Kondo, Y. *Fireproof SFRC (Steel Fiber Reinforced Concrete) Segments-The first application to road tunnels in the world*. WTC 2011, Helsinki, Finland. 2011.

Harding, A., Chappell, M. *Design of Steel Fibre Reinforced Segmental Linings – Reflections on Design Challenges*. WTC 2012. Bangkok, Thailand. 2012.

Krátký, J., Trtík, K., Vodička, J. *Drátkobetonové konstrukce. Česká společnost pro beton a zdivo*. Praha: ČKAIT, 1999.

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

Rivaz, B. *Využití vláknobetonu v podzemním stavitelství*. Seminář CzTA. 2010.

Herka, P., Schepers, R. *Využití vláknobetonu v podzemním stavitelství*. Seminář CzTA. 2012.