

Betón s rozptýlenou výstužou v tunelových aplikáciách.

J.Doječák, Bekaert Hlohovec a.s.

A. STRIEKANÝ BETÓN S OCEĽOVÝMI VLÁKNAMI

Úvod

Betón s oceľovými vláknami je používaný v tunelových aplikáciách veľa rokov ako striekaný betón v primárnom ostení ale zároveň aj vo finálnom ostení. V uplynulom období bolo v mnohých krajinách realizované veľké množstvo výskumných prác a skúšobných programov hodnotenia charakteristík betónov s oceľovými vláknami - ďalej SFRC. Tieto práce veľmi prispeli k lepšiemu popisu charakteristík SFRC a napomohli k lepšiemu pochopeniu chovania sa tohto materiálu. Zároveň umožnili špecifikovať minimálne výkonnostné kritériá tohto systému pre každý projekt. Aktuálny stav danej technológie je dobre známy a množstvo medzinárodných noriem poskytuje jasné postupy a kvalitatívne kritériá pre bezpečné využívanie SFRC.

1. MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI OCEĽOVÝCH A POLYMÉROVÝCH VLÁKIEN

Schopnosť vystuženia vlákna v betóne závisí na jeho zakotvení v betóne, na ťahových charakteristikách a module pružnosti.

1.1 Ťahové vlastnosti vlákien

Ťahová pevnosť bežne na trhu dostupných oceľových vlákien sa pohybuje medzi 1000 až 2000 MPa. Výrobcovia makro syntetických vlákien, uvádzajú 300 až 600 MPa.

1.2. Modul pružnosti vlákien

Hodnota oceľových vlákien je na úrovni 210 000 MPa. Samotný betón dosahuje hodnotu cca 30 000 MPa, pričom modul pružnosti rozdielnych typov PP vlákien sa pohybuje v rozmedzí 3 000 až 10 000 MPa.

1.3. Špecifická hmotnosť vlákien.

Špecifická hmotnosť oceľových vlákien dosahuje hodnotu 7850 kg/m³. PP vlákna, naproti tomu, majú túto hodnotu na úrovni 910 kg/m³, a teda touto charakteristikou ležia pod hodnotou špecifickej hmotnosti vody. V praxi to znamená väčšiu pravdepodobnosť vyplávania PP vlákien na povrch betónového prvku so všetkými s tým súvisiacimi technologickými komplikáciami.

1.4. Odolnosť voči vyšším teplotám

PP vlákna (syntetické mikro vlákna) sa tavia pri teplotách cca 160 °C. Po roztopení PP vlákien sa vytvorí hustá sieť prázdnych kanálikov, cez ktoré kontrolovane unikajú vodné pary. Tento efekt zvyšuje odolnosť betónu voči vyšším teplotám počas požiaru, čo sa prejaví, v závislosti na množstve a type použitého vlákna, okamžitou elimináciou procesu odpraskávania povrchových vrstiev betónu. U makro syntetických vlákien, ktoré

sa tavia pri rovnakej teplote ako mikro vlákna, sa však tento pozitívny efekt neprejavuje v dôsledku rozmerových charakteristík týchto vlákien. Navyiac po roztavení makro vlákien pri vyšších teplotách sa samozrejme úplne stráca ich vplyv vystužovania. Pre porovnanie bod tavenia ocelových vlákien je výrazne vyšší, na úrovni cca 1500°C.

1.5. Korózna odolnosť vlákien.

Vzhľadom na chemické zloženie PP vlákna nepodliehajú korózii. Ocelové vlákna bez povrchovej (napr. pozinkované, antikoro) úpravy nachádzajúce sa na povrchu betónu môžu korodovať, čo však nemá za následok zhoršovanie vlastností betónového prvku ani pre medzný stav použiteľnosti ani pre medzný stav únosnosti. Vzhľadom na malé priemery ocelových vlákien (do 1 mm) a teda aj malé napätia vzniklé v dôsledku korózie, nedochádza pri korózných procesoch k odpraskávaniu betónu na povrchu prvku. Navyiac, keďže ocelové vlákna nie sú navzájom prepojené v betóne, po skorodovaní povrchových vlákien korózia nemôže ďalej pokračovať do objemu.

1.6. Obsah vlákien v čerstvom a vytvrdnutom betóne

Európska norma 14721 špecifikuje 2 metódy merania množstva ocelových vlákien v betóne:

Metóda A definuje meranie množstva vlákien vo vytvrdnutom betóne.

Metóda B definuje meranie množstva vlákien v čerstvom betóne.

U polypropylénových vlákien takáto metodika neexistuje, teda kvalitatívnu kontrolu nemožno realizovať.

1.7. Hydroizolácia vs ocelové vlákna

Pri prvých aplikáciách striekaných betónov s ocelovými vláknami zaznievali obavy o možnosti prepichnutia hydroizolácie prostredníctvom ocelových vlákien.

V r. 1993 financovala CETU (francúzska správa tunelov) výskum prerazenia geomembrány (600 gr/m²) prostredníctvom betónu s ocelovými vláknami, kde daná membrána bola tlačaná k doske s ocelovými vláknami hydraulickým tlakom. Rovnaké výsledky potvrdzujúce nepoškodenie tejto membrány v rámci CETU testov ocelovými vláknami v striekanom betóne boli dosiahnuté aj na iných skúšobných pracoviskách, ako aj v rámci realizovaných prác na množstve tunelových projektov.

2. VLASTNOSTI BETÓNU S OCEĽOVÝMI VLÁKNAMI

Betón s ocelovými vláknami je dobre známy pre svoju húževnatosť. Vplyv vlákien je daný kombináciou efektu vystužovania a tvorby siete. Ocelové vlákna menia predovšetkým chovanie sa betónu: transformujú krehký betón na húževnatý materiál, ktorý je schopný odolávať skutočné veľkým deformáciám bez straty únosnosti. Pod húževnatosťou je potrebné rozumieť redistribúciu zaťaženia s vyššou únosnosťou prvku s nezmenenými vlastnosťami betónu ako základného materiálu.

2.1 Kvalitatívne kritéria pre striekaný betón

Pre stanovenie absorbovanej energie určenej z krivky sila - priehyb sa používa skúšobná vzorka o rozmeroch 600 x 600 x 100 mm (viď EN 14.488-5). Dosky určené pre skúšku prepichnutia - ohybu sa pripravujú vo formách s rozmermi 600 x 600 x 100 mm. Dôraz

sa kladie na zabezpečenie rovného povrchu vzorky a na dodržanie hrúbky 100 mm pri striekaní betónu.

Proces striekania – prípravy vzoriek sa musí realizovať presne v rovnakých podmienkach ako proces samotného striekania primárneho ostenia v tuneli: receptúra betónu, strojné zariadenie, pracovník pri striekacom zariadení, metóda striekania.

Tento prístup simuluje podmienky reálneho chovania sa ostenia. Dáva dobrú predstavu o parametroch únosnosti ostenia a absorpcie energie v striekanom ostení.

Namiesto stanovenia mechanických vlastností vyžadovaných pri vhodnom dimenzačnom modeli s následným výpočtom dovoleného namáhania prvku umožňuje dosková EN skúška vynechať tento medzi krok a okamžite overovať absorpciu energie a únosnosť ostenia.

Je dôležité si jasne uvedomiť, že staticky neurčitá dosková skúška je štruktúrnou skúškou pre hodnotenie chovania sa konštrukcie. Nie je teda skúškou na stanovenie mechanických vlastností pre dimenzačné účely.

Na základe tejto skúšky sú stanovené 3 kvalitatívne triedy striekaného betónu s vláknami (E500, E700, and E1000) pre triedu betónu C30/37:

500 Joulov pre dobré horninové podmienky

700 Joulov pre stredne náročne horninové prostredie

1000 Joulov pre veľmi zlé horninové prostredie

Tieto hodnoty sú určované pre triedu betónu C30/37 obvykle navrhovanú pre dočasné ostenie. Príliš nízka, resp. príliš vysoká pevnosť v tlaku betónu môžu mať nežiadúce účinky.

V prípade vyššej pevnosti v tlaku betónu by mali byť zvýšené kritériá výkonnosti vláknobetónu (podľa EN normy) pre dosiahnutie rovnakej úrovne húževnatosti pri vyžadovanej bezpečnosti.

Dosková skúška je zároveň vhodná pre porovnanie rozdielnych typov a dávkovacích pomerov oceľových vlákien. Rovnako umožňuje porovnanie klasickej výstuže a vlákno výstuže v betóne za predpokladu rovnakého spôsobu porušovania v zmysle EN 14 487-1 Striekaný betón, definície, špecifikácie a zhoda. Toto je dôvod pre používanie kritérií výkonnosti na základe tejto skúšky pre porovnanie oceľovej klasickej a vláknovýstuže , teda materiálov s rovnakým modulom pružnosti.

Donedávna relatívny malý význam faktu únosnosti pri malej šírke trhliny a s malými priehybmi a rotáciami sa mení na dôležitý parameter pre projektantov tunelových stavieb.

Poznámka: Následkom nízkeho modulu pružnosti makro - syntetických vlákien a typu porušovania pozorovaného u tohto typu vlákien , nie je dosková deformačná skúška vhodná pre porovnávanie oceľových a makro - syntetických vlákien. V prípade použitia polymérových vlákien je nutné použiť doplňujúce kritérium zvyškovej pevnosti pre získanie komplexnej informácie o danej výstuži.

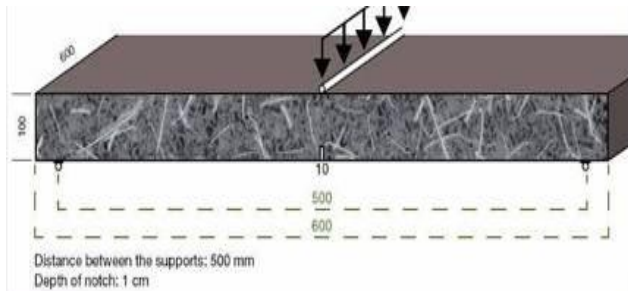
2.2 Reziduálna pevnosť: Vystužujúci efekt meraný na širokej ohybovej skúške

Pre stanovenie zvyškovej pevnosti sa využíva hlavne európska norma EN 14651: Skúšobná metóda pre betón s oceľovými vláknami – Meranie pevnosti v ťahu za ohybu (medza úmernosti(Limit of Proportionality/LOP), zvyšková).

Táto skúšobná metóda je uvádzaná v konečnom doporčení Rilem TC162TDF “Skúšobná a dimenzačná metóda betónu vystuženého oceľovými vláknami”.

Táto európska norma špecifikuje metódu merania pevnosti v ťahu za ohybu betónu s oceľovými vláknami na liatych vzorkách. Metóda poskytuje údaje pre stanovenie medze úmernosti (LOP) a informácie o skúšobnom zariadení pre zvyškovú pevnosť v ťahu za ohybu.

Skúšobná metóda je určená pre oceľové vlákna s dĺžkou do 60 mm. Metóda sa využíva tiež pri kombináciách kovových vlákien a kombinácii kovových a iných vlákien. Skúška umožňuje dodávateľovi navrhujúcemu betón s vláknami kontrolu potvrdzujúcu, že daný vláknotbetón spĺňa špecifikácie definované projektom a výpočtom. Na zlepšenie tohto prístupu navrhujeme sa riadiť nasledovnými požiadavkami:



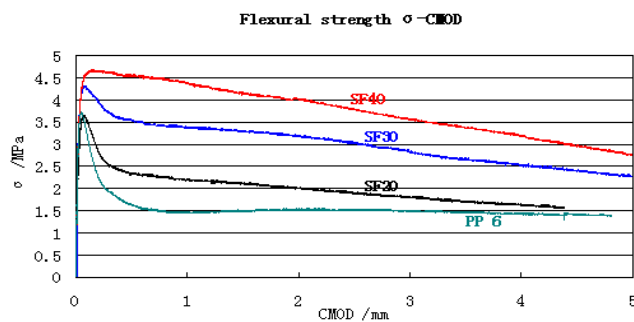
Obr. 1: Ohybová skúška 3 bodovým ohybom

Geometria, rozmery vzoriek a príprava skúšobných vzoriek musia zabezpečiť homogénnu distribúciu vlákien v matrici so splnením podmienok reálneho betónového prvku – primárneho ostenia alebo betónovej dosky.

Rozmery skúšobnej vzorky musia zabezpečiť vhodnosť manipulácie v skúšobnom laboratóriu (z hľadiska primeranej váhy a rozmerov).

Skúška je kompatibilná a dostupná pre väčšinu skúšobných laboratórií so štandardným vybavením.

Geometria vzorky je rovnaká aj pre EN 14 488-5 doskovú skúšku pre absorpciu energie. Rovnaká geometria je predpísaná pre izostatickú ako aj pre hyperstatickú skúšku. Skúšobný program je postavený na príprave vzoriek striekaním v rámci reálnej stavby tým istým spôsobom ako doskové vzorky s menším rozptylom výsledkom v porovnaní s klasickými ohybovými skúškami trámčekov.



Obr. 2: Ohybová pevnosť σ -CMOD

Výsledky pre rozdielne CMOD (otvorenie trhliny podľa EN 14 651)

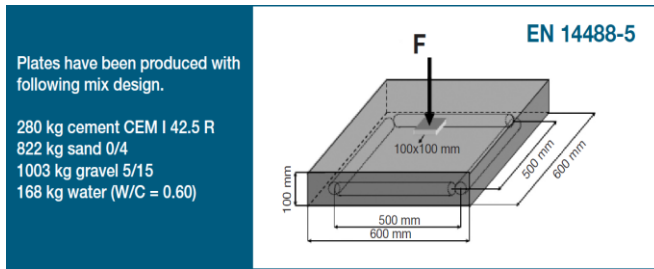
PP= makro - syntetické vlákno 6kg/m³

SF 20/30/40 = oceľové vlákno Dramix RC65/35BN s 20, 30,40 kg/m³

Po vzniku prvej trhliny klesá prudko únosnosť PP vláknotbetónu na cca 60%. To znamená, že 6 kg/m³ PP vlákien má menší vplyv na zvyškovú pevnosť než oceľové vlákna.

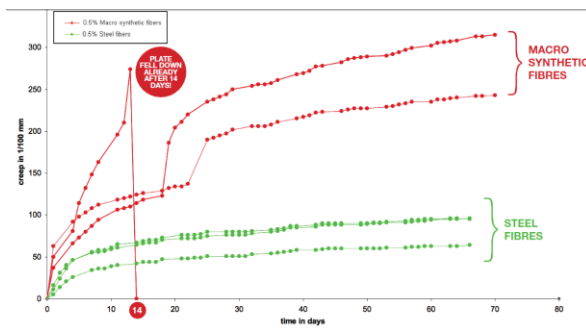
Vyššie dávkovanie makro - syntetických vlákien má zase na strane druhej silný negatívny efekt na spracovateľnosť a čerpaťnosť vláknotbetónu.

2.3 Creep betónu s ocel'ovými vláknami

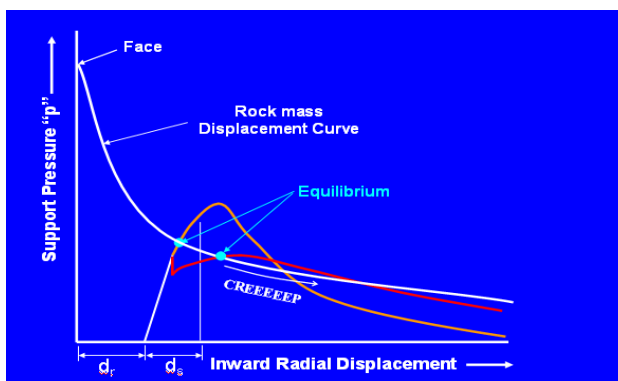


Obr. 3: Skúška creepu – štvorcová doska podľa EN 14488-5

Vzorky boli skúšané zaťažovaním s kontrolovanou deformáciou v zmysle EN 14488-5. Po dosiahnutí priehybu 3 mm bola vzorka odľahčená. Takto boli vzorky predpripravené na skúšku tečenia. Následne boli znova zaťažené silou na úrovni 60 % pôvodnej sily pri priehybe 3 mm. Priehyb je meraný a znázornený na y osi v mierke 1/100 grafu na obr. 4.



Obr. 4: Výsledky tečenia štvorcovej vzorky



Obr. 5: Krivka tlak horniny –vnútorná radiálna deformácia

Výsledok tečenia: tento typ materiálu (červená čiara) neposkytuje významný vystužovací efekt s cieľom stabilizácie horniny a minimalizácie akýchkoľvek budúcich pohybov horniny.

2.4 Dimenzačné postupy pre betón s ocelovými a makro - syntetickými vláknami

Od októbra 2003 je k dispozícii dokument Rilem TC 162-TDF: Dimenzačné doporučenia pre betón s ocelovými vláknami. Pre betón s makrosyntetickými vláknami nie je v súčasnosti takáto smernica k dispozícii.

2.5 Kontrola kvality betón s ocelovými a makro - syntetickými vláknami

Časťou kvalitatívnej kontroly sú vyplavovacie skúšky ako bežné skúšky pre stanovenie množstva vlákien v čerstvom betóne. Je to možné za predpokladu že vlákna je možné detekovať a odstrániť pomocou magnetu, čo platí samozrejme len pre ocelové vlákna.

ZÁVER

Ocelové vlákna v striekanom betóne sú dlhodobo úspešne odskúšavané ako spoľahlivý stavebný materiál pre tunelové aplikácie. Po 30 rokoch skúseností je ohlas investorov veľmi pozitívny. Pre dané aplikácie sú pre ich používanie k dispozícii medzinárodné normy.

Makro - syntetické vlákna sa využívajú v striekanom betóne pre niektoré banské aplikácie (často sú v kombinácii so sieťovinou) alebo pre niektoré špecifické technické požiadavky. Ako štruktúrna výstuž betónu sa nevyužívajú makro - syntetické vlákna ale len ocelové vlákna. Dôvody sú nasledovné:

- Polymérové vlákna sa roztavia pri 165°C; po roztavení pri vyšších teplotách neposkytujú žiaden vystužujúci účinok.
- Modul pružnosti $E = 3000 - 10000$ MPa, čo je výrazne nevyhovujúci parameter pre vystužovanie betónu s modulom pružnosti $E = 30\,000$ MPa.
- Makro - syntetické vlákna majú vyššie hodnoty tečenia.

Presný skúšobný program a kvalitatívne kritériá výkonnosti by mali byť špecifikované pre každý projekt ako predpoklad zabezpečenia požiadaviek technických charakteristík ako aj bezpečnostných požiadaviek.

LITERATÚRA

Rilem TC162-TDF: "Test and design methods for teel fibre reinforced concrete", TC Membership, Chairlady L. Vandewalle, *Materials and Structures, Vol 36, October 2003, P560-567*

Rossi (LCPC, International fiber expert, fib and rilem comitte) *Tunnel and Tunneling Magazine July 2009*

Charles Allen – *Fibre Decider Tunnel and Tunneling October 2009*

Lambrechts A. N. (2005). "The Technical Performance of Steel and Polymer Based Fibre Concrete". *Concrete for a New World - The Institute of Concrete Technology/Annual Technical Symposium/5 April 2005.*

R. Ratcliffe Be MieAust CPEng *Steel versus Synthetic Fibre Reinforcement Shotcrete.*
The European standards *EN 14 487-1* Sprayed concrete, definition, specification and conformity

The European standards *EN 14.488-5* Testing sprayed concrete - Part 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens

Brite Euram Project (Durability final report)

B. BETÓN S OCEĽOVÝMI VLÁKNAMI V TUNELOVÝCH PREFABRIKOVANÝCH SEGMENTOCH

Tento článok prezentuje používanie betónu s rozptýlenou výstužou v tunelových aplikáciách so zameraním na prefabrikované tunelové segmenty. Sú tu analyzované skúšky vláknobetónu, jeho špecifikácie, ktoré spoločne ovplyvňujú výkonnosť betónu s oceľovými vláknami. Tento materiál je považovaný za najhodnejšiu alternatívu predovšetkým z hľadiska odolnosti voči koncentrovanému zaťaženiu a dynamickým účinkom. Vysoké hodnoty koncentrovanej sily pôsobia na tunelový segment, pričom práve toto zaťaženie je rozhodujúcim požadovaným zaťažením. V uplynulom období sa uskutočnilo množstvo výskumných programov za účelom zistenia vplyvu oceľových vlákien na tieto kritické oblasti zaťažovania. Daný príspevok poskytuje podrobný prehľad o dosiahnutých výsledkoch týchto skúšok.

V deväťdesiatych rokoch sa začali rozpracovávať doporučenia dimenzačných postupov pre betón s oceľovými vláknami. Od októbra 2003 je k dispozícii dokument Rilem TC 162-TDF: Doporučenia pre dimenzovanie betónu s oceľovými vláknami.

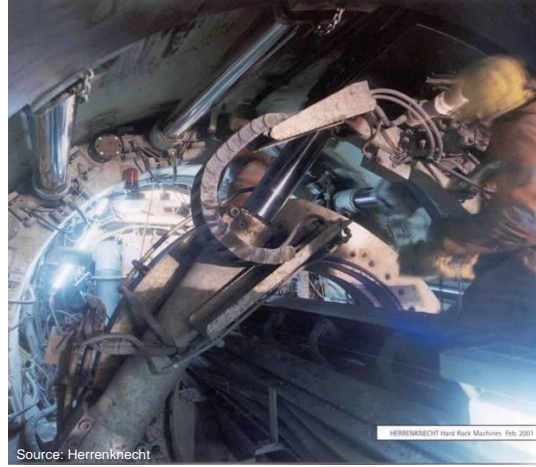
Na rozdiel od vyjadrení mnohých členov tunelárskych spoločností betón s oceľovými vláknami nie je novou technológiou. Táto výstuž bola používaná už viac než 25 rokov v tunelových segmentoch ako štrukturálna výstuž a pre účely zvýšenia životnosti. Po jej prvom použití v prefabrikovaných segmentoch v Taliansku v r. 1982, bolo realizovaných množstvo projektov po celom svete - v UK, Nemecku, Singapure, Ekvádore, Brazílii, Kanade, Novom Zélande a v USA.

1 POŽIADAVKY NA DIMENZOVANIE

Rovnako ako pre akýkoľvek nosný prvok, musí byť aj pre prvky tunelových segmentov realizovaná seriózna analýza. Pri dimenzovaní sú tieto prvky unikátnym stavebným prvkom, nakoľko pri výpočte musí byť zohľadňované množstvo zaťažujúcich stavov pôsobiacich na tento prvok. Segmenty sú vystavené počas výroby niekoľko hodín namáhaniu v ohybe hlavne pri transporte z foriem a pri ukladaní do komôr pre ošetrovanie betónu pri jeho vytvrdzovaní. Po 24 hodinách pobytu v týchto komorách sa segmenty ukladajú na uskladňovacie podpery. Potom sú transportované na stavbu, spúšťané resp. dopravované do tunela a inštalované do pozície ostenia metódou TBM. Pri tejto inštalácii zariadenie TBM (tlačné valce) vytvára vysoké koncentrované zaťaženie spôsobujúce odpraskávanie betónu. Po pokládke segmentov do ostenia razeného tunela tieto prenášajú vysoké tlakové napätia a znižujú ohybové napätia ich prenosom do ostenia.



Obr. 1: Skladovanie segmentov



Obr. 2: Pôsobenie tlačných síl TBM na segment

Dimenzačný návrh segmentu v sebe spája požiadavky viacerých účastníkov projektu s ich vlastnými kvalitatívnymi očakávaniami. Výrobca segmentu požaduje rýchlu a efektívnu výrobu s počiatočnou vysokou pevnosťou v ťahu za ohybu. Dodávateľ prác očakáva inštaláciu segmentov s vyhovujúcimi parametrami, bez poškodzovania segmentov pri ich inštalácii a manipulácii s nimi, čo znamená požiadavku vysokej pevnosti v ťahu.

Projektant vyžaduje od segmentu prenos zaťaženia od horniny, teda hydrostatických síl a splnenie požiadaviek medzného stavu použiteľnosti s odolnosťou voči tlakovým a ohybovým charakteristikám. A konečne investor očakávajúci dlhodobé riešenie s adekvátnou životnosťou s čo najnižšími nákladmi na údržbu.

Betón s oceľovými vláknami možno dimenzovať so zohľadnením vyššie uvedených požiadaviek. Samozrejme existujú určité pravidlá výpočtu so zreteľom na dané požiadavky. V nasledovnej kapitole bude analyzovaná výkonnosť betónu s oceľovými vláknami ako rozhodujúca charakteristika, s ktorou je nutné uvažovať.

Hlavným cieľom tohto článku nie je analýza výpočtových metód betónu s oceľovými vláknami. Každý projektant tunela posudzuje dané zaťažujúce stavy konkrétneho tunela a počíta s vyskytujúcimi sa napätiami v segmentoch.



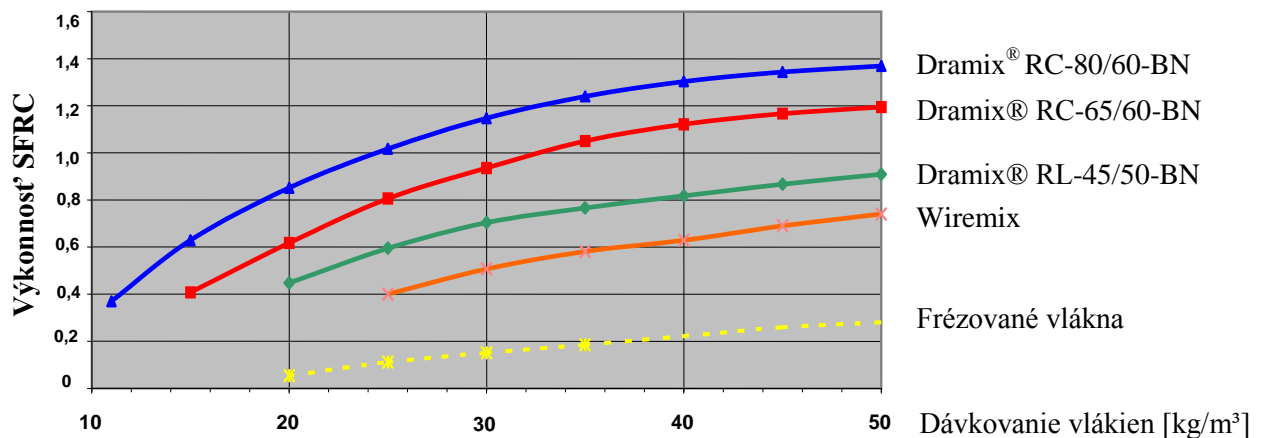
Obr.3 Schéma pôsobiacich síl na segmenty

2 VÝKONNOSŤ OCEĽOVÝCH VLÁKIEN

Podobne ako u iného typu výstuže je dôležité zabezpečiť v priereze prvku postačujúce množstvo vláknovýstuže. Pri porovnávaní kvality 2 typov a dávkovacích pomerov vlákien je problematické dospieť k správnym záverom. Príčina spočíva v rozdielnych faktoroch významne ovplyvňujúcich výkonnosť/efektivitu oceľového vlákna. Týmito hlavnými charakteristikami sú:

- materiálové parametre
- tvar (rovné, ohnuté konce, vlnkovité, zakrúcané, kužeľovité)
- dĺžka (30 až 60mm)
- priemer (0,4 až 1,3mm)
- pevnosť v ťahu (1000 – 2500 N/mm²)

V prípade rovnakého typu kotvenia vlákien majú rozhodujúci vplyv na výkonnosť vlákien dĺžka a priemer vlákna. Je známy fakt, že výkonnosť vlákna sa zvyšuje pri vyššej dĺžke vlákna a znižujúcom sa priemere vlákna. Pre zabezpečenie homogenity oceľových vlákien v betóne boli vyvinuté špeciálne lepené vlákna. Ide predovšetkým o vysoko výkonné vlákna ktorých množstvo v 1 kg je výrazne vyššie ako u štandardných vlákien. Lepenie vlákien zároveň eliminuje riziko tvorby zhlukov – ježkov.



Obr. 4: Výkonnostné triedy v závislosti na dávkovaní a type vlákna

Hneď ako prebehne proces premostenia vzniklej trhliny oceľovými vláknami tak dochádza k stavu tzv. post - trhlinovej pevnosti. Táto hodnota závisí predovšetkým na type oceľového vlákna. Pre dosiahnutie vysokej pevnosti po vzniku trhliny sú rozhodujúce nasledovné kritériá :

- Typ oceľového vlákna
- Ohnuté konce a teda tvar
- Čím menší priemer

- Čím väčšia dĺžka
- Čím vyššia štíhlosť
- Prispôbená pevnosť v ťahu vlákna voči pevnosti v ťahu betónu
- Optimalizovaná receptúra betónu

Nasledovné 3 príklady oceľových vlákien prezentujú celkovú dĺžku vystužujúcej siete a množstvo jednotlivých vlákien v 1 kg/m³. Pomer l/d znamená dĺžka/priemer.

RL-45/50-BN l/d = 45	L = 147 m / kg	2800 vlákien/ kg
RC-65/60-BN l/d = 65	L = 200 m / kg	3200 vlákien/ kg
RC-80/60-BN l/d = 80	L = 288 m / kg	4600 vlákien/ kg

S väčším množstvom vlákien a s väčšou dĺžkou jednotlivého vlákna sa zvyšuje pravdepodobnosť stretnutia sa trhliny s vláknom .

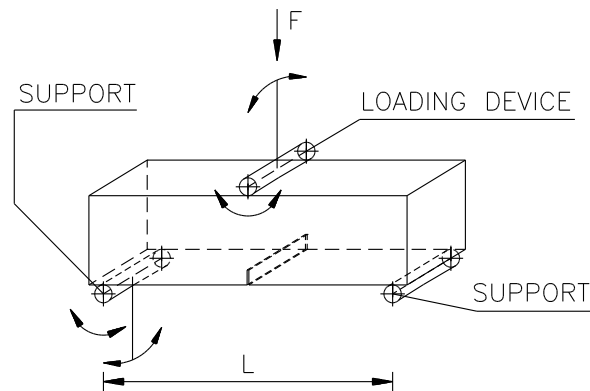
3 Skúšanie výkonnosti betónu s oceľovými vláknami

3.1 Staticky určité trámčekové skúšky

Skúšanie materiálových vlastností je realizované pomocou trámčekových skúšok. (obr. 5, 5.1). Tieto skúšky sú staticky určité a z nich je možné odvodiť dimenzačné napätia (napr. pre M-N interakciu a šmyk). Výsledky týchto skúšok sú podkladom pre dimenzovanie tunelových segmentov. Nižšie uvedený obr. prezentuje typickú schému skúšky na 3 a 4 bodový ohyb. V tejto súvislosti je potrebné spomenúť už zavedenú skúšobnú metódu podľa EN 14651 [8] a japonskú normu JSCE SF-4 [10] pre trámčekové skúšky.

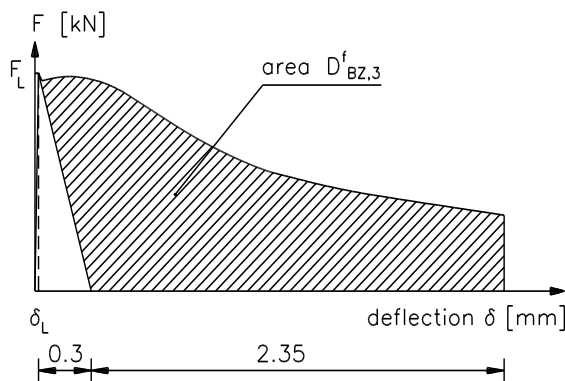


Obr. 5: Skúška pre 4 bodový ohyb

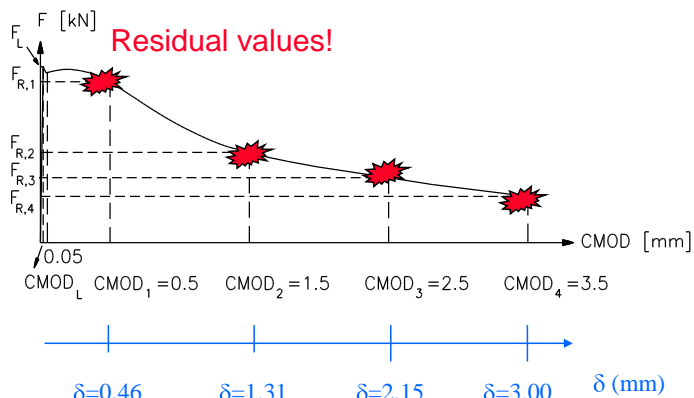


Obr. 5.1: Skúška pre 3 bodový ohyb vzorky s vrubom

Výsledkom ohybovej skúšky je závislosť sila- priehyb, z ktorej sa určuje pevnosť v ťahu za ohybu betónu s oceľovými vláknami. Hodnoty zvyškovej pevnosti sa odčítavajú pre daný priehyb vzorky, pričom hodnoty ekvivalentnej pevnosti predstavujú charakteristiky výkonnosti stanovené z plochy pod napäťovo - deformačnou krivkou. Vo všeobecnosti sa trámčeky zaťažujú do priehybu 3,0 mm.



Obr.6: Závislosť sila-priehyb, Vyhodnotenie plochy pod krivkou podľa JSCE SF-4



Obr. 7: Závislosť sila- priehyb, Stanovenie hodnôt zvyškovej pevnosti podľa EN 14651

3.2 Overenie skúškami

Pre dimenzovanie prvkov z betónu s oceľovými vláknami sú k dispozícii teoretické modely, u ktorých bola overená ich spoľahlivosť. Tieto dimenzačné modely s prijatými zjednodušeniami musia korelovať s oveľa komplexnejšími reálnymi prvkami a zaťažujúcimi podmienkami. Dokonca veľmi detailný dimenzačný prístup nebude schopný dosiahnuť limitnú hodnotu odolnosti materiálového systému. Zvlášť pre dimenzačné modely formulované veľmi všeobecne alebo pre výpočtové vzťahy ktoré využívajú až extrémne koeficienty bezpečnosti (neuvažujúc potenciál plastického chovania sa materiálu) sú skúšky reálnych segmentov vhodným prostriedkom na potvrdenie skutočných charakteristík daného materiálového systému. Niekedy je preto nevyhnutné odsledovať chovanie sa reálnych segmentov vystavených kombinovanému zaťaženiu na nich pôsobiacich síl (kap. 5).



Obr. 8: Skúška tunelového segmentu o reálnych rozmeroch

4 Experimentálny program na spojoch medzi tunelovými segmentmi ostenia

4.1 Úvod

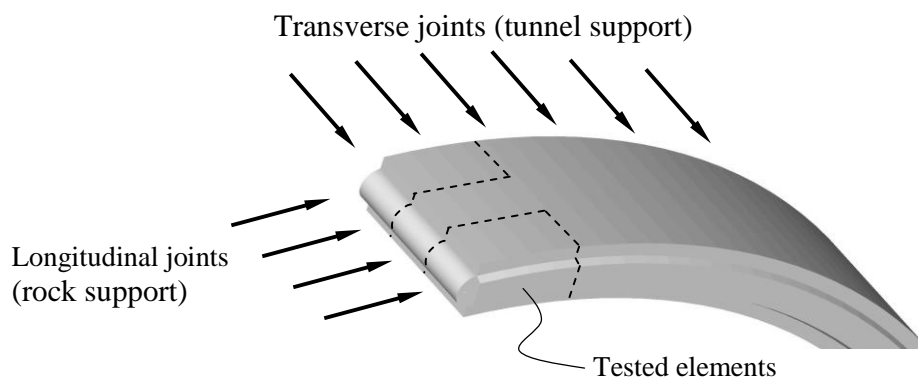
Pri realizácii tunelových stavieb metódou TBM pomocou prefabrikovaných tunelových prvkov musí byť zvláštna pozornosť venovaná dimenzovaniu spojov segmentov. Tieto spoje sú skutočne extrémne namáhané a tak porušenie betónu v spoji môže významne negatívne ovplyvniť stabilitu celej konštrukcie tunela. Koncentrované zaťaženie iniciované technológiou TBM (tlakové sily) alebo na spojení medzi dvoma segmentovými prvkami spôsobuje väčšinu poškodení jednotlivých tunelových prvkov ostenia. Existuje niekoľko výpočtových rovníc popisujúcich spôsoby odvodu síl pri vyskytujúcom sa rozdrvení a prasknutí okraja segmentu. Betón s oceľovými vláknami je považovaný za vhodný materiálový systém pre takéto prípady, keďže predstavuje vystuženie v celom objeme prvku a tak významne znižuje náchylnosť betónu na poškodzovanie v exponovanej časti prvku. V určitých geologických podmienkach a v špeciálnych prípadoch sú na segmenty a na zvlášť na ich spoje vyvodzované dodatočné vyššie zaťaženia.

Tunel Oenzberg, v lokalite na hlavnej dopravnej línii medzi mestami Bern a Zurich, bol vybudovaný investorom Švajčiarske Federálne Železnice (CFF) so zámerom rozvoja železničnej infraštruktúry. Vo vzdialenosti cca 80 m od výhodného portálu pretína tento tunel ďalší železničný tunel. Nepriaznivé geologické podmienky zapríčinili navýšenie zaťaženia na tunelové segmenty a čiastočne aj na spoje týchto segmentov. Takto bolo nevyhnutné dovystuženie týchto segmentov v zóne kde sa oba tunely pretínali.

Bolo uvažované s množstvom riešení vystužovania a po mnohých diskusiách bolo vybrané použitie betónu vystuženého oceľovými vláknami. Po pridaní dostatočného množstva oceľových vlákien tieto zvyšujú pevnosť v ťahu betónu a zlepšujú húževnatosť betónového prvku. Navyše bola eliminovaná potreba komplikovaných armokošov v blízkosti spojov segmentu. Pre posúdenie charakteristík a efektivity betónu s oceľovými vláknami pre tunelové prefabrikované segmenty poveril investor CFF pracovisko University of Applied Sciences (UAS) Fribourg vypracovaním porovnávacej experimentálnej štúdie.

Skúšobný program (experimentálna štúdia)

Pre analyzovanie odolnosti prvkov ostenia voči koncentrovanému zaťaženiu boli realizované tlakové skúšky na podĺžnych a priečných spojoch segmentov. [3,4]. Tieto skúšky boli vykonané na časti reálnych segmentov, vyrezaných z prefabrikovaných prvkov vyrobených počas realizácie tunela Oenzberg (obr. 9).



Obr. 9: Vyrezané časti skúšaných prvkov segmentu

Na priečne spoje (s nutnou podporou) sú pôsobiace sily vyvodzované tunelovacím strojom čo spôsobuje zaťažovanie segmentov ostenia priamo v mieste jeho pokládky. U pozdĺžnych spojov je zaťažovanie iniciované okolitou horninou, v niektorých prípadoch tunela Oenzberg slabším ostením susediaceho tunela.

Pre dané porovnanie boli zvolené 3 alternatívne riešenia vystužovania:

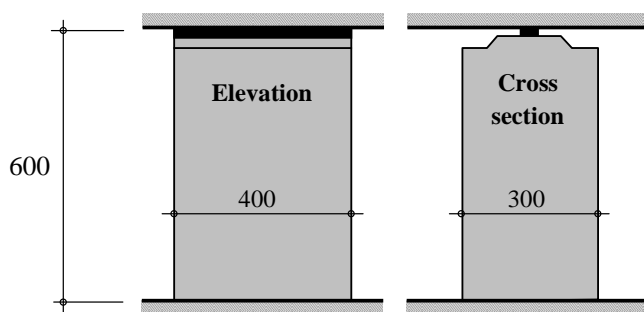
- Betón vystužený prúťovou výstužou (klasické armokoše),
- Betón s oceľovými vláknami, 60 kg/m^3 ,
- Kombinovaná výstuž betónu s oceľovými vláknami, 30 kg/m^3 , a redukovaná prúťová výstuž.

Tieto tri alternatívy boli predmetom experimentálneho programu. Štúdium procesov na spojoch segmentov tunelového ostenia (obr.10) sa týkalo:

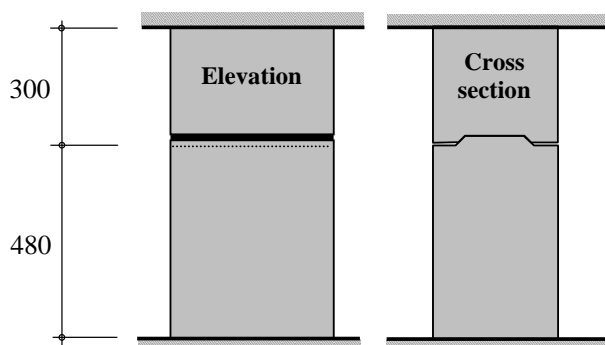
- Pri skúškach priečných spojov pôsobí líniové zaťaženie medzi dvoma susediacimi segmentmi ostenia na styčnú plochu o šírke 200 mm.
- U pozdĺžnych spojov je zaťaženie iniciované prostredníctvom kruhovej dotykovej plochy. Pre zabezpečenie stability dvoch oblých segmentov ostenia boli použité oceľové podpery z oboch strán. Zakrivené časti 2 segmentových prvkov boli potočené pre obmedzenie excentricity zaťažovania.

Pre doplnenie, skúšky únosnosti boli realizované na priečných spojoch s využitím lineárnej sily pôsobiacej po celej dĺžke prvku prostredníctvom oceľovej platne širokej 60 resp. 100 mm. Účelom týchto skúšok bolo sledovanie pôsobenia koncentrovaných síl na segment ostenia. Bola vykonané série skúšok pri veľmi vysokých tlakových zaťaženiach. Tieto skúšky únosnosti nereprezentujú reálne prípady zaťaženia, ale boli určujúce pre posúdenie vplyvu koncentrovaného zaťaženia na daný prvok.

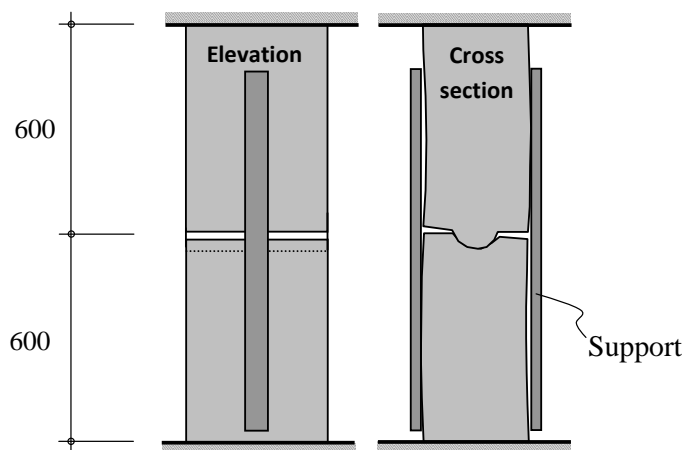
a) Joint bearing strength tests



b) Tests on transverse joints



c) Tests on longitudinal joints

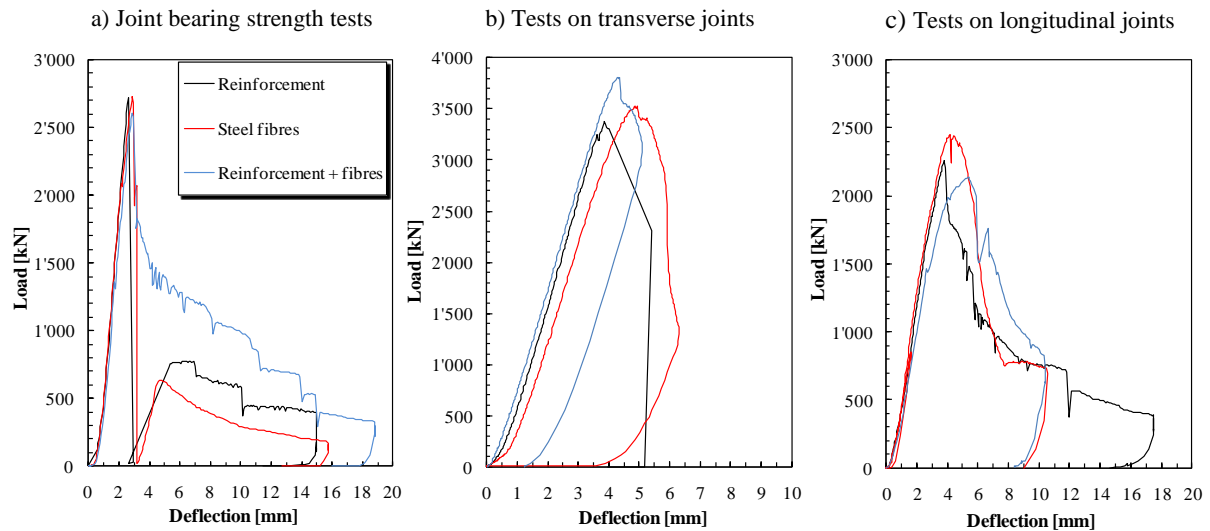


Obr. 10: Skúšky spojov medzi segmentami

4.2 Skúšobné výsledky

Použitím betónu s oceľovými vláknami, buď samostatne alebo v kombinácii s klasickou výstužou, sa dosahuje takmer rovnaká maximálna sila (obr. 11). Na pozdĺžnych spojoch s ich okrúhlym tvarom je inštalácia efektívnej klasickej výstuže len ťažko realizovateľná. To spôsobuje rozsiahlu zónu nevystuženého betónu. Oceľové vlákna však sú schopné vystužovať aj tieto problémové časti spoja segmentu, zároveň im poskytujú vyššiu odolnosť voči poškodeniu kombinovanú s húževnatejším chovaním sa betónu.

Pohyby okolitej horniny môžu skutočne iniciovať deformácie oblúkového prvku. Preto je požadovaná schopnosť segmentu odolávať týmto deformáciám. Práve na obr. 11c je znázornené, že riešenie s oceľovými vláknami ako jediné dosiahlo najvyššie hodnoty zaťažujúcej sily.



Obr. 11: Zaťažujúce krivky sila – priehyb rozdielnych skúšok spojov segmentov

5 Literatúra

- [1] M. Vandewalle, Tunnelling is an Art, NV Bekaert SA, 8550 Zwevegem, Belgium, 2005.
- [2] P. Marti, T. Pfyl, V. Sigrist, T. Ulaga, Harmonized Test Procedures for Steel Fibre Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, Vol 96 No 6/1999.
- [3] R. Suter, K. Bergmeister, Tübinge aus Stahlfaserbeton, Beton- und Stahlbetonbau 11/2004, pp. 858-864.
- [4] R. Suter, P. Buchs, Precast fibre reinforced tunnel lining segments, Experimental Study, Final Report, University of Applied Sciences, Fribourg, 2008.
- [5] H. Falkner, Stahlfaserbeton - ein unberechenbares Material ?, Bauseminar, IBMB Heft 164, Braunschweig, 2002.
- [6] Th. Pfyl, Tragverhalten von Stahlfaserbeton, PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 2003.
- [7] R. Suter, L. Moreillon, High performance fibre reinforced concrete, Experimental Study, Final Report, University of Applied Sciences, Fribourg, 2009.
- [8] EN 14651, Test method for metallic fibered concrete – Measuring the flexural tensile strength (Limit of proportionality (LOP), residual)

- [9] EN 14889-1, Fibres for concrete – part 1, Steel fibres – Definitions, specifications and conformity
- [10] JCI, Test for flexural strength and toughness for fibre reinforced concrete, JSCE SF-4 Japan Concrete Institute, 1984