

Laboratorní zkoušení vzorků drátkobetonu navrženého pro výrobu tunelových segmentů

M.Hilar

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

J. Vodička, J. Krátký & V. Ráček

FSv ČVUT v Praze, Praha, ČR

ABSTRAKT: Záměna konstrukčního železobetonu za konstrukční prostý vláknobeton při realizaci vhodně vytypované betonové konstrukce nesporně vede k řadě výhod. Všechny výhody jsou dány vlastnostmi vláknobetonu a to jak pevnostními tak, a to především, vlastnostmi přetvárnými. Za vhodnou konstrukci pro aplikaci vláknobetonu lze považovat nosná, prefabrikovaná ostění tunelových staveb. Namáhání prefabrikovaných segmentů, zejména při montáži ostění, vede často u prvků vyztužených betonářskou výztuží k mechanickému porušení styčných ploch. Užitím vláknobetonu lze porušení styčných ploch zabránit, což je jedna z velkých výhod při záměně konstrukčních materiálů.

Cílem příspěvku je ukázat přístup k záměně konstrukčních materiálů (tj. přístup od návrhu složení vláknobetonu až po výsledky z experimentálních zkoušek klenáku vyrobeného z prostého drátkobetonu). Vlastnosti drátkobetonu byly ověřovány standardních vzorcích. Na krychlích o hraně 150 mm byla ověřována pevnost v prostém tlaku, na trámcích rozměrů 700 x 150 x 150 mm byla ověřována ohybová pevnost.

Výchozí hmotnostní dávky ocelových vláken (drátků) 50 kg/m³ a 70 kg/m³ i vybrané typy drátků (Dramix, Tri Treg) byly voleny z důvodu dosažení odolnosti prvku proti mechanickému poškození segmentů při výrobě, dopravě, montáži ostění a během životnosti konstrukce, zejména ale s ohledem na danou tloušťku segmentů 250 mm (traťové tunely prodloužení trasy A pražského metra). Z realizovaného programu zatěžovacích zkoušek segmentů je v tomto příspěvku popsána pouze zkouška klenáku v prostém tlaku, která byla provedena jako první. Výsledky tlakové zkoušky vláknobeto která byla provedena také.

1 VÝSLEDKY MATERIÁLOVÝCH ZKOUŠEK

Pro zkoušený klenák byl navržen a odsouhlasen prostý vláknobeton s ocelovými vlákny Dramix při dávkování vláken $m_f = 50 \text{ kg/m}^3$. Nejprve byla uskutečněna průkazní zkouška na šesti krychlích

o hraně 150 mm krychelná pevnost v tlaku podle ČSN EN 12390-3 (tab. 1).

Tabulka 1. Pevnost v tlaku ověřená na krychlích

Ozn. vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objem. hmotnost [kg/m ³]	Tlaková síla [kN]	$f_{c,i}$ [MPa]
	b [mm]	h [mm]	l [mm]				
4	149,0	147,6	150,4	7968	2409	1520	69,1
5	148,5	150,8	150,5	8209	2436	1437	64,2
6	151,0	150,5	151,2	8285	2411	1634	71,9
10	150,5	155,9	150,6	8214	2325	1565	66,7
11	147,7	154,0	150,3	8156	2386	1474	64,8
12	150,2	155,3	150,7	8359	2378	1561	66,9
Průměrná hodnota:					2391	1532	67,3

V tab. 1 je uvedena i průměrná krychelná pevnost $f_{fc, mc, cub} = 67,3$ MPa.

Z hodnot uvedených v tab.1 lze dále stanovit:

směr. odchylku šesti vzorků: $s_6 \approx 2,58$ MPa

charakteristický rozptyl:

$$\Delta f_{kc, cub, 3} = 1,48 \cdot 2,85 = 4,25 \text{ MPa}$$

krychelnou pevnost:

$$f_{fc, kc, cub} = 67,3 - 4,25 = 63,05 \text{ MPa}$$

Pro stanovení pevnostní třídy tohoto vláknobetonu v tlaku lze použít tabulku 2.7.1b z TP-FC 1-1, tj. nejbližší nižší hodnotu charakteristické krychelné pevnosti

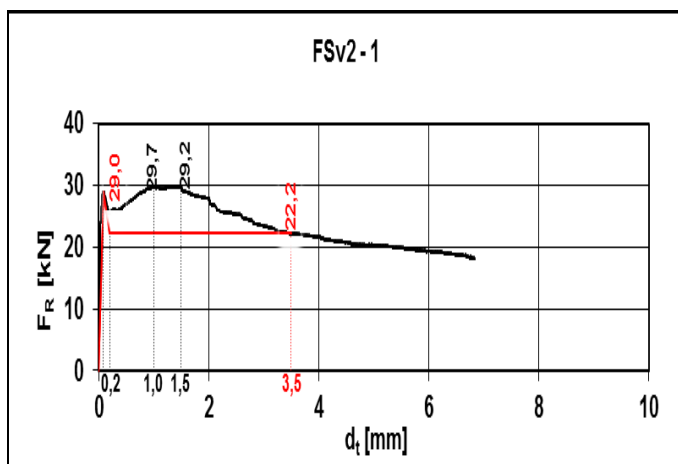
$$f_{fc, kc, cub} = 60 \text{ MPa} < 63,05 \text{ MPa}$$

a vláknobeton lze označit jako:

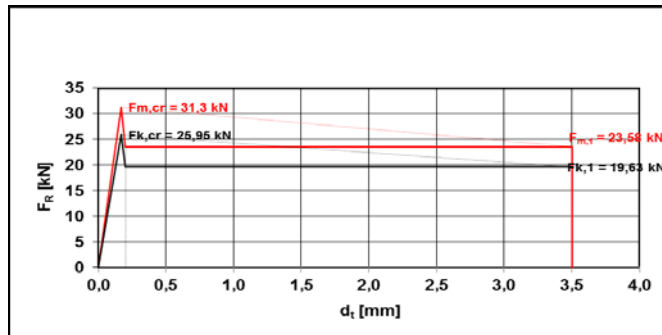
FC $f_{fc, kc, cyl} / f_{fc, kc, cub} = \text{FC } 55/60$

při uvážení poměru 0,9 mezi válcovou a krychelnou pevností.

Pro stanovení tahových pevností vláknobetonu byly využity zkoušky trámek ohybem při čtyřbodovém zatížení. Zkoušky prováděl Kloknerův ústav ČVUT v Praze a výsledky tzv. diagramů odolnosti trámek ($F_R - \delta_t$) byly stanoveny pro dohodnuté průhyby δ_{ti} standardního trámu všech šesti zkušebních vzorků.



Obrázek 1. Diagram odolnosti trámku



Obrázek 2. Zjednodušené idealizované diagramy odolnosti: průměrný, charakteristický

Grafické vyjádření diagramů odolnosti ($F_R - \delta_{ti}$) je ilustrován na obr. 1. Pro zjednodušené odvození charakteristických pevností vláknobetonu je na Obr. 1 též vyznačen (červeně) idealizovaný diagram odolnosti při dvou mezních průhybech: na mezi vzniku makrotrhliny $\delta_{t, cr}$, při dohodnutém mezním průhybu $\delta_{t, 3.5} = 3,5$ mm

Při vyhodnocení veškerých pevností všech trámek vychází (viz. obr. 2):

1) na mezi vzniku makrotrhliny průměrná odolnost trámek

$$F_{Rm, cr} = 31,3 \text{ kN, při směrodatné odchylce } s_6 = 3,64 \text{ kN}$$

a charakteristickém rozptylu u šesti trámek:

$$\Delta F_{Rk, 6} = 1,48 \cdot 3,64 \approx 5,4 \text{ kN, takže charakteristická odolnost je}$$

$$F_{Rk, cr} = 31,3 - 5,4 = 25,9 \text{ kN}$$

2) při mezním průhybu $\delta_t = 3,5$ mm je průměrná odolnost trámku

$$F_{Rm, 1} = 23,6 \text{ kN, při směrodatné odchylce } s_6 = 2,7 \text{ kN}$$

a charakteristickém rozptylu u šesti trámek:

$$\Delta F_{Rk, 6} = 1,48 \cdot 2,7 = 4,0 \text{ kN, takže charakteristická odolnost}$$

$$F_{Rk, eq, 1} = 23,6 - 4,0 = 19,6 \text{ kN}$$

Průměrné a charakteristické pevnosti v tahu vláknobetonu

Při zkoušce trámek ohybem a čtyřbodovém zatížení platí pro standardně uspořádané zkoušky obecný vztah

$$M_E = \frac{1}{2} F_R \frac{l}{3} = F_R \frac{l}{6}$$

Na mezi vzniku makrotrhliny pro $F_{Rm,cr} = 31,3$ kN je

$$M_{m,cr} = 31,3 \cdot \frac{0,6}{6} = 3,13 \text{ kNm}.$$

Průměrná pevnost v tahu za ohybu při kvazilineárněpružném chování trámek je potom

$$f_{fc, tm, fe, cr} = 6 \cdot M_{m,cr} / bh^2 = 6 \cdot 3,13 / 0,15^3 \approx 5,56 \text{ MPa}.$$

Pro charakteristickou pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu potom obdobně platí pro

$$F_{Rk,cr} = 25,9 \text{ kN je } M_{k,cr} = 2,59 \text{ kNm}$$

a charakteristická pevnost v tahu za ohybu:

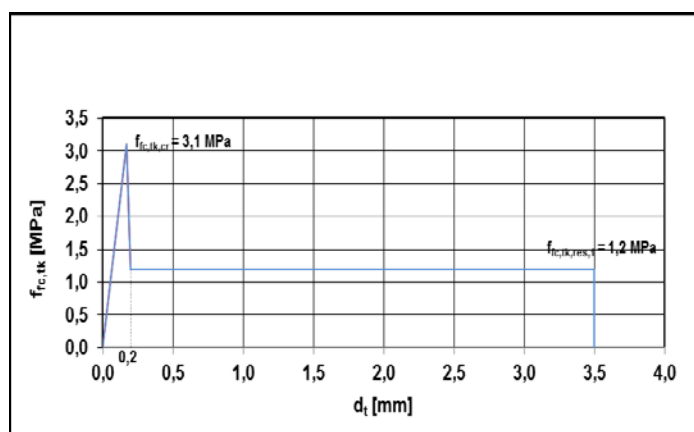
$$F_{fc,tk,fe,cr} = 6 \times 2,59 / 0,15^3 = 4,61 \text{ MPa}.$$

Odvozená charakt. pevnost vláknobetonu v dostředném tahu při vzniku makrotrhliny

$$f_{fc,tk,cr} = f_{fc,tk,fe,cr} / 1,45 = 4,61 / 1,45 = 3,18 \text{ MPa}$$

Pevnostní třída vláknobetonu v dostředném tahu podle Tab 2.7.2 TP FC 1-1 (obr. 3):

$$f_{fc,tk} = 3,1 \text{ MPa}$$



Obrázek 3. Příklad charakteristického diagramu ($f_{fc,tk} - \delta_{t,i}$) tj. (charakt. pevnost v tahu dostředném – průhyb) při zjednodušeném vyhodnocení diagramu odolnosti

Při dosažení mezního průhybu $\delta_{t,1} = 3,5 \text{ mm}$ je:

$$F_{m,1} = 23,6 \text{ kN}$$

$$M_{m,1} = 0,1 \times 23,6 = 2,36 \text{ kNm},$$

$$f_{fc, tm, eq, 1} \approx 2,2 \times 2,36 / 0,15^3 \approx 1,54 \text{ MPa}$$

Odvozená ekvivalentní charakteristická pevnost vláknobetonu v dostředném tahu při $\delta_{t,1} = 3,5 \text{ mm}$ (podle TP FC 1-1)

$$f_{fc,tk,eq,1} = 2,2 M_{m,1} / bh^2 = 2,2 \cdot 1,963 / 0,15^3 = 1,28 \text{ MPa}$$

$$\text{kde } M_{m,1} = 0,1 \cdot 19,63 = 1,963 \text{ kNm}$$

Pevnostní třída FC v dostředném tahu při $\delta_{t,1} = 3,5 \text{ mm}$ (viz. Tab 2.7.3 TP FC 1-1)

$$f_{fc, tk, res, 1} = 1,2 \text{ MPa}$$

Pevnostní třída FC v tlaku stanovená zkouškou krychelné pevnosti je: FC 55/60

Takže plné označení FC Senec, Dramix 50 kg/m^3 je FC 55/60 – 3,1/1,2.

2 VÝROBA ZÁVĚREČNÉHO KLENÁKU

Výroba závěrečného dílce (klenáku) pro účely zkoušení proběhla v Senci, kde byly vyráběny všechny segmenty pro prodloužení trasy A pražského metra. Na obr. 4 je zachycena betonáž a následné odbednění drátkobetonového klenáku.



Obrázek 4. Betonáž drátkobetonového klenáku a odbednění klenák

3 ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY ZÁVĚREČNÉHO KLENÁKU

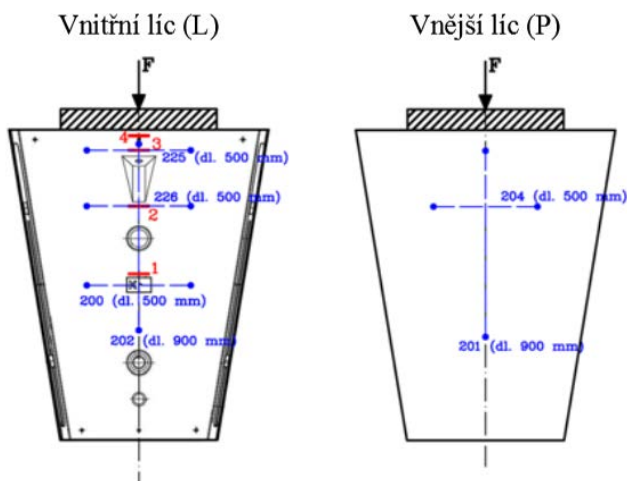
Zkoušení železobetonového a drátkobetonového závěrečného segmentu (klenáku – označení „K“) bylo realizováno v laboratoři Kloknerova ústavu ČVUT v Praze. V obou případech zkoušky byly klenáky zkoušeny v tlaku tak, aby bylo simulováno zatížení podélnými lisy tunelovacího štítu

(technologie TBM) při jeho postupu do horninového masivu na čelbě tunelu (tj. směr působící síly je rovnoběžný s podélnou osou tunelové trouby).

Při zkoušení byla vždy kontinuálně zaznamenávána hodnota působící síly, ale zároveň byly měřeny i velikosti deformací. Ty se měřily jednak osazenými potenciometrickými snímači dráhy, ale také signály z odporových tenzometrů, které byly vždy umístěny na povrchu segmentu (viz. obr. 5).

Prefabrikát byl umístěn v obou případech na vozík zkušebního stavu a na horní tlačenu plochu byla osazena nejprve deska z novoduru tl. 9 mm a na ní další deska z ocelového plechu P20. Obě desky odpovídaly tvarem dosedacím plochám tunelovacího štítu.

Působící síla byla zvyšována s přírůstkem 300 kN a mezi jednotlivými zatěžovacími stupni byl segment odtižen na hodnotu 90 kN.

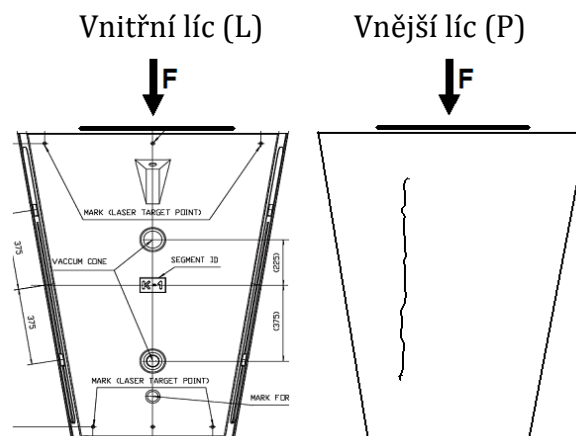


Obrázek 5. Uspořádání zkoušky včetně rozmístění potenciometrů a tenzometrů

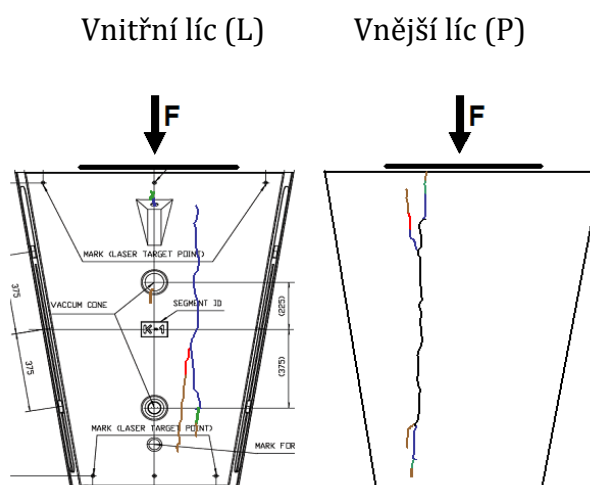
Tab. 2: Výsledné porovnání naměřených sil u dvou rozdílně vyztužených klenáků při zkoušce tlakem

Beton	ŽB	Drátkobeton
Vznik první trhliny při síle F_{cr} [kN]	3300	4200
Max. dosažená síla F_u [kN]	5868	cca 7200

A) DRÁTKOBETONOVÝ SEGMENT

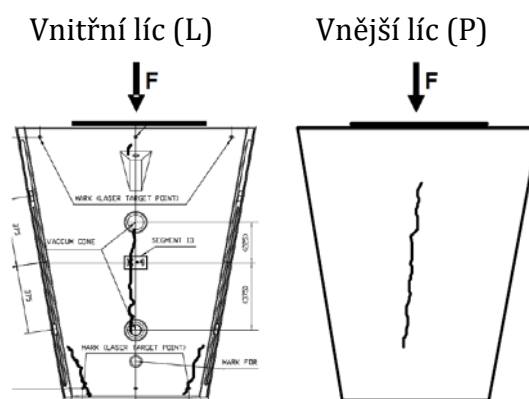


Obrázek 6. Záznam výskytu makrotrhliny – drátkobetonový klenák – $F_{fc,cr} = 4200\text{kN}$

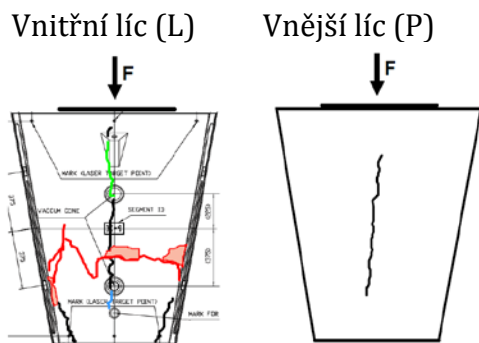


Obrázek 7. Záznam trhliny při dosažení mezního zatížení – drátkobetonový klenák – $F_{fc,u} = 7200\text{kN}$

B) ŽELEZOBETONOVÝ SEGMENT



Obrázek 8. Záznam výskytu makrotrhliny – železobetonový klenák – $F_{c,cr} = 3300\text{kN}$



Obrázek 9. Záznam trhliny při dosažení mezního zatížení – železobetonový klenák – $F_{c,u} = 5868\text{kN}$



Obrázek 10. Porovnání klenáků dosažení mezní únosnosti:
a) železobetonový klenák
b) drátkobetonový klenák

4 DISKUSE K VÝSLEDKŮM

Ze získaných výsledků zkoušek drátkobetonu je možné uvést následující závěry:

- Výsledky průkazných zkoušek podle dílčích objemových hmotností vyrobeného drátkobetonu ukazují na přijatelnou homogenitu vyrobeného drátkobetonu. Stejně tak rozptyl tlakových pevností a tahových pevností zjištěných při ohybových zkouškách je v přijatelných mezích.
- Z vyčíslených charakteristických pevností lze

vláknobeton zařadit do pevnostní třídy podle FC TP – 1 část 1.

- Ze zkoušek reálného klenáku segmentového ostění lze konstatovat lepší chování drátkobetonového prvku oproti prvku železobetonovému – pozdější vznik a rozvoj trhlin, způsob porušení i vyšší zatížení, které vedlo k destrukci klenáku.

5 ZÁVĚR

V obou případech zjištěného zatížení, jak při vzniku makrotrhliny, tak na mezi únosnosti drátkobetonový klenák dosáhl vyšších hodnot a to o cca 25%. Důležitá je zejména hodnota při vzniku první trhliny, která určuje mezní stav použitelnosti. Z uvedeného lze konstatovat, že drátkobetonový prvek vykázal cca 3x větší únosnost, než je předpokládaná maximální tlaková síla hydraulických lisů na tunelovacím štítu pro ražbu prodloužení trasy A pražského metra, která je $F_E = 2430\text{ kN}$.

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

REFERENCE

- [1] TP FC 1-1 Technické podmínky 1: Vláknobeton – Část 1 Zkoušení vláknobetonu – Vyhodnocení destruktivních zkoušek a stanovení charakteristického pracovního diagramu vláknobetonu pro navrhování vláknobetonových konstrukcí (ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra betonových a zděných konstrukcí, Praha 2007)
- [2] Vokáč M., Bouška P.: *Experimentální zkoušky segmentů prefabrikovaného ostění metra V.A - Segment K z drátkobetonu*; ČVUT, Kloknerův ústav; Praha; 21.srpen 2011;