

## NÁVRH NOSNÉ KONSTRUKCE Z DUCTALU DESIGN OF STRUCTURE FROM DUCTAL

**MARK REBENTROST, PAVEL VANĚK**

Reaktivní jemnozrný beton (RPC) může být charakterizován jako ultravysokohodnotný beton s pevností v tlaku v úrovni 200 MPa. RPC byl vyvinutý společností Lafarge, Rhodia a Bouygues, mateřskou společností firmy VSL, a je registrován pod obchodní značkou Ductal®. Mimořádné mechanické vlastnosti a trvanlivost RPC umožňují lehké, estetické a vysoce efektivní konstrukční řešení mostů, lávek pro pěší nebo různorodých architektonických aplikací (obr. 1, 2, 3).

Reactive powder concrete (RPC) can be described as an ultra-high strength concrete with compressive strength in excess of 200 MPa. RPC was originally developed by Rhodia, Lafarge and Bouygues, the parent company of VSL, and is a registered trademark under the name Ductal®. The superior mechanical and durability properties of RPC enable lighter, aesthetically enhanced and highly efficient structural solutions of road and pedestrian bridges and architectural applications to be achieved.

Ductal se skládá z cementu, jemného písku, křemičitého úletu a moučky, superplastifikátorů, vody a může obsahovat buď vysokopevnostní ocelová nebo poly-

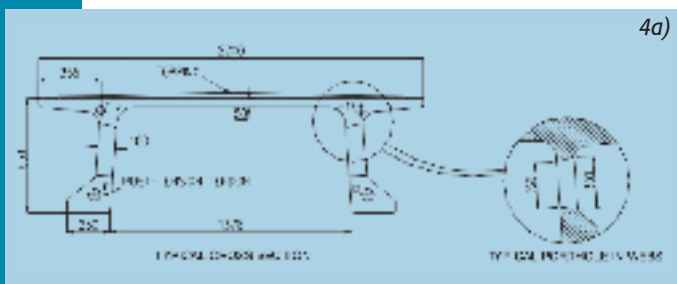
merní vlákna. RPC se zpravidla používá bez měkké výztuže, přičemž hlavní tahová napětí od ohybového momentu eliminuje předpětí a druhotná tahová napětí přenášejí vysokopevnostní ocelová vlákna obsažená v matici.

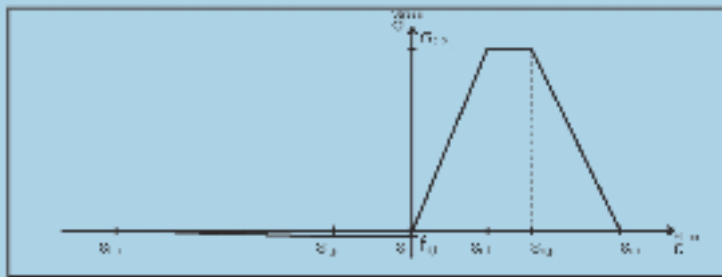
RPC se stává stále používanějším materiálem především u konstrukcí lávek i vzhledem k tomu, že nové materiály a inovační konstrukční řešení se u investora snáze prosazují u těchto konstrukcí než např. u konstrukcí dálničních mostů.

Příkladem takového projektu je

soustava lávek pro pěší realizovaná v rámci přestavby železniční stanice v novozélandském Aucklandu. Lávky se skládají z několika prostě podepřených polí s rozpětími od 7,25 do 25,3 m, typické pole má rozpětí 20,4 m. Nosníky s délkou větší než 10,2 m jsou vzhledem k přepravním podmínkám tvořeny dvěma segmenty a dodatečně předepnuty na staveništi.

Průřez nosníku je tvaru písmene II šířky 2 200 mm, výšky 650 mm a s tloušťkou desky 50 mm, která je vykonzolo-





Tension		Compression	
Flexure Tensile Strength - $f_{ct}$	7,00 MPa	Compressive Strength - $f_{cd}$	110 MPa
Direct Tensile Strength - $f_{td}$	6,50 MPa	Strain at Tensile Failure - $\epsilon_{ct}$	1000 MPa
Flexure Tensile Modulus - $E_{ct}$	14 000	Maximum Strain at Ultimate Tensile Strength - $\epsilon_{ct,ult}$	11800 MPa
Design Tensile Strength - $f_{td,des}$	4,19 MPa	Maximum Tensile Strain - $\epsilon_{td,des}$	112 MPa
Maximum Tensile Strain - $\epsilon_{td,max}$	11100	Residual Strain at Ultimate Tensile Strength - $\epsilon_{ct,r}$	2100
Design Tensile Strain - $\epsilon_{td,des}$	11100	Maximum Strain at Ultimate Tensile Strength - $\epsilon_{ct,ult}$	3100

Other	
Young's Modulus - $E_c$	47000 MPa
Design Compressive Strength - $f_{cd}$	110 MPa
Flow Type	Non-4
Heat Treatment	No

5

Vlastnost	Hodnota
<b>Materiálové vlastnosti</b>	
Charakteristická pevnost v tlaku [MPa]	140
Návrhová pevnost v tahu za ohybu [MPa]	4
Youngův modul pružnosti [GPa]	47
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	2 450
<b>Trvanlivostní vlastnosti</b>	
Celková pórovitost [%]	2-6
Mikropórovitost (>10 $\mu$ m) [%]	< 1
Koeficient propustnosti (vzduchu) [m <sup>2</sup> ]	2,5 x 10 <sup>-18</sup>
Absorpce vody [kg/m <sup>2</sup> ]	< 0,2
Difúze chloridových iontů [m <sup>2</sup> /s]	0,02 x 10 <sup>-12</sup>
Elektrický odpor (bez ocelových vláken) [k $\Omega$ .cm]	1,13 x 10 <sup>3</sup>
Elektrický odpor (s ocelovými vlákny) [k $\Omega$ .cm]	137

Tab. 1. Materiálové vlastnosti Ductalu použitého v projektu

Tab. 1. Material characteristics of Ductal used in the project



6

1. MS – Únosnost	Moment [kNm]	Smyková síla [kN]
Max (komb. 2A) – 1,2(DL + FP + TP)	1 659	330
Min (komb. 3A) – 1 (0,8DL – EQ – 0,33TP)	187	37
<b>2. MS – Použitelnost</b>		
	Průhyb [mm]	Rozpětí/průhyb
Max (komb. 2B) – PT(serv.) + DL + FP + WD	11,4	1 763
Min (komb. 3B) – PT(serv.) + 0,9DL + WD	-22,6	-889

Tab. 2. Výsledky od rozhodujících zatěžovacích stavů

Tab. 2. Results of main loading states

Obr. 1 Lávka Sunyudo, rozpětí 120 m, Jižní Korea

Fig. 1 Sunyudo Footbridge, span 120 m, South Korea

Obr. 2 Lávka Sakata-Mirai, rozpětí 51 m, Japonsko

Fig. 2 Sakata-Mirai Footbridge, span 51 m Japan

Obr. 3 Skořepiny tloušťky 20 mm, Kanada  
Fig. 3 Curved shell elements 20 mm thick, Canada

Obr. 4 Typický příčný řez a čelo kontaktně betonovaného segmentu a), b)  
Fig. 4 Typical cross section and match cast joint a), b)

Obr. 5 Zjednodušený pracovní diagram  
Fig. 5 Idealised stress-strain diagram

Obr. 6 Manipulace s prefabrikovaným segmentem  
Fig. 6 Manipulation with pre-cast segment

na 400 mm od os stojin nosníku (obr. 4). Deska není vyztužena, veškerá ohybová a smyková namáhání jsou přenášena díky materiálovým pevnostním charakteristikám pouze Ductalem. Torzní tuhost je zajištěna žebry vystupujícími 350 mm od horního povrchu desky v osové vzdálenosti 2 700 mm. Nosníky jsou předepnuty dvěma desetilánovými jednotkami v patách stojin a dvěma šestilánovými jednotkami při horním povrchu s předpínacími lany  $\varnothing$  12,7 mm. Průběh předpínacích kabelů je přímý, pouze s mírným zakřivením na koncích nosníku.

Nosníky z Ductalu byly navrženy podle návrhového postupu vydaného University of New South Wales ve spolupráci s VSL Austrálie. Hodnoty uvedené v následujících odstavcích jsou uvažovány pro typický nosník délky 20,4 m.

V tab. 1 jsou uvedeny pro tento pro-

jekt použité materiálové vlastnosti Ductalu. Skutečná průměrná hodnota pevnosti v tlaku zkoušených vzorků byla významně vyšší, charakteristická pevnost byla dosažena na 95 % vzorků. Díky absenci kapilární porozity vykazuje Ductal extrémně vysokou odolnost proti vniku agresivních látek, jak ukazují trvanlivostní vlastnosti v tab. 1.

Návrhové zatížení lávky bylo počítáno dle AS/NZS 1170(10), s uvažováním vlastní tíhy (pouze 770 kg/m), užitého zatížení, zatížení teplotou, větrem a seismicitou. V tab. 2 jsou uvedeny výsledky od rozhodujících zatěžovacích stavů.

Pro analýzu průřezu byl použit software I-Spark v upravené verzi, který analyzoval průřez ve všech fázích zatěžování, od dodatečného předepnutí po mez kluzu vyztuže až do vysokého stupně přetížení za současného uvažování neli-

nearity materiálu a geometrie průřezu. Díky spolupráci s autory softwaru může uživatel ve výpočtu volit řadu ovlivňujících parametrů včetně druhu vláken a režimu ošetřování Ductalu.

Zjednodušený pracovní diagram Ductalu uvažovaný pro návrh je zobrazen na obr. 5. Ve výpočtu byla použita hodnota  $\sigma_{c,p}$  140 MPa charakteristické pevnosti v tlaku, pro návrhovou pevnost v tahu  $f_{dt}$  hodnota 4 MPa, což představuje bezpečnostní koeficient cca. 6, pokud hodnotu tahové pevnosti porovnáme s výsledky dosaženými na testovaných vzorcích. Mez pevnosti je definována v bodě, kdy poměrné přetvoření vláken  $\epsilon_{0,u}$  dosáhne hodnoty 0,0035. Velikost předpínacích kabelů byla stanovena na základě požadované pevnos-

ti a s vyloučením tahu ve spáře mezi segmenty při plném užitém zatížení. Výsledkem byl výpočtový moment únosnosti 1 659 kNm a výpočtová smyková pevnost 679 kN dosažená pouze Ductalem, a to bez smykové výztuže.

Ohybový moment na desce byl prověřován jednak mezi stojinami a jednak na konzolách v krajích průřezu. Deska tloušťky 50 mm vyztužená pouze ocelovými vlákny poskytuje výpočtový moment únosnosti 3,1 kNm, což je o 60 % více než požadovaná hodnota.

Jednotlivé segmenty byly prefabrikovány ve výrobně VSL v Melbourne, která je vybavena RPC betonárkou. Pro dosažení požadovaného tvaru a povrchu nosníků bylo použito speciálně navržené ocelové bednění skládající se z pevné

vnitřní formy a dvou pohyblivých bočních forem. Po převezení na stavbu byly nosníky dodatečně předepruty, zainjektovány a byla nabetonována vrchní nášlapná vrstva lávky. Následovala instalace zábradlí a osazení nosníků na pilíře.

V návrhu lávky byl použitý efektivní tvar lehké a zároveň architektonicky atraktivní konstrukce. Bylo demonstrováno, při jakých parametrech nosník o rozpětí 20,4 m splňuje požadované meze pevnosti a použitelnosti, v příčném směru deska tloušťky pouhých 50 mm nebyla díky ohybové pevnosti Ductalu nijak dodatečně vyztužena.

Uvedený příklad ukazuje, že ultravysokohodnotné betony nejsou náhradou železobetonu, ale díky svým vlastnostem nabízí projektantům možnost inovačních návrhů konstrukcí s vynikající životností.

Dr. Mark Rebentrost

VSL Australia Pty. Ltd.

6 Pioneer Avenue, Locked Bag 102

Pennant Hills NSW 2120, Thornleigh

Australia

www.vsl.com

Ing. Pavel Vaněk

VSL SYSTÉMY (CZ), s. r. o.

V Násypu 339/5, 152 00 Praha 5

tel.: 251 091 680, fax: 251 091 699

e-mail: vsl@vsl.cz, www.vsl.cz



7a)



7b)



7c)

Obr. 7 Soustava lávek pro pěší, Nový Zéland  
a), b), c)

Fig. 7 Series of footbridges, New Zealand  
a), b), c)