

# EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ OHYBOVÉ PEVNOSTI DESEK Z UHPC ■ EXPERIMENTAL DETERMINATION OF FLEXURAL STRENGTH OF SLABS MADE OF UHPC

Milan Holý, Petr Tej, Jiří Kolísko,  
Lukáš Vráblík

Článek je zaměřen na stanovení ohybové pevnosti tenkých desek z ultra vysokohodnotného betonu vyztuženého ocelovými vlákny (UHPC). Únosnost prvků bez betonářské výztuže vyztužených pouze rozptýlenou výztuží v podobě drátků v ohybu je ovlivněna především orientací a distribucí vláken a projevuje se u nich size-effect. Speciální tělesa – deskové pruhy o tloušťkách 40, 50, 60, 70 a 80 mm – byla testována ve čtyřbodovém ohybu na rozpětí 1 900 mm a ve třibodovém ohybu na rozpětí 600 mm v poloze stejné jako při betonáži a obrácené dnem vzhůru. Vyhodnocené ohybové pevnosti byly porovnány s pevnostmi stanovenými referenčními ohybovými zkouškami na trémciích o velikostech 150 × 150 × 700 mm, 100 × 100 × 400 mm a 40 × 40 × 160 mm. Byly vyhodnoceny vlivy velikosti prvku, tloušťky desky, rozpětí a polohy vzhledem k betonáži na únosnost v ohybu. Experimenty byly dále podpořeny numerickou simulací. ■ This paper focuses on the determination of the flexural strength of thin slabs made of the Ultra High-Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPC). The load-bearing capacity in bending of elements reinforced only with steel fibres (used as a scattered reinforcement) is primarily influenced by the orientation and distribution of the fibres. A size-effect occurs in these elements. Bending tests were executed on some special test specimens – slabs strips. The slab strips of various thickness of 40, 50, 60, 70 and 80 mm were tested in 4-point bending tests with span of 1 900 mm and in 3-point bending tests with span 600 mm. Half of the test specimens was tested in casting position, the other half was tested upside down. The obtained values of the flexural strength were compared to values from reference bending tests of the beams 150 × 150 × 700 mm, 100 × 100 × 400 mm and 40 × 40 × 160 mm. Influence of the different size of the tested specimen, of the slab thickness, of the span size and of the positioning of the slab with respect to the direction of casting on the flexural strength are evaluated. The experiments were further supported by numerical simulation.

Vzhledem k tomu, že tahová odezva vláknobetonů obecně není pevně definovaná materiálová vlastnost, byly v rámci vývoje segmentů mostovky pro spřažené dřevo-UHPC (ultra vysokohodnotný beton vyztužený ocelovými vlákny) lávky provedeny speciální ohybové zkoušky za účelem stanovení pevnosti v tahu za ohybu pro konkrétní okrajové podmínky.

## EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

V současné době probíhá na Kloknerově ústavu ČVUT ve spolupráci se společnostmi Novák & Partner vývoj technologie spřažené dřevo-betonové lávky s využitím prefabrikovaných segmentů mostovky z UHPC. Konceptně byly segmenty navrženy jako tenké desky konstantní tloušťky z UHPC vyztužené pouze rozptýlenou výztuží v podobě ocelových drátků. Segmenty jsou uloženy na dvou dřevěných trámech, se kterými jsou spřaženy. V podélném směru segmenty spolupůsobí s trámy a jsou namáhány převážně tlakovou silou a ohybem. V příčném směru staticky působí jako prostý nosník s převalujícími konci. Pro návrh jejich tloušťky je rozhodující únosnost v příčném směru, ve kterém jsou namáhané pozitivním i negativním ohybovým momentem a smykovou silou.

## Pevnost vláknobetonů v tahu

Odezva daného materiálu na vnější silové zatížení se nazývá mechanická vlastnost a bývá charakterizována fyzikální veličinou, nejčastěji napětím (pevností) a deformací (mezním přetvořením). Tahová odezva vláknobetonů není obecně pevně definovaná materiálová vlastnost. Hodnota tahové pevnosti je závislá nejen na konkrétní receptuře, množství a vlastnostech použitých vláken a typu zkoušky, ale závisí zejména také na uspořádání a orientaci vláken v konkrétním průřezu a vyhodnocovaném směru. Uspořádání a orientace vláken jsou silně ovlivněny rozměrovým efektem (size-effect – menší tělesa vykazují vyšší pevnost) a stěnovým efektem (wall-effect – dochází k usměrnění vláken o stěny formy, projevuje se nejvíce u tenkých prvků). Uspořádání a orientace vláken závisí kromě tvaru a velikosti konkrétního prvku také na způsobu jeho výroby. Tato problematika byla studována již mnoha autory po celém světě a je podrobně zpracována např. v [7], [10], [13].

Uspořádání a orientace vláken (v tomto případě ocelových drátků) v betonové matici tedy není homogenní. Drátky v blízkosti bednění se orientují podélně s bedněním. Vlivem gravitace mohou drátky sedat od vrchu dolů a orientovat se spíše do vodorovné pozice. Při horním povrchu desky tak např. při nevhodné konzistenci může dojít k částečné

absenci drátků a naopak při spodním povrchu může dojít k jejich větší koncentraci.

U betonů běžných pevností se aplikují tři způsoby stanovení pevnosti v tahu: test příčným tahem, ohybem anebo prostým tahem. Každý test poskytuje jinou hodnotu – pevnost v prostém tahu, pevnost v tahu za ohybu (ohybová pevnost) a pevnost v příčném tahu. Pro účely materiálu UHPC jsou podstatné testy v ohybu či prostém tahu, ze kterých je možno odvodit skutečné materiálové charakteristiky pro návrh prvků.

## Zkušební tělesa pro stanovení ohybové pevnosti

Na základě různých platných norem existuje pro stanovení pevnosti betonu v tahu za ohybu více typů zkoušek, které se liší zejména velikostí vzorků a statickým schématem. Zkoušky se provádějí většinou na trémciích namáhaných čtyřbodovým či třibodovým ohybem se zářezem či bez zářezu. O správnosti aplikace a interpretovatelnosti výsledků konkrétního zkušební postupu pro vláknobetonové konstrukce se vedou neustále diskuze, proto bylo provedeno pro porovnání více různých typů zkoušek.

Byly provedeny zkoušky ve třibodovém ohybu na trémciích 100 × 100 × 400 mm a 150 × 150 × 700 mm se zářezem (dle ČSN EN 14651+A1 [3]) a ve čtyřbodovém ohybu na trémciích 150 × 150 × 700 mm a 100 × 100 × 400 mm (dle ČSN P732452 [6]). Vzhledem k jemnozrnnosti UHPC byly provedeny testy také na trémciích 40 × 40 × 160 mm (pro testování cementu dle ČSN EN 196-1 [4]) ve třibodovém ohybu bez zářezu (podle ČSN EN 12390-5 [5]). U testů ve třibodovém ohybu se zářezem byly osazeny senzory pro měření rozevření trhliny CMOD.

Je nutno upozornit, že normové zkušební trémky mají rozpětí, které je pouze malým násobkem výšky průřezu, a proto se na jejich průhybu významnou měrou podílí smykové deformace (jejich podíl činí pro třibod cca 18 % a pro čtyřbod cca 14 % z celkového průhybu). Současné normy nezohledňují při odvozování materiálového diagramu z naměřené závislosti síla-průhyb z ohybové zkoušky vliv smykových deformací a dochází k poměrně značným odchýlkám ve výpočetní predikci průhybů, podrobněji ve [12].