

Projevy poddajnosti spřažení u spřažených ocelobetonových mostů

Effects of the Deformable Connection at Composite Steel-Concrete Bridges

Karel Bauer, Alena Kohoutková

Chování spřažených ocelobetonových mostů je ovlivněno mírou spřažení mezi ocelovými nosníky a betonovou deskou. Studie ukazuje rozložení normálových napětí po průřezu mostu, velikost průhybů a spolupůsobících šířek desek v závislosti na míře poddajnosti spřažení. K výpočtům byla použita teorie lomenic s náhradními smykovými prvky.

Performance of composite bridges from steel beams and concrete slabs is influenced by deformability of the connection between beams and slabs. This study of the effects of more or less deformable connectors proved the influence on distribution of longitudinal stresses, deflections and effective widths. The results were obtained by the folded - plate theory using special shear elements.

Spřažené mosty, složené z ocelových nosníků a s nimi spřažené betonové desky, tvoří velmi efektivní a široce používaný nosný systém. Míra spřažení může být různá – od velmi tuhých a únosných spřahujících prvků, zajišťujících plné spřažení, až k mnohem poddajnějším uspořádáním, kdy spřažení je jen částečné. To však nemusí znamenat snížení statických předností spřažených konstrukcí, neboť znamená – kromě úspory za ušetřené spřahující prvky a jejich osazení – při jejich vhodném rozmístění i možnost cílené regulace rozložení vnitřních sil v konstrukčním systému.

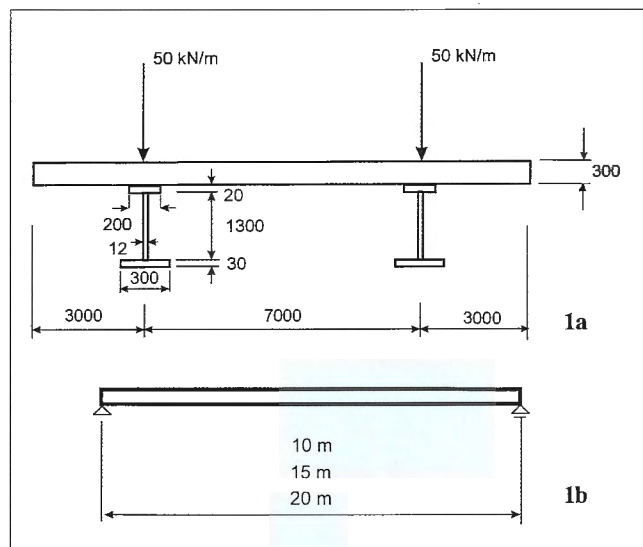
Pro praktické použití, zejména pro vytvoření názoru na efektivitu různé míry spřažení, byla provedena parametrická studie, jejímž záměrem bylo vyšetřit vlivy poddajnosti spřažení mezi betonovou deskou a ocelovými nosníky typických spřažených mostů. Ve snaze získat výsledky jasné, kde by se nekombinovaly projevy různých schémat uložení konstrukce, byla studie provedena na prostém mostním poli (získané poznatky však budou mít širší použití, neboť, jak známo, prostý nosník relativně výstižně aproximuje též chování části spojitěho nosníku mezi body s nulovými hodnotami ohybových momentů, a též chování nadpodporových úseků a konzol lze, při zavedení příslušných modelů, idealizovat prostými nosníky). Prostý nosník je též vhodný tím, že betonová deska je tlačena, a není tedy třeba respektovat složité nelineární působení betonu v tahovém režimu.

Příčný řez sledovaného spřaženého mostu, zjednodušeného pro tuto parametrickou studii, je uveden na obr. 1a. Jde o konstrukci se dvěma ocelovými hlavními nosníky a se spřaženou deskou, pro jednoduchost konstantní tloušťky v příčném směru. Pro získání širokého rozsahu výsledků byla tato konstrukce řešena pro tři rozpětí: 10 m, 15 m a 20 m (obr. 1b). Řešení je provedeno v lineárně pružné oblasti použitím teorie lomenic.

Materiálové charakteristiky jsou: modul pružnosti oceli 210 000 MPa, modul pružnosti betonu 33 000 MPa, Poissonův součinitel pro ocel 0,3 a Poissonův součinitel pro beton 0,18.

Zatížení konstrukce je spojitě přímkové nad každým hlavním nosníkem o intenzitě 50 kN/m (tedy celkem 100 kN na m délky nosníku – obr. 1a).

Studie je provedena pro široký rozsah poddajností spřažení mezi betonovou deskou a nosníky, neboť vyšetřování tohoto aspektu bylo hlavním cílem této studie. Toto spřažení je



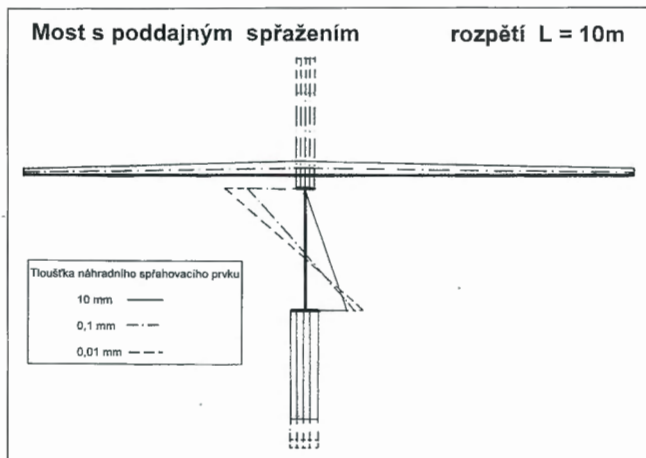
Obr. 1a – Příčný řez a zatížení spřaženého mostu / Cross-section and load position of the composite bridge

Obr. 1b – Tři řešená rozpětí / Three analysed spans

ve výpočtu, podobně jako v [2], modelováno speciálními smykovými lomenicovými prvky umístěnými mezi horními povrchy ocelových nosníků a středem tloušťky betonové desky, které svými smykovými charakteristikami reprezentují smykovou poddajnost skutečného spřažení. Rozsah tloušťky těchto prvků od 0,01 mm do 10 mm (tisícinásobek) s velkou rezervou pokrývá celý rozsah praktických případů spřažení, od prakticky tuhých až k zcela poddajným. Studie celkem obsahovala výsledky 21 úplných výpočtů konstrukce.

Z výsledků jednotlivých výpočtů, provedených nejprve pro rozpětí 10 m a pro postupně se měnící tloušťky náhradních smykových prvků, a dále podobně pro rozpětí 15 m a 20 m, plynou odpovídající hodnoty podélných měrných normálových sil N_x . Pro případ rozpětí 10 m a pro několik charakteristik poddajnosti spřažení, reprezentovaných náhradními tloušťkami smykových prvků, jsou průběhy podélných měrných normálových sil N_x na polovině šířky průřezu uprostřed rozpětí mostu vykresleny na obr. 2. Patrné jsou rozdíly mezi jednotlivými případy v hodnotách i v rozložení podélných měrných normálových sil N_x , zřejmě jsou i projevy ochabnutí smykem. Výpočty poskytly i hodnoty průhybů konstrukce při různých mírách spřažení. Obdobné průběhy podélných měrných normálových sil N_x byly získány pro případy rozpětí 15 m a 20 m. Zejména se ukazuje – očekávaný – značný vliv poddajnosti spřažení na hodnoty namáhání v horní pásnici ocelového nosníku a s tím související přemísťování polohy neutrální osy celého průřezu v závislosti na postupně se měnící tloušťce náhradních smykových prvků. Potvrzuje se též, že význam ochabnutí smykem se zmenšuje s rostoucím rozpětím nosníku.

Kvantitativně jsou hlavní výsledky pro jednotlivá rozpětí souhrnně uvedeny v tab. 1, 2 a 3 a vykresleny v obr. 3.



Obr. 2 – Rozložení měrných podélných normálových sil N_x podél střednice poloviny šířky průřezu uprostřed rozpětí v závislosti na poddajnosti spřažení pro rozpětí 10 m / Distribution of axial forces along the central line of the cross-section – variation according to deformability of connection, span of 10 m

Tloušťka náhradního prvku [mm]	10	5	1	0,5	0,1	0,05	0,01
N_x v dolní pásnici [kN]	796	802	838	869	953	982	1 054
N_x v horní pásnici [kN]	3	-21	-184	-324	-696	-808	-962
N_x v betonu nad stěnou [kN]	-111	-109	-91	-74	-30	-17	-4
N_x v betonu uprostřed šířky [kN]	-46	-45	-37	-30	-12	-7	2
celková síla přenesená betonem [kN]	-437	-426	-351	-286	-115	-66	-18
spolupůsobící šířka desky mezi nosníky [mm]	2 123	2 115	2 083	2 072	2 061	2 059	2 058
spolupůsobící šířka desky na konzole [mm]	2 091	2 086	2 068	2 062	2 056	2 055	2 054
průhyb [mm]	1,358	1,415	1,776	2,077	2,872	3,118	3,51

Tab. 1 – Přehled výsledků pro rozpětí 10 m – průřez ve středu rozpětí / Overview of results at the midspan cross-section – 10 m span

Tloušťka náhradního prvku [mm]	10	5	1	0,5	0,1	0,05	0,01
N_x v dolní pásnici [kN]	1 797	1 803	1 846	1 891	2 073	2 152	2 270
N_x v horní pásnici [kN]	35	10	-180	-384	-1 194	-1 545	-2 015
N_x v betonu nad stěnou [kN]	-203	-201	-185	-167	-91	-58	-15
N_x v betonu uprostřed šířky [kN]	-134	-132	-120	-107	-58	-37	-9
celková síla přenesená betonem [kN]	-1 021	-1 010	-921	-826	-448	-285	-73
spolupůsobící šířka desky mezi nosníky [mm]	2 706	2 701	2 674	2 660	2 639	2 636	2 634
spolupůsobící šířka desky na konzole [mm]	2 513	2 509	2 493	2 484	2 472	2 470	2 469
průhyb [mm]	5,751	5,889	6,879	7,884	11,78	13,461	15,782

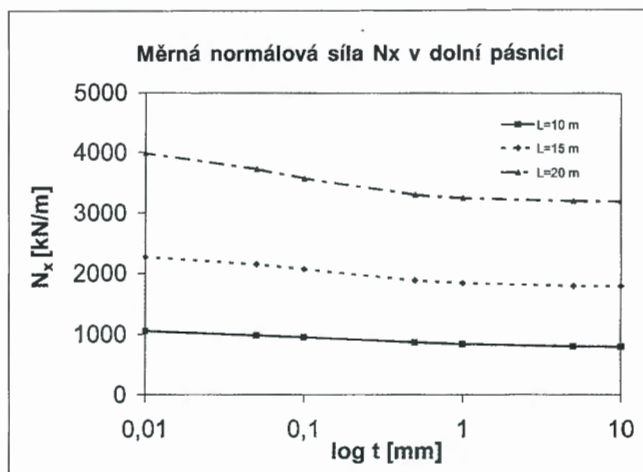
Tab. 2 – Přehled výsledků pro rozpětí 15 m – průřez ve středu rozpětí / Overview of results at the midspan cross-section – 15 m span

Tloušťka náhradního prvku [mm]	10	5	1	0,5	0,1	0,05	0,01
N_x v dolní pásnici [kN/m]	3 198	3 204	3 250	3 302	3 573	3 729	3 986
N_x v horní pásnici [kN/m]	82	57	-142	-374	-1 568	-2 260	-3 392
N_x v betonu nad stěnou [kN/m]	-329	-327	-313	-294	-195	-136	-40
N_x v betonu uprostřed šířky [kN/m]	-259	-258	-244	-228	-149	-104	-31
celková síla přenesená betonem [kN]	-1 840	-1 829	-1 737	-1 628	-1 071	-748	-219
spolupůsobící šířka desky mezi nosníky [mm]	3 004	3 001	2 986	2 974	2 951	2 947	2 943
spolupůsobící šířka desky na konzole [mm]	2 710	2 709	2 698	2 691	2 677	2 674	2 672
průhyb [mm]	16,886	17,138	19,035	21,136	31,438	37,312	47,008

Tab. 3 – Přehled výsledků pro rozpětí 20 m – průřez ve středu rozpětí / Overview of results at the midspan cross-section – 20 m span

Většina následujících grafů ukazuje, že hlavní změny ve velikostech zkoumaných veličin se odehrávají v jistém pásmu hodnot tuhosti spřažení – ubíráme-li tuhosti spřažení, tj. postupujeme-li od pravé strany grafů (je třeba poznamenat, že tuhost spřažení vyjádřená tloušťkou náhradního smykového prvku je v těchto obrázcích pro možnost zachycení širokého rozsahu výsledků vynášena na vodorovné ose v logaritickém měřítku), obvykle se dosti dlouho prakticky nic neděje až po jistou hranici, která znamená relativně rychlý přechod k chování, které je charakteristické pro nosníky s poddajným

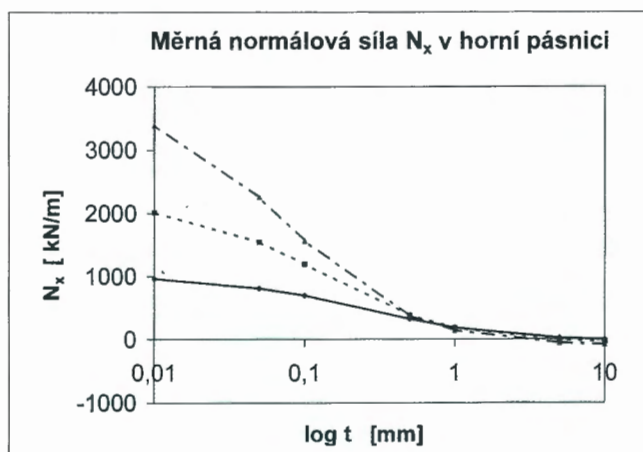
spřažením, jejichž chování je prakticky stejné jako u nosníků se spřažením plným, a to s mnohem nižší spotřebou spřahujících prvků, menší pracností atd.



Obr. 3 – Závislost hodnot podélných normálových sil N_x v dolní pásnici na poddajnosti spřažení / Variation of axial forces in the bottom flange according to deformability of connection

Hodnoty podélných měrných normálových sil N_x v dolní ocelové pásnici v závislosti na poddajnosti spřažení ukazuje pro tři rozpětí obr. 3. Pro jednotlivá rozpětí se velikosti podélných měrných normálových sil N_x značně vzájemně liší, jak odpovídá velikostem ohybových momentů přenesených celým průřezem pro tato rozpětí. Normálové síly N_x v dolní ocelové pásnici jsou podle očekávání vždy tahové a závislost jejich hodnot na tuhosti spřažení je mnohem menší než u horní pásnice (obr. 4). Při vzrůstu tuhosti spřažení je pro všechna tři rozpětí zřejmý pokles těchto sil N_x v dolní ocelové pásnici. Zapojováním horní betonové desky v této desce vznikají podélná normálová napětí a zvyšuje se kapacita únosnosti průřezu, avšak současně se přesouvá vzhůru neutrální osa celého spřaženého průřezu a tím se vzdaluje od dolní pásnice. Znamená to, že jakkoli tuhým spřažením lze napětí v dolní pásnici snížit jen do jisté míry.

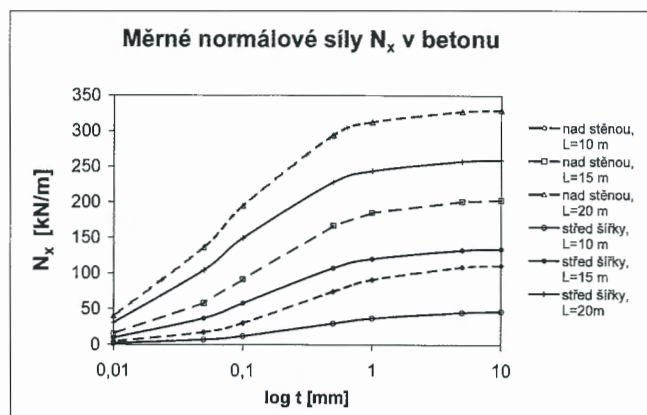
Hodnoty podélných měrných normálových sil N_x v horní ocelové pásnici v závislosti na poddajnosti spřažení ukazuje pro řešená tři rozpětí obr. 4. Pro velmi poddajná spřažení je zde dosahováno vysokých tlakových namáhání, blízkých nosníkům zcela bez spřažení a jejich velikost je v absolutní hodnotě blízká hodnotám podélných měrných normálových sil N_x v dolní pásnici (obr. 3). S rostoucí tuhostí spřažení napětí



Obr. 4 – Závislost hodnot podélných normálových sil N_x v horní pásnici na poddajnosti spřažení / Variation of axial forces in the top flange according to deformability of connection

rychle klesají, a to nejen proto, že se zapojuje do akce betonová deska, ale též proto, že neutrální osa celého spřaženého průřezu se přibližuje právě k této horní pásnici. To je důvodem toho, že podélné měrné normálové síly N_x v horní pásnici jsou si pro tužší spřažení navzájem blízké pro různá rozpětí a velmi malé, popř. i přecházejí do tahového režimu.

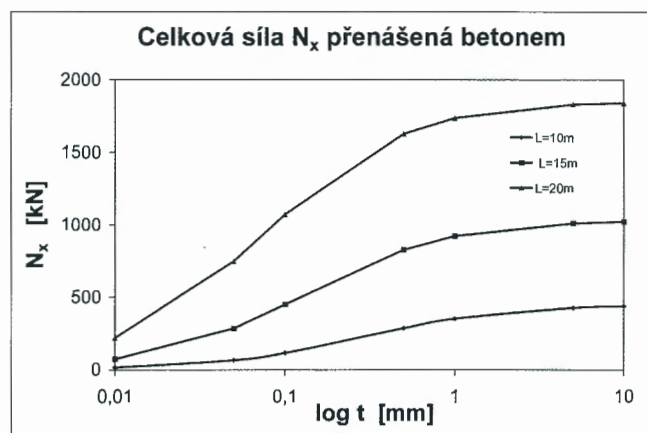
Hodnoty podélných měrných normálových sil N_x ve střednicové rovině betonové desky nad stěnami ocelových nosníků jsou v závislosti na tuhosti spřažení vyznačeny na obr. 5. S narůstající tuhostí spřažení tlakové namáhání betonové desky pochopitelně vzrůstá – nejstrmější nárůst je v oblasti náhradních tloušťek smykových toků od 0,05 mm do 0,5 mm (tedy pro relativně poddajná spřažení) a dále pro tužší spřažení narůstá tlak v betonové desce už jen málo.



Obr. 5 – Závislost hodnot podélných normálových sil N_x ve střednicové rovině betonové desky nad stěnou a uprostřed šířky mostu na poddajnosti spřažení / Variation of axial forces in concrete slab according to deformability of connection

Hodnoty podélných měrných normálových sil N_x ve střednicové rovině betonové desky uprostřed vzdálenosti mezi nosníky (tj. uprostřed šířky mostu) ukazuje v závislosti na tuhosti spřažení také obr. 5. Průběhy jsou podobné jako pro měrné normálové síly N_x ve střednicové rovině betonové desky nad stěnami ocelových nosníků. Pro rozpětí 20 m jsou hodnoty uprostřed šířky betonové desky a nad stěnami nosníků prakticky totožné, pro rozpětí 15 m a zejména pro rozpětí 10 m jsou napětí uprostřed šířky desky značně nižší, neboť se projevuje smykové ochabnutí, které je u kratších rozpětí (při stejné šířce desky) výraznější.

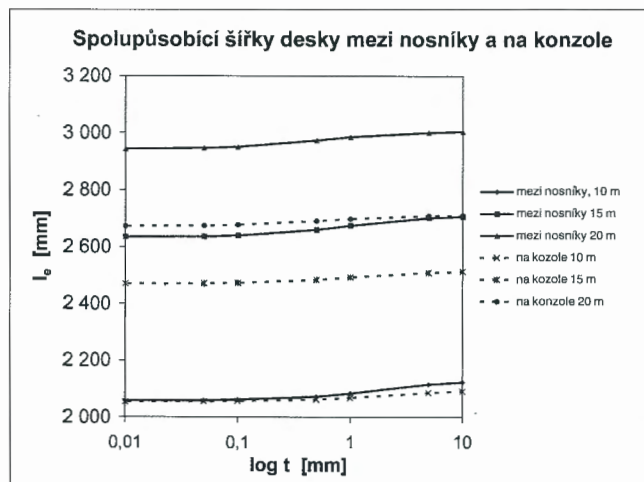
Celková tlaková síla, která je přenášena polovinou šířky betonové desky je pro různé tuhosti spřažení ukázána na obr. 6. Stejně jako pro měrné normálové síly N_x ve střednicové rovině betonové desky, s narůstající tuhostí spřažení tlakové namá-



Obr. 6 – Celková normálová síla N_x v betonové desce – polovina průřezu / Total axial force in concrete slab – half of the cross-section

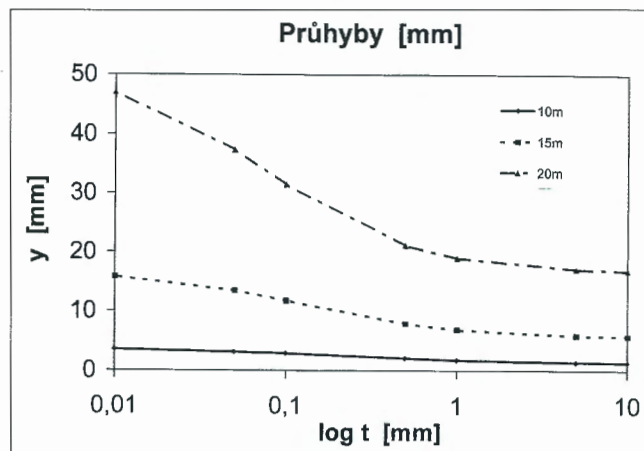
hání betonové desky vzrůstá – nejstrměji v oblasti náhradních tloušťek smykových prvků od 0,05 mm do 0,5 mm (tedy pro relativně poddajná spřažení) a dále pro tužší spřažení narůstá tlak v betonové desce jen málo.

Hodnoty spolupůsobících šířek (zrcadlících vliv ochabnutí smykem) betonové desky jsou pro různé tuhosti spřažení ukázány na obr. 7 (pro polovinu šířky části desky mezi nosníky a pro konzolové vyložení desky). Ukazuje se, že spolupůsobící šířka je podle očekávání výrazně ovlivněna délkou rozpětí, avšak na míře spřažení závisí jen velmi málo – pro velmi poddajné spřažení je jen nepatrně menší než pro tuhé spřažení. Zajímavé je, že spolupůsobící šířky desky mezi nosníky i na konzole – přestože skutečné šířky jsou rozdílné (polovina betonové desky mezi nosníky je široká 3 500 mm, kdežto konzola je vyložena jen 3 000 mm) – jsou pro rozpětí 15 m téměř stejné, avšak pro rostoucí rozpětí, kdy se do plného působení zapojuje stále více celá šířka desky, narůstá spolupůsobící šířka mezi nosníky rychleji než na konzole.



Obr. 7 – Spolupůsobící šířka betonové desky mezi nosníky (vztazeno k polovině šířky) a na konzole v závislosti na poddajnosti spřažení / Effective width of the concrete slab between girders and on the cantilever flange in dependence on deformability of connection

Průběhy spřaženého nosníku jsou pro různé tuhosti spřažení ukázány na obr. 8. Tuhost spřažení má podstatný význam na velikost průhybů. Opět se však prokazuje, že s narůstající tuhostí spřažení průhyby klesají nejvíce v oblasti náhradních tloušťek smykových prvků od 0,05 mm do 0,5 mm (tedy pro relativně poddajná spřažení) a dále pro tužší spřažení klesají průhyby nosníku už jen málo.



Obr. 8 – Průhyb středu rozpětí mostu v závislosti na poddajnosti spřažení / Deflection of midspan of the bridge in dependence on deformability of connection

Závěrem si položíme otázku, jaký vliv měly změny tuhosti sprážení na chování mostu obsahujícího ocelové nosníky a s nimi spráženou betonovou desku. Dospíváme k těmto závěrům:

- ◆ Namáhání spodní pásnice (tloušťky 30 mm) se sprážením snížilo, ale jen zhruba na 80 % hodnoty odpovídající případu bez sprážení.
- ◆ Napětí horní pásnice (tloušťky 20 mm) se s rostoucí tuhostí sprážení podle očekávání snižuje podstatně (pro tužší sprážení napětí skoro vymizí). Aby se nestalo, že tato pásnice bude téměř nevyužita, je samozřejmě nutné navrhnout její rozměry s ohledem na příslušnou míru tuhosti sprážení.
- ◆ Tlakové namáhání betonové desky vzrůstá s mírou sprážení (pro případ bez sprážení, kdy by betonová deska ležela „volně“ na ocelových nosnících, by samozřejmě nebyla vůbec membránově namáhána).
- ◆ Spolupůsobící šířky desek jsou poddajností sprážení ovlivněny jen v malé míře.

Z výše uvedeného plyne závěr pro praktické navrhování sprážených nosníků:

I značně poddajné sprážení zajišťuje dostatečně vysoký účinek sprážení ocelových nosníků s betonovou deskou. Spolupůsobící šířky platné pro tuhé sprážení jsou přijatelné i pro použití u konstrukcí s poddajným sprážením.

Prezentovaná parametrická studie, zaměřená zejména právě na velikosti spolupůsobících šířek, byla zpracována záměrně v lineárním režimu pro možnost porovnání s obvykle používanými vztahy pro stanovení spolupůsobících šířek založených na klasických postupech.

Úplný soubor výsledků výpočtů a vyhodnocení parametrické studie je uveden v [1].

Výsledky prezentované v tomto článku byly získány v rámci řešení grantového projektu 103/95/1684 uděleného Grantovou agenturou České republiky.

Literatura:

[1] *Studie projevů poddajnosti sprážení ve sprážených mostech*, Výzkumná zpráva grantového projektu 103/95/1684, REAT, 1995

[2] **Křístek, V., Studnička, J.:** Analysis of composite girders with deformable connectors, *Proc. Instn. Civ. Engrs, Part 2*, 73, Dec. 1982, pp. 699-712

Ing. Karel Bauer, CSc., Reat, s. r. o. Praha

Ing. Alena Kohoutková, CSc., Stavební fakulta ČVUT, Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Kdyby vše bylo tak lehké jako betony z Liaporu, život by byl peříčko



Lehké betony na bázi Liaporu dosahují stejné pevnosti jako betony klasické při výrazném snížení vlastní hmotnosti. Lze tak docílit větších rozpůnů konstrukcí, zvětšit užité zátížení a uspořít betonářskou výztuž. Díky jeho lehkosti se s tímto materiálem snadno manipuluje. Liaporbeton kromě toho vyniká mnoha dalšími dobrými vlastnostmi, které mj. umožňují výrazné snížení stavebních nákladů.

Posudte sami:

Objemová hmotnost činí pouze 650-2000 kg/m³, **zvukový odpor** lepší až o 5 dB než u srovnatelných hmot a **tepelný odpor** je u obvodového pláště větší než 2,0 m² KW⁻¹.

Liapor je ekologický, naprosto čistý materiál. V domech z něho postavených se bydlí zdravě a příjemně. V případě Vašeho zájmu Vám nabídneme servis, který, mimo jiné, zahrnuje návrh, dopravu a odborné poradenství.

• **LIAS Vintřov, Lehký stavební materiál, k. s., 357 44 Vintřov, tel.: 0168/66 61 65, fax: 0168/66 58 08** •


Základ dobrých staveb

Žádám o podrobnější informace o stavebních materiálech Liapor®.

Jméno _____

Adresa _____

PSC _____ Město _____

Fax _____

Vyplněný kupon zašlete na adresu:

LIAS Vintřov, LSM, k. s., 357 44 Vintřov