

KAZETOVÉ STROPY PRO VELKÉ ROZPONY – ENVIRONMENTÁLNÍ ANALÝZA

Petr Hájek, Ctislav Fiala

1 Úvod

Železobetonové kazetové konstrukce se tradičně uplatňují především při realizaci velkorozponových zastropení. V porovnání s plnou železobetonovou deskou spotřebovávají kazetové konstrukce méně materiálu, jsou lehčí a zatěžují tak i méně podporující svislé konstrukce i základy. Menší spotřeba materiálu se současně odráží i v příznivějších environmentálních parametrech. Je prezentována environmentální analýza, a porovnání s jinými typy velkorozponových železobetonových konstrukcí.

2 Kazetová železobetonová deska

Tradiční železobetonová kazetová deska představuje vzhledem ke svému tvaru jeden z velmi efektivních typů stropních konstrukcí z hlediska relace mezi statickými parametry a spotřebou konstrukčních materiálů. Důvodem jsou nesporné statické výhody vyplývající z žebrového charakteru průřezu, obousměrného pnutí konstrukce a menší plošné hmotnosti. V porovnání s plnou železobetonovou deskou lze v případě kazetami odlehčených desek dosáhnout i více než 50% úspory betonu při zachování stejných statických parametrů. Redukce zatížení se odráží i v menší spotřebě výztužné oceli vlastní desky a menším zatížení konstrukcí podporujících. Toto se výrazněji projevuje při použití kazetových desek na větší rozpory. Jak ukazuje řada realizací budov, může se kazetový pohled i vhodně architektonicky uplatnit především u větších halových prostor, kde odlehčený žebrový tvar může významně podpořit architektonické řešení interiérů prostor s velkými rozpory (obr. 1).



Obr. 1 Kazetová železobetonová konstrukce (a) zastropení podzemní vstupní haly galerie v Louvru s integrovaným osvětlením ve středu kazet; (b) obchodní centrum v Athénách

Cestou ke zefektivnění technologie výstavby kazetových železobetonových stropů je používání různých typů bednicích dílců vyráběných v různých rozměrových řadách a umožňujících tak optimální volbu dimenzí stropní konstrukce s ohledem na konkrétní dispoziční a zatěžovací podmínky.

3 Environmentální analýza kazetových stropních konstrukcí

Optimalizace spotřeby konstrukčních materiálů zaměřená na redukcí čerpání primárních neobnovitelných surovin je jedním ze základních požadavků při vývoji nových stavebních konstrukcí respektujících požadavky udržitelné výstavby, tj. environmentální, ekonomické a sociální požadavky a kritéria. Kazetová železobetonová stropní deska představuje již svojí tvarovou podstatou alternativu stropní konstrukce respektující tyto základní principy. Environmentální i ekonomické výhody souvisí především se snížením spotřeby primárních neobnovitelných surovin, se snížením nároků na dopravu a manipulaci materiálů, s úsporami v konstrukcích podporujících a s menším množstvím odpadu a materiálů k recyklaci po dožití konstrukce [1].

Cílem provedené analýzy bylo prověřit efektivnost kazetových stropních konstrukcí využívajících plastové bednicí dílce z hlediska statických, environmentálních a ekonomických parametrů. Analyzované stropní konstrukce byly navrženy na velké rozpony v rozmezí 8,0 až 12,0 m a byly vylehčeny bedněním s plastových dílců Uninox [2]. Pro možnost srovnání jednotlivých parametrů byly do analýzy zahrnuty další dvě alternativy stropních konstrukcí běžně v praxi používaných na velké rozpony, a to předpjaté stropní dutinové panely Spiroll – Partek [3] a předpjaté stropní TT dílce [4]. Stropní konstrukce byly analyzovány ve čtyřech hlavních skupinách, které představovaly různé rozpony hodnocených stropních konstrukcí: (a) skupina 1: stropní pole 8x8 m, (b) skupina 2: stropní pole 10x10 m, (c) skupina 3: stropní pole 12x12 m a (d) skupina 4: stropní pole 8x16 m (poslední skupina byla zvolena pro porovnání s převážně jednosměrně pnutou stropní konstrukcí). Každá z uvedených skupin obsahuje dvě podskupiny stropních konstrukcí dle uvažovaného přídatného zatížení (mimo vlastní tíhu konstrukce). První podskupina stropních konstrukcí byla zatížena stálým zatížením (mimo vlastní tíhu) $g_k = 2,5 \text{ kN/m}^2$ a nahodilým užitným zatížením $q_k = 5,0 \text{ kN/m}^2$. Druhá podskupina stropních konstrukcí byla zatížena stálým zatížením $g_k = 2,5 \text{ kN/m}^2$ a nahodilým užitným zatížením $q_k = 10,0 \text{ kN/m}^2$. Železobetonové monolitické křížem vyztužené kazetové desky byly analyzovány pro dvě varianty tloušťek konstrukce, zatížení a rozpětí konstrukce v alternativách krajního a vnitřního pole spojité stropní desky. Výsledně bylo analyzováno a porovnáno celkem 48 variant stropních konstrukcí.

3.1 Varianty analyzovaných stropních konstrukcí

Železobetonové monolitické křížem vyztužené kazetové desky jsou realizovány pomocí plastového bednění typu Uninox. Jde o speciálně vyztužené typizované plastové bednicí dílce, které umožňují snadné vytvoření žeber ve dvou na sebe kolmých směrech. Dílce jsou vyráběny ve čtyřech modulových řadách (500 mm, 700 mm, 800 mm a 900 mm) a o různých výškách (150 až 425 mm), tak aby bylo možné co nejoptimálněji navrhnout stropní konstrukci s ohledem na konkrétní rozpětí a zatížení. V analyzovaných konstrukcích byly použity dva typy nejběžněji používaných dílců – 70/27 (osová

vzdálenost žeber 700 x 700 mm, výška dílce 270 mm) a 70/32, tloušťka horní železobetonové desky byla ve všech případech 60 mm a celkové tloušťky stropních konstrukcí tak byly 330 a 380 mm. Objem materiálů (betonu a oceli) v jednotlivých stropních polích byl pro environmentální hodnocení získán prostřednictvím optimalizace vyztužení na výpočtovém modelu pro křížem vyztužené kazetové desky zpracovaném v tabulkovém procesoru Microsoft Excel 2003. Při výpočtu byl použit beton C25/30 a C30/37 a výztužná ocel R 10 505.

Předpjaté stropní dutinové panely SPIROLL – PARTEK. V analýze byly použity tři běžně vyráběné předpjaté stropní dutinové panely skladebné šířky 1,2 m v tloušťkách a dimenzích odpovídajících zatížení a rozpětí v jednotlivých alternativách. Stropní panely byly uvažovány jako prosté nosníky na rozpětí 8, 10 a 12 m uložené na průvlacích. Byly použity tři typy stropních předpjatých panelů (a) SPIROLL tl. 250 mm, (b) PARTEK tl. 265 mm a (c) PARTEK tl. 400 mm.

Předpjaté stropní TT dílce – v analýze byly použity běžně vyráběné předpjaté stropní TT dílce [4] skladebné šířky 2,4 m v tloušťkách a dimenzích odpovídajících zatížení a rozpětí v jednotlivých alternativách. Stropní panely byly uvažovány jako prosté nosníky na rozpětí 8, 10 a 12 m uložené na průvlacích.

3.2 Environmentální a ekonomické parametry

V analyzovaných stropních konstrukcích figurují tři základní stavební materiály: prostý silikátový beton, klasická výztužná ocel a předpínací legovaná ocel. Při environmentální analýze stropních konstrukcí byly u jednotlivých variant sledovány hodnoty svázaných energií, svázaných emisí $\text{CO}_{2,\text{ekv.}}$ a $\text{SO}_{x,\text{ekv.}}$, plošné hmotnosti a ceny stropu vztažené na metr čtvereční stropní konstrukce. V environmentálním hodnocení byly použity materiálové charakteristiky uvedené v Tab. 1.

| Svázané (embodied) hodnoty materiálů | | | |
|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| materiál | svázaná energie | svázané emise CO_2 | svázané emise SO_x |
| | [MJ/kg] | [kg $\text{CO}_{2,\text{ekv.}}$ /kg] | [g $\text{SO}_{x,\text{ekv.}}$ /kg] |
| prostý beton | 0,8 | 0,13 | 0,5 |
| výztužná ocel | 36 | 2,4 | 11 |
| předpínací legovaná ocel | 43 | 2,9 | 14 |

Tab. 1 Environmentální charakteristiky materiálů použité v hodnocení [5]

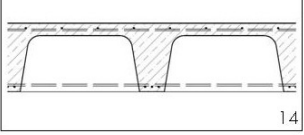
Pro kalkulaci ceny stropních konstrukcí na metr čtvereční bylo využito cen materiálů a prefabrikátů dle podkladů výrobců uvedených v [2], [3] a [4].

Environmentální profil stropní konstrukce zahrnuje společně s obrázkem a stručným popisem tři podskupiny dat:

- (i) environmentální parametry (obecná kritéria environmentální kvality stavebních materiálů) - (a) svázaná spotřeba energie, (b) svázané emise $\text{CO}_{2,\text{ekv.}}$, (c) svázané emise $\text{SO}_{x,\text{ekv.}}$, (d) vlastní hmotnost materiálů, (e) ceny zabudovaných materiálů,
- (ii) materiály na vstupu (fáze výstavby - využívané zdroje pro výrobu materiálů a konstrukcí) – (a) obnovitelné materiály, (b) recyklované materiály, (c) přírodní zdroje,

- (iii) materiály na výstupu (fáze demolice po dožití stavby – možnost dalšího využití po dožití konstrukce): (a) plnohodnotně recyklovatelné, (b) částečně recyklovatelné, (c) nerecyklovatelné (odpad).

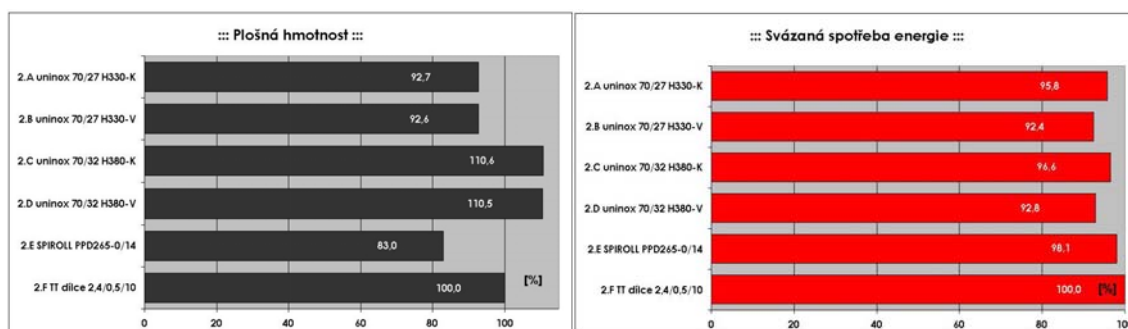
Příklad jednoho ze 48 profilů stropních konstrukcí analýzy je v Tab. 2, environmentální profil monolitické kazetové stropní desky tl. 330 mm z bednicích dílců Uninox 70/27, vnitřní pole s rozpětím 10x10 m zatížené $g_k = 2,5 \text{ kN/m}^2$ a $q_k = 5,0 \text{ kN/m}^2$.

| | | | |
|--|------------------------------------|-------|-------------------|
|  | svázaná spotřeba energie | 748,6 | MJ/m ² |
| | svázané emise CO _{2,ekv.} | 81,3 | kg/m ² |
| | svázané emise SO _{x,ekv.} | 333,5 | g/m ² |
| | plošná hmotnost materiálů | 421,6 | kg/m ² |
| | cena stropu | 819,3 | Kč/m ² |
| <p>2.B</p> <p>monolitická kazetová deska, uninox, 70/27, H330, vnitřní pole 10,0x10,0 m. $g_k = 2,5 \text{ kN/m}^2$ a $q_k = 5,0 \text{ kN/m}^2$</p> | ::: obnovitelné materiály | 0 | kg/m ² |
| | ::: recyklované materiály | 0 | kg/m ² |
| | ::: přírodní zdroje | 421,6 | kg/m ² |
| | ::: plnohodnotně recyklovatelné | 11,7 | kg/m ² |
| | ::: částečně recyklovatelné | 409,9 | kg/m ² |
| | ::: nerecyklovatelné (odpad) | 0 | kg/m ² |

Tab. 2 Environmentální profil kazetové stropní desky Uninox 70/27 H330

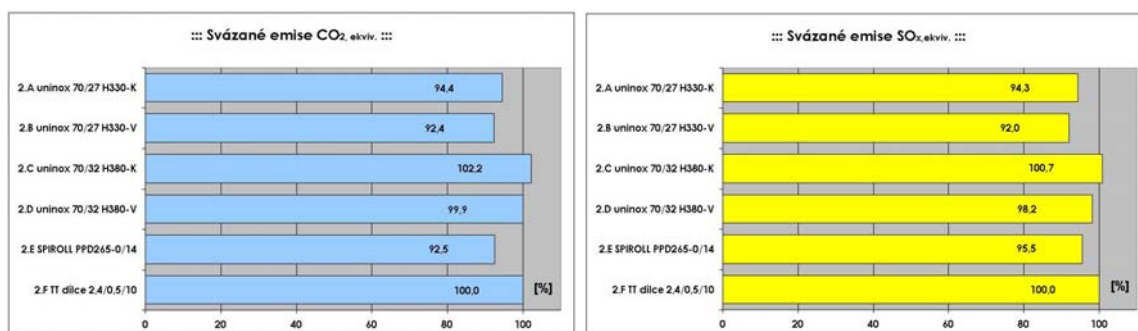
3.3 Vyhodnocení analýzy

Při environmentální analýze alternativ stropních konstrukcí byly sledovány hodnoty plošné hmotnosti, svázané energie a svázaných emisí CO_{2,ekv.} a SO_{x,ekv.} v 1 m² stropu. Výsledky v absolutních hodnotách pro jednotlivé alternativy stropních konstrukcí jsou uvedeny v profilech, viz. příklad v Tab. 2. Procentuální srovnání hodnot jednotlivých alternativ stropů je uvedeno v sadách grafů pro každou podskupinu rozpětí pole a velikosti zatížení. Jako referenční stropní konstrukce byla zvolena v jednotlivých podskupinách stropní konstrukce z prefabrikovaných TT dílců, jejíž hodnoty jsou v grafech rovny 100%.



Obr. 2 Plošná hmotnost a svázaná spotřeba energie stropních konstrukcí, pole 10x10 m

Příklad vyhodnocení pro podskupinu rozpětí pole 10x10 m a zatížení $g_k = 2,5 \text{ kN/m}^2$ a $q_k = 5,0 \text{ kN/m}^2$ je uveden v následujících grafech (obr. 2 a 3). Plošná hmotnost referenčních TT dílců je v daném případě rovna 455,4 kg/m². Panely Spiroll jsou lehčí o 17%. Kazetové monolitické stropní konstrukce vycházejí z hlediska plošné hmotnosti při tloušťce stropu 330 mm úspornější vzhledem k referenčním TT dílcům o 7%, v případě tloušťky stropu Uninox 380 mm vykazují naopak větší plošnou hmotnost o více než 10%.



Obr. 3 Svázané emise CO_{2,ekv.} a SO_{x,ekv.} stropních konstrukcí, pole 10x10 m

Procentuální srovnání hodnot svázaných emisí CO_{2,ekv.}, SO_{x,ekv.} a svázaných energií jsou zřejmá z grafů na obr. 3 a obr. 2. U kazetových monolitických desek Uninox dochází k vyrovnávání rozdílu mezi deskami 330 a 380 mm, větší množství betonu je u desky H380 kompenzováno větším množstvím výztuže u desky H330, které je potřebné k přenesení namáhání při stejném zatížení a menší účinné výšce průřezu. Rozdíl jednotlivých hodnot je v řádu jednotek procent, max. pak 10%. Při užitém zatížení 5 kN/m² je v grafech zřejmé snížení svázaných hodnot emisí a energií u stropů Uninox i panelu Spiroll do 7% oproti referenčním TT dílcům. Při užitém zatížení 10 kN/m² je snížení svázaných hodnot emisí a energií u panelu Spiroll 1 až 4%, u stropů Uninox jsou hodnoty vyšší oproti referenčním TT dílcům v průměru o 6%, max. však 15%. Zde je nárůst způsoben potřebou vykrýt dvojnásobný nárůst zatížení běžnou betonárkou výztuží (předpínací výztuž je v tomto případě účinnější) při stejné účinné výšce průřezu. Při takto velkém zatížení a rozpětí by s ohledem na redukci výztuže, tedy svázaných emisí a energií, bylo vhodné u stropů Uninox případně uvažovat o zvětšení účinné výšky průřezu, tedy např. použití vyšších plastových forem.

V rámci analýzy bylo provedeno i porovnání finančních nákladů na realizaci 1 m² uvedených typů konstrukcí. V tomto srovnání vyšly železobetonové kazetové stropy použité na velké rozpory velmi dobře. Skutečné náklady na realizaci stropní konstrukce jsou však velmi závislé na konkrétních podmínkách realizovaného objektu zahrnujících především náklady na dopravu prefabrikátů (závislé na vzdálenosti výroby prefabrikátů), náklady na dopravu betonové směsi (závislé na vzdálenosti betonárky), náklady na manipulaci na staveništi (závislé na charakteru konstrukce – výška, rozloha aj.), vliv dimenzí podpůrných konstrukcí (průvlaků, stěn) apod. Proto výsledky této části analýzy nejsou v příspěvku prezentovány, nicméně pro konkrétní aplikaci je lze vyčíslit a porovnat.

4 Závěr

Environmentální analýza prokázala, že kazetové železobetonové monolitické stropní konstrukce jsou efektivní alternativou ke dvěma srovnatelným prefabrikovaným konstrukcím z předpjatých panelů Spiroll a TT dílců, a to i v případě neuvažování dalších vlivů, např. vlivu podporujících stropních průvlaků aj. Dramatický vliv průvlaků na stropní konstrukci jako celek nelze ovšem očekávat v žádné z uvedených variant, průvlaků jsou nedílnou součástí jak prefabrikovaných, tak monolitických konstrukcí.

Environmentální výhodnost té či oné varianty je u kazetové železobetonové monolitické stropní konstrukce závislá na optimální volbě především bednicích plastových forem, tedy zvolené účinné výšce průřezu pro daný typ rozpětí a zatížení. Z optimalizované účinné výšky průřezu vyplývá následně minimální potřebné množství betonářské výztuže a betonu pro daný výsek stropu. Významným faktorem jsou vedle menšího zatížení životního prostředí emisemi CO₂, SO_x, svázanou spotřebou energie i přímé úspory primárních zdrojů surovin (výhledově i menší množství materiálu při demolici konstrukce). Nevýhodou monolitické kazetové stropní konstrukce oproti prefabrikovaným alternativám je větší délka trvání výstavby a nutnost realizace podpůrného bednění. V některých případech je výhodou kazetových stropních konstrukcí zajímavý podhledový efekt kazetové konstrukce, zvýrazňující architektonické řešení interiéru konkrétní stavby. V některých případech je naopak výhodou rovný stropní podhled realizovaný z panelů Spiroll. Kazetový tvar podhledu se může vhodně architektonicky uplatnit především u větších halových prostor, tak jak je to zřejmé z příkladů vstupní haly do obrazové galerie v Louvru nebo nákupního střediska v Aténách. U vícepodlažních objektů hraje významnou roli celková tloušťka stropní konstrukce, která je u monolitické konstrukce při větších rozponech srovnatelná s předpjatými panely Spiroll (avšak bez uvažování výšky průvlaků), oproti stropní konstrukci z TT dílců je však významně menší.

Analýza ukázala, že při dobrém optimalizovaném návrhu mohou být environmentální výhody železobetonových kazetových desek ekonomicky zhodnoceny. V případě konkrétní navrhované konstrukce by skutečná efektivita použití kazetové konstrukce měla být prověřena podrobným výpočtem, včetně vyhodnocení environmentálních parametrů a cenového porovnání.

Tento výsledek byl získán za finančního přispění MŠMT ČR, projekt IM0579, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS. V příspěvku bylo využito dílčích výstupů výzkumného projektu GAČR 103/05/0292 – Optimalizace navrhování progresivních betonových konstrukcí.

Literatura

- [1] Fiala C., Hájek, P.: Environmentální optimalizace komůrkové železobetonové desky, 12. Betonářské dny 2005, Hradec Králové: ČBS ČSSI, ISBN 80-903502-2-4, 2005
- [2] Firemní materiály UNINOX s.r.o., www.uninox.cz, 2006
- [3] Technické listy panelů SPIROLL, Dywidag prefa a.s., www.dywidag.cz, 12/2006
- [4] Technická specifikace TT dílců, 11/2006
- [5] Waltjen, T.: Ökologischer Bauteilkatalog, Wertegängige Konstruktionen, Springer – Verlag, Wien, 1999

prof. Ing. Petr Hájek, CSc.

✉ České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra konstrukcí pozemních staveb
Thákurova 7, 166 29 Praha 6
☎ 224 354 459
📠 233 339 987
😊 petr.hajek@fsv.cvut.cz
URL <http://people.fsv.cvut.cz/~hajekp/>

Ing. Ctislav Fiala

✉ České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra konstrukcí pozemních staveb
Thákurova 7, 166 29 Praha 6
☎ 224 354 473
😊 ctislav.fiala@fsv.cvut.cz
URL www.ctislav.wz.cz