

KAZETOVÉ STROPNÍ KONSTRUKCE PRO VELKÉ ROZPONY WAFFLE-SLAB FLOORS FOR LARGE SPANS

PETR HÁJEK, CTISLAV FIALA

Železobetonové kazetové konstrukce se tradičně uplatňují při realizaci velkorozponových zastropení. Staticky výhodné působení se odráží v efektivnějším využití materiálu. Je prezentována environmentální analýza i aplikace při výstavbě letištních budov.

RC waffle slabs are traditionally used for the construction of large span floor structures. Structural effectiveness results in a more effective use of structural materials. An environmental analysis and an application of waffle slabs in the construction of airport halls are presented.

Tradiční železobetonová kazetová deska představuje vzhledem ke své tvarové podstatě jeden z nejefektivnějších typů stropních konstrukcí z hlediska relace mezi spotřebou konstrukčních materiálů a statickými parametry. 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, a tím i snížení zatížení. 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 podhled 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. 2).

Obr. 1 Kazetová železobetonová konstrukce zastropení podzemní vstupní haly galerie v Louvru s integrovaným osvětlením ve středu kazet

Fig. 1 RC waffle floor slab in Louver gallery underground entrance hall with integrated lighting in centers of cassettes

Obr. 2 Obchodní centrum v Athénách

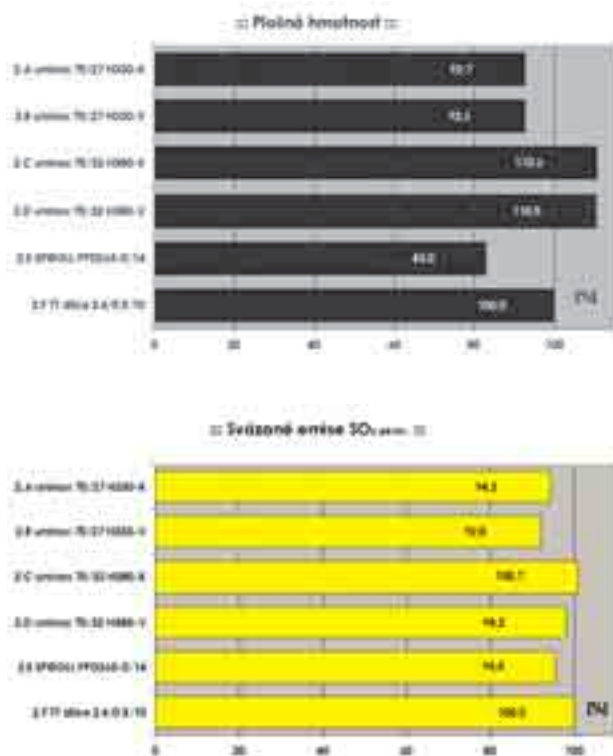
Fig. 2 Shopping centre in Athens

Cestou k 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.

ENVIRONMENTÁLNÍ ANALÝZA KAZETOVÝCH STROPNÍCH KONSTRUKCÍ

Optimalizace spotřeby konstrukčních materiálů zaměřená na redukcii čerpání primárních neobnovitelných surovin je jedním ze základních požadavků při vývoji nových stavebních konstrukcí respek-





Obr. 3 Plošná hmotnost stropních konstrukcí, pole 10 x 10 m
Fig. 3 Self-weight of floor structures, bay 10 x 10 m

Obr. 5 Svázané emise SO_{x,equiv.} stropních konstrukcí, pole 10 x 10 m
Fig. 5 Embodied emission SO_{x,equiv.} of floor structures, bay 10 x 10 m

tujících požadavky udržitelné výstavby, tj. takových, jejichž návrh uvažuje environmentální, ekonomické a sociální požadavky a kritéria. Kazetové železobetonové stropní desky představují již svojí tvarovou podstatou progresivní alternativu stropních konstrukcí 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 plastových bednicích dílců z hlediska statických, environmentálních a ekonomických parametrů. Analyzované stropní konstrukce byly navrženy na velké rozpory v rozmezí 8 až 12 m a byly vylehčeny bedněním z plastových

dílců Uninox [2]. Pro možnost srovnání jednotlivých parametrů byly do analýzy zahrnuty další dvě alternativy stropních konstrukcí běžně v praxi používaných na velké rozpory: předpjaté stropní dutinové panely Spiroll – Partek [3] a předpjaté stropní TT dílce [4]. Stropní konstrukce byly analyzovány ve čtyřech hlavních skupinách, které představovaly různé rozpory hodnocených stropních konstrukcí:

- skupina 1: stropní pole 8 x 8 m
- skupina 2: stropní pole 10 x 10 m
- skupina 3: stropní pole 12 x 12 m
- skupina 4: stropní pole 8 x 16 m (poslední skupina byla zvolena pro zhodnocení vlivu převážně jednosměrného pnutí stropní konstrukce).

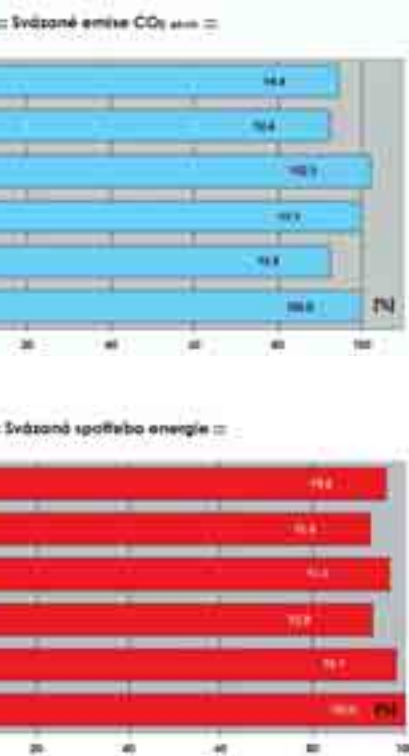
Každá z uvedených skupin obsahuje dvě podskupiny stropních konstrukcí dle uvažovaného přídavného zatížení (mimo vlastní tíhy konstrukce).

První podskupina stropních konstrukcí byla zatížena stálým zatížením (mimo vlastní tíhu, tj. podlaha, příčky) $g_k = 2,5 \text{ kN/m}^2$ a nahodilým užitným zatížením $q_k = 5 \text{ kN/m}^2$.

Druhá podskupina stropních konstrukcí byla zatížena stálým zatížením $g_k = 2,5 \text{ kN/m}^2$ a nahodilým užitným zatížením $q_k = 10 \text{ kN/m}^2$.

Železobetonové monolitické křížem vyztužené kazetové desky byly analyzovány pro dvě varianty tloušťek konstruk-

ce, zatížení a rozpětí konstrukce v alternativách krajního a vnitřního pole spojitě stropní desky. Výsledná analýza tedy představovala srovnání 48 variant stropních konstrukcí.



Obr. 4 Svázané emise CO_{2,equiv.} stropních konstrukcí, pole 10 x 10 m
Fig. 4 Embodied emission CO_{2,equiv.} of floor structures, bay 10 x 10 m

Obr. 6 Svázaná energie stropních konstrukcí, pole 10 x 10 m
Fig. 6 Embodied energy of floor structures, bay 10 x 10 m

Variety 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, 700, 800 a 900 mm) a o různých výškách (150 až 425 mm) tak, aby bylo možné optimálně navrhnout stropní konstrukci s ohledem na konkrétní rozpětí a zatížení. V analyzovaných konstrukcích byly použity dva typy nejběžněji používaných dílců – 70/27 (modulace 700 x 700 mm,

výška vložky 270 mm) a 70/32, tloušťka horní železobetonové desky byla 60 mm. Celkové tloušťky stropních konstrukcí byly 330 a 380 mm. Objem materiálů (betonu a oceli) v jednotlivých stropních polích byl pro environmentální hodnocení získán z výpočtového modelu křížem vyztužených kazetových stropních desek zpracovaném v tabulkovém procesoru Microsoft Excel 2003. Při výpočtu konstrukcí byl použit beton C25/30 a C30/37, 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

- SPIROLL tloušťky 250 mm
- PARTEK tloušťky 265 mm
- PARTEK tloušťky 400 mm.

Předpjaté stropní TT dílce – v analýze byly použity běžně vyráběné předpjaté stropní TT dílce 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. Byly použity stropní předpjaté TT dílce specifikované dle [4].

Svázané hodnoty a ceny materiálů

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 $CO_{2,ekv.}$ a $SO_{x,ekv.}$ plošné hmotnosti a ceny stropu vztahované na metr čtvereční stropní konstrukce. V environmentálním hodnocení stropních konstrukcí byly použity materiálové charakteristiky uvedené v tab. 1.

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

Environmentální profily stropních konstrukcí

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

- uvedení hodnot plošné hmotnosti, ceny zabudovaných materiálů, svázané energie a svázaných emisí $CO_{2,ekv.}$ a $SO_{x,ekv.}$ v jednom metru čtverečním stropní konstrukce,
- zdroj materiálů použitých v konstrukci (materiály na vstupu), tj. materiály obnovitelné, materiály recyklované a materiály z přírodních zdrojů
- možnost využití materiálů po dožití konstrukce – možnost recyklace (materiály na výstupu), tj. materiály plnohodnotně recyklovatelné, částečně recyklovatelné a nerecyklovatelné.

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

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 jednom metru čtverečním stropní konstrukce. Výsledky v absolutních hodnotách pro jednotlivé alternativy stropních konstrukcí jsou uvedeny v profilech, viz příklad tab. 2. Procentuální srovnání hodnot jednotlivých alternativ stropů je uve-

deno 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 %. Vyhodnocení pro podskupinu rozpětí pole 10 x 10 m a zatížení $g_k = 2,5 \text{ kN/m}^2$ a $q_k = 5 \text{ kN/m}^2$ je uvedeno v grafech na obr. 3 až obr. 6.

Plošná hmotnost referenčních TT dílců je při užitém zatížení 5 kN/m^2 rovna 455,4 kg/m^2 . Panely Spiroll jsou v tomto ohledu úspornější o 17 %. Kazetové monolitické stropní konstrukce vycházejí z hlediska plošné hmotnosti při tloušťce stropu 330 mm úspornější v závislosti na hodnotě zatížení o 7 %, v případě tloušťky stropu Uninox 380 mm se při poli 10 x 10 m hodnota oproti předchozí skupině (pole 8 x 8 m) snížila cca o 10 %, stropy jsou tedy oproti referenčním hodnotám těžší o 6 %.

Procentuální srovnání hodnot svázaných emisí $CO_{2,ekv.}$, $SO_{x,ekv.}$ a svázaných energií jsou zřejmá z grafů (obr. 4 až obr. 6). U kazetových monolitických desek Uninox dochází k vyrovnávání rozdílů 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/m^2 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/m^2 je snížení svázaných hodnot emisí a energií u panelu Spiroll 1 až 4 %, u stropů Uninox jsou hodnoty vyšší oproti referenčním TT dílcům

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

Tab. 1 Environmental characteristics of materials used in an assessment [5]

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



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

Tab. 2 Environmental profile of waffle-slab floor Uninox 70/27 H330



Obr. 7 Kazetové bednění z plastových kopulí Uninox

Fig. 7 Waffle formwork from plastic domes Uninox

Obr. 8 Kazetový pohled stropní konstrukce

Fig. 8 Waffle ceiling of floor structure

Obr. 9 Budova požární nádrže

Fig. 9 The fire reservoir building



v průměru o 6 %, max. však 15 %. Zde je nárůst způsoben potřebou vykrytí dvojnásobný nárůst zatížení běžnou betonářskou výztuží (předpínací výztuž je v tomto případě účinnější) při stejné účinné výšce průřezu. Při takto velkém zatížení a rozpětí by s ohledem na redukcii výztuže, tedy svázaných emisí a energií, bylo vhodné u stropů Uninox případně uvažovat o zvětšení účinné výšky průřezu, tedy např. o použití plastových forem 70/37.

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.

PŘÍKLAD APLIKACE KAZETOVÝCH DESEK PŘI VÝSTAVBĚ MEZINÁRODNÍHO LETIŠTĚ V ATÉNÁCH

Smlouva o výstavbě aténského letiště byla podepsána v roce 1995 a v roce 1996 byl oficiálně položen základní kámen letiště s pracovním názvem Spata (podle jména nedaleké obce). Výstavba komplexu letiště trvala 51 měsíců. Mezinárodní aténské letiště – Athens International Airport Eleftherios Venizelos – bylo dokončeno v srpnu roku 2000. V říjnu téhož roku začal pětiměsíční zkušební provoz letiště a od března 2001 již začal plně funkční provoz. Hlavní budova letiš-

Literatura:

- [1] Fiala C., Hájek P.: Environmentální optimalizace komůrkové železobetonové desky, 12. Betonářské dny 2005, Hradec Králové: ČBS ČSSI, 2005, ISBN 80-903502-2-4
- [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, dodaná Ing. Tanasis Avukatos, 11/2006
- [5] Waltjen T.: Ökologischer Bauteilkatalog, Bewertgänge Konstruktionen, Springe – Verlag, Wien, 1999

tě má čtyři úrovně a čtrnáct spojovacích mostů do letadel, což představuje užitou plochu 150 000 m². Nosná konstrukce objektů je tvořena železobetonovým monolitickým skeletem. Na několika budovách areálu letiště bylo pro stropní konstrukce na velké rozpory použito železobetonových kazetových desek vytvořených pomocí systému plastového bednění typu Uninox, umožňujícího realizaci staticky efektivních a tvarově efektních kazetových stropních konstrukcí na velké rozpory. V rámci areálu letiště byly bednicí plastové dílce Uninox použity pro realizaci kazetových stropních konstrukcí u budovy Olympic Catering, haly pro servis letadel přepravce Olympiaki a budovy požární nádrže.

U budovy Olympic Catering bylo s využitím 2 500 kusů bednicích dílců typu 70/22 a 4 500 kusů dílců typu 70/32 realizováno cca 12 000 m² kazetových stropních konstrukcí s rozpory kolem 10 x 10 m. Příklad realizovaného bednění z dílců Uninox 70/32 je na obr. 7, výsledný kazetový podhled letištní budovy cateringu po odbednění stropu je na obr. 8.

U budovy haly pro servis letadel přepravce Olympiaki bylo použito 1 000 kusů dílců typu 80/25, s jejichž využitím bylo realizováno přibližně 3 000 m² kazetových stropních konstrukcí.

Pro budovu požární nádrže (obr. 9) bylo pro cca 1 500 m² kazetových stropních konstrukcí použito 650 kusů bednicích plastových dílců typu 90/32.

ZÁVĚR

Environmentální analýza prokázala, že kazetové železobetonové monolitické stropní konstrukce jsou progresivní 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 variantě, průvlakly jsou nedílnou součástí jak prefabrikovaných, tak monolitických konstrukcí. V případně monolitických konstrukcí lze ale očekávat menší vliv průvlaků (vzhledem k jejich spojitosti a spolupůsobení s okolními stropními deskami) na výsledné parametry celé stropní konstrukce než u prefabrikovaných železobetonových nebo předpjatých průvlaků. Lze tak předpokládat, že při jejich započítání v konkrétní projektované konstrukci mohou vycházet monolitické kazetové stropy na velká rozpětí ještě výhodněji.

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 stropní konstrukce. Z optimalizované účinné výšky průřezu vyplývá následně minimální potřebné množství betonářské výztuže a betonu pro daný výsek stropní konstrukce. Významným faktorem jsou vedle menšího zatížení životního prostředí emisemi CO₂, SO_x, menší svázaná spotřeba energie i přímé úspory primárních zdrojů surovin (výhledově i menší množství materiálu při demolici konstrukce po jejím dožití).

Nevýhodou monolitické kazetové stropní konstrukce je delší doba trvání výstavby a nutnost realizace podpůrného bednění stropní konstrukce oproti prefabrikovaným alternativám konstrukcí.

V některých případech realizací je výhodou kazetových stropních konstrukcí zajímavý podhledový efekt, zvýrazňující architektonické řešení interiéru stavby. 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 letištní haly mezinárodního letiště v Aténách. V některých případech je naopak výhodou rovný stropní podhled realizovaný z panelů Spiroll.

U vícepodlažních objektů hraje významnou roli celková tloušťka stropní konstrukce, která je u monolitické konstrukce při větších rozporech srovnatelná s předpjatými panely Spiroll (avšak bez uvažování výšky průvlaků), oproti stropní konstrukci z TT dílců je však významně nižší.

Analýza ukázala, že při dobrém optimalizovaném návrhu jsou environmentální výhody kazetových železobetonových monolitických stropních konstrukcí výrazněji ekonomicky zhodnoceny a představují především významný parametr při komplexním hodnocení konstrukcí z hlediska jejich udržitelnosti. V případě konkrétního návrhu konstrukce by skutečná efektivita použití kazetové konstrukce měla být prověřena podrobným výpočtem, včetně vyhodnocení environmentálních parametrů a cenového porovnání.

Článek byl vypracován s využitím výsledků výzkumného projektu GAČR 103/05/0292 – Optimalizace navrhování progresivních betonových konstrukcí.

Prof. Ing. Petr Hájek, CSc.
 tel.: 224 354 459
 e-mail: petr.hajek@fsv.cvut.cz
<http://people.fsv.cvut.cz/~hajekp/>
 Ing. Ctislav Fiala
 tel.: 224 354 473
 e-mail: ctislav.fiala@fsv.cvut.cz
<http://www.ctislav.wz.cz>
 oba:
 Katedra konstrukcí pozemních staveb
 Fakulta stavební ČVUT v Praze
 Tháškova 7, 166 29 Praha 6

Prickerova cena za rok 2007 byla udělena britskému architektu Lordu Richardu Rogersovi (autor návrhu terminálů na londýnském letišti Heathrow a na madridském letišti Bajasas) za jeho společensky otevřené projekty v oblasti urbanizmu. Slavnostní vyhlášení se bude konat 4. června t. r. v Londýně.

www.pritzkerprice.com