



1

NOVÉ TVARY PŘEDPJTÝCH BETONOVÝCH SKOŘEPIN: BETONOVÁ SKOŘEPINA CENTRO OVALE VE ŠVÝCARSKU

NEW SHAPES OF CONCRETE SHELLS BY MEANS OF PRESTRESSING: THE CENTRO OVALE CONCRETE SHELL IN SWITZERLAND

Aurelio Muttoni, Franco Lurati,
Miguel Fernández Ruiz

Betonové skořepiny byly v minulosti často používány jako vhodné a ekonomické řešení pro řadu konstrukcí, např. střechy, síla, chladicí věže a těžní plošiny. Při využití jejich jednoduché nebo dvojitě křivosti jsou ohybové momenty a smykové síly omezeny a v konstrukci působí převážně membránové síly (v rovině konstrukce), které umožňují překlenutí velkých rozpětí při minimálních tloušťkách (typicky jen desítky milimetrů). V posledních dekádách pokrok v numerickém modelování, vývoji bednění a technologii betonu otevřel nové možnosti pro využití betonových skořepin. Článek popisuje návrh a výstavbu skořepiny tvaru elipsoidu (93 × 52 × 22 m) s tloušťkou stěny od 100 do 120 mm. Převážná část skořepiny byla postavena s využitím technologie stříkaného betonu, v některých místech však byl použit klasický postup ukládání monolitického betonu do připraveného bednění. V určitých oblastech byly postupy přizpůsobeny místním podmínkám, např. přidání dodatečného předpětí, vláken a smykové výztuže tak, aby byla zajištěna předepsaná bezpečnost pro oba mezní stavy, únosnosti i použitelnosti. Následující text je upravený text článku „Concrete shells – Towards efficient structures: Construction of an ellipsoidal concrete shell in Switzerland“, publi-

kovaného stejnými autory v časopisu *Structural Concrete*, Ernst & Sohn, Germany, Vol. 14, No. 1, 2013, pp. 43–50, DOI: 10.1002/suco.201200058. Představená konstrukce (betonová skořepina Centro Ovale) byla na kongresu *fib2014* oceněna titulem Vynikající betonová konstrukce. ■ Concrete shells have been widely used in the past as economical and suitable solutions for a number of structures such as roofs, silos, cooling towers or offshore platforms. Taking advantage of their single or double curvature, bending moments and shear forces are limited and the structure develops mostly membrane (in-plane) forces, allowing to span large distances with limited thicknesses (typically of only some centimetres). In the last decades, the advances on numerical modelling, formwork erection and concrete technology open a new set of possibilities for use of concrete shells. In this paper, the design and construction of a shell with the form of an ellipsoid (93 × 52 × 22 m) and with variable thickness between 100 and 120 mm is described. The shell was built using sprayed concrete and also ordinary concrete in some regions. A number of tailored solutions were also adopted such as post-tensioning, addition of fibres and shear studs to ensure satisfactory performance both at serviceability and ultimate limit states. The following text is adapted from the manuscript “Concrete shells

– Towards efficient structures: Construction of an ellipsoidal concrete shell in Switzerland”, published by the same authors in the journal: *Structural Concrete*, Ernst & Sohn, Germany, Vol. 14, No. 1, 2013, pp. 43–50, DOI: 10.1002/suco.201200058. The presented work (Centro Ovale concrete shell) was recipient of the 2014 *fib* Award for Outstanding Concrete Structures

ÚVOD

Zděné oblouky a klenby

Historie zděných oblouků a klenb je bohatá a zahrnuje řadu tradičních stavebních postupů. V literatuře lze nalézt jejich podrobné přehledy a rozbor [1-5]. Soustavy zděných oblouků byly pravděpodobně první složitější konstrukce navržené člověkem k překonávání velkých vzdáleností přes široké řeky nebo údolí. Tyto konstrukce, které mohly být inspirovány přírodními tvary, se objevily už ve 2. století před Kristem v Mezopotámii. Jsou vyskládány ze souborů klínovitě opracovaných kameňů, které byly ukládány k sobě na sucho nebo spojeny vrstvami malty.

Využitím tvaru oblouku jsou vnější účinky (síly vyvolané vlastní tíhou konstrukce a přenášeným zatížením) vy-

nášeny vnitřními tlakovými silami v jednotlivých kamenech a spojích mezi nimi (a někdy s pomocí přítěžovacích stěn a výplní na rubu zděných klenbových konstrukcí). Linie definující teoretickou výslednici rovnováhy vnitřních tlakových sil a působících vnějších účinků je obvykle nazývána výslednicová čára (the thrust line) (zahrnující její přiřazenou tloušťku odpovídající pevnosti materiálu). Tato linie by měla zůstat ve všech svých bodech uvnitř zděné konstrukce, protože pro spoje těchto typů konstrukcí jsou jakákoliv tahová napětí nepřijatelná [5]. Tím je určen tvar oblouku. Tvary, kde výslednice sil neprochází uvnitř zděné konstrukce, nejsou v rovnováze s vnějšími účinky a dochází k zhroutení konstrukce.

Prostorové klenby jsou plochy dvojí křivosti složené z kamenného nebo cihelného zdiva. Tradičně byly používány pro konstrukce střech nebo překrytí podzemních konstrukcí. Podobně jako ve zděném oblouku i v klenbě se musí vytvořit plocha výslednic sil, která by měla zůstat uvnitř konstrukce. Vzhledem k dvojité křivosti klenby může však být zatížení přenášeno ve více než jednom směru. Pro klasické tvary kupolí, s kulovým pohledem, je tlaková plocha držena uvnitř zdiva významným zvýšením jeho tloušťky ve vybraných oblastech (kupole Pantheonu v Římě). V těchto případech klenby vyvozuji vodorovný tlak na spodní podpory. Jinou možností je zabezpečení klenby tangenciálními tahovými silami, které udržují tlakovou plochu uvnitř zdiva. Bazilika Sv. Petra (Vatikan) byla v polovině 18. století poté, co byly v kupoli objeveny velké trhliny, zpevněna čtyřmi železnými řetězy, které slouží jako tažený prstenec [5].

Železobetonové skořepiny

Problémy a obtíže, které je možno pozorovat na zděných konstrukcích, zejména klenbách s dvojí křivostí (odpovídajícího tvaru vzhledem k působení, což vede k významným štíhlostem), lze ve většině případů řešit přidáním výztuže, jejíž tahové síly mohou vychylovat výslednicovou plochu tak, aby zůstávala uvnitř betonu. V důsledku toho ve výztužené konstrukci dvojí křivosti vznikají pouze membránové síly (rovinné osově a smykové síly) a velmi omezené ohybové momenty a smykové síly působící ven z plochy. Protože požadovaná tloušťka může být významně snížena, jsou výsledkem velmi tenké železobetonové skořepiny dvojí křivosti.

První betonové skořepiny vyjadřovaly zcela jasně možnosti využití principu membránového chování [6]. Evropané (F. Dischinger, E. Torroja, R. Maillart) a američtí (A. Tedesco) konstruktéři získávali zkušenosti se skořepinami v tloušťkách 30 až 40 mm. Tyto projekty postavené v letech 1910 až 1940 reprezentují tvary definované analytickým vyjádřením (části kulových a válcových ploch nebo hyperbolických paraboloidů). V okrajích ploch byly navrhovány tažené výztuhy, aby v konstrukci bylo co nejlépe zajištěno membránové působení sil. Obtíže spojené s analytickým řešením tenkých skořepin vysvětlují poněkud omezený počet užívaných tvarů v tomto období a nízký počet konstruktérů, kteří se do návrhů takových konstrukcí vůbec pouštěli.

V následujícím období, mezi roky 1940 až 1970, došlo k velmi zajímavému vývoji v Americe v pracích španělského architekta F. Candely a v Uruguayi v návrzích inženýra E. Dieste (později se zabýval i vývojem zděných skořepin). Jejich přístup byl založen na co nejjednodušších analýzách (zejména Candela) spolu s kombinacemi různých částí dříve používaných tvarů. Vzhledem k jejich tvarovým vlastnostem a jednoduchosti výstavby byly často užívány hyperbolické paraboloidy. Tento přístup nabízel řešení projektů s využitím větších konstrukcí a s bohatším uplatněním různých tvarů. H. Isler postavil ve Švýcarsku [7 a 8] mezi roky 1960 a 1980 impozantní množství neobvyklých skořepinových konstrukcí, jejichž tvary získával a optimalizoval různými mechanickými analogiemi (pneumatické, gravitační tvarované membrány ad.). Je vhodné poznamenat, že nárůst užívání betonových skořepin v určitém období byl spíše dán znalostmi a zkušenostmi jejich

konstruktérů než pokračujícím obecným vývojem v jejich navrhování.

V dekadě mezi roky 1980 a 1990 byly betonové skořepiny používány jen zřídka. Byl to důsledek řemeslně náročné výstavby bednění a požadavku na přesné rozmístění výztuže pro takovou konstrukci, což zvyšovalo stavební náklady na ni, takže byla raději dávána přednost jiným typům konstrukčních řešení. V posledních letech se situace zvolna mění. Možnosti nabízejí nové typy betonů (např. vláknobetonu), výztuží, příprava 3D tvarů bednění na NC strojích a prostorové osazování jednotlivých dílů s použitím 3D grafických programů stejně jako nové možnosti pokročilých analýz simulace chování těchto konstrukcí s využitím nejmodernějších programových systémů. To vše dohromady umožňuje vývoj nového přístupu ke skořepinovým konstrukcím s mnohem volnějšími omezeními při volbě jejich tvarů. Nicméně porozumění principu dvojité křivosti, mechanismům přenosu zatížení a pravidlům daným přístupem k navrhování podle mezních stavů stále zůstává podstatou navrhování skořepin. A je to zejména důležité ve vztahu k analýze vzpěru tohoto typu konstrukcí. Přehled poznání v této oblasti byl publikován v roce 1979 Mezinárodní asociací pro skořepiny a prostorové konstrukce (International Association for Shell & Spatial Structures) [9] spolu s doporučeními pro jejich návrh. Výzkum v této oblasti nadále probíhá [10, 11] a je potřebné, aby pokračoval i v budoucnosti.

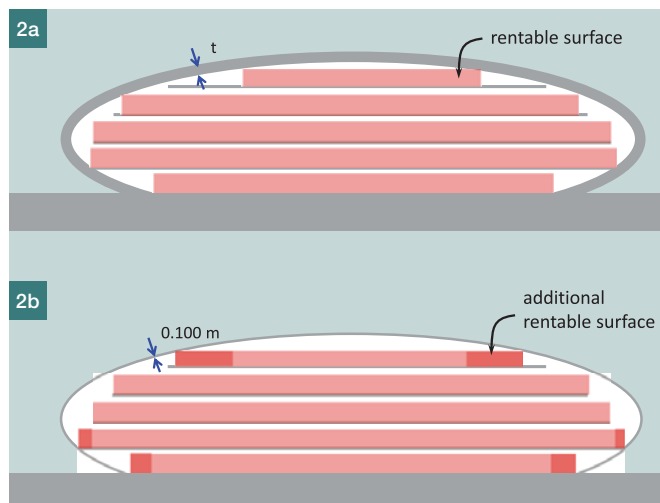
V následujícím textu jsou diskutovány podstatné aspekty návrhu a výstavby betonových skořepin se vztahem ke konstrukci skořepiny postavené nedávno ve Švýcarsku. Návrhu a realizace této skořepiny se zúčastnili autoři článku.

Obr. 1 Centro Ovale, Chiasso

Fig. 1 Centro Ovale, Chiasso

Obr. 2 Vliv tloušťky střešní konstrukce na velikost pronajimatelné podlahové plochy, a) tlustá střeška, b) tenká betonová skořepina

Fig. 2 Influence of the thickness of the roof on the rentable surfaces: (a) thick roof; and (b) thin concrete shell



NÁVRH BETONOVÉ SKOŘEPINY K ZASTŘEŠENÍ OBCHODNÍHO CENTRA VE ŠVÝCARSKÉM CHIASSU

Proč betonová skořepina?

Pro projekt nového obchodního centra ve švýcarském Chiassu bylo navrženo zastřešení ve tvaru elipsoidu, které splnilo požadavky klienta na užitnou plochu a představy architekta o výrazu nové budovy. Tloušťka stěny elipsoidu byla rozhodující, neboť přímo ovlivňuje velikost pronajímatelné plochy (obr. 2a). Při hledání řešení byly použity dřevěné i ocelové prvky. Použití tohoto řešení však některých místech omezovaly požadavky vzpěru, které by bylo možné řešit zvýšením tloušťky konstrukce v nejkritičtěších místech. To však bylo pro klienta neekonomické, neboť silnější konstrukce snižovala vnitřní pronajímatelnou plochu. Jako vhodné řešení se naopak ukázalo použití betonové skořepiny. Její tloušťka mohla být i v kritických místech, které ovlivňují rozsah pronajímatelné plochy, jen 100 mm. To dovolilo klientovi zachovat dostatečný funkční prostor a optimalizovat cenu projektu obchodního centra (obr. 2b).

Geometrie a hlavní charakteristiky skořepiny

Skořepina tvaru elipsoidu má osové rozměry 92,8 m (podélná osa) × 51,8 m (příčná osa) × 22,5 m (výška). Elipsoidem prochází řez vodorovnou rovinou a v této úrovni je usazen na betonovou podstavu tvořenou příčnými stěnami. Výsledná výška skořepinové konstrukce je 18,24 m (obr. 3). Tloušťka stěny skořepiny je proměnná. Hodnota 100 mm byla vybrána jako základní, stanovená na základě konstrukčních požadavků (minimální možná tloušťka s nezbytným krytím výztuže) při uvážení požadované bezpečnosti vzhledem k vybočení.

Při vnějším i vnitřním povrchu skořepiny byla navržena výztuž ve dvou vrstvách. Vrstvy výztuže byly orientovány v radiálním (poledníkovém) a tangenciálním (rovnoběžkovém) směru. Tyto orientace byly ze statického hlediska neefektivnější. Uspořádání čtyř vrstev výztuže zajišťovalo přenesení ohybových momentů a smykových sil vznikajících v místě spojení skořepiny s podstavou, poblíž předpjaté oblasti a v okolí otvoru ve vrcholu elipsoidu s ocelovým zaskleným světlíkem (obr. 3). V ostatních oblastech nabývaly ohybové momenty a smykové síly jen malých hod-

Obr. 3 Hlavní rozměry skořepiny, a) řez podél hlavní osy, b) řez podél příčné osy ■

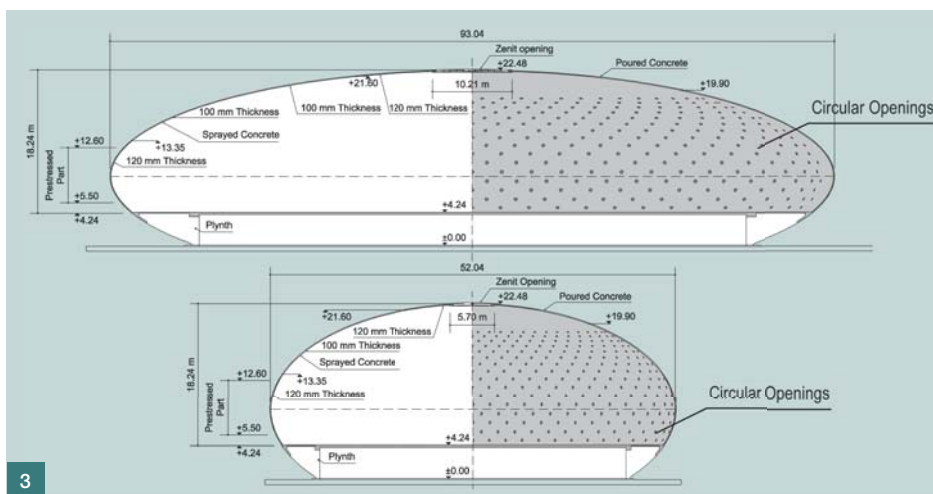
Fig. 3 Main geometrical dimensions, a) section along the major axis, b) section along the minor axis

Obr. 4 Membránové (v ploše skořepiny) vnitřní síly, a) oblast rovníku s maximálními tahovými silami, b) graf intenzity jednotkové síly ■

Fig. 4 Membrane (in-plane) inner forces, a) equator region, where maximum tensile forces develop, b) diagram of unitary force intensity

Obr. 5 Deformované tvary při porušení ztrátou stability, a) snížená tuhost v oblasti otvoru ve vrcholu skořepiny, b) snížená ohybová tuhost v horní části dodatečně předpjaté pásu, c) snížená celková ohybová tuhost ■

Fig. 5 Deformed shapes at the buckling failure, a) reduced stiffness at the zenith opening connection, b) reduced flexural stiffness at the top of the post-tensioned region, c) overall reduced flexural stiffness



not. Výztuž však byla po celé ploše skořepiny rozložena z konstrukčních důvodů ve čtyřech vrstvách, zejména pro omezení vzniku trhlin (mohly vzniknout v závislosti na kombinaci zatěžovacích stavů) a zajištění předepsané bezpečnosti proti boulení skořepiny.

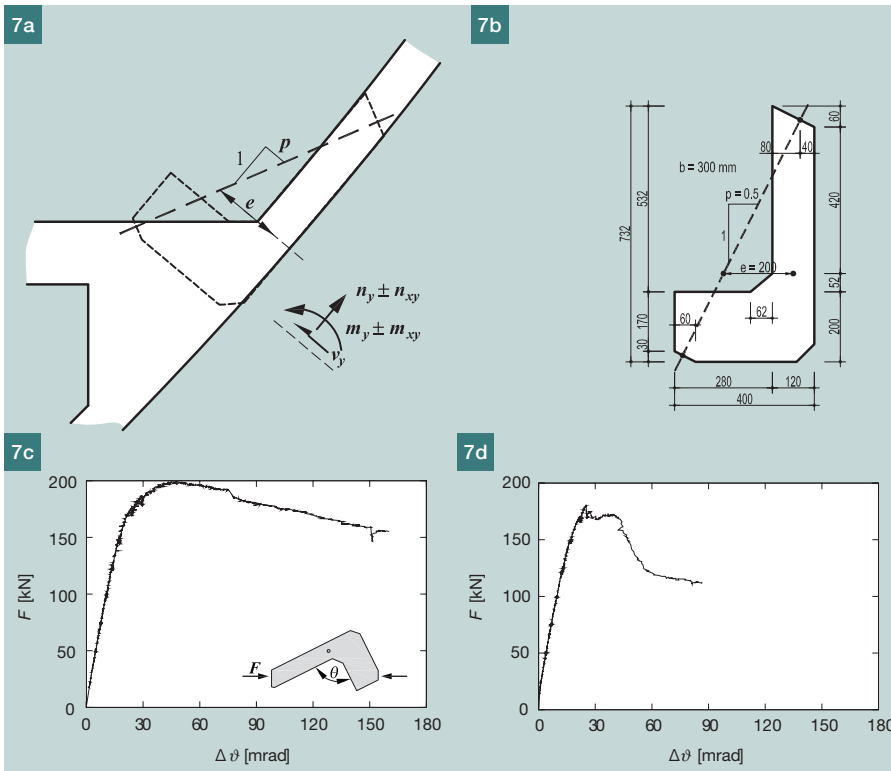
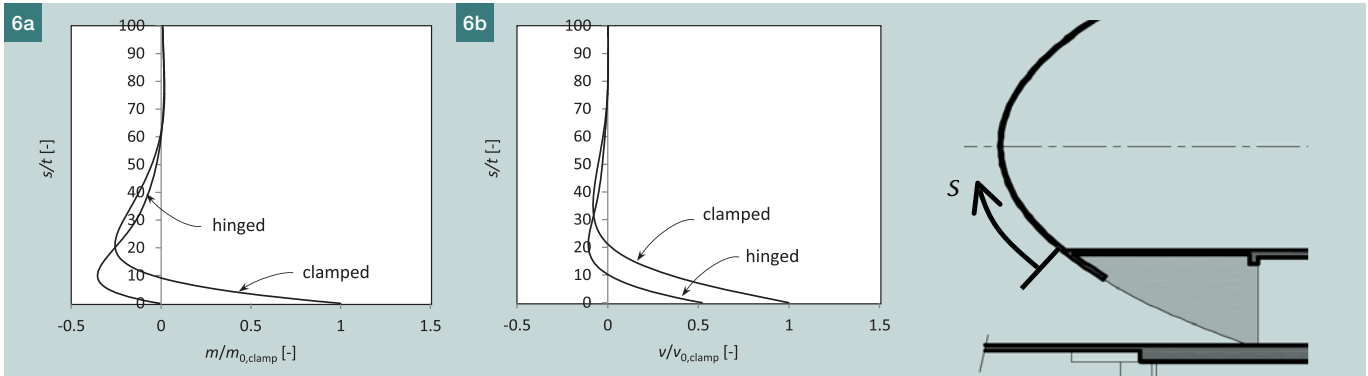
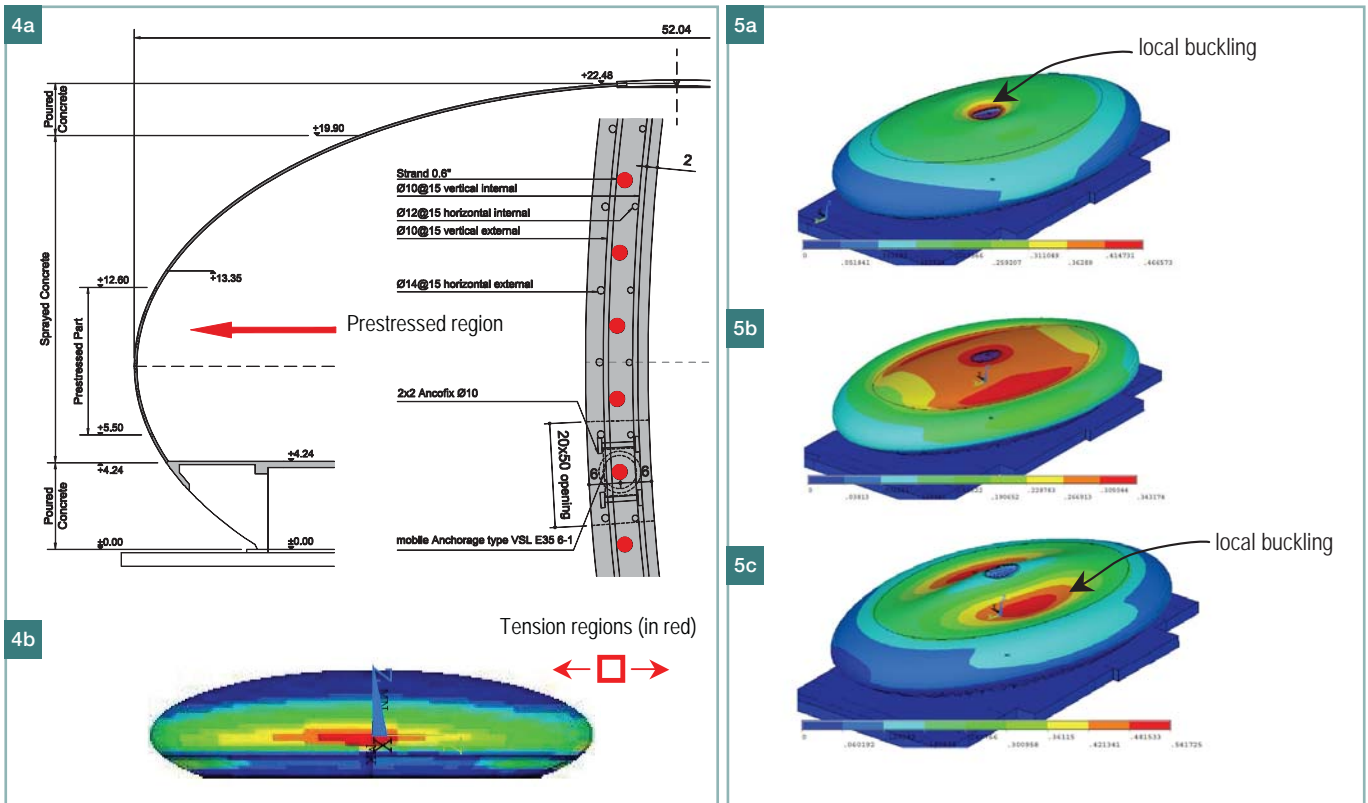
V pásu podél „rovníku“ skořepiny (od úrovně +5,5 m do úrovně +12,6 m, obr. 3) byla k přenesení membránového napětí ve vodorovném směru základní výztuž doplněna o 35 dodatečně předpjatých kabelů (0,6“ kabely typu monostrand). (Kabely jsou uloženy v ohebných kanálcích co nejmenších rozměrů tak, aby se minimalizovalo narušení tlakové zóny ve skořepině [12, 13]). Tloušťka skořepiny byla v této oblasti zvýšena na 120 mm (mezi úrovněmi +4,24 a +13,35 m). V oblasti spojení s betonovou podstavou (v úrovni mezi +4,24 a +5,14 m) byla k zajištění dostatečné smykové odolnosti a deformační kapacity (oblast je vystavená působení příčných (parazitických) smykových sil a ohybových momentů) přidána smyková výztuž.

V oblasti okolo otvoru ve vrcholu skořepiny až po úroveň +21,6 m byla tloušťka její stěny také zvýšena na 120 mm, což dovolilo napojit betonovou skořepinu na ocelovou konstrukci světlíku umístěnou do otvoru (10,21 × 5,7 m). Zaskleným otvorem proniká do vnitřního prostoru obchodního centra denní světlo. K posílení přirozeného osvět-

lení interiéru byly do pásu mezi úrovněmi +4,81 až +18,78 m vloženy řady kruhových otvorů o průměru 0,4 m (obr. 3).

Vlastnosti betonu

Na výstavbu konstrukce byl od úrovně +4,24 m do úrovně +19,9 m použit stříkaný beton. Tato technologie umožnila pro realizaci skořepiny použití konvenčního (jednostranného) bednění. Tam, kde byl sklon skořepiny minimální (méně než 20°, v pásu od +19,9 po +22,48 m), byla použita tradiční technologie monolitického betonu ukládaného do bednění. Pro oba typy betonů byla předepsána charakteristická tlaková pevnost betonu po 28 dnech f_{ck} 30 MPa. Do stříkaného betonu byla přidávána tvarovaná ocelová vlákna (30 kg/m³ betonu). Vlákna měla délku 30 mm a poměr délky k průměru 80. Vlákna byla použita pro zvýšení odolnosti betonu proti vzniku a rozvoji trhlin (v oblasti dodatečného předpětí) a k zvýšení duktility betonu namáhaného vysokými normálovými a smykovými silami (v oblasti napojení na základnu). Směs pro stříkaný beton obsahovala 300 kg cementu/m³ betonu a 25 kg jemně mletého vápence/m³ betonu (pro zlepšení zpracovatelnosti). 70 % zrn kameniva bylo rozměrů 0 až 4 mm, zbytek mezi 4 až 8 mm. Byla použita suchá technologie stříkání, tzn. že voda byla do směsi přidávána až ve stříkací pistolí.



Obr. 6 Porovnání příčných sil ve svislém (radiálním) směru (v poměru k hodnotám maximálních sil pro vetknutý případ) jako funkce vzdálenosti od vetknutého okraje s (normalizované tloušťkou desky), a) ohybové momenty, b) smykové síly

Fig. 6 Comparison of non-membrane forces in the vertical (radial) direction (normalized by maximum forces for the clamped case) as a function of the distance to the clamped edge (s normalized by the thickness of the slab), a) bending moments, b) shear forces

Obr. 7 Smykové síly a ohybové momenty v místě napojení na betonovou základnu, a) teoretický průběh výslednicové čáry, b) zkoušený prvek, c) chování zkoušeného prvku se smykovou výztuží, d) chování zkoušeného prvku bez smykové výztuže

Fig. 7 Shear and bending forces at the connection to the concrete basement, a) location of the theoretical thrust line, b) tested specimen, c) behaviour of the specimen tested with shear studs, d) behaviour of the specimen tested without shear studs

SPECIFIKA NÁVRHU

Kromě požadavků vycházejících z konstrukčních důvodů (např. tloušťka skořepiny objasněná v předchozím textu) se návrh skořepiny a její výztuže řídil třemi statickými hledisky: membránové působení vnitřních sil ve skořepině, účinky 2. řádu a příčné (parazitní) ohybové a smykové síly působící v místě uložení na betonovou základnu.

Byl sestaven 3D MKP model konstrukce (v komerčním programu ANSYS) pro lineární a nelineární analýzu jejího chování. Porovnání výsledků numerické analýzy s analytickými řešeními některých skořepin, např. kulových ploch [14], potvrdilo přesnost a výstižnost MKP výsledků. Tento přístup umožnil zpřesnění řešení včetně kontrol a srovnání výsledků jednotlivých analýz i z hlediska udržitelnosti.

Vnitřní membránové síly

Obecně dosahovaly vnitřní membránové tahové síly (působí v ploše) jen nepříliš vysokých, spíše nízkých, hodnot, které by mohly být pokryty jen minimálním

množstvím tahové výztuže. Podstatnou výjimkou z tohoto stavu jsou velké tahové síly působící v oblasti kolem rovniku skořepiny (obr. 4). Návrh konstrukce byl zpracován tak, aby její pevnost byla dostatečná z hlediska mezního stavu únosnosti stejně jako byla zajištěna kontrola šířky trhlin z hlediska mezního stavu použitelnosti. Z toho vzešel požadavek na dodatečné předpětí (monostrandy) v oblasti působení velkých tahových sil. Je třeba poznamenat, že v některých částech konstrukce vedla dlouhodobá přetvoření betonu (zejména od smrštění) k vzniku tahových napětí (zejména v oblasti napojení na základnu), která vyžadovala návrh dostatečné výztuže k zajištění omezení nadměrného rozevírání trhlin.

Stabilita konstrukce

Otázky stability (vzpěru a boulení) byly zásadní pro návrh vrcholové části skořepiny v oblasti minimálních křivosti a největších tlakových sil. Návrh byl zpracován dle doporučení IASS [9]. K popsání stabilitního chování byly realizovány nelineární analýzy chování konstrukce s uvážením počátečních imperfekcí, dotvarování betonu, skutečné tuhosti konstrukce po vzniku trhlin a jejího nelineárního chování [9]. Byla rovněž provedena citlivostní analýza konstrukce na účinky výrazného snížení tuhosti určité oblasti způsobené různými příčina-

mi (vznik trhlin v určité oblasti skořepiny, místní imperfekce v kombinaci se zatížením sněhem nebo teplotou). Její výsledky ovlivnily posuzování stability konstrukce (obr. 5), ale byly pro všechny případy přijatelné.

Okrajové síly

Příčné vnitřní síly vznikají převážně v místě napojení betonové základny (okrajové síly vyvolané kompatibilitou deformací spojených konstrukcí). Příčné vnitřní síly byly zjištěny i v oblasti dodatečného předpětí a kolem vrcholového otvoru (jejich intenzita však byla nižší než v místě napojení na základnu).

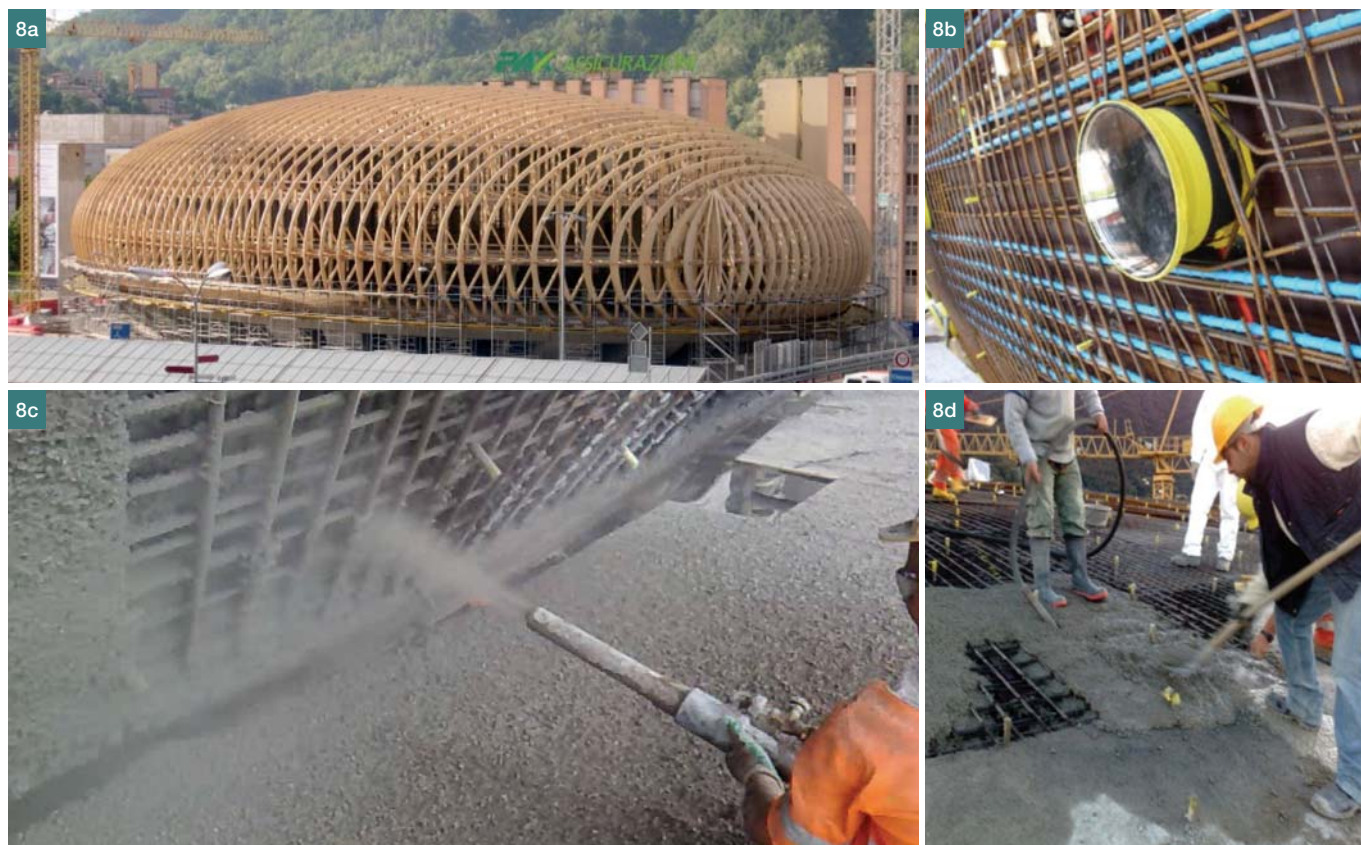
Okrajové příčné síly (ohybové momenty a smykové síly) obvykle vznikají na okrajích skořepiny a jsou dobře popsány v odborné literatuře [14]. Obě síly lze vypočítat na základě geometrie skořepiny ze vztahů

$$v_y = v_{y,0} \exp(-\lambda_v s) \cos(\omega_v s),$$

$$m_y = m_{y,0} \exp(-\lambda_m s) \cos(\omega_m s),$$

kde v_y a m_y značí jednotkové smykové síly a jednotkové ohybové momenty působící ve vzdálenosti s (ve směru kolmo k okraji skořepiny), $v_{y,0}$ a $m_{y,0}$ značí jednotkové smykové síly a jednotkové ohybové momenty v místě napojení (vetknutého) okraje, λ_v , λ_m , ω_v a ω_m značí parametry závislé na geometrii skořepiny [14] (poloměr

Obr. 8 Výstavba skořepiny, a) dočasné lešení, b) ukládání předpínacích kabelů, c) stříkání betonu, d) ukládání monolitického betonu ■ Fig. 8 Construction of the shell, a) temporary falsework, b) placing of prestressing tendons, c) spraying of concrete, d) pouring of concrete



křivosti, tloušťku, Poissonovu konstantu, podmínky napojení (vetknutí)). Oba vztahy vedou na exponenciální rozklad okrajových sil vyjádřených harmonickou funkcí. Na popsané skořepině byl vliv okrajových sil patrný do vzdálenosti rovnající se cca čtyřicetinásobku její tloušťky (obr. 6). Ohybové momenty a smykové síly při různých kombinacích zatížení vyvolávaly na volných okrajích skořepiny kladné, nebo záporné hodnoty poměrných přetvoření.

Je třeba také zdůraznit vliv okrajových podmínek na okrajové příčné síly. V místě pevného napojení skořepiny na podstavu vzniká ohybový moment ($m_{y,0,clamp}$). Pokud by v tom místě byla skořepina připojena kloubově, v okraji by měl moment nulovou hodnotu, ale v bezprostřední vzdálenosti by už dosahoval svého maxima (avšak v nejnižší absolutní hodnotě). Stejně tak co se týká smykových sil, ve vetknutém okraji skořepiny vznikají maximální smykové síly ($v_{y,0,clamp}$) dvojnásobné velikosti oproti kloubově podepřené skořepině ($v_{y,0,hinged}$). V grafech na obr. 6 jsou vyneseny hodnoty poměrných vnitřních sil v podporové oblasti pro oba typy podepření. Z jejich rozdílů je vidět, jaký vliv mají na hodnoty vnitřních sil okrajové podmínky a deformační kapacita konstrukce.

Pro přenesení okrajových sil bývají obvykle používány různé postupy. Prv-

ní sestává z místního zvýšení tloušťky skořepiny tak, aby výslednicová čára mohla mít vhodnější průběh (analogický přístup bývá používán pro předpjaté pásy [15]). Alternativně může být navržena výztuž dle mezního stavu použitelnosti na požadavky omezení šířky trhlin a dle mezního stavu únosnosti za předpokladu plastické redistribuce vnitřních sil (obr. 6). Druhé řešení vyžaduje určitou úroveň deformační kapacity v okrajové oblasti, která je ovlivněna smykovými silami [16].

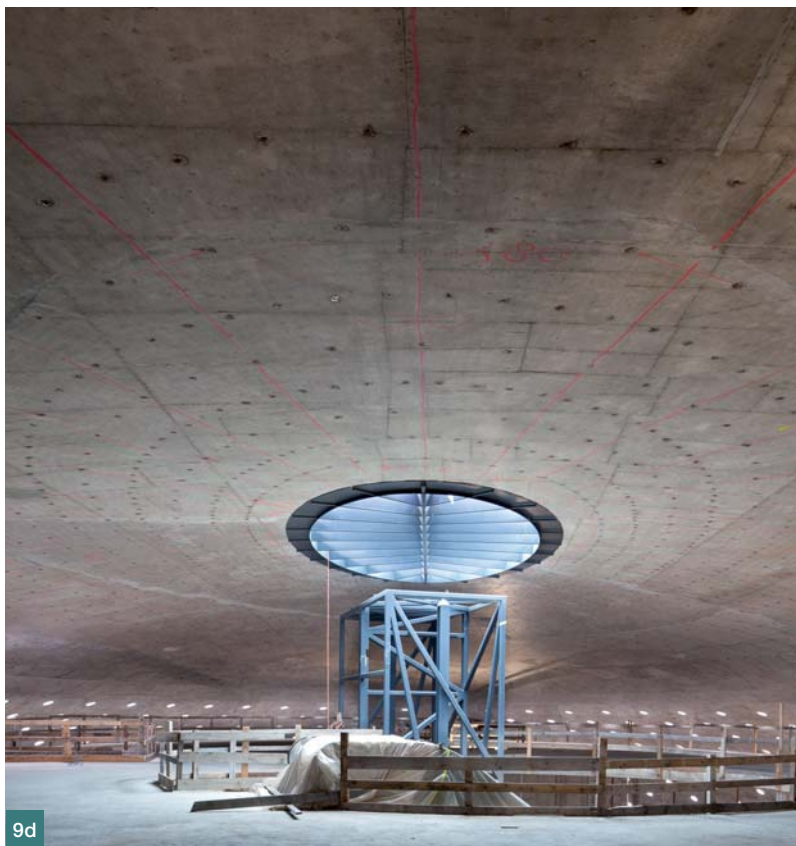
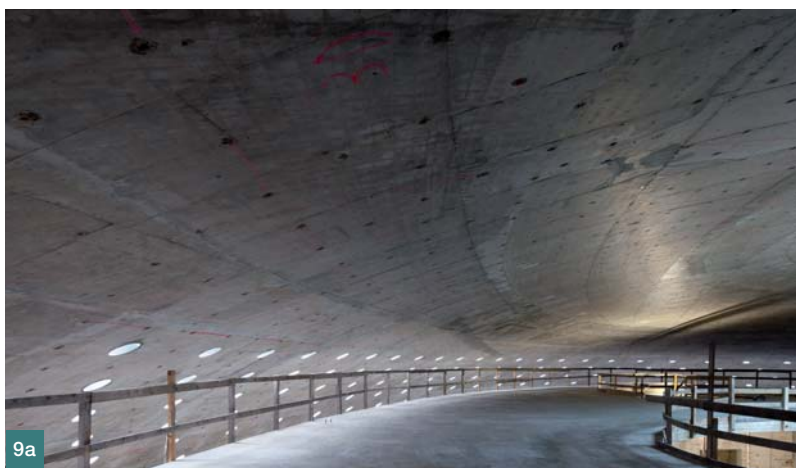
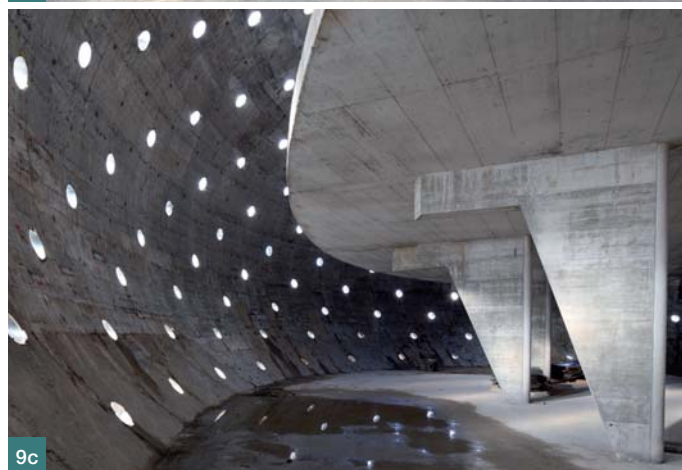
Aby bylo možno vyhovět potřebám architektonického návrhu a maximální funkčnosti, byl pro popisovanou skořepinu použit druhý postup. Vybrané řešení bylo experimentálně ověřeno v laboratoři (obr. 7). Příčná výztuž byla navržena tak (0,5 %), aby zajišťovala dosta-

tečnou pevnost konstrukce i při velkých deformacích (obr. 7c). Experimentálně byl vyzkoušen vybraný konstrukční prvek v obou variantách, s i bez příčné smykové výztuže. Betonový prvek s příčnou výztuží vykazoval významně lepší chování než referenční prvek bez výztuže, který se porušil při nižším zatížení a vykázal výrazně omezenou deformační kapacitu (obr. 7d).

VÝSTAVBA SKOŘEPINY

Bednění skořepiny bylo upevněno na dřevěnou příhradovou konstrukci ramenátů (obr. 8a). Bednění bylo skládáno z panelů ohýbaných na místě a přišroubovaných na určené místo lešení. Poté byla rozmístěna a vázána výztuž (obr. 8b). Pro uložení betonu byla použita na většině plochy stříkaná techno-

Obr. 9 Dokončená konstrukce, a,b,c,d
Fig. 9 Completed structure, a,b,c,d



Literatura:

- [1] *Arenas de Pablo J. J.*: Bridges (in Spanish: Caminos en el aire: los puentes), Colegio de ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 2 vols., 2002, 1031 p.
- [2] *Boothby T. E.*: Analysis of masonry arches and vaults. Prog. Struct. Eng. Mat., Vol. 3, 2001, pp. 246–256
- [3] *Boyd T. D.*: The Arch and the Vault in Greek Architecture, American Journal of Archaeology, Vol. 82, No. 1, 1978, pp. 83–100
- [4] *Heyman J.*: The Stone Skeleton: Structural engineering of masonry architecture, Cambridge University Press, 1995, 163 p.
- [5] *Muttoni A.*: The art of structures – an introduction to the functioning of structures in architecture, EPFL Press, Lausanne, Switzerland, 2011, 269 p.
- [6] *Cassinello P., Schlaich M., Torroja J. A.*: Félix Candela. In memoriam (1910–1997). From thin concrete shells to the 21st century's lightweight structures (in Spanish: Félix Candela. En memoria (1910–1997). Del cascarón de hormigón a las estructuras ligeras del s. XXI), Informes de la Construcción, Vol 62, No 519, 2010, pp. 5–26
- [7] *Chilton J., Isler H.*: Heinz Isler: The engineer's contribution to contemporary architecture, RIBA Publications/Thomas Telford, 2000, pp. 20–29
- [8] *Kotnik T., Schwartz J.*: The architecture of Heinz Isler, Journal of the IASS, Vol.52, Nr. 3, 2011, pp. 185–190
- [9] IASS (International association for shell and spatial structures). Working Group Nr. 5, Recommendations for reinforced concrete shells and folded plates, Madrid, Spain, 1979, 75 p.
- [10] *Espín A. T.*: Optimal design of shape and reinforcement in concrete shells (in Spanish: Diseño óptimo de forma y armado de láminas de hormigón). PhD thesis, Universidad Politécnica de Cartagena – Depart. de estructuras y construcción, Spain, 2007, 224 p.
- [11] *Mungan I.*: A conceptual approach to shell buckling with emphasis on reinforced concrete shells, In Proc. of the IASS Symposium 2009, Valencia, 2009, pp. 39–50
- [12] *Muttoni A., Burdet O., Hars E.*: Effect of Duct Type on the Shear Strength of Thin Webs, ACI Structural Journal, Farmington Hills, USA, 2006, pp. 729–735.
- [13] *Fernández Ruiz M., Muttoni A.*: Shear strength of thin-webbed post-tensioned beams, American Concrete Institute, Structural Journal, Vol. 105, No. 3, 2008, pp. 308–317
- [14] *Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S.*: Theory of plates and shells, 2nd ed., Mc Graw-Hill, 1959
- [15] *Schlaich J., Engelsmann S.*: Stress Ribbon Concrete Bridges, SEI, 1996, pp. 271–274
- [16] *Vaz Rodrigues R., Muttoni A., Fernández Ruiz M.*: Influence of shear on the rotation capacity of R/C plastic hinges, ACI, Structural Journal, Vol. 107, No. 5, 2010, pp. 516–525
- [17] *Garlock M., Billington D.*: Félix Candela. Engineer, Builder, Structural Artist, Yale University Press, New Haven CT, 2008
- [18] *Muttoni A., Lurati F., Fernández Ruiz M.*: Concrete shells – towards efficient structures: Construction of an ellipsoidal concrete shell in Switzerland, Structural Concrete, Ernst & Sohn, Germany, Vol. 14, No. 1, 2013, pp. 43–50, doi: 10.1002/suco.201200058

logie (obr. 8c) a pouze ve vrcholové oblasti skořepiny s malou křivostí byl beton ukládán běžným způsobem a zhutňován ponornými vibrátory (obr. 8d). Ukládání výztuže a betonáž skořepiny trvalo cca tři měsíce.

Po dokončení betonáže a zatvrdnutí betonu byla skořepina postupně odskružena. To je v podstatě nejkritičtější fáze výstavby tohoto typu konstrukce a v některých případech vedla i k jejímu zhroucení [17]. Pro představenou konstrukci byly práce rozděleny do několika fází tak, aby se odskružení nestalo omezující situací pro její návrh.

Nejprve byla vnesena polovina předpínací síly (jeden ze dvou kabelů byl předepjat). Poté byl uvolněn kontakt bednění s betonem v místě předpětí a bednění zde bylo rozebráno. Následovalo vnesení předpětí do všech kabelů. Tento postup zajistil rovnoměrný přenos předpětí do betonu. Dále byly postupně uvolněny svislé stojky bednění podpírající vrcholovou oblast skořepiny a celá konstrukce byla odskružena. Během procesu postupného odskružování byly měřeny deformace konstrukce ve vybraných bodech a jejich hodnoty ukládány. Jejich porovnání s predikovanými hodnotami ukázalo dobrou shodu. Fotografie dokončené konstrukce skořepiny jsou na obr. 9.

Cenu za výstavbu betonové konstrukce tvořilo ze 49 % lešení a bednění, 21 % betonářská výztuž, 5 % předpínací výztuž a aktivace předpětí, 24 % stříkaný beton a 1 % monolitický beton uložený běžným způsobem. To odhaluje velkou finanční náročnost spoje-

nou s výstavbou lešení a bednění pro výstavbu těchto typů konstrukcí a zdůrazňuje potřebu výzkumu a vývoje nových efektivních stavebních technologií.

ZÁVĚRY

Článek shrnuje nejdůležitější aspekty vztahující se k návrhu a výstavbě betonové skořepinové konstrukce ve švýcarském Chiassu. Hlavní závěry jsou následující:

- Betonová skořepina je efektivní konstrukce a lze ji použít jako trvanlivé řešení pro zastřešení nebo překrytí rozsáhlých prostor.
- Betonovou skořepinu lze postavit s velmi malou tloušťkou, která umožňuje maximalizovat vnitřní prostor konstrukce. Tato skutečnost dovoluje rovněž minimalizovat množství použitého materiálu a energie potřebné na výstavbu, takže tím přispívá k udržitelnému způsobu stavění.
- Návrh betonové skořepiny se řídí hledisky, která nemusí být tak zásadní pro jiné typy betonových konstrukcí, např. membránové síly, účinky 2. řádu a okrajové síly (požadavky kompatibility), které však mohou s vysokou pravděpodobností být rozhodujícími kritérii v určitých oblastech skořepiny.
- Výzkum a inovace jsou stále žádané pro technologie podpůrných lešení a bednění. Tradiční postupy vedou k dobrým výsledkům z hlediska tvaru a kvality, avšak dvojí křivost povrchu bednění vede k velmi složitým a cenově náročným systémům.
- Návrh betonových skořepinových konstrukcí dle požadavků stability je

komplexní otázkou, jež není dostatečně pokryta praktickými předpisy. Přehled a aktualizace návrhových doporučení a předpisů by pomohla konstruktérům a povzbudila je k navrhování dalších zajímavých skořepinových konstrukcí.

Klient	Centro Ovale 1 SA, (Chiasso, Switzerland)
Architekt	Elio Ostinelli (Chiasso, Switzerland)
Návrh konstrukce a engineering	Aurelio Muttoni, Franco Lurati, Miguel Fernández Ruiz (Mendrisio and Lausanne, Switzerland)
Dodavatel	Muttoni SA, (Bellinzona, Switzerland)
Náklady	5,3 mil CHF (včetně DPH a cen návrhu a projektu)

Fotografie: 1, 9 – Simone Mengani, Chiasso, Švýcarsko, 8 – Livio Muttoni, Lugano, Švýcarsko

prof. Aurelio Muttoni, PhD.
Muttoni & Fernández, ic SA,
Route du Bois 17
CH-1024, Ecublens
Switzerland
e-mail: aurelio.muttoni@mfic.ch



Franco Lurati
Lurati Muttoni Partner SA
via Moree 3, CH-6850, Mendrisio
Switzerland
e-mail: franco.lurati@lmpartner.ch



Miguel Fernández Ruiz, PhD.
Muttoni & Fernández, ic SA
Route du Bois 17
CH-1024, Ecublens
Switzerland
e-mail: miguel.fernandezruiz@mfic.ch

