

SAMOKOTVENÁ MEMBRÁNA NAD OBDÉLNÍKOVÝM PŮDORYSEM

SELF-ANCHORED MEMBRANE ABOVE A RECTANGULAR PLAN

Leonard Šopík, Jiří Stráský

Samokotvená předpjatá membrána nad obdélníkovým půdorysem je popsána z hlediska konstrukčního uspořádání a statického působení. Jsou uvedeny základní výsledky analýz postupné výstavby a aplikace proměnného zatížení. Na závěr jsou uvedena doporučení pro různé rozměry konstrukcí. ■ A self-anchored edprestressed membrane above a rectangular plan is described in terms of the structural arrangement and a static function. Essential results of the analyses of a progressive erection and an application of the variable load are presented. In conclusion the recommendations for different dimensions of structures are presented.

Membránové střešní konstrukce z předpjatého betonu jsou vhodné pro zastřešení staveb sloužících ke společenským a reprezentativním účelům. Jsou také využitelné v průmyslových stavbách, sportovních halách a stadiónech, u kterých je často nutné zastřešit rozsáhlé prostory bez omezení vnitřního prostoru sloupovými prvky.

Tento článek navazuje na publikace [1, 2] a je zaměřen na analýzu membrány jednoduché křivosti nad obdélníkovým půdorysem s využitím samokotveného systému.

PRINCIP SAMOKOTVENÉHO SYSTÉMU

Samokotvený systém se skládá z předpjaté membrány kotvené v krajních nosnících. Vodorovná síla je přenášena ohybem nosníků do přímých (obr. 1) či obloukových vzpěr (obr. 2).

Celkové statické působení konstrukce je zřejmé z obr. 3. Nosné kabely jsou ukotveny v koncových nosnících, a horizontální síla z kabelů je tím přenesena do těchto nosníků. Koncový nosník je podélně předepnut a radiální účinky od tohoto předpětí jsou v rovnováze s horizontálními silami kabelů. Koncový nosník tak přenáší horizontální síly z ukotvení membrány do krajních vzpěr. Vzpěrami jsou síly z obou stran ukotvení přenášeny proti sobě, a je tak uzavřen přenos sil působících v konstrukci; mluvíme o tzv. samokotveném systému. Je tedy vytvořena konstrukce, u které není nutné nákladné zachycení horizontálních sil základovou konstrukcí.

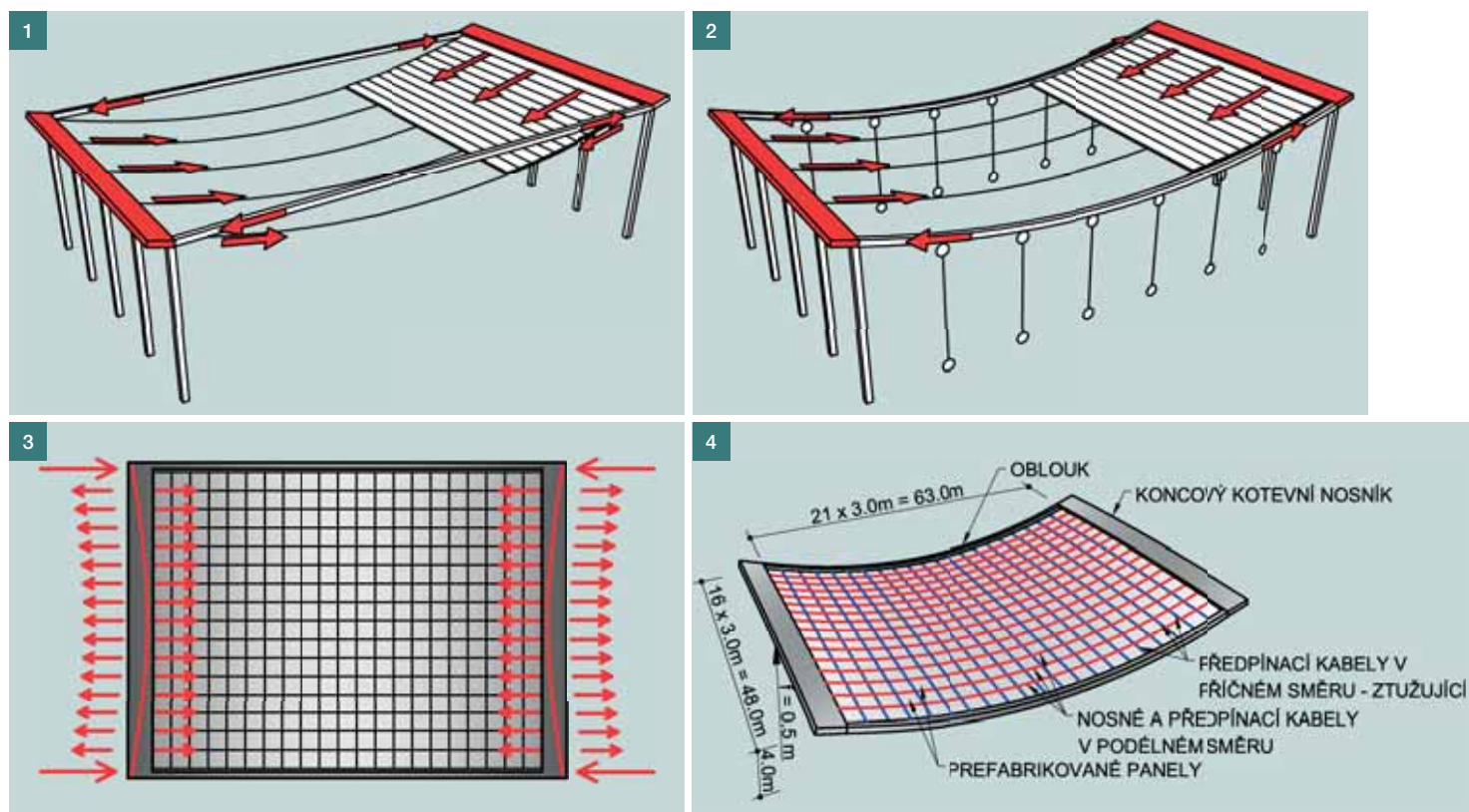
STUDOVANÁ KONSTRUKCE

Pro studium membránové střešní konstrukce s použitím samokotveného systému byly zvoleny půdorysné rozměry, které jsou vhodné např. pro za-

střešení plaveckého stadionu. Studovaná střešní konstrukce měla půdorysné rozměry membrány 63 m na délku a 48 m na šířku. Velikost vzezření byla zvolena 4 m. Z důvodu odvodnění bylo navrženo parabolické konkávní zakřivení v příčném směru o velikosti vzezření 0,5 m. Na obr. 4 je znázorněn finální tvar konstrukce včetně základního popisu.

Koncové kotevní nosníky spolu s obloukovými vzpěrami tvoří samokotvící rám. Membrána je s tímto rámem spojena podél koncových nosníků a také podél obloukových vzpěr. Do koncového nosníku jsou zakotveny nosné kabely a také podélně předpínací kabely. Příčné předpínací kabely jsou zakotveny do podélných obloukových vzpěr. Předpínací kabely ve směru příčném i podélném se skládají ze čtyř lan o ploše jednoho lana 150 mm² a jsou napnuty na hodnotu 1 200 MPa.

Koncový nosník má průřez o rozměrech 1,5 x 4 m a je natočen tečně k parabolické geometrii membrány. Obloukové vzpěry mají čtvercový průřez o hraně 0,7 m a svou geometrií kopírují tvar membrány. Pro zajištění stability ve vertikálním směru jsou štíhlé obloukové vzpěry podepřeny sloupovými



Obr. 1 Samokotvená membrána s příkými vzpěrami ■ Fig. 1 Self-anchored membrane with straight struts

Obr. 2 Samokotvená membrána s obloukovými vzpěrami ■ Fig. 2 Self-anchored membrane with arc struts

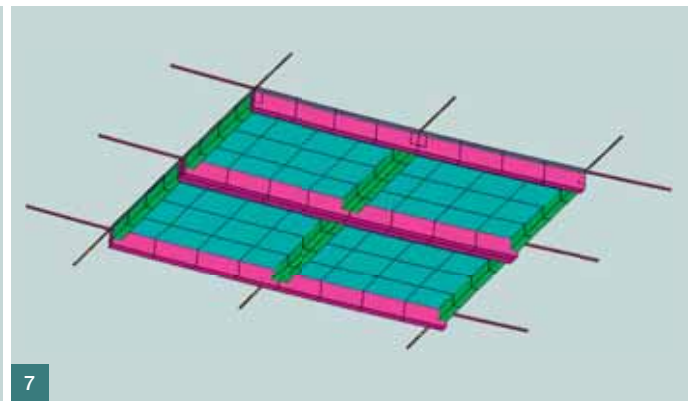
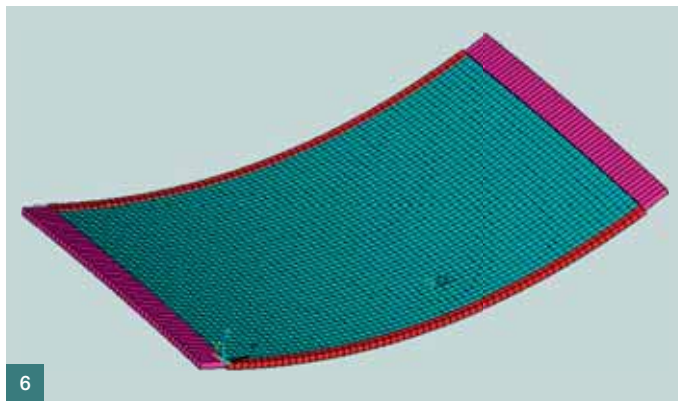
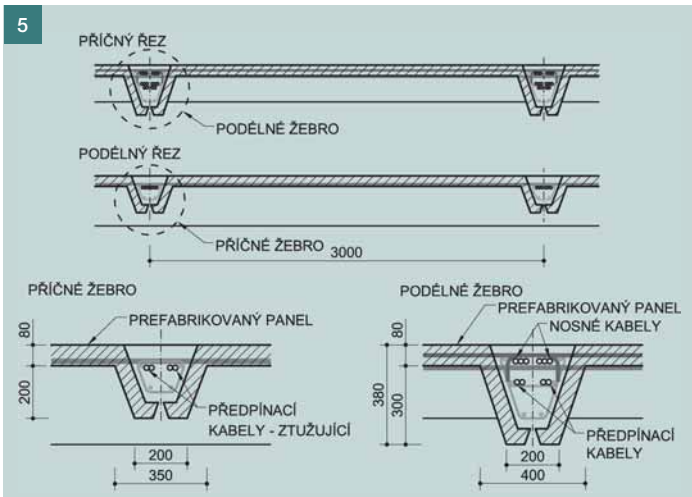
Obr. 3 Statická funkce samokotveného systému ■ Fig. 3 Static function of self-anchored system

Obr. 4 Popis konstrukce a základní rozměry ■ Fig. 4 Description of structure and dimensions

Obr. 5 Prefabrikované panely ■ Fig. 5 Precast segments

Obr. 6 Zobrazení celého modelu ■ Fig. 6 Global model

Obr. 7 Detailní zobrazení panelů ■ Fig. 7 Detail of precast segments



prvky. Ve směru horizontálním (příčném) jsou spojeny s membránou.

Základním stavebním prvkem studované membrány jsou prefabrikované panely (obr. 5). Všechny panely jsou čtvercového půdorysu o rozměrech 3 m x 3 m. Tloušťka panelů je 80 mm. Po okrajích jsou panely opatřeny žebry. Žebra v podélném směru jsou rozměrově větší než v příčném, protože prostor jimi vytvořený obsahuje větší množství kabelů než prostor vytvořený příčnými žebry. Při řešení se pro prefabrikované panely předpokládalo použití lehkého konstrukčního betonu třídy LC 25/28.

VÝPOČTOVÝ MODEL A FÁZE VÝSTAVBY

Při reálné výstavbě by konstrukce procházela různými stadii namáhání a statických systémů. Postup výstavby má zásadní vliv na finální tvar i napjatost membrány. Bylo tedy nutné respektovat tento postup i při analýze konstrukce [1]. Analýza byla rozdělena na dvě základní části, a to na stadium montáže prefabrikovaných panelů a na stadium po zmonolitnění prefabrikátů. Obě základní stadia byla dále rozdělena do několika dalších kroků s cílem vnést do membrány potřebnou tlakovou rezervu, a to při respektová-

ní postupu výstavby. Výpočetní modely byly řešeny v programovém systému ANSYS. Model ve finálním stavu výstavby je zobrazen na obr. 6 a detailní pohled na obr. 7.

VYHODNOCENÍ NAPJATOSTI MEMBRÁNY

Ve finálním kroku výstavby byla do betonové membrány v obou směrech vnesena tlaková rezerva o velikosti 2 až 3 MPa (obr. 8 a 9).

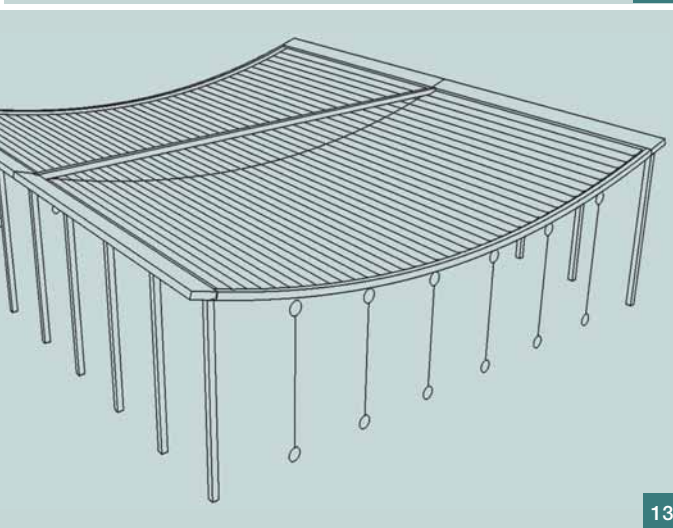
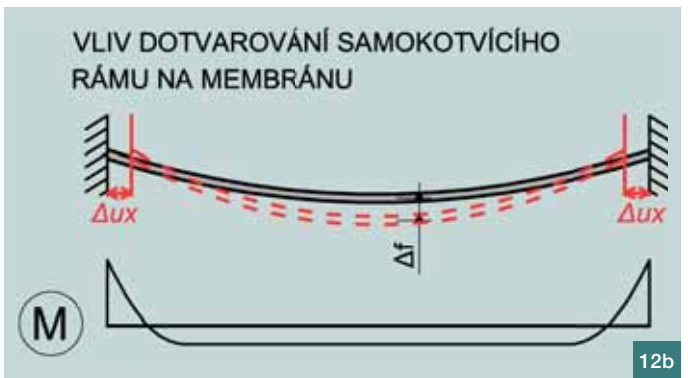
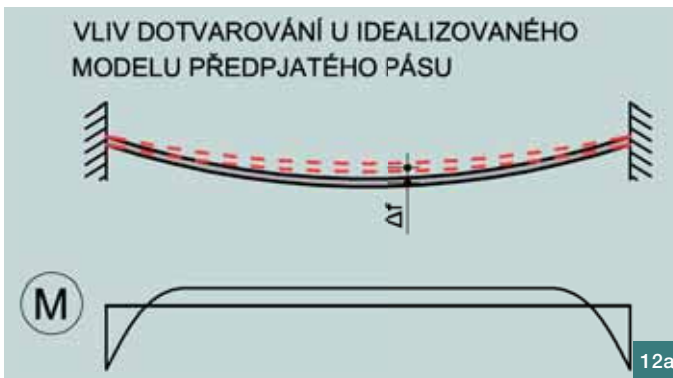
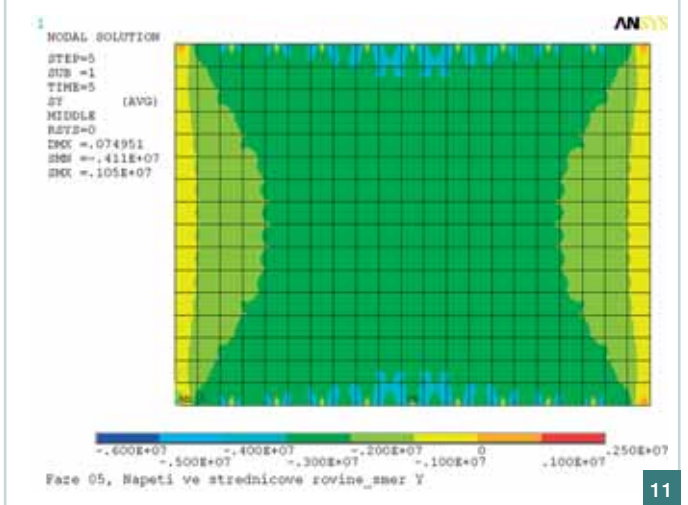
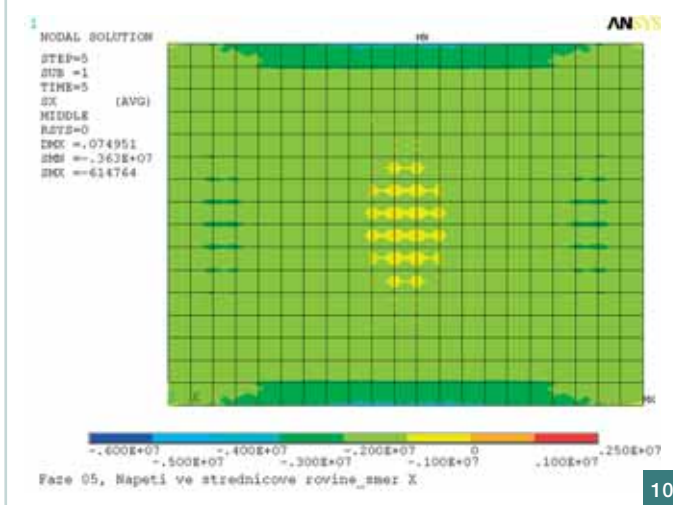
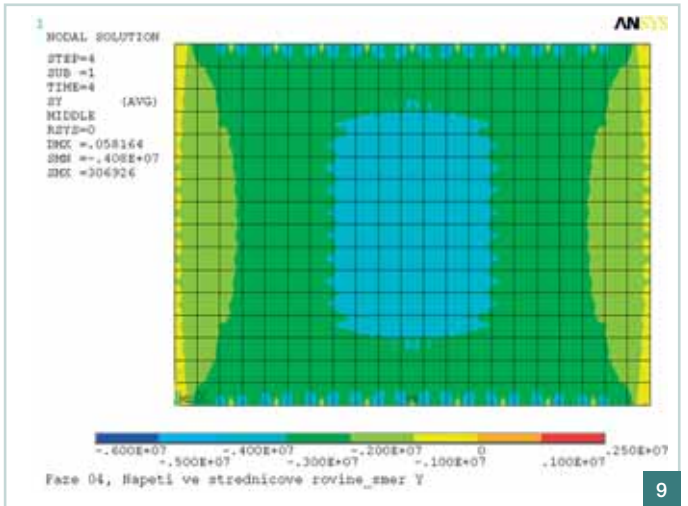
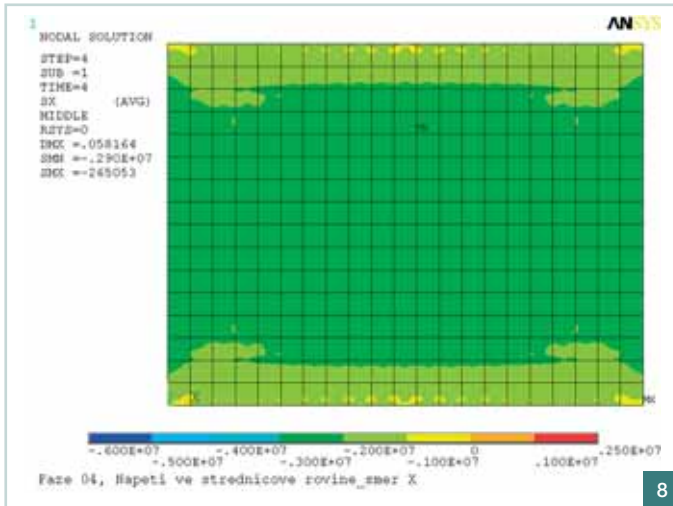
Tlaková rezerva membrány je odčerpávána proměnným zatížením větrem a sněhem. Sníh byl aplikován třemi způsoby, a to na celou plochu, na podélnou polovinu a na příčnou polovinu. Větr byl aplikován taktéž třemi způsoby a to kombinací tlaku a sání, kombinací dvou velikostí sání v podélném směru a také kombinací dvou velikostí sání ve směru příčném. Zatížení větrem i sněhem bylo určeno na základě platných norem. K největšímu odčerpání tlakové rezervy došlo při aplikaci zatížení sněhem na celou plochu (obr. 10 a 11). Tlaková rezerva při tomto zatížení poklesla na hodnotu 1 MPa ve střednici panelu, a nebyla tak zcela vyčerpána. Velikost navrženého předpětí byla dostatečná.

Také funkčnost samokotveného systému byla potvrzena. Výpočetový mo-

del byl podepřen pouze ve směru svislém a ve směru horizontálním byl podepřen pružně (s malou tuhostí pružin). Pružné podepření tak nijak výrazně neomezovalo přenos sil v konstrukci a dávalo možnost plně využít samokotvícího rámu.

ČASOVÁ ANALÝZA KONSTRUKCE

Nedílnou součástí návrhu většiny betonových konstrukcí je jejich analýza v čase. Stejně jako u betonů obvyklých dochází v čase i u betonů lehkých k vývoji charakteristik materiálu (nárůst pevnosti, modulu pružnosti) a také k objemovým změnám betonu (dotvarování a smršťování). U lehkých betonů, čili betonů s pórovitým kamenivem, je průběh těchto změn v čase a jejich konečná hodnota různá od betonů obvyklých. Smršťování je u lehkých betonů vyšší a dotvarování je naopak nižší. Pro zhodnocení vlivu reologických vlastností membrány a celé konstrukce byla provedena časově závislá analýza. Při ní byla membránová plošná konstrukce nahrazena roštovým prutovým modelem. Nejdříve byla časově závislá analýza provedena pouze na jedné řadě panelů, která byla na svých koncích vetknuta. Byl v podstatě vytvořen jeden předpjatý pás, který nebyl ovlivněn reologickými změnami samokotvícího rá-



Obr. 8 Normálové napětí ve střednici v podélném směru [Pa]

Fig. 8 Normal stresses in the midplane in longitudinal direction [Pa]

Obr. 9 Normálové napětí ve střednici v příčném směru [Pa]

Fig. 9 Normal stresses in the midplane in transversal direction [Pa]

Obr. 10 Normálové napětí ve střednici v podélném směru při zatížení sněhem [Pa]

Fig. 10 Normal stresses in the midplane in longitudinal direction caused by snow load [Pa]

Obr. 11 Normálové napětí ve střednici v příčném směru při zatížení sněhem [Pa]

Fig. 11 Normal stresses in the midplane in transversal direction caused by snow load [Pa]

Obr. 12 Vliv dotvarování na membránu, a) jeden pás bez samokotvícího rámu, b) celá konstrukce

Fig. 12 Influence of creep on membrane, a) one stress ribbon without self-anchored frame, b) completed structure

Obr. 13 Modifikace samokotveného systému se vzpěrou uprostřed

Fig. 13 Modification of self-anchored system by strut placed in the middle

mu. Poté byl vytvořen model celé konstrukce membrány včetně samokotvícího rámu. Úbytek tlakové rezervy na konci životnosti konstrukce (100 let) byl u zjednodušeného modelu přibližně 8 %, u celkového modelu byl v podélném směru 12 % a ve směru příčném asi 15 %. Lze tedy předpokládat, že vlivem dotvarování a smršťování betonu dosahují ztráty předpětí velikosti okolo 15 %.

Srovnáním zjednodušeného modelu jednoho pásu a celkového modelu bylo zjištěno rozdílné ohybové namáhání membrány. U zjednodušeného modelu pásu jsou ve vetknutí tažena spodní vlákna průřezu membrány a u celkového modelu jsou tažena horní vlákna průřezu. U modelu předpjatého pásu dochází vlivem dotvarování ke stlačení pásu a pás se deformuje nahoru (obr. 12a). U modelu celkové konstrukce dochází vlivem dotvarování k podélné deformaci samokotvícího rámu a tím je membrána deformována směrem dolů (obr. 12b). Deformacím odpovídá i průběh ohybových momentů.

VLIV ZMĚNY PŮDORYSNÝCH ROZMĚRŮ KONSTRUKCE

Provedenými analýzami a jejich výsledky byla prokázána pouze realizovatelnost konstrukce výše popsaných rozměrů. Membránová konstrukce nad obdélníkovým půdorysem ovšem nabízí značnou variabilnost rozměrů. Z toho důvodu byla studie dále rozpracována na různé půdorysné rozměry. Ukázalo se, že v případě zvětšení půdorysných rozměrů není problémem samotná membrána, dimenze nosných či předpínacích kabelů, ale dimenze samokotvícího rámu. Zvětšením rozpětí zastřešení výrazně narůstá velikost horizontálních sil, a tím náročnost na dimenze koncového kotevního nosníku a jeho předpětí. Pro případ, kdy už velikost předpětí a s tím související rozměry koncového nosníku přerostou přijatelné rozměry, je možné rozdělit koncové nosníky umístěním přímých vzpěr po jejich délce (obr. 13). To umožní změnit trasování předpětí nosníků, a využít tak vzepětí předpínacích kabelů na menší délce.

Oblouky po stranách konstrukce, které přenášejí síly z konců nosníků proti sobě a uzavírají tak tok sil v konstrukci, je možné i u větších rozpětí volit subtilní. Je ale nutné vzít v úvahu stabilitu oblouků v příčném směru v počátečních krocích výstavby, kdy ještě ne-

Literatura:

- [1] Stráský J.: Visuté předpjaté střechy. Beton TKS 4/2005, 1/2006
- [2] Stráský J.: Membránové střechy z předpjatého betonu. Beton TKS 1/2008

ní zhotovena membrána. V rovině vertikální jsou proti vybočení zajištěny kloubově uloženými sloupy.

ZÁVĚR

Hlavním cílem studia samokotvené membrány nad obdélníkovým půdorysem bylo prověřit její realizovatelnost. Výsledky analýz a následující posudky prokázaly, že konstrukce je realizovatelná. Tlaková rezerva vnesená do membrány byla dostatečná a nebyla proměnným zatížením odčerpána, a to ani v případě zahrnutí dlouhodobých ztrát určených časově závislou analýzou. Také funkce samokotveného systému byla potvrzena. Studii změny půdorysných rozměrů byla potvrzena realizovatelnost tohoto typu konstrukce i pro větší půdorysné rozměry.

Předkládaný článek představil pokračující studium membránových střešních konstrukcí z předpjatého betonu na FAST VUT v Brně, konkrétně samokotvené membrány nad obdélníkovým půdorysem, a poukázal také na možnost zastřešení pomocí tvarově čisté a moderní konstrukce. Získané poznatky jsou dále využívány v dalším studiu tvarově složitějších a rozmanitějších konstrukcí tohoto typu.

Popsaná konstrukce byla řešena v rámci projektu Ministerstva průmyslu a obchodu „Impuls“ FI – IM5/128 Progresivní konstrukce z vysokohodnotného betonu. Příspěvek byl vypracován v rámci výzkumného záměru MSM 0021630519 „Progresivní spolehlivé a trvanlivé nosné stavební konstrukce“.

Ing. Leonard Šopík

Stráský, Hustý a partneři, s. r. o.

Bohunická 50, 619 00 Brno

e-mail: l.sopik@shp.eu

tel.: 547 101 811, www.shp.eu



Prof. Ing. Jiří Stráský, DSc.

Stráský, Hustý a partneři, s. r. o.

Bohunická 50, 619 00 Brno

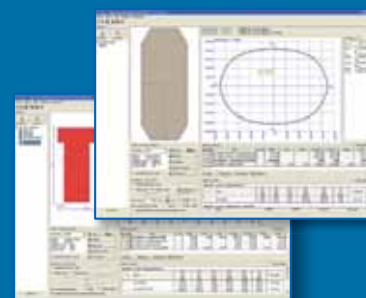
e-mail: j.strasky@shp.eu

tel.: 547 101 811, www.shp.eu

& Fakulta stavební VUT v Brně

Veveří 95, 662 37 Brno

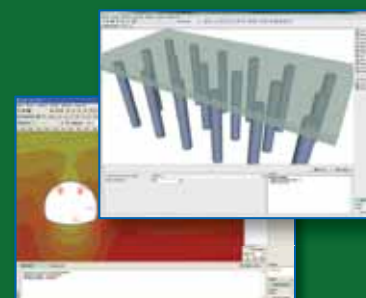
tel.: 541 147 845



Statika a dimenzace stavebních konstrukcí

EN - 1990, 1991, 1992, 1993, 1995, 1996

- dimenzování betonu, oceli, dřeva, zdvia podle aktuálních Eurokódů
- automatická generace kombinací podle zatěžovacích normy
- posouzení prvků z korozivzdorné oceli dle EN 1991-1-4
- posouzení požární odolnosti
- posouzení MSÚ i MSP (mezni stav napětí a trhlin) v betonech
- Beton 3D - posouzení libovolného tvaru průřezu na všechny vnitřní síly



Geotechnické programy

- Skupina pilot - nový program
- GEO5 - nastavení výpočtu jedním výběrem lze zvolit výpočet podle:
 - EN 1997 1-1 Standard
 - NAD České republiky
 - původní normy ČSN
 - uživatelská nastavení a další
- Sedání - plošné přitížení
- Stabilita svahu - automatický výpočet EN 1997 - DA.1 (obě kombinace)
- MKP - proudění závislé v čase

fine

tel.: +420 233 324 889
fax: +420 233 321 754
E-mail: hotline@fine.cz

www.fine.cz