

Adatlap¹ témahirdetési javaslatához a Csonka Pál Doktori Iskola Tanácsa részére

Témavezető² neve: Dr. Sajtos István
e-mail címe³: sajtos@szt.bme.hu

Téma címe: Falazott boltozatok, mint húzószilárdság nélküli
héjszerkezetek, statikája

A **téma** rövid leírása⁴:

A falazott szerkezetű boltozatok és más falazott szerkezetek viselkedése, a repedések kialakulásának okai, folyamata még ma sem minden részletében értett és feltárt, annak ellenére, hogy évszázadok óta építenek ilyen szerkezeteket.

Heyman [Heyman, 1996] írásai jelentették a kezdetet a 60-as, 70-es években. Újra bevezette a boltívek vizsgálatát a nyomásvonal segítségével, alkalmazva arra a képlékenységtan szélsőérték tételeit. Egyszerű geometriájú boltozatok esetében a héjak membránelmélete alapján adott megoldást a boltozat igénybevételeire, elhanyagolva a boltozat, falazat anyagának húzószilárdságát. Ma is intenzíven kutatott téma a boltívek nyomásvonal elmélettel történő vizsgálata [Block et al, 2006], de a statikus terhek mellett a dinamikus hatásokkal is foglalkoznak.

A 90-es években a falazatok szilárdsági és alakváltozási jellemzőinek meghatározására bevezetésre kerültek a homogenizációs módszerek [Lourenco, 1996], aminek az eredményei szükségesek a témajavaslatban szereplő probléma megoldásához.

A falazat viselkedése leírható úgy is, mint az olyan anyag viselkedése, amely nem rendelkezik húzószilárdsággal [Baratta-Corbi¹, 2010]. A valós viselkedést jól leíró modell építhető így fel, ami képlékenységtani eszközök használatát teszi lehetővé falazott szerkezetek, így boltozatok esetében is.

Nyitott probléma maradt a boltozat, mint héj viselkedésének leírása a falazati anyag tulajdonságainak figyelembevételével.

A nyomásvonal elmélet térbeli általánosításával a folytonos felületszerkezethez, boltozathoz, diszkrét nyomásvonal hálózat határozható meg numerikusan [Block et al, 2006], [Block-Ochsendorf, 2007]. A módszer elsősorban új, csak nyomott boltozatok alakjának meghatározására alkalmas. Kísérlet történt a húzószilárdság nélküli anyagú héjak folytonos

¹ Az adatlapot egy példányban kinyomtatva és aláírva a Szilárdságtani Tanszék titkárságára, egy elektronikus változatban pedig a Doktori Iskola titkárának ([Marótzy Katalin mkata@et.bme.hu](mailto:Marotzy.Katalin@et.bme.hu)) kell eljuttatni. A témahirdetés elfogadása esetén az adatlap felkerül a Csonka Pál Doktori Iskola (www.szt.bme.hu/doktori), a témahirdetés rövid leírása pedig az Országos Doktori Tanács honlapjára ([http://www.doktori.hu/-](http://www.doktori.hu/))

² A témahirdetés elfogadása automatikusan a témavezető akkreditációját is jelenti a 2010. évi felvételi eljáráshoz.

³ Kérjük, olyan elérhetőséget adjon meg, ahová biztonsággal küldhetünk hivatalos értesítéseket.

⁴ A téma (szóközökkel) 2000-4000 leütés hosszú – a jelentkező hallgatókat bővebben tájékoztató változatát, (mely a téma fent megadott releváns nemzetközi irodalmára tételesen hivatkozik) – kérjük mellékletben megadni.

nyomásfelületének a membránhéj elmélet alapján történő meghatározására is [Baratta-Corbi², 2010].

Még mindig nyitott kérdés a folytonos nyomásfelület (ha létezik) meghatározása abban az esetben, ha diszkrét helyen alakulnak ki repedések az anyag húzószilárdságának csekély volta miatt. Erre keressük a választ.

Kétféle feladat fogalmazható meg:

A) feladat: ha adott, a létező boltozat geometriája és anyaga:

A héjegylenletek tetszőlegesen választott referenciafelületre vetített igénybevételek segítségével felírhatók. Azt a referencia felületet keressük, amelyhez az igénybevételek csak membránerők, amelyek kielégítik az anyagra vonatkozó húzószilárdság-nélküliség feltételét úgy, hogy a feszültségmező szinguláris is lehet, azaz repedés is keletkezhet. Ez a referencia felület a „nyomásfelület”. Amennyiben az így meghatározott felület a boltozat vastagságán belül marad, akkor a boltozat állékony ellenkező esetben egy része vagy az egész boltozat nem állékony.

Természetesen csak numerikus eljárás pl. véges-elem módszer segítségével lehet tetszőleges boltozatforma esetében a számításokat elvégezni, ami nem más, mint a referencia felület alakjának meghatározása bizonyos korlátozó feltételek esetében. A numerikus eljárás megfogalmazásához az elméleti alapokat pl. [Baratta-Corbi, 2010¹] tartalmazza.

B) feladat: új boltozat alakjának meghatározása:

Ebben az esetben geometriai kényszereket (pl. alaprajzi és magassági adatok) megadva keressük azt a héjszerkezetet, amely a középfelületére vonatkozóan membránhéj és a membrán igénybevételek kielégítik az anyagra vonatkozó húzószilárdság-nélküliség feltételét úgy, hogy repedés sem keletkezik. Ekkor a „nyomásfelület” és a középfelület egybeesik, a boltozat membránhéj.

Az A) feladat megoldása a cél, hogy olyan praktikus kérdések megválaszolhatók legyenek, mint állékony-e egy adott geometriájú boltozat megrepedt állapotban, illetve a boltozat repedéseit okozhatta-e annak súlya vagy más hatás eredménye? Felderíthetők az építészettörténeti korok – lefedett tér mérete, alakja miatti – boltozatforma változásainak a szerkezeti okai.

A kutatás eredménye: Numerikus módszer, amely alkalmas meglévő boltozatok vizsgálatára vagy új boltozatok tervezésére úgy, hogy a teher okozta repedések helye és a boltozat teherbírása is meghatározható.

A **téma** meghatározó irodalma⁵:

- J. Heyman: The stone skeleton, Cambridge University Press, 1996.

- P.B. Lourenco: Computational strategies for masonry structures, PhD dissertation, Delft University of Technology, 1996

- Block, P., Ciblac, T., and Ochsendorf, J.A.: Real-time Limit Analysis of Vaulted Masonry Buildings, *Computers and Structures*, Vol. 84, No 29-30, pp. 1841-1852, November 2006.

⁵ Minimum 5, maximum 10 cikket vagy monográfiát kérünk felsorolni, melyben feltétlenül szerepelnie kell a legfrissebb, legismertebb eredményeknek.

- P. Block – J. Ochsendorf: Thrust network analysis: a new methodology for three-dimensional equilibrium, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, Vol.48, No 3, pp. 167-173., 2007

- A. Baratta – O. Corbi¹: An approach to masonry structural analysis by the No Tension assumption – Part I: Material modeling, theoretical setup, and closed form solutions, Part II: Load singularities, numerical implementation and applications, *Appl. Mech. Rev.* Vol.:63, Iss.4., 040802 (17 pages), 040803 (21 pages), July 2010

- A. Baratta – O. Corbi²: On the equilibrium and admissibility coupling in NT vaults of general shape, *Int. J. of Solids and Structures*, Vol.47, pp. 2276-2284., 2010

A **téma** hazai és nemzetközi folyóiratai⁶:

- *Építés – Építészettudomány*;

- *Periodica Polytechnica-Civil Engineering*; Scopus

- *Periodica Polytechnica-Architecture*;

- *Computers and Structures*; Scopus

- *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*;

- *International Journal of Solids and Structures*; Scopus

-
-
-
-

A **témavezető** fenti folyóiratokban megjelent 5 közleménye:

- Hegyi D. – Sajtos I.: Új rugalmas fenomenológiai anyagtörvény műszaki textíliákhoz, *Építés- Építészettudomány*, 37., 1-2., pp.95-106., 2009

- Bódi, I. – Fűzy, J. – Klopka, Z. – Kóris, K. – Sajtos, I.: Bending theory of shallow shells under forced deformation on their edges. *Periodica Polytechnica Ser. Civ. Eng.* Vol.42., No.2., pp.65-70, 1998

- Ther T. – Sajtos I. – Armuth M. – Strommer L.: Ribbed vaults of the Nagyvázsony monastery church, *Periodica Polytechnica – Architecture*, 41., (1.), pp.3-8., 2010

- Hegyi, D.–Sajtos, I.–Geiszter, Gy.–Hincz, K.: 8-node quadrilateral double-curved surface element for membrane analysis, *Computers and Structures*, Vol.84, 31-32, pp.2151.-2158., 2006

⁶ Minimum 5, maximum 10 folyóirat megadását kérjük, melyek között feltétlenül szerepelnie kell a PhD fokozatszerzés szempontjából elengedhetetlen (Scopus és/vagy Sci illetve Iconda minősítésű idegen nyelvű folyóiratoknak is. Kérjük, ezeket a periodikákat a felsorolásban jelöljék meg.

- Kollár, L.- Sajtos, I.: Problems of two way reinforcement in membrane shells *Bulletin of International Association of Shell and Spatial Structures*, Vol.30., pp.17-37. 1989

A **témavezető** utóbbi tíz évben megjelent 5 legfontosabb publikációja:

- Hegyi, D.-Sajtos, I.-Geiszter, Gy.-Hincz, K.: 8-node quadrilateral double-curved surface element for membrane analysis, *Computers and Structures*, Vol.84, 31-32., pp.2151.-2158., 2006

- O.Csicsely, Á.-Józsa, Zs.-Sajtos, I.: Analysis of adobe-clay as an environmental – friendly structural material, *Materials Science Forum*, Vols.537-538., pp.17.-24., 2007

- Hegyi, D. – Sajtos, I. – Sándor, Gy.: Long-term strain measuring of technical textiles by photographic method, *Materials Science Forum*, Vols.537-538., pp.381.-387., 2007

- Vető D. – Sajtos I.: Application of geometric method to determine the buckling load of spherical shell, *Pollack Periodica*, 4., (2.), pp.123-134., 2009

- Hegyi D. – Sajtos I.: Új rugalmas fenomenológiai anyagtvény műszaki textíliákhoz, *Építés-Építészettudomány*, 37., 1-2., pp.95-106., 2009

A **témavezető** eddigi doktoranduszai⁷:

- név (felvétel éve/abszolutórium megszerzésének éve/PhD fokozat éve)

- Hegyi Dezső (1999/2004/2006)

- O. Csicsely Ágnes (1999/2002/2006); társ témavezető: Dr. Józsa Zsuzsa

- Pintér Tamás (2002/2005/-)

- Árva Péter (2004/2008/folyamatban)

- Vajk Rita (2006/2012/folyamatban)

- Vető Dániel (2008/2011/folyamatban)

Melléklet: a téma bővebb leírása

Budapest, 2012. február 15.

Témavezető aláírása

⁷ Kérjük, a témavezetési tevékenységre vonatkozó adatokat abban az esetben is adja meg, ha témavezetőként a DI már korábban akkreditálta, vagy törzstagként témavezetői akkreditációja nem szükséges.

Falazott boltozatok, mint húzószilárdság nélküli héjszerkezetek, statikája

Témajavaslat

Dr. Sajtos István

A falazott szerkezetű boltozatok és más falazott szerkezetek viselkedése, a repedések kialakulásának okai, folyamata még ma sem minden részletében értett és feltárt, annak ellenére, hogy évszázadok óta építenek ilyen szerkezeteket.

Heyman [Heyman, 1996] írásai jelentették a kezdetet a 60-as, 70-es években. Újra bevezette a boltívek vizsgálatát a nyomásvonal segítségével, alkalmazva, kiterjesztve arra a képlékenységtan szélsőérték tételeit. Egyszerű geometriájú boltozatok esetében a héjak membránelmélete alapján adott megoldást a boltozat igénybevételeire, elhanyagolva a boltozat, falazat anyagának húzószilárdságát.

Ma is intenzíven kutatott téma a boltívek nyomásvonal elmélettel történő vizsgálata [Ochsendorf, 2006], [Block et al, 2006] [Peck, 2003], mind analitikus, mind numerikus módszert használva, de a statikus terhek mellett a dinamikus hatásokkal is foglalkoznak.

Hazánkban is többen foglalkoztak és jelenleg is foglalkoznak boltívek vizsgálatával [Peck, 2003], [Peck-Sajtos, 2005], [Ther et al, 2010].

A 90-es években a falazatok szilárdsági és alakváltozási jellemzőinek meghatározására bevezetésre kerültek a homogenizációs módszerek [Lourenco, 1996]. A módszer lehetőséget ad a falazatot helyettesítő kontinuum alakváltozási és szilárdsági jellemzőinek meghatározására, a károsodási folyamat követésére. Jelenleg is intenzív kutatás folyik ezen a területen. Az említett kutatási irány eredményei szükségesek a témajavaslatban szereplő probléma megoldásához.

A falazat viselkedése leírható úgy is, mint az olyan anyag viselkedése, amely nem rendelkezik húzószilárdsággal (NT = No Tension material; ML = Masonry Like material) [Baratta-Corbi¹, 2010]. A fent említettél egyszerűbb, de a valós viselkedést jól leíró modell építhető így fel, ami képlékenységtani eszközök használatát teszi lehetővé falazott szerkezetek, így boltozatok esetében is.

A falazott szerkezetekkel foglalkozó kutatás a 2000-es évek elejére jutott arra a szintre, hogy a CISM (International Centre for Mechanical Sciences, Udine) workshopot szervezett 2011 október 3-7 között a téma tudományos ismertetésére.

Nyitott probléma maradt a boltozat, mint héj viselkedésének leírása a falazati anyag tulajdonságainak figyelembevételével.

A nyomásvonal elmélet térbeli általánosításával a folytonos felületszerkezethez, a boltozathoz, diszkrét nyomásvonal hálózat határozható meg numerikusan [Block et al, 2006], [Block- Ochsendorf, 2007], [Block, 2009]. A módszer elsősorban új, csak nyomott boltozatok alakjának meghatározására alkalmas.

Kísérlet történt a húzószilárdság nélküli anyagú héjak folytonos nyomásfelületének a membránhéj elmélet alapján történő meghatározására [Baratta-Corbi², 2010], [Fraternali, 2010]. A módszer szerint a Pucher féle feszültségfüggvényt olyan alakban veszik fel, ami kielégíti az anyag húzószilárdság nélküli volta vonatkozó feltételeket. A szerzők dongaboltozatra alkalmazták az eljárást.

Még mindig nyitott kérdés a folytonos nyomásfelület (ha létezik) meghatározása abban az esetben, ha diszkrét helyen alakulnak ki repedések az anyag húzószilárdságának csekély volta miatt. Erre keressük a választ.

Kétféle feladat fogalmazható meg:

A) feladat: ha adott, a létező boltozat geometriája és anyaga:

A héjegylenetek tetszőlegesen választott referenciafelületre vetített igénybevételek segítségével felírhatók [Green-Zerna, 1992]. Azt a referencia felületet keressük, amelyhez az igénybevételek csak membránerők, amelyek kielégítik az anyagra vonatkozó húzószilárdság-nélküliség feltételét úgy, hogy a feszültségmező szinguláris is lehet, azaz repedés is keletkezhet. Ez a referencia felület a „nyomásfelület”. Amennyiben az így meghatározott felület a boltozat vastagságán belül marad, akkor a boltozat állékony ellenkező esetben egy része vagy az egész boltozat nem állékony.

Természetesen csak numerikus eljárás pl. véges-elem módszer segítségével lehet tetszőleges boltozatforma esetében a számításokat elvégezni, ami nem más, mint a referencia felület alakjának meghatározása bizonyos korlátozó feltételek esetében. A numerikus eljárás megfogalmazásához az elméleti alapokat pl. [Baratta-Corbi, 2010¹] tartalmazza.

B) feladat: új boltozat alakjának meghatározása:

Ebben az esetben geometriai kényszereket (pl. alaprajzi és magassági adatok) megadva keressük azt a héjszerkezetet, amely a középfelületére vonatkozóan membránhéj és a membrán igénybevételek kielégítik az anyagra vonatkozó húzószilárdság-nélküliség feltételét úgy, hogy repedés sem keletkezik. Ekkor a „nyomásfelület” és a középfelület egybeesik, a boltozat membránhéj.

Az A) feladat megoldása a cél, hogy olyan praktikus kérdések megválaszolhatók legyenek, mint állékony-e egy adott geometriájú boltozat megrepedt állapotban, illetve a boltozat repedéseit okozhatta-e annak súlya vagy más hatás eredménye? Felderíthetők az építészettörténeti korok – lefedett tér mérete, alakja miatti – boltozatforma változásainak a szerkezeti okai.

Az A) feladat megoldása jelenti a B) feladat megoldását is, mivel az utóbbi feladat megoldása az előbbi egy speciális esetének tekinthető.

A kutatás eredménye: Numerikus módszer, amely alkalmas meglévő boltozatok vizsgálatára vagy új boltozatok tervezésére úgy, hogy a teher okozta repedések helye és a boltozat teherbírása is meghatározható.

Hivatkozások:

- A. Baratta – O. Corbi¹: An approach to masonry structural analysis by the No Tension assumption – Part I: Material modeling, theoretical setup, and closed form solutions, Part II: Load singularities, numerical implementation and applications, *Appl. Mech. Rev.* Vol.:63, Iss.4., 040802 (17 pages), 040803 (21 pages), July 2010
- A. Baratta – O. Corbi²: On the equilibrium and admissibility coupling in NT vaults of general shape *Int. J. of Solids and Structures*, Vol.47, pp. 2276-2284., 2010
- Block, P., DeJong, M., and Ochsendorf, J.: As Hangs the Flexible Line: Equilibrium of Masonry Arches *The Nexus Network Journal*, Vol. 8, No 2, pp. 13-24, October 2006.
- Block, P., Ciblac, T., and Ochsendorf, J.A.: Real-time Limit Analysis of Vaulted Masonry Buildings *Computers and Structures*, Vol. 84, No 29-30, pp. 1841-1852, November 2006.
- P. Block – J. Ochsendorf: Thrust network analysis: a new methodology for three-dimensional equilibrium *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, Vol. 48, No 3, pp. 167-173., 2007
- P. Block: *Thrust Network Analysis: Exploring Three-dimensional Equilibrium* Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA., 2009
- F. Fraternali: A thrust network approach to the equilibrium problem of unreinforced masonry vaults via polyhedral stress function *Mechanics Research Communication*, Vol.37, pp. 198-2004., 2010
- A.E. Green – W. Zerna: *Theoretical elasticity* Dover Publications Inc., New York, 1992
- J. Heyman: *The stone skeleton*, Cambridge University Press, 1996
- P.B. Lourenco: *Computational strategies for masonry structures*, PhD dissertation, Delft University of Technology, 1996
- Ochsendorf, J.A.: The Masonry Arch on Spreading Supports *The Structural Engineer*, Vol. 84, No. 2, pp. 29-36, January 2006.
- Peck T.-né: Falazott boltívek hagyományos elmélete, *Építés – Építészettudomány*, Vol.31, 1-2, pp. 69-104, 2003
- Peck, T-né – Sajtos, I.: Chp.9.4.: *Falazott boltozatok, boltívek*, (p.61.) ed.: Fernezelyi S. – Matuscsák T.: *Épületek teherhordó szerkezetei. Aktuális szerkezeti megoldások tervezőknek, kivitelezőknek.* Verlag Dashöfer Szakkönyv Kft. És T. Bt., Budapest, 2005.
- Ther T. – Sajtos I. – Armuth M. – Strommer L.: Ribbed vaults of the Nagyvázsony monastery church *Periodica Polytechnica – Architecture*, 41., (1.), pp.3-8., 2010