

Falazott szerkezetek mechanikájának diszkrét elemes vizsgálata

„K” 100770
záró kutatási beszámoló

1. téma: Ívhidak

(a) Első lépésként egy konkrét híd diszkrételemes modelljét dolgoztuk ki, amelynek segítségével összehasonlítottuk a DEM és az egyéb, a mérnöki gyakorlatban jelenleg általánosan használt (MEXE, Archie-M, Ring) módszerek által szolgáltatott eredményeket.

Publikáció: [HC1]

(b) Forgács Tamás PhD hallgatóm közreműködésével megvizsgáltuk, hogyan módosítja az ívhidak mechanikai viselkedését az, ha az ív tengelye nem merőleges a parton álló támaszokra („*ferde ívek*”). A XIX. században három fő konstrukciós technika alakult ki ilyen ívhidak építésére. Szimulációink azt mutatták, hogy míg a legegyszerűbb (ún. „*hamis*”) ferde ívek esetén a ferdeség növelésével romlik a szerkezet teherbíró képessége, a két fejlettebb („*helikális*” és „*logaritmikus*”) eljárás esetén a nagyobb ferdeség nagyobb biztonságot jelent, mind önsúlyra, mind hasznos élteherre. Diszkrételemes szimulációk segítségével elemeztük a hasznos teher **kritikus pozícióját**: azt találtuk, hogy kicsiny (a minimálisan szükségeshez közeli) ívvastagság esetén a támaszköz felében a legkedvezőtlenebb a teher helyzete, az ívvastagság növelésével viszont ez a hely a fesztáv harmada felé tolódik el, a geometriai jellemzőktől függő mértékben. Azonosítottuk azokat az eseteket, amelyekben veszélyesen magas lehet az állékonysághoz minimálisan **szükséges kapcsolati súrlódási tényező**.

Publikáció: [NC6]; [NC10]; [EA5]; [EA6]

(c) „*Multiring*” (több ívből álló) szerkezetek esetén első lépésként azt vizsgáltuk meg, hogy kohéziós kapcsolatokkal rendelkező szerkezetek teherbírása hogyan függ az ívek számától. Ezzel kapcsolatban grafostatikai módszerrel igazoltam, hogy a teherbírás az ívvastagságnak hiperlineáris függvénye, PhD hallgatóm pedig olyan analitikus levezetést adott, amellyel az *ívek között átadódó erők* meghatározhatók. (Jelenleg kohézió nélküli kapcsolatokkal rendelkező modelleken futnak a teherbírásvizsgálatok és a tönkremeneteli módok elemzése.)

Publikáció: [KC4]

2. téma: Boltozatok repedései támaszmozgásokra

(a) A falazott szerkezetek Heyman-féle klasszikus elméletében az ún. *Safe Theorem* szerint a vizsgált boltozat stabil állapotban van, ha található a terhekkal egyensúlyt tartó (és az anyagi feltételeket is teljesítő) erőrendszer. Ez a tétel az alapja annak, hogy gyakran még igen erősen repedezett boltozatokat is – helyesen – biztonságosnak nyilvánítanak. A tételről kimutattam, hogy egyes esetekben sérül: olyan boltozatokat is biztonságosnak nyilvánít, amelyek valójában tönkremennének. Megfogalmaztam a tétel *két korrigált változatát*.

Publikáció: [NC1]; [EA3]

(b) Simon József doktoranduszhallgatóval *ovális boltozatok* viselkedését vizsgáltuk. Önsúlyteherre megadtuk a minimálisan szükséges falvastagságot a boltozat fő geometriai jellemzői, illetve a kapcsolati súrlódási tényező függvényében. A gyakorló mérnökök számára olyan diagramokat készítettünk, amelyek segítségével – a tényleges falvastagság ismeretében – megállapítható egy konkrét boltozat geometriai biztonsági tényezője. Elemeztük a féloldalas statikai terhek, illetve a támaszmozgások hatását, valamint a jellegzetes tönkremeneteli módokat.

Publikáció: [HC2]; [NC4]; [EA1]

(c) Diszkrétéleemes és végeeseleemes modellekkel *keresztboltozatok* borda nélküli, illetve bordás változataira nagyszámú numerikus (FEM és DEM) szimulációt végeztünk, amelyekkel a különféle támaszmozgásoknak a repedések megnyílására, ill. a tönkremenetel módjára való hatását elemeztük. A futtatásokat Lengyel Gábor résztvevő végezte. Elemeztük a boltozatok erőjátékát és a kialakuló repedésképeket. Kimutattuk például, hogy a borda jelenléte - különösen a nagyobb támaszmozgások tartományában - inkább káros, mint hasznos, mert a merevebb szerkezet csak jelentősebb repedésekkel és megcsúszásokkal tud alkalmazkodni a támaszmozgások miatt módosuló geometriához.

Publikáció: [EA2]; [NC2]

(c) Lengyel Gábor résztvevővel DEM-es szimulációk segítségével elemeztük, hogy *keresztboltozatok reakciói* hogyan oszlanak meg a pillérek és az oldalfalak között, és ez a megoszlás hogyan módosul, ha a támaszok fokozatosan kifelé mozdulnak és így a boltozat berepedezik. Hasonló vizsgálatokat végeztünk kör és különféle excentricitású csúcsív vezérgörbájű *dongaboltozatok* támaszmozgásaira: elemeztük a vízszintes reakció-komponens nagyságának a függőleges komponenshez viszonyított értékét, fix és kvázistatikusan kifelé mozduló támaszok esetén. Analitikus megoldást adtunk folytonos gerendamodell alapján, majd összehasonlítva az elméleti előrejelzéseket 3DEC szimulációk eredményeivel, azt találtuk, hogy fix támaszok esetén – annak ellenére, hogy az ívek megrepedeznek – a belső erők eloszlása olyan, hogy a folytonos gerendamodell megbízható becslést ad a

reakciókra, míg elmozduló támaszok esetén a folytonos modell előrejelzései erősen konzervatív becslésnek tekinthetők.

Publikációk: [NC5]; [KC3]

(d) *Csúcsíves dongaboltozatokra* Lengyel Gábor résztvevő mind szemianalitikus levezetéssel, mind DEM szimulációkkal vizsgálta az önsúly kiegyensúlyozásához minimálisan szükséges falvastagságot. Kimutatta, hogy a legkisebb szükséges falvastagságot a szabályos háromszögre szerkesztett ívhez igen közeli vezérgörbe esetén kapjuk. Ez a felismerés részben megmagyarázza, hogy miért vált a gótikában annyira elterjedté a szabályos háromszögre szerkesztett csúcsív. A továbbiakban Lengyel Gábor diszkrétételes szimulációkkal vizsgálta, hogy különféle vezérgörbájű *donga- és keresztboltozatok* hogyan viselkednek, ha támaszaik (kvázistatikusan módon) kifelé mozdnak, egészen a tönkremenetelig. A vizsgálatok azt mutatták, hogy minél nagyobb a vezérgörbe "csúcsossága", annál nagyobb támaszelmozdulás szükséges ahhoz, hogy a szerkezet statikailag határozottá váljon, így annál nagyobb a támaszmozgások megengedhető tartománya is. Viszont a csúcsosság növekedésével megnő a szerkezet integritásának fenntartásához szükséges kapcsolati súrlódási tényező is, ezért a túlságosan csúcsos szerkezetek felső részein könnyen megcsúszhatnak a kőblokkok.

Publikáció: [NC7]; [NC8]

(e) Önsúlyuk mellett *támaszrezgésekkel* is terhelve bordás, illetve borda nélküli *keresztboltozatokat*, az derült ki, hogy bár a bordás boltozatok globálisan kevésbé érzékenyek a támaszrezgésekre, lokális sérülések alakulhatnak ki a bordák és a héj találkozásánál, amelyek végül tönkremenetelhez vezetnek.

Publikáció: [NC9]

3. téma: Becsapódások szimulálása

később helyette új feladat OTKA engedéllyel:

3. téma: Elmozdulásmódszer-alapú numerikus eljárás

(a) Az eredeti munkatervben *extrém sebességű* (10-30 km/sec) *becsapódások* modellezését terveztük megoldani, annak érdekében, hogy elemezhessük, falazott boltozatok fölötti feltöltés különféle vastagságai esetén hogyan alakul a boltozatra lejutó dinamikus teher. Ez a terv azonban zsákutcának bizonyult: mint kiderült, a rendelkezésünkre álló számítógépes környezetben a szimulációk nem lettek volna reális idő alatt lefuttathatók. (További, bár kevésbé alapvető problémát jelentett, hogy amikor a becsapódás sebessége nagyságrendekkel meghaladja a fogadó közegre jellemző hangsebességet, akkor olyan anyagjellemzőket is kalibrálnunk kellett volna a becsapódó test energiájának disszipációjával kapcsolatban, amelyekre csak igen

durva becsléseket tudunk volna adni.) Ezért az OTKA-tól engedélyt kértünk, hogy e feladat helyett a következőt végezzünk el:

(b) A síkfalak saját síkjukban való nyírásának szimulálásánál – amikor a szerkezet topológiája nem, vagy csak elhanyagolható mértékben rendeződik át – merült fel az a lehetőség, hogy a DEM és a klasszikus elmozdulásmódszer-alapú FEM előnyeit kombinálva, egy olyan *numerikus eljárást* dolgozzunk ki, amely képes a kapcsolatok törését, megcsúszását követni, de ezt jóval hatékonyabban teszi, mint a DEM eljárások, amelyek a topológiai változások (itt fölösleges) folyamatos figyelésére jelentős számítási időt fordítanak. A Szakály Ferenc résztvevő által kidolgozott modellben az egyes falazóelemek végeselemes felosztást kaptak, a peremeiken lévő csomópontok pedig nemlineáris (felszakadni, megcsúszni is képes) rugókkal kapcsolódtak a szomszédos falazóelemek megfelelő perem-csomópontjaihoz. Modellünk addig tudja valóságghűen követni a fal nemlineáris viselkedését, amíg új érintkezések még nem jönnek létre. Így az eljárás a síkfalak saját síkjukban való nyírásának a tönkremenetelig való modellezésére használható hatékonyan.

Publikációk: [KC1]; [KC2]

4. téma: Síkfalak, kémények

(a) Kémények (FRP-erősítéssel és anélkül) *földrengésre* való viselkedését szimulálta diszkrét elemes módszerrel Lengyel Gábor résztvevő. A későbbiekben ezek a numerikus tapasztalatok adták a 2.(e) témakörnél bemutatott, boltozatok földrengésvizsgálatával kapcsolatos elemzések alapját.

Publikáció: [EA4]

(b) Szakály Ferenc résztvevővel *síkfalak* nyírás hatására történő deformációját és tönkremenetelét elemeztük, diszkrét elemes modellek segítségével. Azt kerestük, javítható-e a nyírás teherbírás megfelelően választott *téglakötések* alkalmazásával (pl. katonafal). Különböző téglakötésű falak nyírás teherbírását határoztuk meg a fal tetejére ható függőleges leterhelés intenzitásának és a fal hosszának függvényében. Azt találtuk, hogy a függőleges leterhelés mértékének függvénye, hogy melyik téglakötés a leghatékonyabb a nyírás teherbírás szempontjából. (E vizsgálatok során szerzett tapasztalataink alapozták meg a 3. témakörben szereplő numerikus eljárást.)

Publikáció: [NC3]

5. Egyéb eredmények

(a) A szakirodalom, illetve a doktoranduszok számára tartott DEM-kurzusaim segédanyagainak továbbfejlesztése alapján született az az *angol nyelvű kézirat* (105 oldal), amely a diszkrét elemek módszerének matematikai alapjait és főbb változatait mutatja be. A kéziratot folyamatosan frissítem. Interneten bárki számára elérhető, hazai és külföldi kutatók egyaránt használják.

Publikáció: [E1]

(b) A falazott szerkezetek diszkrét elemes modellezéséről az IGI Global kiadó könyvet jelentetett meg. Ebben *két fejezetet* írtam, amelyek a diszkrét elemes modellezés "Discontinuous Deformation Analysis", illetve "Non-Smooth Contact Dynamics" módszereinek elméleti alapjait és falazott szerkezetekre vonatkozó gyakorlati felhasználási lehetőségeit mutatják be.

Publikáció: [KF1]; [KF2]

Publikációk:

Folyóiratcikkek külföldi folyóiratban:

[NC1] Bagi, K. (2014): When the Safe Theorem fails: Non-Heymanian collapse modes of masonry structures. Int. J. Solids and Structures 51(14), pp. 2696-2705

[NC2] Lengyel, G. – Bagi, K. (2015): Numerical analysis of the mechanical role of the ribs in groin vaults. Computers and Structures 158(1), pp. 42-60

[NC3] Szakály F – Hortobágyi Zs – Bagi K (2016): Discrete Element Analysis of The Shear Resistance of Planar Walls with Different Bond Patterns. Open Construction and Building Technology Journal 10, pp. 220-232

[NC4] Simon J – Bagi K (2016): Discrete element analysis of the minimum thickness of oval masonry domes. Int. J. Architectural Heritage 10(4), pp. 457-475

[NC5] Lengyel G – Bagi K (2016): Horizontal reaction components of pointed vaults. Int. J. Masonry Research and Innovation 1(4), pp. 398-420

[NC6] Forgács T – Sarhosis V – Bagi K (2017): Minimum thickness of semi-circular skewed masonry arches. Engineering Structures 140, pp. 317-336

[NC7] Lengyel, G.: Minimum thickness of the gothic barrel vault. Archive of Applied Mechanics, bírálat alatt

[NC8] Lengyel, G.: Discrete element analysis of gothic vaults for self-weight and horizontal support displacement. Engineering Structures, bírálat alatt

[NC9] Lengyel, G. - Németh, R.: The mechanical role of the ribs in masonry groin vaults for seismic action. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, bírálat alatt

[NC10] Forgács T. – Sarhosis V. – Bagi K.: Influence of construction method on the load bearing capacity of skew masonry arches. Engineering Structures, nyelvi lektorálás alatt

Folyóiratcikkek hazai folyóiratban:

[HC1] Turi, N. - Bagi, K. - Kiss, R.M. - Török, Á. (2013): A prágai Károly-híd modellezése. Magyar Építőipar, 2013/2, pp. 55-62

[HC2] Simon, J. - Bagi, K. (2012): Ovális alaprajzú falazott boltozatok diszkrét elemes vizsgálata. Magyar Építőipar, 2012/5, pp. 180-186

Könyvfejezetek (konferenciához nem kapcsolódó szakkönyvben):

[KF1] Bagi K (2016): The DDA Method. In: Sarhosis et al (eds): Computational Modeling of Masonry Structures Using the Discrete Element Method. IGI Global, Hershey; pp. 91-104

[KF2] Bagi K (2016): The Contact Dynamics Method. In: Sarhosis et al (eds): Computational Modeling of Masonry Structures Using the Discrete Element Method. IGI Global, Hershey; pp. 105-125.

Hosszabb konferenciacikkek:

[KC1] Szakály F. – Bagi K: Quasi-static modelling of masonry structures. In: Ivica Kožar, et al (szerk.): Procs of the 8th ICCSM, Opatia, Horvátország, 2015.09.29-2015.10.02. (9 oldal)

[KC2] Szakály F – Bagi K.: Falazott szerkezetű síkfalak kvázi-statisztikus vizsgálata. Baksa Attila, Bertóti Edgár, Szirbik Sándor (szerk.): XII. Magyar Mechanikai Konferencia kiadványa, Miskolc, Magyarország, 2015.08.25-2015.08.27. Paper 223. (7 oldal)

[KC3] Lengyel G – Bagi K: Analysis of the horizontal reaction of pointed barrel and cross vaults. In: Ivica Kožar, et al (szerk.): Procs of the 8th ICCSM, Opatia, Horvátország, 2015.09.29-2015.10.02. (23 oldal)

[KC4] Kassotakis N – Forgács T – Sarhosis V – Bagi K (2017): Discrete element modelling of multi-ring brickwork masonry arches. Procs. 13th Canadian Masonry Symposium, Halifax, Canada, 04-07 June 2017 (11 oldal)

Konferencia-előadások cikk nélkül:

[EA1] Simon, J. - Bagi, K. (2012): Discrete element analysis of masonry domes with oval plan. 8th European Solid Mechanics Conference, 9-13 July 2012, Graz, Austria

[EA2] Lengyel, G. - Bagi, K. (2013): Discrete element analysis of the mechanical role of the ribs in groin vaults. 7th MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, 12-14 June 2013, Cambridge, Boston, USA

[EA3] Bagi, K. (2013): When Limit State Analysis Fails: Collapse of Masonry Structures. COMPLAS 2013 Conference, 03-05 Sept 2013, Barcelona

[EA4] Lengyel, G. – Bagi, K.: Mechanical behaviour of masonry chimneys. 19th Inter-Institute Seminar for Young Researchers, 11-12 Oct 2013, Vienna

[EA5] Forgács, T., Sarhosis, V., Bagi, K.: Influence of construction method on the mechanical behaviour of skewed masonry arches. . 8th International Congress of Croatian Society of Mechanics, 29 Sept – 2 Oct 2015, Opatija, Croatia

[EA6] Forgács, T. - Sarhosis, V. - Bagi, K.: Influence of Construction Method on the Mechanical Behaviour of Skewed Masonry Arches. 20th Inter-Institute Seminar, 9-10 October 2015, Cracow, Poland

Egyéb publikációk:

[E1] Bagi, K. (2012): Fundamentals of the discrete element method. (Department of Structural Mechanics, TU Budapest, 105 pages)