

Többsorosos, téglafalazatú boltozatok modellezése numerikus módszerekkel



Forgács Tamás
PhD hallgató

Témavezető:
Dr. Bagi Katalin

***Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi Egyetem***

Építőmérnöki Kar
Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék



Áttekintés

Bevezetés - motiváció

Számítási eljárások

Diszkrét elemek módszere

Numerikus modell + kalibráció

Eredmények

Összegzés

The grid contains 18 thumbnails arranged in a 6x3 layout. The thumbnails are as follows:

- Thumbnail 1 (Top Left):** Titled 'Táblázat, rajzalkotás' (Table, drawing). It shows a table and a drawing of a bridge structure.
- Thumbnail 2 (Top Middle):** Titled 'Fájlteret' (File area). It shows a folder icon and a list of files.
- Thumbnail 3 (Top Right):** Titled 'Fájlteret' (File area). It shows a folder icon and a list of files.
- Thumbnail 4 (Row 2, Left):** Titled 'Matematika' (Mathematics). It shows mathematical formulas and diagrams.
- Thumbnail 5 (Row 2, Middle):** Titled 'Számkísérlet' (Numerical experiment). It shows a graph and a diagram.
- Thumbnail 6 (Row 2, Right):** Titled 'Számkísérlet' (Numerical experiment). It shows a graph and a diagram.
- Thumbnail 7 (Row 3, Left):** Titled 'Diszkrét elem módszer (DEM)' (Discrete element method). It shows a 3D model of a structure.
- Thumbnail 8 (Row 3, Middle):** Titled 'Diszkrét elem módszer' (Discrete element method). It shows a graph and a diagram.
- Thumbnail 9 (Row 3, Right):** Titled 'Diszkrét elem módszer' (Discrete element method). It shows a graph and a diagram.
- Thumbnail 10 (Row 4, Left):** Titled 'Numerikus modell' (Numerical model). It shows a 3D model of a structure.
- Thumbnail 11 (Row 4, Middle):** Titled 'Kalibrált numerikus eredmények' (Calibrated numerical results). It shows a 3D model and a graph.
- Thumbnail 12 (Row 4, Right):** Titled 'Kalibráció' (Calibration). It shows a graph and a diagram.
- Thumbnail 13 (Row 5, Left):** Titled 'Eredmények' (Results). It shows a graph and a diagram.
- Thumbnail 14 (Row 5, Middle):** Titled 'Eredmények' (Results). It shows a graph and a diagram.
- Thumbnail 15 (Row 5, Right):** Titled 'Eredmények' (Results). It shows a graph and a diagram.
- Thumbnail 16 (Bottom Left):** Titled 'Következtetések' (Conclusions). It contains a list of bullet points.
- Thumbnail 17 (Bottom Middle):** Titled 'Köszönöm a figyelmet!' (Thank you for your attention!). It contains a list of names and affiliations.
- Thumbnail 18 (Bottom Right):** Titled 'Köszönöm a figyelmet!' (Thank you for your attention!). It contains a list of names and affiliations.

Falazott hídszerkezetek típusai

Vezérgörbe szerint

Elliptikus



Csúcsíves



Körív



4

Támaszok száma szerint



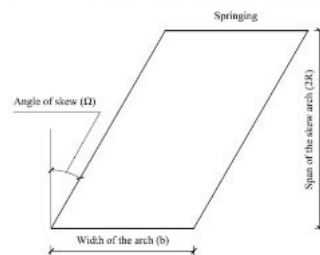
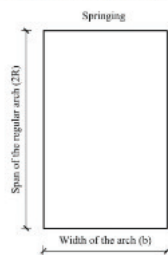
5

Alaprajzi értelemben

Egyenes boltozat



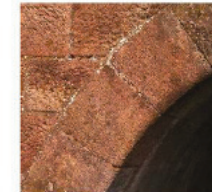
Ferde boltozat



6

Anyag és kötéstípusok

Kő



Tégla



Kötéstípusok



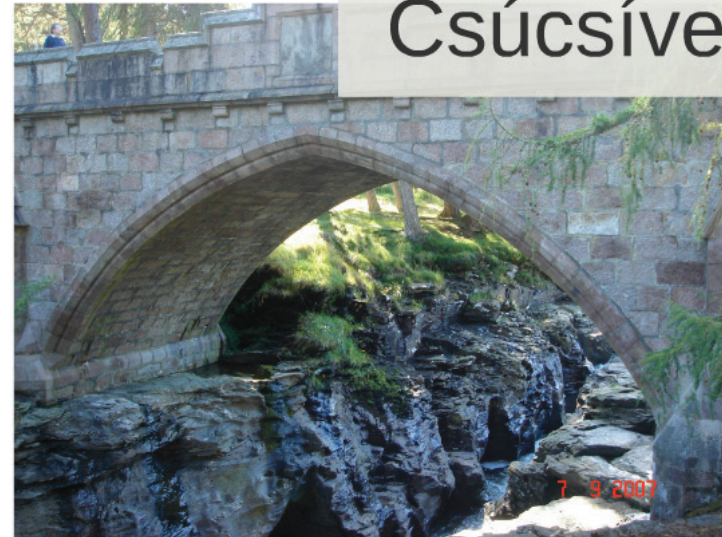
7

Vezérgörbe szerint

Elliptikus



Csúcsíves



Körív



Támaszok száma szerint



Alaprajzi értelemben

Egyenes boltozat



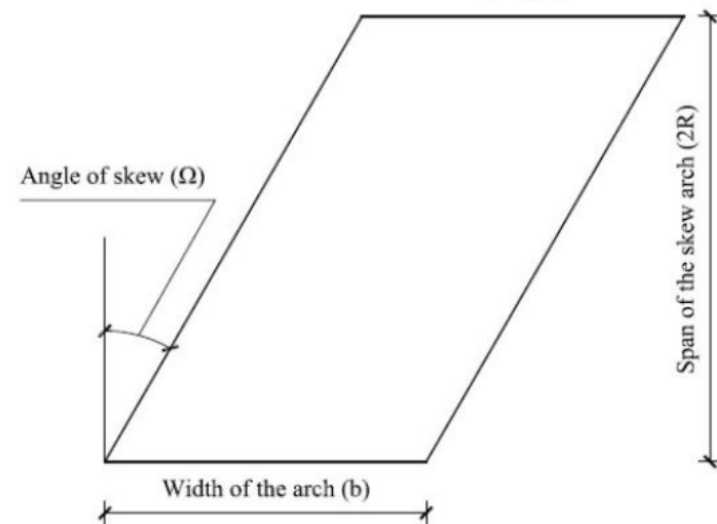
Springing



Ferde boltozat



Springing



Anyag és kötéstípusok

Kő



Tégla



Kötéstípusok



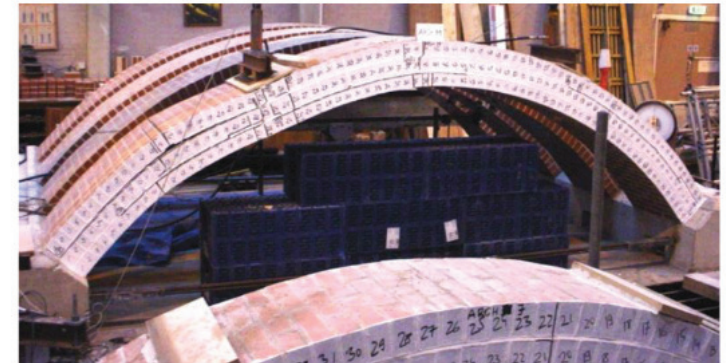
Motiváció

- Forgalmi terhek növekedése
- Anyagjellemzők romlása: átázás, mállás, stb.



Komplex, nemlineáris szerkezeti viselkedés:

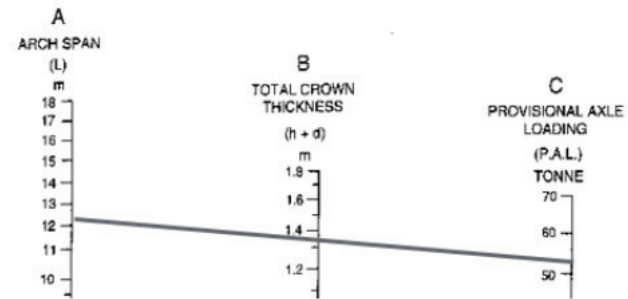
- Különböző merevségű anyagok
- Repedések, megcsúszások jelenhetnek meg
- Gyűrűk szeparálódhatnak egymástól



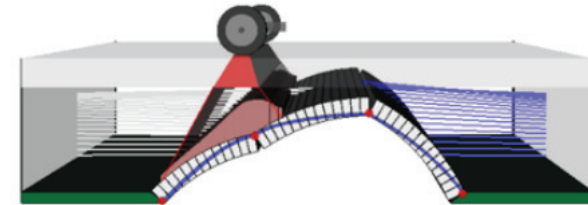
Megbízható, pontos ellenőrző módszerek szükségesek!

Számítási eljárások

1. szint: pl. MEXE módszer, Pippard

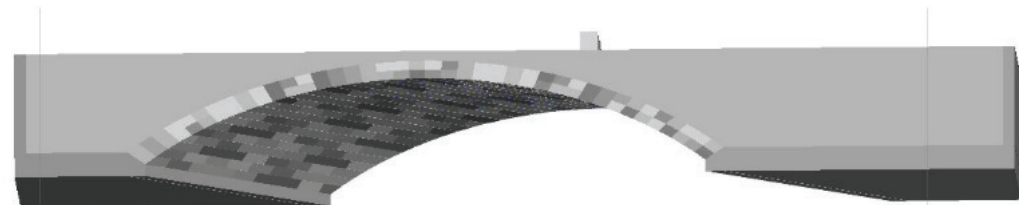


2. szint: merev blokk módszer
- merev-képlékeny viselkedés
- csak törőteher + töréskép



3. szint: fejlett módszerek (FEM, DEM)

- habarcs jellemzők: kohézió, húzószilárdság
- erő-elmozdulás diagram meghatározása



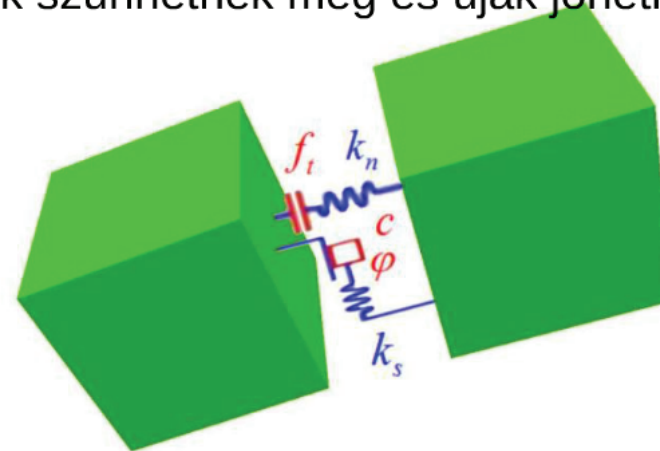
Bemenő paraméterek száma
Szükséges szakértelem

Diszkrét elemek módszere (DEM)

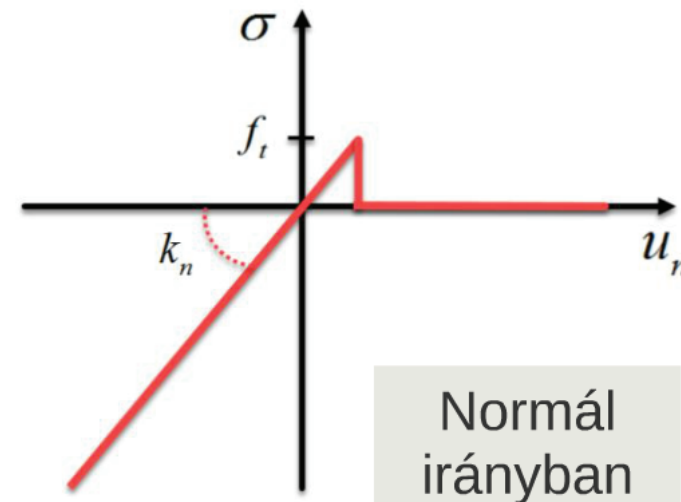
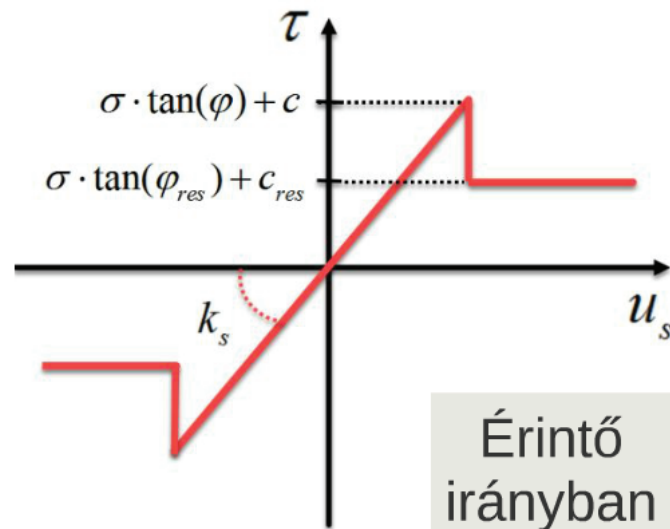
- Egymástól elkülönülő, véges méretű testek, amelyek egymástól függetlenül képesek elmozdulni.
- Az elemek önálló szabadságfokokkal rendelkeznek.
- Automatikus kontaktfelismerés: kapcsolatok szűnhetnek meg és újak jöhetnek létre

DE modell összetevői:

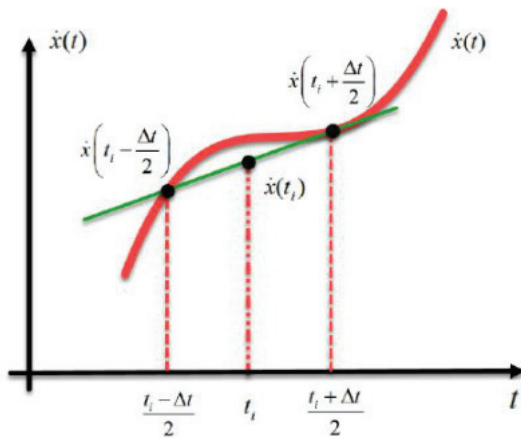
Elemek + Kapcsolatok



Kapcsolati viselkedés:



Diszkrét elemek módszere



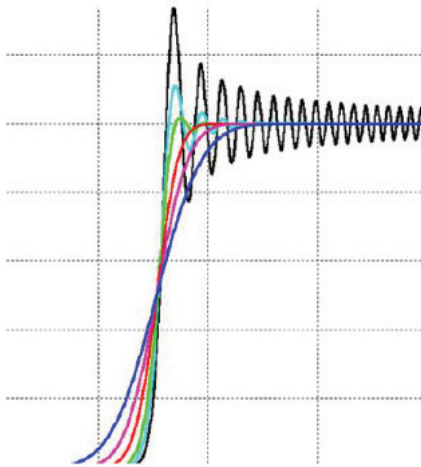
Centrális differenciák módszere

$$\ddot{x}(t) + \alpha \dot{x}(t) = \frac{F(t)}{m} + \underline{g}$$

$$\ddot{x}(t) = \frac{1}{\Delta t} \left[\dot{x}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) - \dot{x}\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) \right]$$

$$\dot{x}(t) = \frac{1}{2} \left[\dot{x}\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) + \dot{x}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) \right]$$

$$\dot{x}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) = \left[\left(1 - \frac{\alpha \Delta t}{2}\right) \cdot \dot{x}\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) + \left(\frac{F(t)}{m} + \underline{g}\right) \cdot \Delta t \right] \cdot \frac{1}{1 + \alpha \frac{\Delta t}{2}}$$



- Explicit időintegrálás
- Időlépést megválasztása
- Statikus egyensúly eléréséhez mesterséges csillapítást alkalmaz

$$\Delta t \leq 2 \cdot \min_{(p)} \left\{ \sqrt{\frac{m^p}{k^p}} \right\}$$

Numerikus modell

Geometria

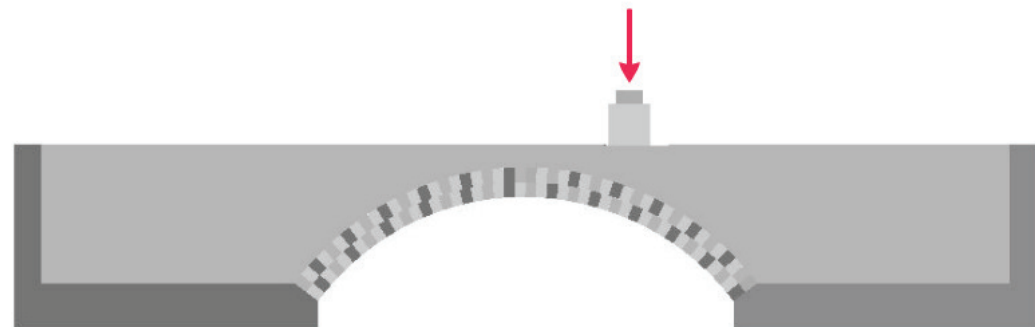
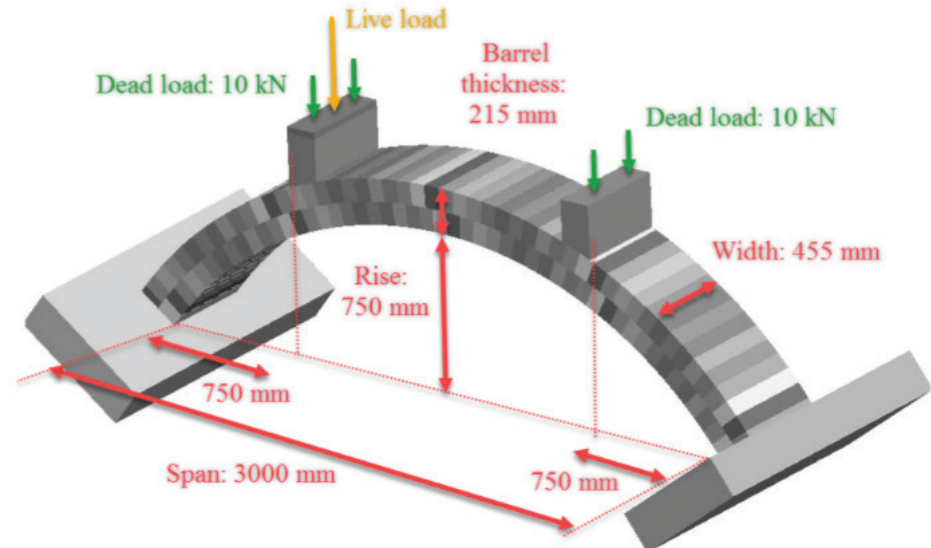
- 1 diszkrét elem ~ 1 kisméretű tömör téglá
- Lehetőség valódi téglá elrendezés vizsgálatára
- Habarcs zéró vastagságú interfészként modellezve

Anyagjellemzők:

- Téglák: lineárisan rugalmas
- Háttöltés: lineárisan rugalmas + Mohr-Coulomb törési feltétel
- Habarcs: lineárisan rugalmas + Coulomb-féle megcsúszási feltétel (kalibráció alapján)

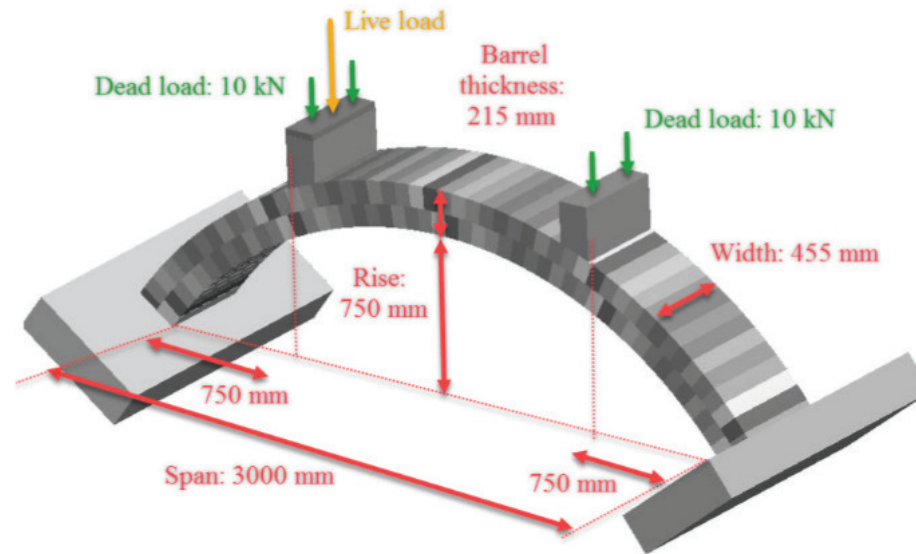
Peremfeltételek + terhelési viszonyok:

- Fix támaszok
- Ha háttöltés nincs jelen: 2×10 kN a támaszköz 1/4 és 3/4-nél.
- Hasznos teher: támaszköz 1/4-nél
- 2D probléma

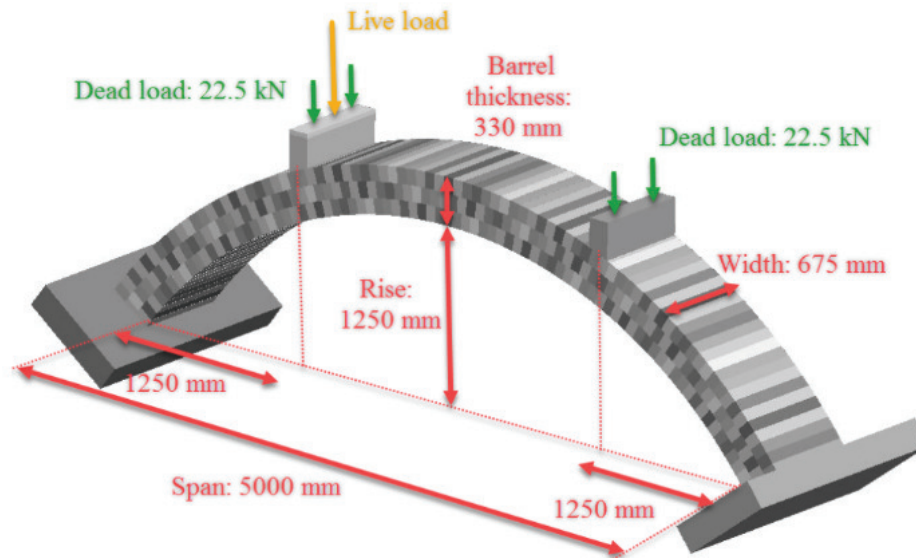


Kalibráció kísérletek eredményeihez

Melbourne et al. (2004) [1]

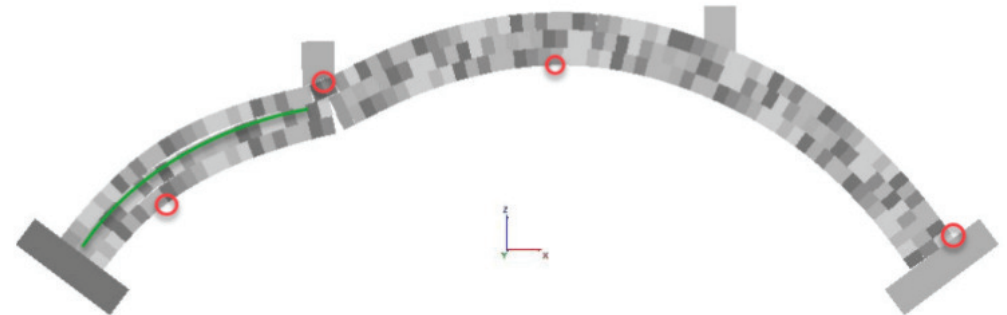
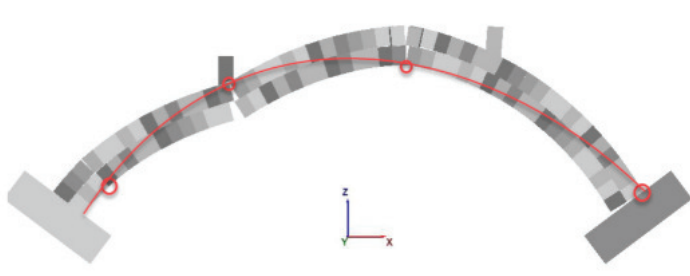
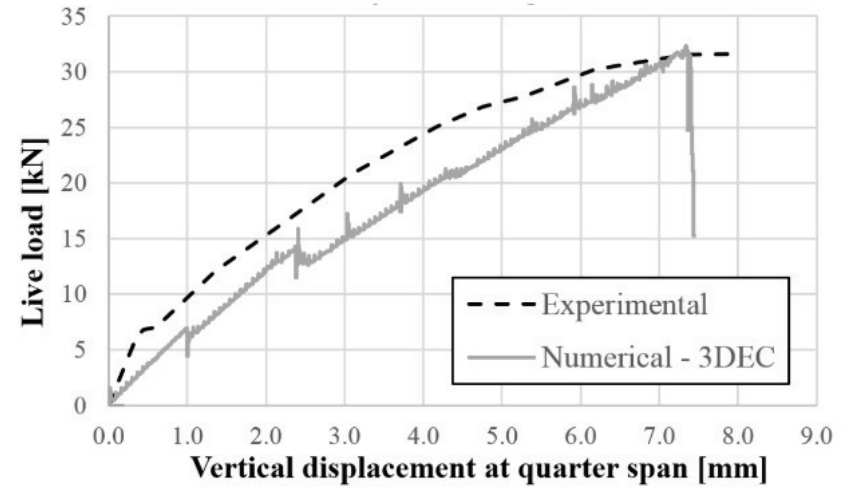
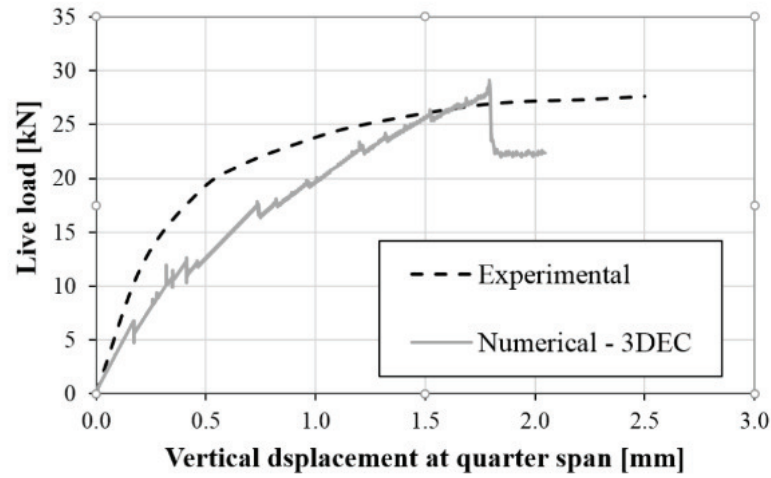


3m támaszköz - 2 gyűrű



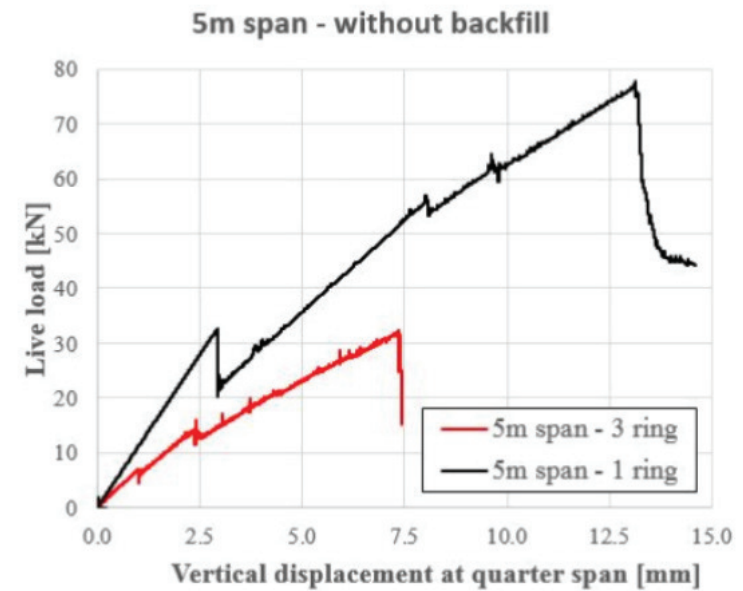
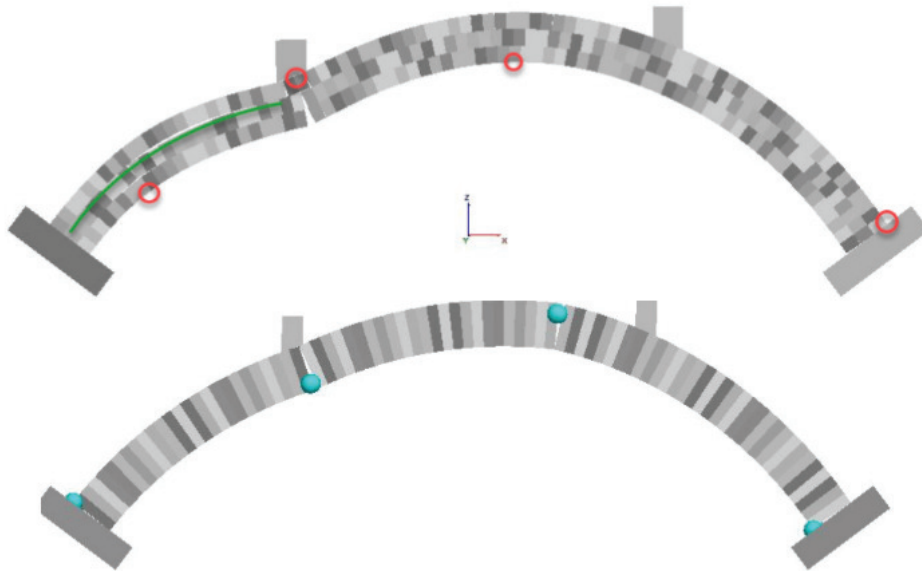
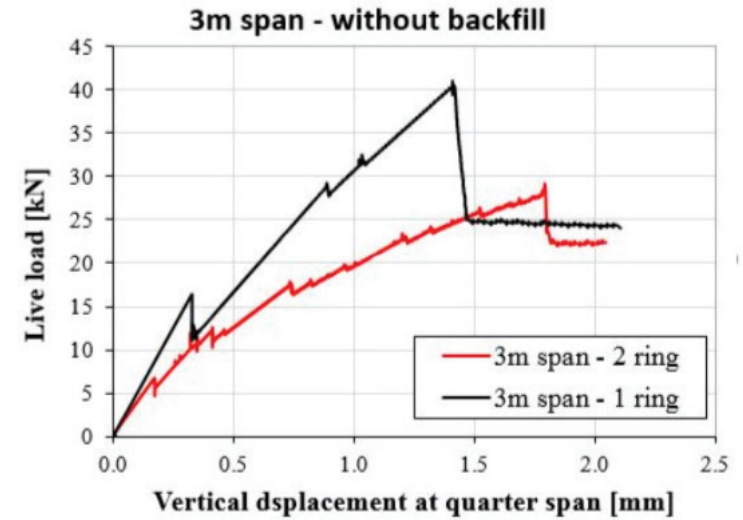
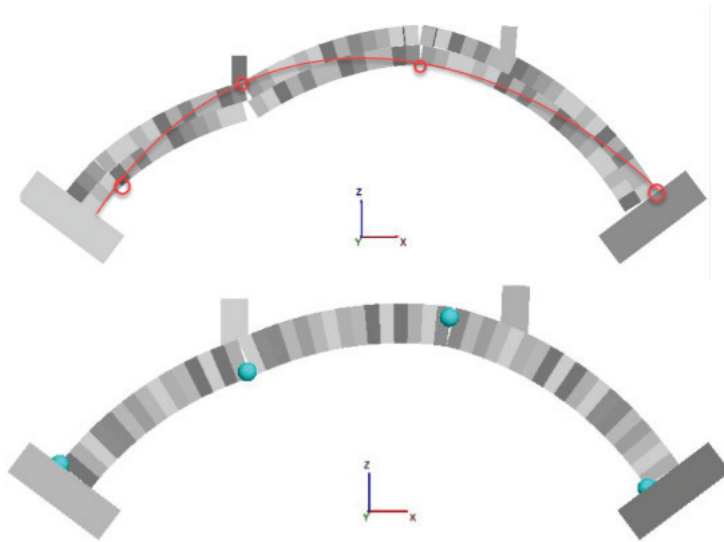
5m támaszköz - 3 gyűrű

Modell kalibráció



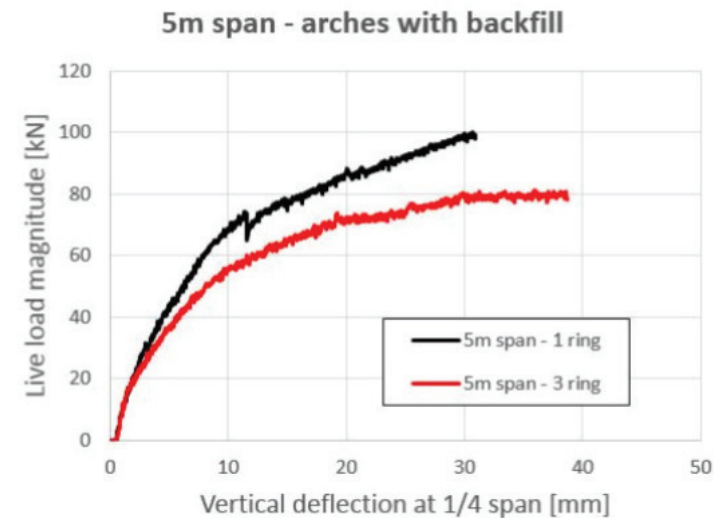
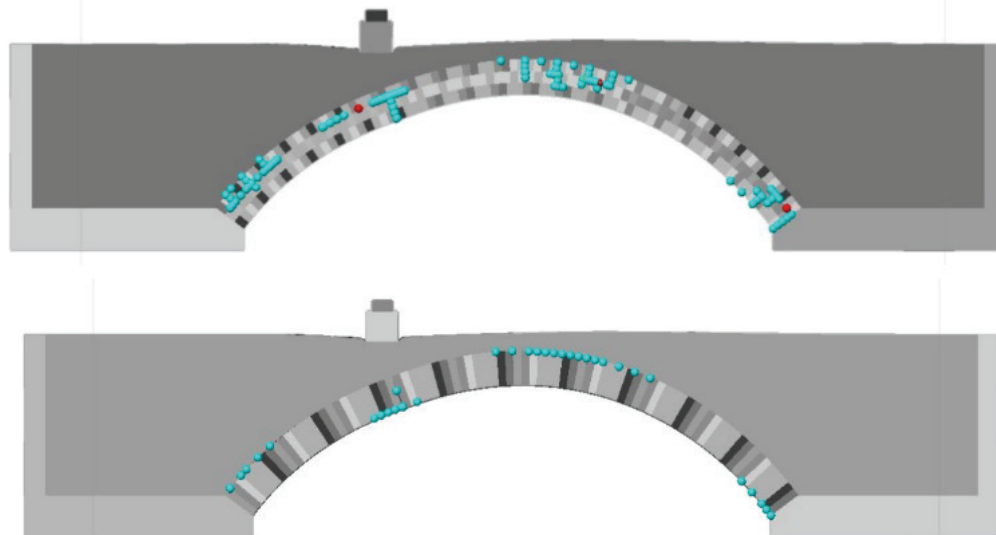
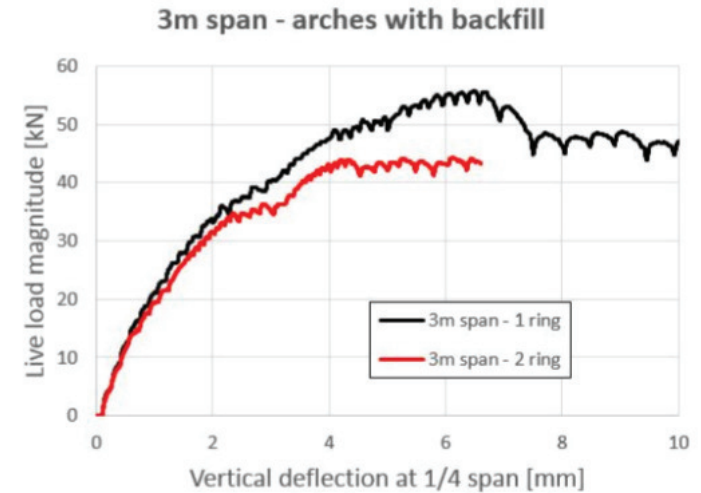
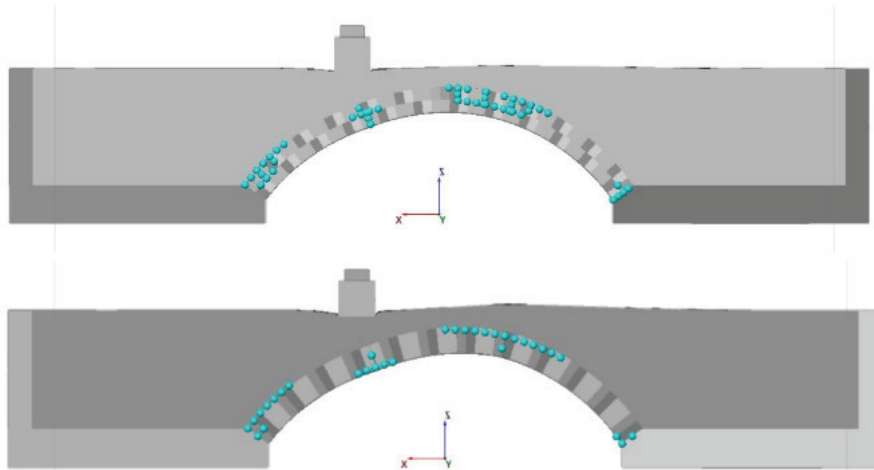
Eredmények

Többsoros vs. egysoros boltozat **háttöltés nélkül**



Eredmények

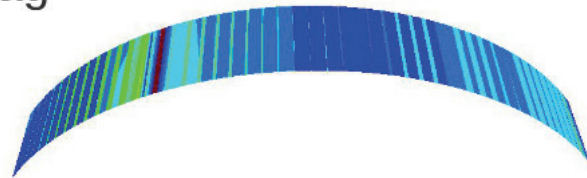
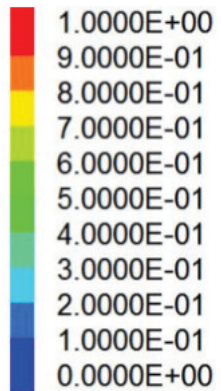
Többsoros vs. egysoros boltozat háttöltéssel



Eredmények

Gyűrűk közti kapcsolóelemek kihasználtsága

Kihasználtság



3m támaszköz
háttöltés nélkül



5m támaszköz
háttöltés nélkül



3m támaszköz
háttöltéssel



5m támaszköz
háttöltéssel

Teherszint: 20 kN

Következtetések

- Létrehoztam egy **kalibrált, diszkrét elemes modellt**, amely képes többsoros falazott boltozatok modellezésére a pontos geometriai kialakítás figyelembe vételével.
- Többsoros boltozatok **merevsége és teherbírása jelentősen kisebb** az ekvivalens egysoros boltozathoz képest.
- A **háttöltés szerepe** különösen jelentős: **növeli a sugárirányú normálfeszültségeket** az íven belül, így gátolva a gyűrűk szeparálódásának lehetőségét.

Köszönöm a figyelmet!

Köszönetnyilvánítás:

A szerző köszönetét fejezi ki az Emberi Erőforrások Minisztériumának az általuk nyújtott Új Nemzeti Kiválóság Program ösztöndíjért.



EMBERI ERŐFORRÁSOK
MINISZTERIUMA

Hivatkozások:

- [1] Melbourne C. Adrienn K. Tomor (2004). "Cyclic Load Capacity and Endurance Limit of Multi-Ring Masonry Arches." Proc., 4th International Conference of Arch Bridges ARCH'04, CIMNE, Barcelona.
- [2] Nicko Kassotakis , Vasilis Sarhosis , Tamás Forgács, Katalin Bagi. "Discrete element modelling of multi-ring brickwork masonry arches". In: Bennett Banting, Yi Liu (Editors). 13th Canadian Masonry Symposium Proceedings. Halifax Canada
- [3] Zhang Y. 2015. Advanced nonlinear analysis of masonry arch bridges, PhD thesis, Imperial College
- [4] Itasca (2017). 3-Dimensional Distinct Element Code Manual. Theory and Background, Itasca Consulting Group, Minneapolis