

2019/2020 őszi félév

Hidak és Szerkezetek Tanszék



TDK Dolgozat

Anizotrop falazóelem numerikus és kísérleti vizsgálata

Konzulensek:

Dr. Haris István

Roszevák Zsolt

Hortobágyi Tamás

IR7SMS

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	4
2.	Az anyagra vonatkozó információk	6
a)	Kerámia	6
b)	Mechanikai anyagmodellek	8
c)	Rideg és rugalmas-képlékeny-fellazuló anyagok komplex modelljei	8
3.	Az általam elvégzett laboratóriumi kísérletsorozat	9
a)	A vizsgált falazóelem	9
b)	A kísérletsorozat bemutatása	10
c)	A kísérleti eredmények	12
4.	Előzetes numerikus vizsgálat	17
a)	A modell	17
b)	Az eredmények	22
5.	Az általam elvégzett kísérlethez készített numerikus modell	25
a)	A modell	25
b)	Az eredmények	27
c)	A laborkísérleti és a numerikus eredmények összehasonlítása	29
d)	A numerikus modell kritikája	31
6.	A mások által végzett laboratóriumi kísérletsorozat	32
a)	A vizsgált falazóelem	32
b)	A kísérletsorozat bemutatása	33
c)	A kísérleti eredmények	34
i.	3-as jelű próbatest	34
ii.	4-es jelű próbatest	37
iii.	5-ös jelű próbatest	39

iv.	A két laborkísérlet eredményeinek összehasonlítása	44
7.	A pályázati kísérlethez készített numerikus modell	45
a)	A modell.....	45
i.	A 1. számítás ismertetése és az eredményei.....	47
ii.	A 2. számítás ismertetése és az eredményei.....	50
iii.	A 3. számítás ismertetése és az eredményei.....	52
iv.	A 4. számítás ismertetése és az eredményei.....	53
v.	Az 5. számítás ismertetése és az eredményei.....	54
8.	Tovább lépési lehetőségek.....	56

1. Bevezetés

A mai világban minden iparág törekszik a minél hatékonyabb anyagfelhasználásra, a lehető legjobb költséghatékonyság megteremtésére. Ennek eléréséhez az optimalizálás és a numerikus modellépítés igen nagy fontossággal bír, hiszen utóbbival a viszonylag drága laborkísérletek akár kiválthatók. Nincs ez máshogy az építőmérnöki gyakorlatban sem, ahol ezek a szempontok kritikus fontosságúak. A modern számítástechnikai módszerek segítségével az előbb említett kritériumok könnyebben vizsgálhatók. A számítógéppel való modellezéskor arra kell törekednünk, hogy a numerikus modell minél inkább tükrözze a szerkezet, vagy szerkezeti elem valóságos viselkedését. A szerkezeti elemeink számítógéppel való modellezése során tehát nem mindegy, hogy milyen anyagmodellt választunk, vagy milyen közelítésekkel élünk a geometria definiálásakor. Különös fontossággal bír, hogy a megalkotott numerikus modellezési eljárás milyen pontossággal adja vissza a valóságos szerkezeti elem tényleges viselkedését. Egy ilyen numerikus modell kellően pontos felépítése után van lehetőség az adott elem méretbeli, formai, illetve anyaghasználati, gyártási optimalizációjára. Ilyen, a korszerű ortotrop falazóelemekre vonatkozó elemszintű numerikus modellalkotási vizsgálat a kutatásaim alapján még nem is készült.

A numerikus vizsgálathoz korábbi konzulensi tapasztalatokon kívül [3] más szakirodalomra nem tudtam támaszkodni. A modellalkotás eredményeként lehetőségünk nyílt különböző elemek egymásra ható viselkedését is numerikusan vizsgálni, így a további kutatások a falazóelemekből épített falazat modellezésének alapjait teremthetik meg.

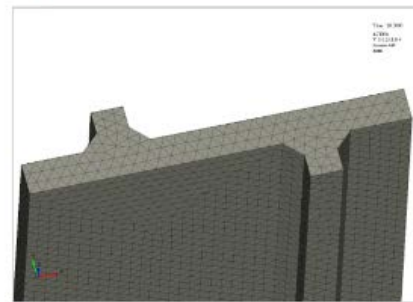
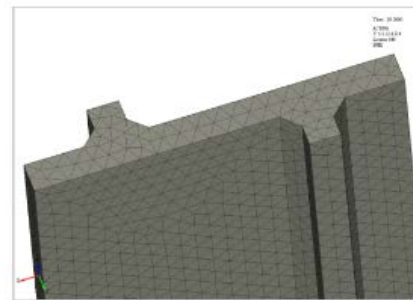
Jelen munka keretein belül anizotrop (ortotrop) kerámia falazóelemek laboratóriumi vizsgálatával és numerikus modellezési lehetőségeivel foglalkozom. A laboratóriumi kísérletek során hat próbatestből álló kísérletsorozatot terveztem és hajtottam végre, melyeket az ún. bordákkal párhuzamos, monoton növekvő erővel tönkremenetelig terheltem (lásd 1. ábrán). Ez felel meg alapvetően a gyakorlati felhasználás terhelésének. A laboratóriumi vizsgálatoknál mértem az egyes próbatestek függőleges - a bordákkal párhuzamos - és a vízszintes - bordákra merőleges - alakváltozásait, valamint a terhelő erőt és a relatív elmozdulás értékét is a kijelölt mérési pontokban. Ezen kívül külső forrásból származó, hasonló elrendezésű, ugyanakkor másfajta elgondolással készült kísérletet is felhasználtam a munkám során. Ebben a modellezésben három darab próbatest állt rendelkezésre, ezeket szintén bordákkal

párhuzamosan, monoton növekvő erővel terhelték tönkremenetelig. A vizsgálatoknál a terhelőfej elmozdulását mérték mérésenként négy helyen.

Elsőként a falazóelemek bordáinak numerikus modellezési lehetőségeit vizsgáltam, ezen belül a végeelem háló sűrűségének (lásd 2. ábrán) és a lekerekítéseknek a hatásait tanulmányoztam. A modelleket a konzulensek által korábban kifejlesztett numerikus modellezési eljárásra alapozva dolgoztam ki [3]. A modellalkotás első lépéseként egy közbenső bordaelem modellezését végeztem el. Erre azért volt szükség, mert a meglehetősen bonyolult felépítésű elem vizsgálata túl összetett feladat lett volna az alapvető modellezési hibák kiszűrésére. Erről a kutatási szakasról egy korábbi TDK dolgozatban számoltam be [1]. Ezt követte a jelen munkában bemutatott, teljes falazóelem numerikus modelljeinek megalkotása, melyeken a kapott laboratóriumi kísérletekkel megegyező terheléses vizsgálatot hajtottam végre. A laboratóriumi és a numerikus kísérletek során elvégzett vizsgálatok eredményeit összehasonlítottam, így az erő-eltolódás diagramok, valamint az erő-függőleges alakváltozások és az erő-vízszintes alakváltozások kapcsolatai is kiértékelésre kerültek.



1. ábra: Laboratóriumi kísérlet (tönkrement falazóelem)



2. ábra: Végeelemes háló a falazóelem bordáján (felül 3 mm, alul 2 mm) [1]

2. Az anyagra vonatkozó információk

a) Kerámia

Az anyagkutatók meghatározása szerint kerámia minden olyan anyag, amely nem fém és nem polimer. Az agyag mellett számos más (például mesterséges) anyagból is készíthető kerámia, bár a legtöbb területen a kerámiák hő- és vegyszerállósága jelenti a legfőbb értéket.

Ezek az előnyös tulajdonságok a kerámiákon belüli atomok közötti erős (ionos, kovalens) kötésekből származnak, de sajnos ezek az erős kötéseknek a tulajdonságai okozzák a kerámiák legnagyobb hátrányát, törékenységüket is (szívósságuk csupán néhány százaléka a fémekének).

A kerámiák különösen érzékenyek belső szerkezetük legparányibb megváltoztatására is. Az egyik legintenzívebben kutatott terület a kerámiák szívósságának növelése. E kutatási területbe a saját kísérleti és numerikus megoldásaim is segítséget nyújthatnak.

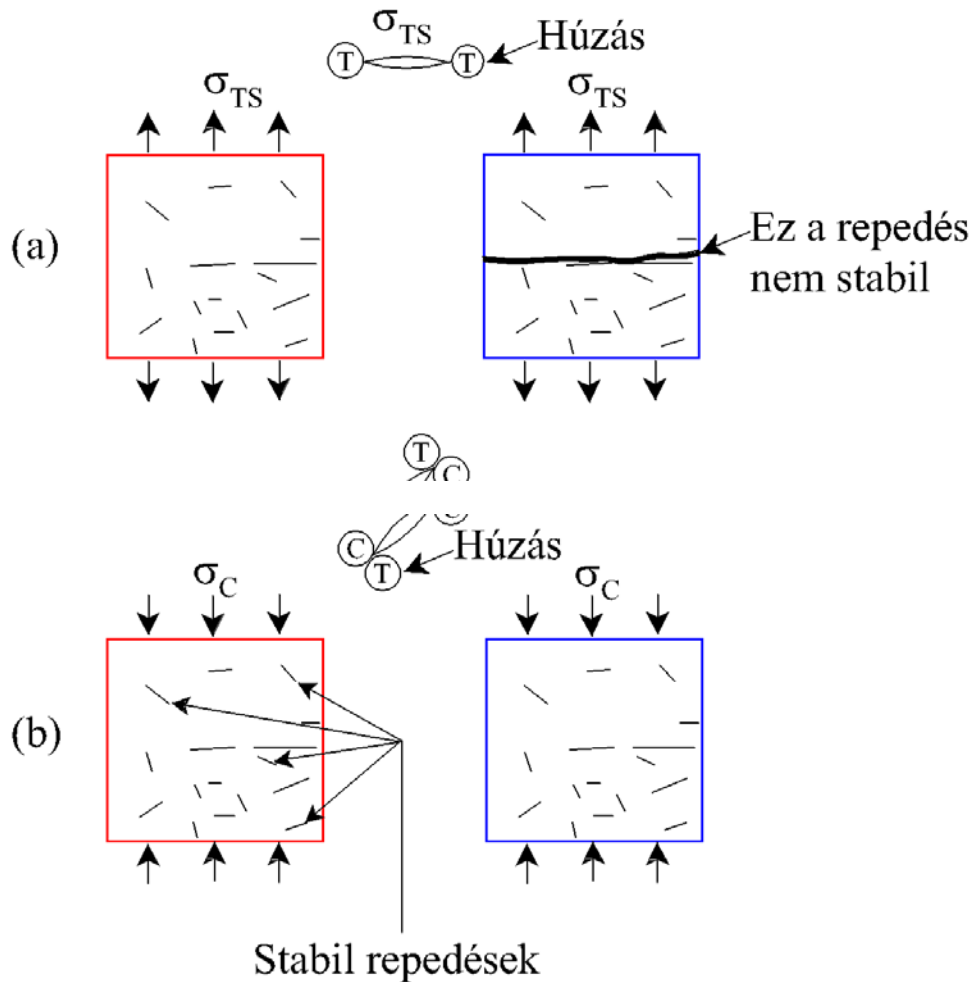
Nagyon fontos különbség a fémekhez képest, hogy a kerámiáknál a diszlokációk szerepe jóval kisebb a hibák között, szerepüket a pont- és 3D-hibák (pórusok, üregek, zárványok) veszik át. Az erős és merev belső kötés miatt a mikroszerkezet jóval kevésbé hajlamos átrendeződésre, már egészen kicsi (a fémekéhez képest jó két nagyságrenddel kisebb) hiba esetén megindulhat az egész kötésrendszer robbanásszerű tönkremenetele (Ejtsünk betonpadlóra egy fém és egy porceláncsészét! Az eredmény jól érzékelteti a különböző típusú hibák terjedésének veszélyessége közötti különbséget). Makroszinten ez a hatás vezet a kerámiák „rideg” anyagi viselkedéséhez.

A kerámiák többsége, valamint a ridegebb fémek (pl. öntöttvas) és a ridegebb polimerek teljesen másféleképpen törnek a fémes anyagokhoz képest. Ilyenkor közvetlenül az atomi kötések hasadnak, az első szakadás után megállíthatatlanul terjed tovább a teherbíró képesség elvesztése, nincs semmilyen helyi képlékeny zóna. Elegendő a legkisebb hiba (például egy lokális mikrorepedés az atomi lánc néhány tagjában), és a merev rendszer nem képes ennek olyan jellegű „szétosztására”, a belső struktúra összeomlik. Ezt a fajta törési módot rideg (angol szóval „brittle”) törésnek hívják, és gyors terjedése miatt különösen veszélyes. A törési felületek ilyenkor élesek, hasadó metszetekből állnak.

A mikroszerkezet sajátosságainak köszönhetően a kerámiák egy részénél az elméleti és valóságos határszilárdságban több nagyságrendi eltérés mutatkozhat. Minél több belső hiba

gyengíti a polikristályos szerkezetet, annál nagyobb a tényleges érték eltérése a határszilárdság elméletileg lehetséges értékétől.

Megjegyzésként felhívnom a figyelmet a kerámiák mindenkorai tönkremenetelét okozó repedés terhelési mód szerinti különbözőségére (lásd 3. ábra):



3. ábra Különböző típusú repedésterjedések kerámiákban [2]

Húzás esetén a mikrorepedések csúcsainál levő feszültségkoncentrációk a szívóssági határ elérésekor dinamikus makrorepedés-terjedést indítanak, a szívóssági határhoz közeledve az anyagi stabilitást veszítjük el. Nyomott elemeknél a repedésterjedés valamivel stabilabb, a mikrorepedések (amelyekből ilyenkor rendszerint jóval több van) összefűződése kvázistatikus terhek esetén az anyag blokkokra történő szétesésével, morzsolódásával jár együtt. A kísérleteim során a falazóelemeket csak egytengelyű nyomásnak vettem alá. [2]

b) Mechanikai anyagmodellek

Az anyag viselkedésének modellezése a természettudományok legösszetettebb feladatai közé tartozik. A rendkívül változatos belső összetétel a különböző fizikai tulajdonságok olyan széles skálájával ruházta fel az anyagokat, hogy viselkedésük átfogó megértése és modellezése a tudósok és mérnökök minden erőfeszítése ellenére még nem mondható teljesnek és befejezettnek. Ma már a százezret közelíti a mérnöki gyakorlatban használt különféle anyagfajták száma.

Maga az anyagmodell általános kifejezésként választ jelent, az anyag választ az őt ért külső hatásokra. Mivel a külső hatások mérnöki értelmezés szerint is nagyon sokfélék lehetnek, éppen ezért anyagmodell is többféle lehet. Az anyagmodell fogalma mást jelent a különböző iparágak, a különböző mérnökök számára.

Nagyon fontos állításként kell tehát rögzíteni, hogy ebben a dolgozatban csak olyan feladatokat tárgyalok, amikor az anyagnak a külső hatásokra (erők, hőmérsékletváltozások, idő) adott mechanikai választ (belső deformációk és feszültségek) keresem. Éppen ezért a saját modelljeimet mechanikai anyagmodelleknek fogom hívni. Mivel a továbbiakban kizárólag mechanikai anyagmodellekkel foglalkozom, ezért az egyszerűség kedvéért elhagyom a „mechanikai” jelzőt, csupán az „anyagmodell” fogalmat használom, azonban mindig a fenti meghatározás adta korlátok közé szorítva annak értelmezését. [2][3] Ezek a mechanikai anyagmodellek soha nem öncélú elemei a mechanika tudományának, hanem fontos gyakorlati célokat szolgálnak. Segítségükkel képesek a mérnökök szerkezeteket tervezni vagy ellenőrizni. Nélkülük a szó szoros értelmében lehetetlenné válna a kicsit is komolyabb mérnöki munka.

c) Rideg és rugalmas-képlékeny-fellazuló anyagok komplex modelljei

Szerkezeteinkben használt anyagjaink viselkedése igen eltérő lehet attól függően, hogy milyen anyagszerkezeti tulajdonságokkal rendelkeznek. A betonok, rideg fémek és talajok nemlineáris viselkedése a képlékeny tulajdonságok mellett az anyagban keletkező mikro- és makroszintű repedések kialakulásától és szilárdságcsökkentő hatásától is függ. Ez a hatás akkor jelent számottevő problémát, ha az anyag mikrostruktúrájában a kristályos belső szerkezet csak lokálisan van jelen vagy a kristályrács alapvetően hibás. A mechanikában a repedések hatása két szempont alapján vizsgálható:

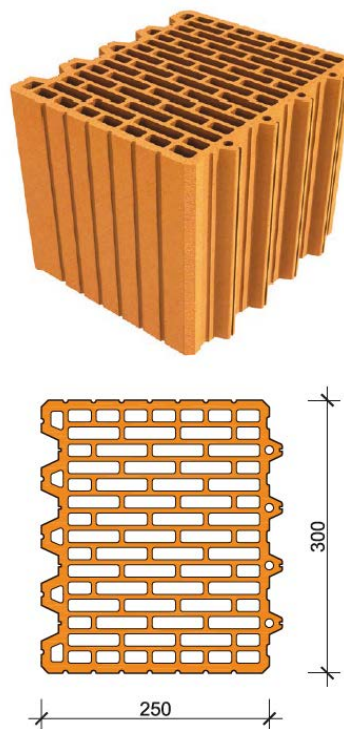
- Előállítható olyan anyagmodell, mely a makrorepedés-rendszer globális hatását vizsgálja, amelyben a modell a terhelt kontinuum viselkedését modellezi.

- Továbbá léteznek olyan modellek, melyek a makrorepedések hatását vizsgálják az anyagban keletkező feszültség-alakváltozás koncentrációk által, valamint ezzel együtt az anyag stabilitását is képesek leírni. Az ilyen modellekkel a törésmechanika tudománya foglalkozik. [2][3]

3. Az általam elvégzett laboratóriumi kísérletsorozat

a) A vizsgált falazóelem

A laborkísérletben anizotrop falazóelemként a korszerű Leiertherm 30 N+F gyártmányú terméket vizsgáltam. A kísérletsorozat hat darab próbatest vizsgálatából állt. Egy elem hosszúsága 250 mm, szélessége 300 mm, magassága pedig 238 mm. A falazóelemre megadott gyártói nyomószilárdság karakterisztikus értéke: 11 N/mm^2 . A falazóelem gyártási helye Mátraderecske. A téglaelemek kialakítását a 4. ábra mutatja. [4]



4. ábra: Leiertherm 30 N+F falazóelem

b) A kísérletsorozat bemutatása

A kísérletsorozatot a BME Szerkezet és Anyagvizsgáló Laboratóriumában hajtottam végre. A terhelést egy Z600 típusú, telepített terhelő berendezéssel végeztem. A gép hidraulikával ellátott, manuálisan működtetett és maximálisan 600 kN terhet tud közvetíteni. Előzetesen egy elem teherbírását kb. 350 kN nagyságúra becsültem. A terhelendő próbatestet teherelosztó farostlemezek közé tettük, így terhelte meg az elemet egytengelyű nyomással a berendezés. A farostlemezek az esetleges egyenetlenségeket kívánták kiküszöbölni, hogy a nyomás a keresztmetszet minden egyes pontjában közel azonos legyen. Mindemellett a terhelőberendezés felső nyomólapja gömbcsuklós kialakítású volt (lásd 5. ábrán).



5. ábra: A kísérleti elrendezés

Minden egyes próbatest két-két szemközti, a kísérleti elrendezés szempontjából az elülső, illetve a hátulsó oldalára egy-egy Hottinger Baldwin WA/20 típusú induktív elmozdulásmérő

lett felszerelve, melyek a terhelés irányában mérték a bekövetkezett összenyomódást átlagosan 12,5 cm hosszú referenciaszakaszon (lásd 6. ábrán).

Az előzőekben ismertetteken túl, két próbatest kivételével, nyúlásmérő bélyegeket is elhelyeztem. Két próbatest egy-egy oldalára függőlegesen, és két további próbatest egy-egy oldalára vízszintesen kerültek elhelyezésre a nyúlásmérő bélyegek. A kísérlethez KMT-LIAS-06-84/350-5 típusú, 84 mm hosszú nyúlásmérő ellenállásokat használtunk (lásd 7. ábrán). A mérőegységekből kapott adatokat Catman Easy szoftver segítségével detektáltam.



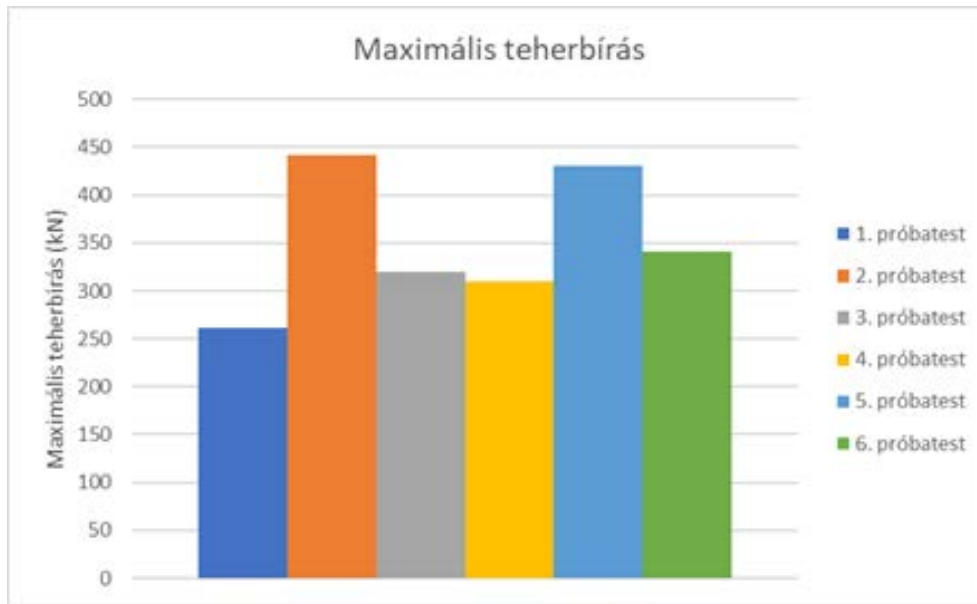
6. ábra: Induktív elmozdulásmérő



7. ábra: Függőlegesen elhelyezett nyúlásmérő bélyeg

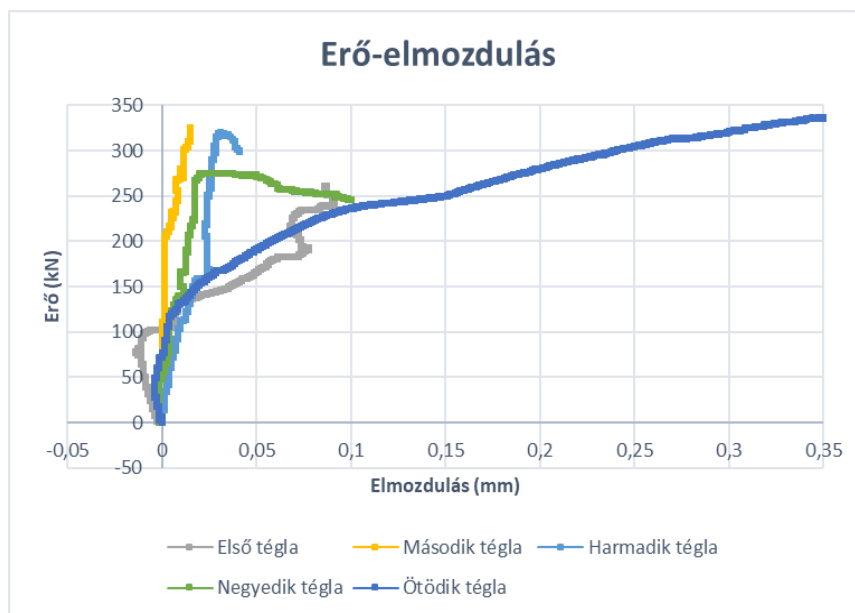
c) A kísérleti eredmények

A hat mérés során a maximális teherbírás szempontjából igen eltérő eredmények születtek. A becsült 350 kN körüli teherbíráshoz képest az 1. jelű próbatest esetében sokkal kisebb, mintegy 250 kN nagyságú maximális erőt mértünk. Három mérés esetében (3., 4. és 6. jelű) 300 kN és 350 kN közötti értéket, míg két mérés esetében (2. és 5. jelű) nagyobb – közel 450 kN – teherbírást mértem. A hat téglatest ugyanazon gyártásból és raklapról származott, így különösen meglepő az ilyen mértékű eltérés a mérési eredmények között. Az eltérő eredmények a terhelőberendezés pontatlansága, a gömbcsukló hibája miatt alakulhattak ki. Az egyes eredményeket a 8. ábra mutatja.



8. ábra: Maximális teherbírás

Az induktív elmozdulásmérők is egymástól jelentősen eltérő adatokat detektáltak, amit leginkább a téglaelemek függőleges irányú erő-elmozdulás grafikonjain láthatunk (9. ábra). A 6. jelű próbatest mérési eredményei a mérőberendezés hibája miatt nem kerültek közlésre.



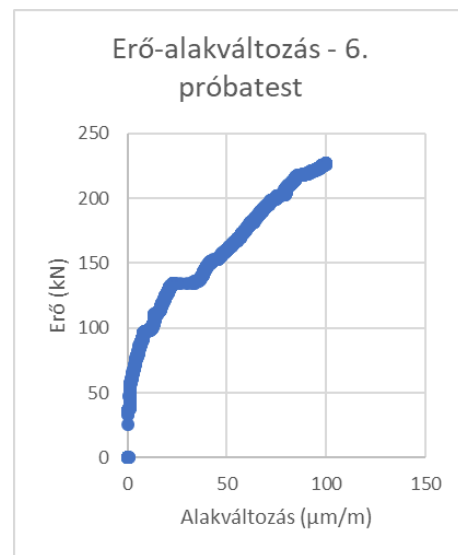
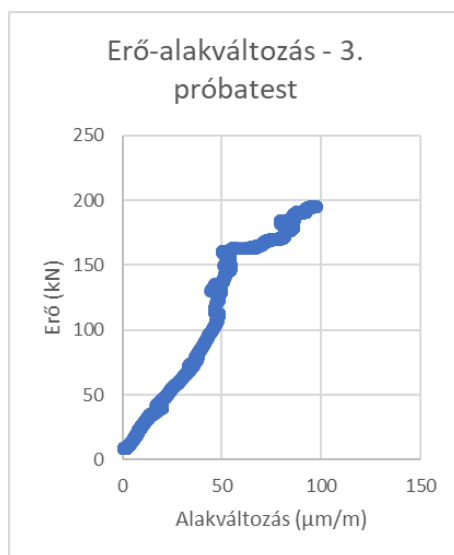
9. ábra: Az elemek erő-elmozdulás diagramja

A próbatestek kezdeti merevsége (kb. 120 kN-os terhelésig) szinte megegyezik. Az 1. jelű próbatest esetében kezdetben megnyúlást mért az elmozdulásmérő berendezés. A nem várt mérési eredmény minden bizonnyal a próbatest terhelés alatti kezdeti „helyezkedéséből”

adódott, a nem tökéletesen párhuzamos felfekvési síkok miatt következhetett be. A mérési eredményekből megállapítható, hogy a terhelési sebesség megválasztása jelentősen befolyásolta a detektált viselkedést. A kisebb terhelési sebesség mellett végrehajtott kísérletek (1. és 5. jelű) esetén a kezdeti merevség után képlékenyedő fázis figyelhető meg, míg a nagyobb sebességgel terhelt (2., 3. és 4. jelű) elemek esetében ridegebb viselkedés mutatkozott. Ez arra enged következtetni, hogy a lassabb terhelési sebesség mellett van ideje a képlékeny alakváltozásoknak, esetleg kisebb lokális töréseknek kialakulni.

Megfigyelhető, hogy bár a kerámia alapanyag a ridegségéről „hírhedt”, de a teljes falazóelem lyukacsos kialakítása számottevő képlékeny alakváltozás kialakulását teszi lehetővé. A próbatestek terhelő berendezésből való kiszedésekor egyértelmű magyarázatot látunk a jelenségre. Az alapanyag ugyan jelentős képlékeny viselkedéssel nem bír, de a belső bordaszerkezetben megjelenő repedések mentén történő apró átrendeződések a teljes elem „képlékeny” viselkedését mutatják.

A terhelési erő és a bordairányra merőleges keresztirányú nyúlás mérési eredményeit a 3. és 6. jelű próbatest esetén a 10. és 11. ábra tartalmazza. Kizárólag ezeken az elemeken volt vízszintes nyúlásmérő bélyeg.



10. ábra: 3. jelű próbatest erő-alakváltozás diagramja 11. ábra: 6. jelű próbatest erő-alakváltozás diagramja

A pozitív értékek a függőleges induktív elmozdulásmérők esetén összenyomódást, a vízszintes nyúlásmérő bélyegeknél pedig nyúlást jelentenek.

Látható, hogy a keresztirányú elmozdulások közelíthetők lineárisan, azaz mindkét esetben kb. 200 kN nagyságú erőnél 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ -es alakváltozást mértem. Ugyanakkor észrevehető, hogy a korábban bemutatott maximális teherbírástól jelentősen eltérnek az eredmények. Ez azzal magyarázható, hogy a teljes tönkremenetel kezdetén függőleges irányú repedések jelentek meg minden esetben a próbatesteken, melyek a vízszintes ellenállásmérőkön is áthaladtak (lásd 12. ábra), így ezek után a bélyegek rossz értékeket mutattak, azokat a mérési eredményekből ki kellett zárnom.



12. ábra: Függőleges repedés

A tönkremenetel hangos pattogással kezdődött, melynek következtében kisebb darabok is lerepültek a falazóelemekről. Tönkremenetelkor a terhelőgépből kiszedve a téglatest belseje teljesen összetöredezett. (lásd 13. ábra)



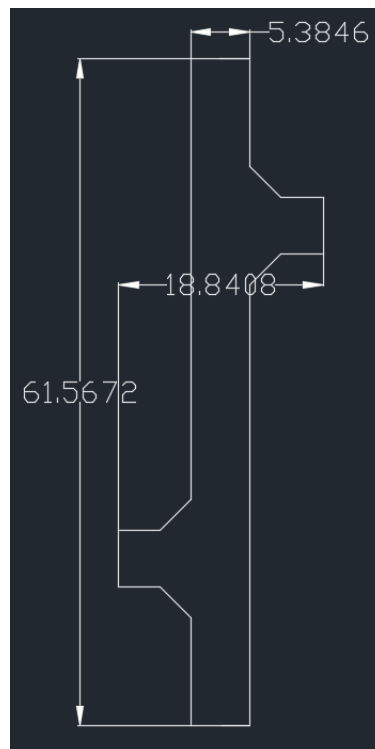
13. ábra: Tönkrement falazóelem

A kapott mérési eredmények nagy szórást mutatnak, mely egyrészt a gyenge minőségű próbatestekkel (falazóelemek), másrészt a kezdeti kutatási fázis miatt még pontosítandó mérési eljárással magyarázható.

4. Előzetes numerikus vizsgálat

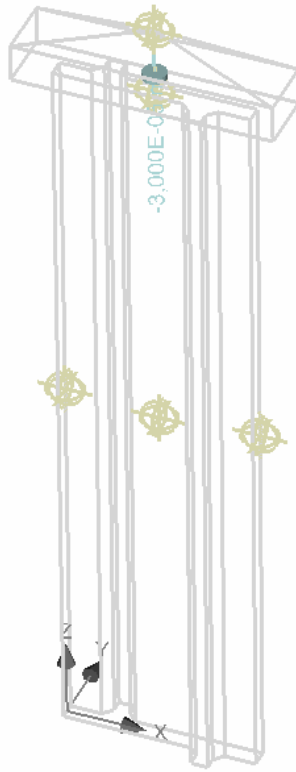
a) A modell

Első lépésként a minél pontosabb geometria felépítéséhez szükséges végelemek nagyságának a vizsgálata volt a cél, annak meghatározása, hogy mekkora elemnagyságot használjak a numerikus kísérleteimhez. Ehhez a virtuális kísérlethez csupán a téglaelem egy általános belső részletét modelleztem szimmetriafeltételek kiegészítésével. (14. ábra) A numerikus vizsgálatokat a GID nevű szoftver 12-es verziójával, majd azt követően az Atena Studio V5, 3D-s, nemlineáris végeselemes programmal végeztem.



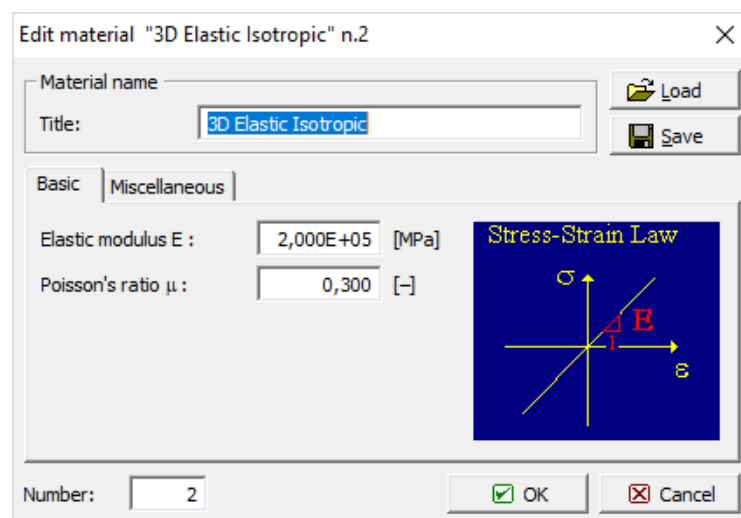
14. ábra: A modellezett részlet

Az elem hossza 61,56 mm, maximális szélessége 18,84 mm, illetve magassága 125 mm, hiszen az elmozdulásmérők is ilyen hosszon mérték az értékeket. A modellezéshez szükség volt egy téglatestre, azon egy téglalap alapú acél gúla elhelyezésére a vizsgált elem tetején, melynek csúcsában definiáltam az elmozdulás értékét. (lásd 15. ábra) Így a teljes keresztmetszetre el lehet osztani az eltolódást, míg a definiált elmozdulás csupán pontszerű. Más előnye is van az acél elemnek, ugyanis a program a testben keletkező erőket és feszültségeket is jobban tudja mérni az előbb részletezett módon.



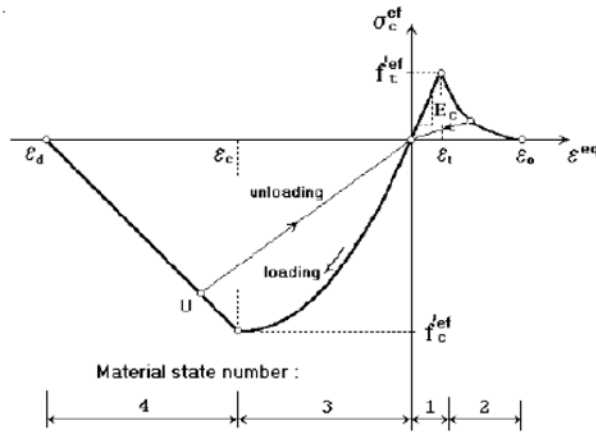
15. ábra: ATENA 3D modell

A modellhez szükséges volt anyagmodelleket is definiálni. Mivel rákerült egy acél test a téglaelemre, így azt az anyagfajtát is definiálnom kellett. Az acéllemezre egy egészen egyszerű lineárisan rugalmas izotrop anyagmodell került. Megadtam az acél rugalmassági modulusát és Poisson-tényezőjét, ahogyan az alábbi, 16. ábrán látható:



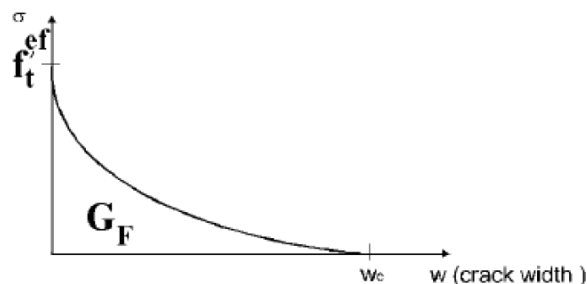
16. ábra: Az acél anyagmodellje

A téglatest elemére már bonyolultabb a meghatározás, az anyagmodellt a kerámiákra, illetve rideg anyagokra parametrizálható „3D Nonlinear Cementitious 2” nevű modell segítségével vettem fel. A programban megadhatók egy teljesen egyenértékű egyirányú feszültség-alakváltozás görbe pontjai, pl.: a nyomó- és húzószilárdság értéke. (lásd 17. ábra)



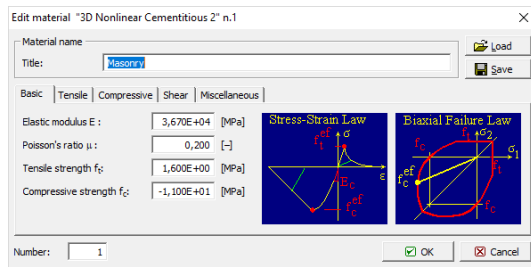
17. ábra: Egyirányú feszültség-alakváltozás rideg anyagokra

A görbe többi pontját a program automatikusan felveszi, így azokat változtatni nem lehet. A 17. ábrán az 1-es szakasz a húzófeszültség kimerüléséig tart, itt a rugalmassági modulus lineárisnak tekinthető. A második szakaszon a repedésmegnyílás modellezése egy exponenciális függvénnyel írható le, mely a speciális törési energia és a húzószilárdság függvényéből számítható. (lásd 18. ábra)

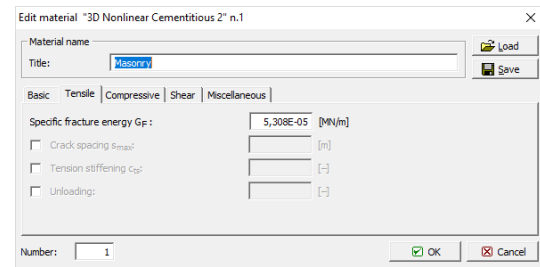


18. ábra: Exponenciális repedésmegnyílás függvénye

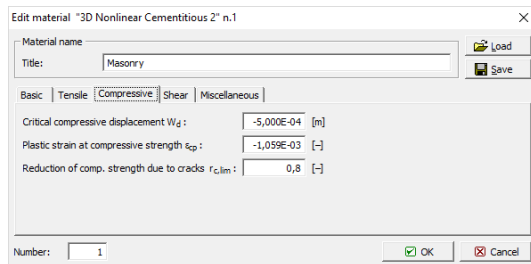
A 3. szakasz a nyomófeszültség maximális értékének eléréséig tart. Ez a függvény az anyag kezdeti és a maximális nyomófeszültséget metsző rugalmassági modulusok arányától, valamint a nyomószilárdság értékétől függ. A bemutatott görbe ezen a szakaszon parabolikus görbének tekinthető. Az említett 3D Nonlinear Cementitious 2 modellben tehát a következő adatok adhatók meg:



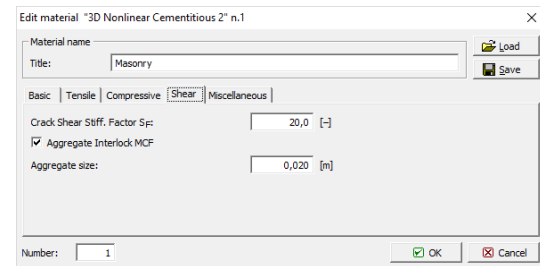
a)



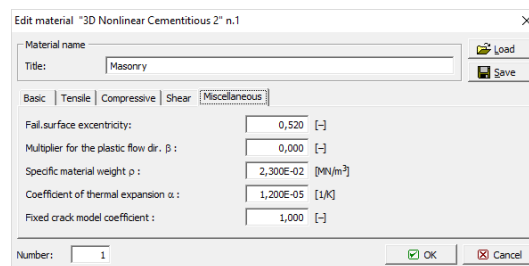
b)



c)



d)



e)

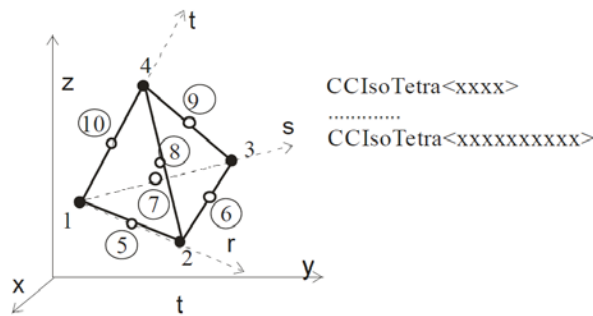
19. ábra: Az anyagmodell definiálása a programban

A 19./a) ábrán az általános tulajdonságok állíthatók be, mint a rugalmassági modulus, Poisson-tényező, húzó- és nyomószilárdság. A b) ábrán a húzáshoz tartozó, a c) ábrán a nyomáshoz tartozó, a d) ábrán a nyírési és az e) ábrán a vegyes tulajdonságok adhatók meg. A programnak csupán a nyomószilárdság értéket adtam meg, majd az összes többit automatikusan felvette. A modell tulajdonságain természetesen lehet változtatni, azonban a folyási függvény, a degradáció, a repedésmegnyílás, a nyírési faktor függvényeinek csak egy vagy két pontját változtathatjuk, mivel a függvények előre definiáltak.

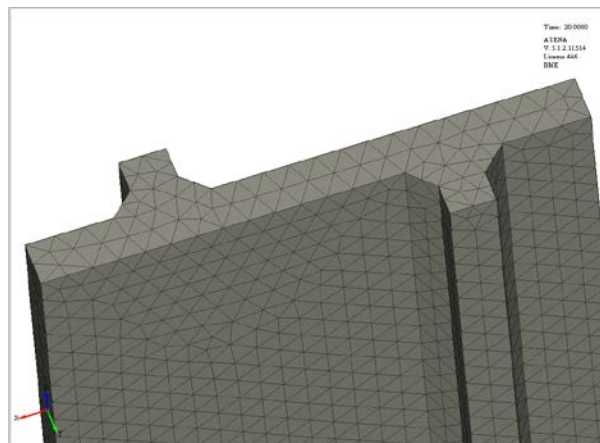
A most beállított értékek közelítő értékek, melyeket további kísérletsorozattal lehetne pontosítani.

A modell alsó síkja függőleges értelemben megtámasztott. Ahogyan korábban említettem, a terhet egy elmozdulás segítségével helyeztem el az acél gúla csúcspontjában. A maximális elmozdulás -z irányba, függőlegesen lefelé mutat és összesen 0,6 mm nagyságú volt, mely elmozdulás 20 lépcsőben került rá.

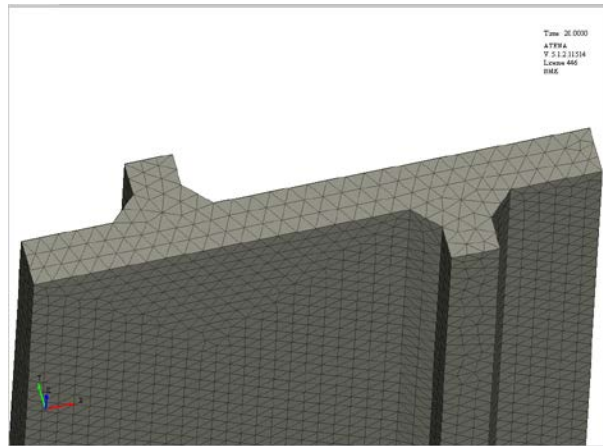
Az elhelyezett végeleemes háló kétféle volt, melyet vizsgálat alá vetettem. Az egyik esetben az elem szélességében három, míg a másikban két darab végelelem helyezkedett el. Ez azt jelenti, hogy az előbbi esetben kb. 3, míg a másikban kb. 4 mm volt egy végelelem szélessége. A numerikus modellben egységesen kvadratikus bázisfüggvényeket, valamint a kerámia elemekre 10 csomópontos tetraéder végelelemeket alkalmaztam. Célszerű lett volna a téglatest alakú végelelem kialakítása, hiszen ekkor nagyobb pontosság érhető el, viszont a sarkok lekerekítése miatt nem lehetett ezzel a módszerrel behálózni a modellt. A végelelemhálóval kapcsolatos illusztrációk a 20-22. ábrán láthatók.



20. ábra: Tetraéderes végelelem geometriája



21. ábra: Ritkább háló

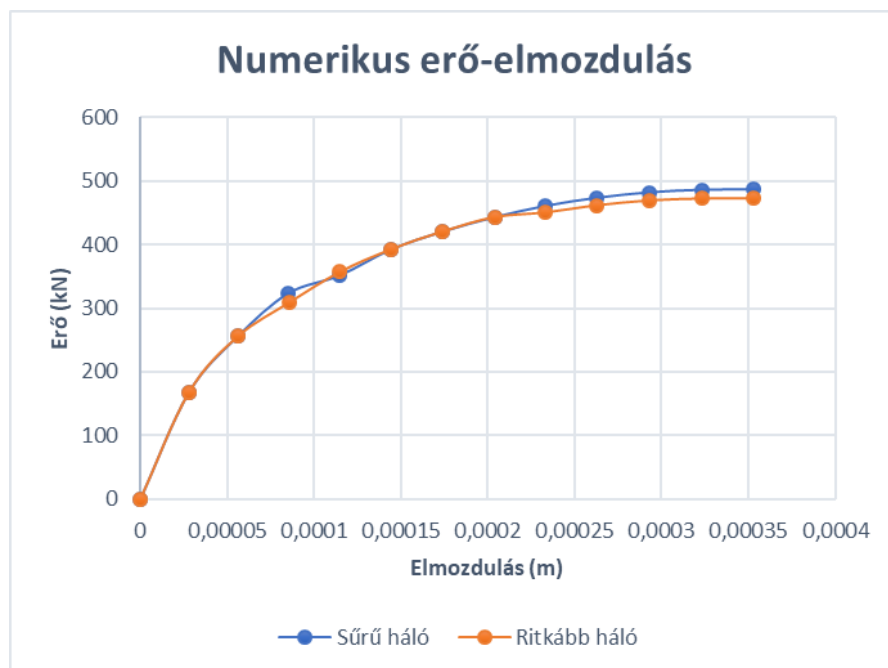


22. ábra: Sűrűbb háló

Az eredményekhez monitorpontokat vettem fel a modell tetején, közepén, illetve a két végén, a modell hossza mentén. Az először említett két ponttal a test függőleges összenyomódásait lehet vizsgálni, míg az utána említett szélső pontokkal a harántirányú megnyúlást lehet figyelemmel követni. [3][5]

b) Az eredmények

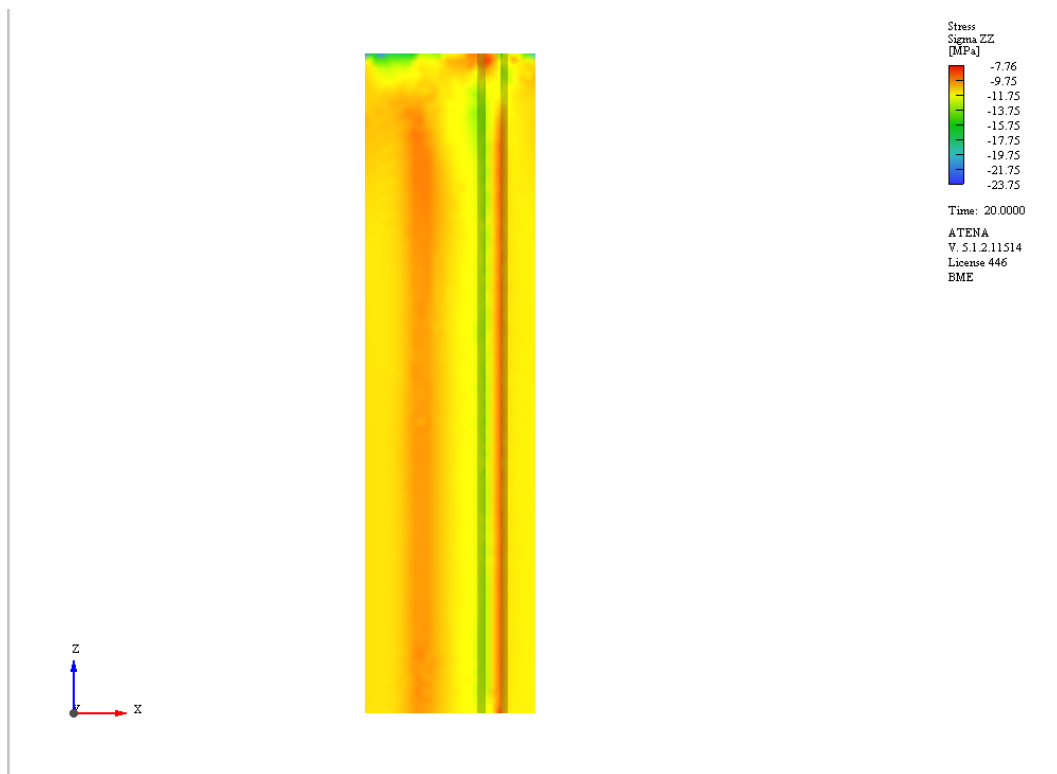
A kezdeti, egy bordaelemen végzett vizsgálat eredményeit az alábbi, 23. ábra mutatja:



23. ábra: A numerikus számítás erő-elmozdulás diagramja

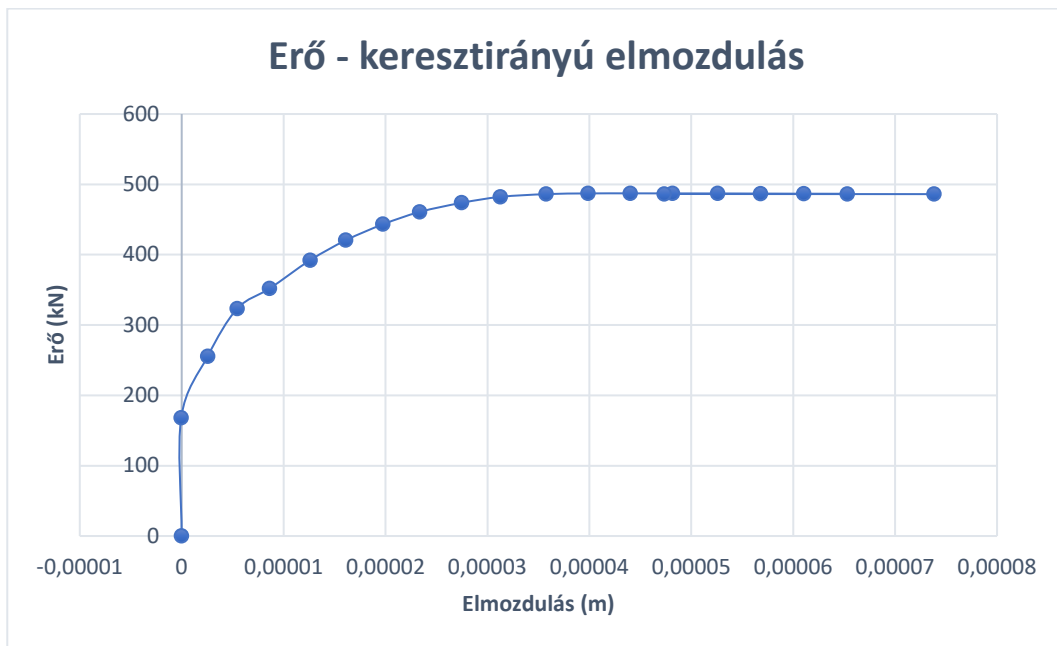
Megfigyelhető, hogy a kétféle végeleemes hálóval kapott numerikus eredmények között érdemi különbség nincs. Az erő-eltolódás görbék alakja megegyezik egymással. A maximális teherbírás is közel azonos, a sűrű hálóval vett számítás csupán 3%-kal mutat nagyobb teherbírást, mint a ritkább hálóval számolt verzió. A legnagyobb eltérés a számítási időben mutatkozott. Míg a sűrű hálóval felépített modell 30 percig, úgy a ritkább hálóval készített modell csupán 5 percig futott. Ez nagyon jelentős különbség, éppen ezért a továbbiakban a nagyobb, 4 mm-es hálózás alkalmazása mellett döntöttem azokban az esetekben, amikor a futási idő nagysága miatt nem tudtam alkalmazni a sűrűbb hálózást.

A kialakult függőleges feszültségek szabályos képet mutatnak. Jól látszik, hogy ott, ahol a borda található, illetve az erőbevezetés helyén feszültség-csúcsok alakulnak ki, ami a várákosnak megfelelő. (lásd 24. ábra)



24. ábra: Függőleges feszültségábra

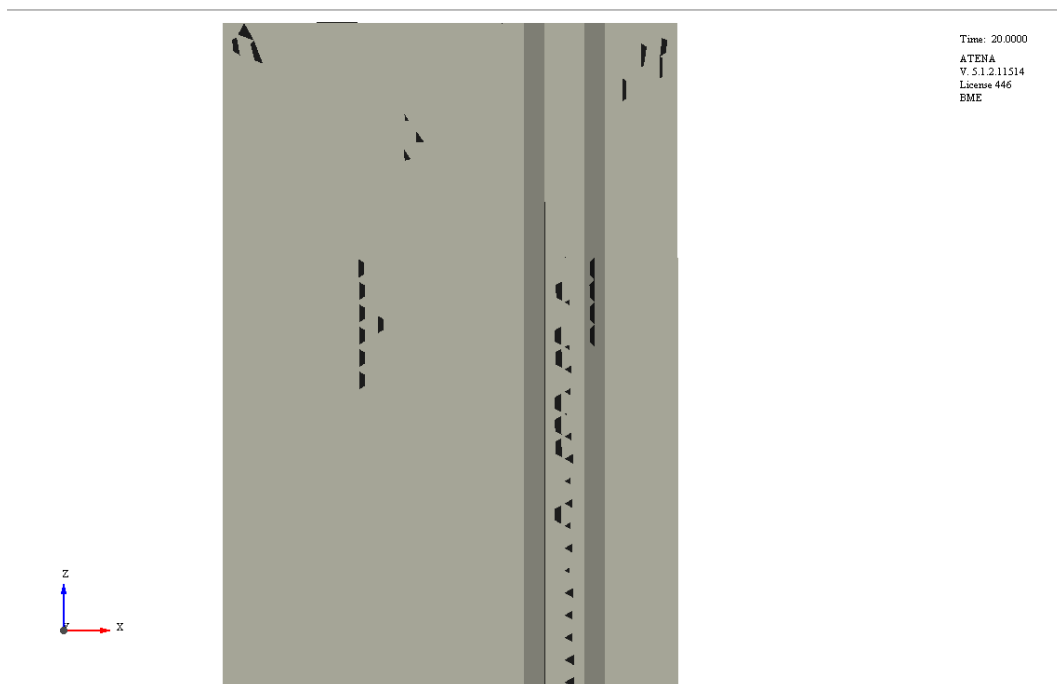
A harántirányú elmozdulásokat az erő függvényében a 25. ábra tartalmazza.



25. ábra: Erő - keresztirányú elmozdulás

Jól látszik, hogy a grafikon ugyanolyan lefutást mutat, mint a függőleges elmozdulás, csak egy nagyságrenddel kisebbek az elmozdulások.

Végül a kialakult repedések helyzetét mutatom be a 26. ábrán.



26. ábra: Repedések az elemben

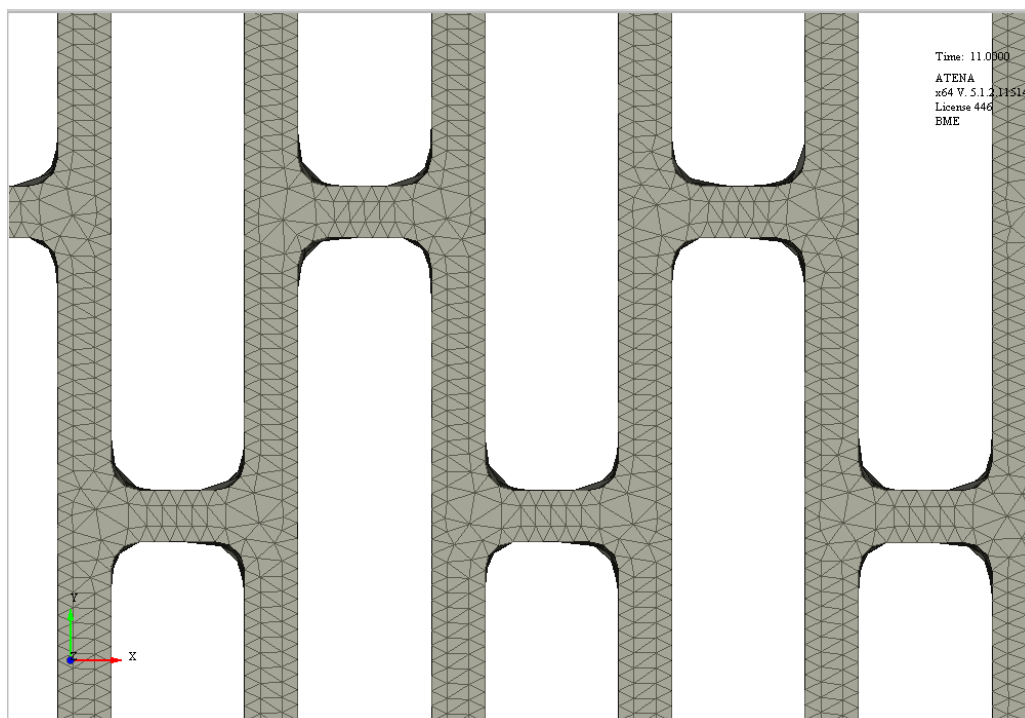
5. Az általam elvégzett kísérlethez készített numerikus modell

a) A modell

A részletes vizsgálat során már nemcsak egy belső borda modellezésével foglalkoztam, hanem a teljes keresztmetszetet vizsgáltam, kihasználva a téglaelem egyszerűen szimmetrikus mivoltát.

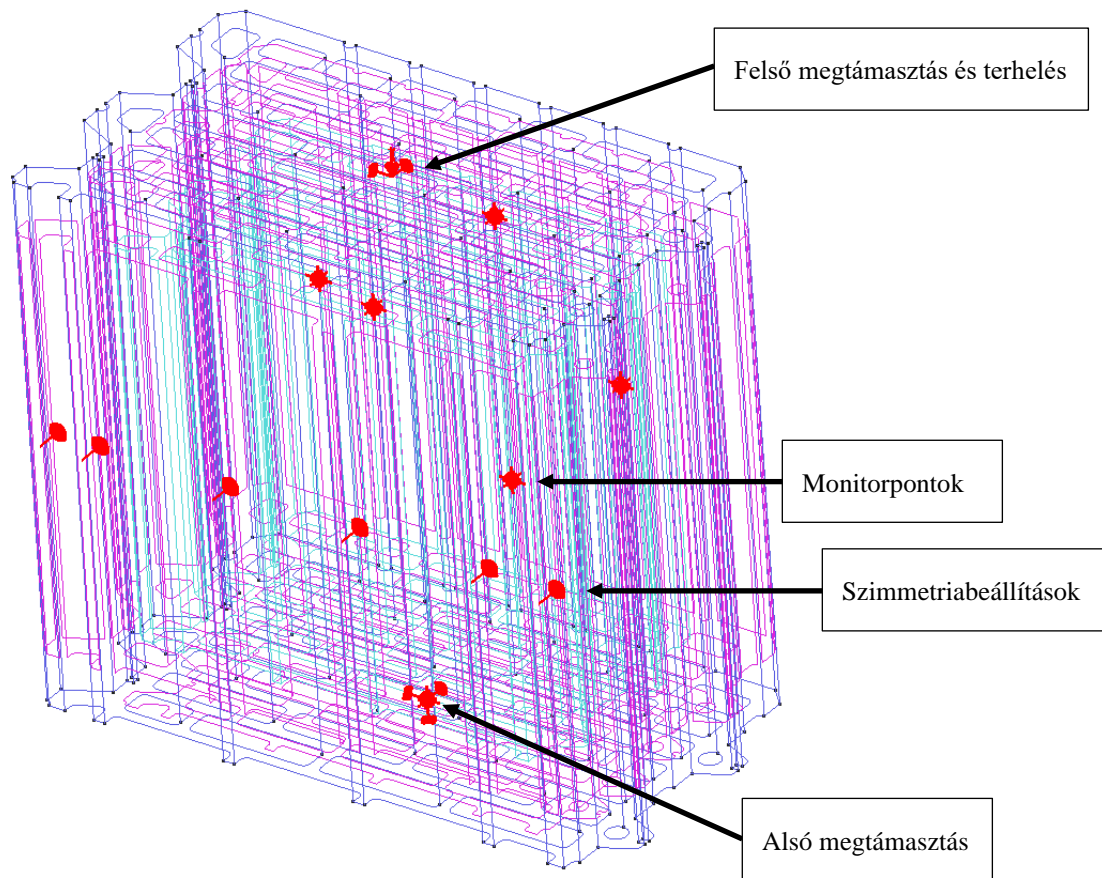
A felépített modell egy „fél téglá”, melynél a szimmetriatengelyben szimmetriafeltételeket írtam elő. A test alján mindhárom (x, y, z) irányú eltolódást meggátló támaszt állítottam be, míg a felső síkra x és y irányban - a terhelésre merőleges irányokban - került támasz. Így tudtam elérni, hogy a numerikus modell a lehető legjobban írja le az egytengelyű nyomókísérletet. A felépített modellt 11 MPa nagyságú nyomóerővel terheltem a felső síkján, függőleges irányban. A terhet 11 lépésben működtettem az elemre.

Ennél a modellenél a kisebb, 3 mm-es elemnagysággal készült a végeleemes modell a számítási idő értékelhető hossza miatt, illetve a nagyobb pontosság érdekében, melynek egy részlete az x-y síkban a 27. ábrán látható:



27. ábra: Alkalmazott végeleemes háló

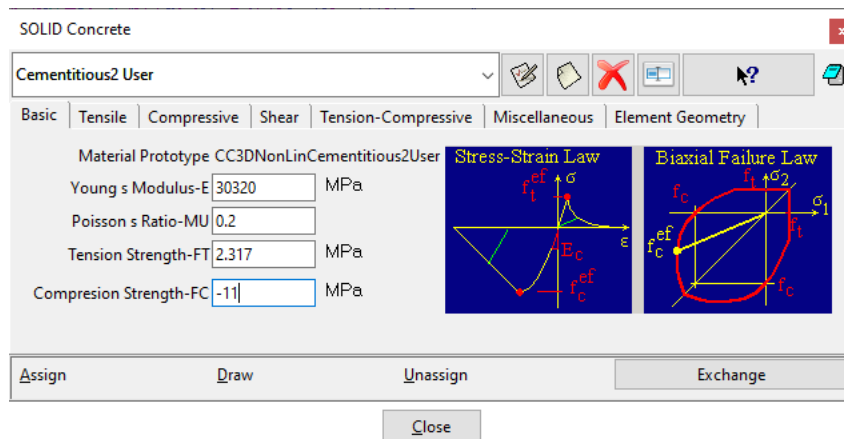
A modell kialakítása a 28. ábrán található:



28. ábra: A modell kialakítása

Ahogy korábban is, így most is tetraéder alakú végelemeket alkalmaztam a modell megalkotásánál.

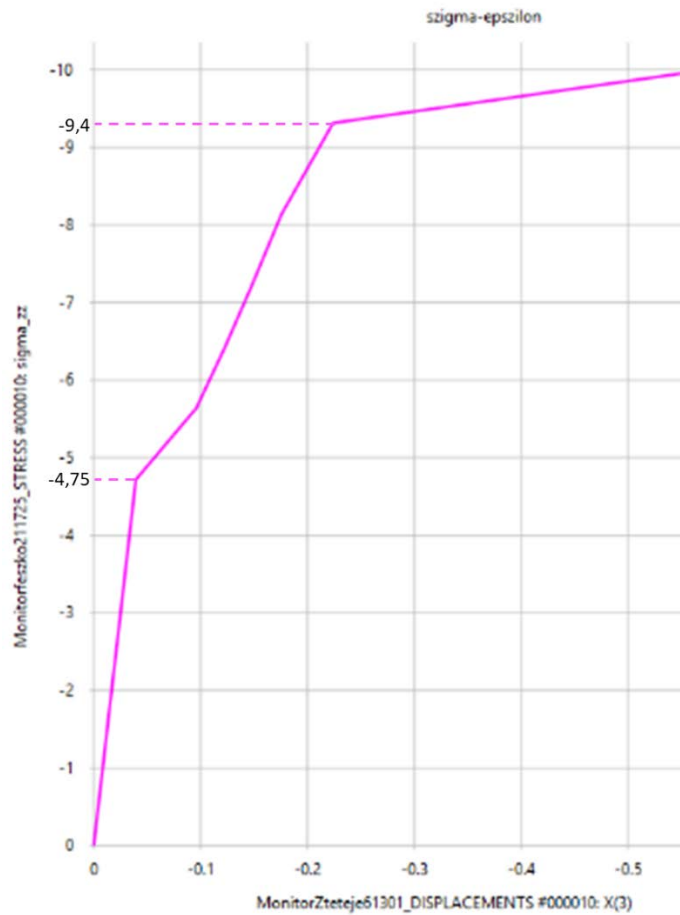
Az alkalmazott anyagmodell a téglára ismét az ún. „3D Nonlinear Cementitious 2”, melyet az előzetes numerikus modell fejezetében részletesen ki is fejttem. Eltérés ahhoz képest, hogy az anyagjellemzők esetében megváltoztattam a nyomásra vonatkozó maximális feszültséget a Leiertherm katalógusában [4] található deklarált nyomószilárdság értékére, 11 MPa-ra. A többi jellemző változatlan maradt, ahogyan az látható a 29. ábrán.



29. ábra: Az alkalmazott anyagmodell alapbeállításai

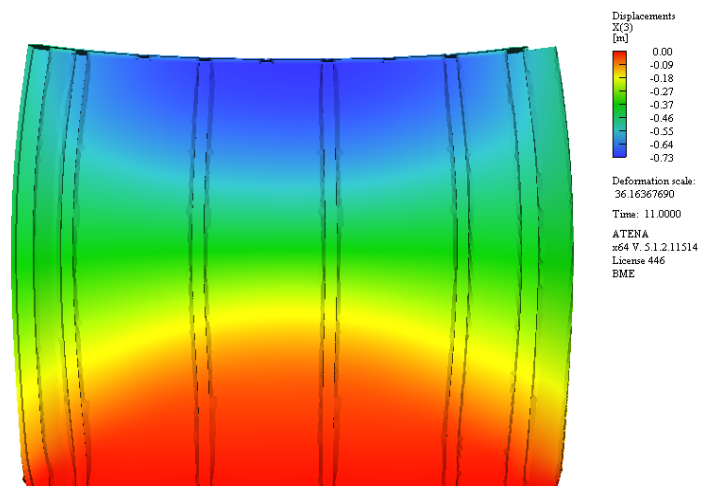
b) Az eredmények

A részletesebb numerikus modellen elvégzett vizsgálat eredményeként többek közt feszültség–alakváltozás (erő-eltolódás) ábrákat, deformációs ábrákat és repedésképeket kaptam, melyeket össze tudtam vetni a laborkísérletben kapott eredményekkel. A numerikus modell felső középső pontjának feszültség–eltolódás diagramja (lásd a 30. ábrán), jellegét tekintve megegyezik a laborkísérletekben mértekkel. Megfigyelhető, hogy a numerikus modell nagy kezdeti merevséggel rendelkezik, mely megegyezik a laborkísérlet szintén kezdeti, repedésmentes szakaszával. Ezt követően lineáris lágyulás kezdődik a 4,75 MPa – 0,021 mm pontban, melyet egy felkeményedő viselkedési szakasz követ. A numerikus eredményekben is megmutatható a laborkísérletekben már megfigyelt „képlékeny”, repedések mentén átrendeződő viselkedési fázis. A tönkremenetelhez tartozó, szinte tökéletesen képlékeny, de kissé felkeményedő viselkedési szakasz kezdete a 9,4 MPa – 0,116 mm pontnál kezdődik meg. A numerikus eredmények lágyuló görbéje 0,5 - 0,6 mm-es elmozdulás tartományban ér véget, amely megegyezik Van Mier (1986) betonokra végzett kísérleteiben tapasztaltakkal [6].



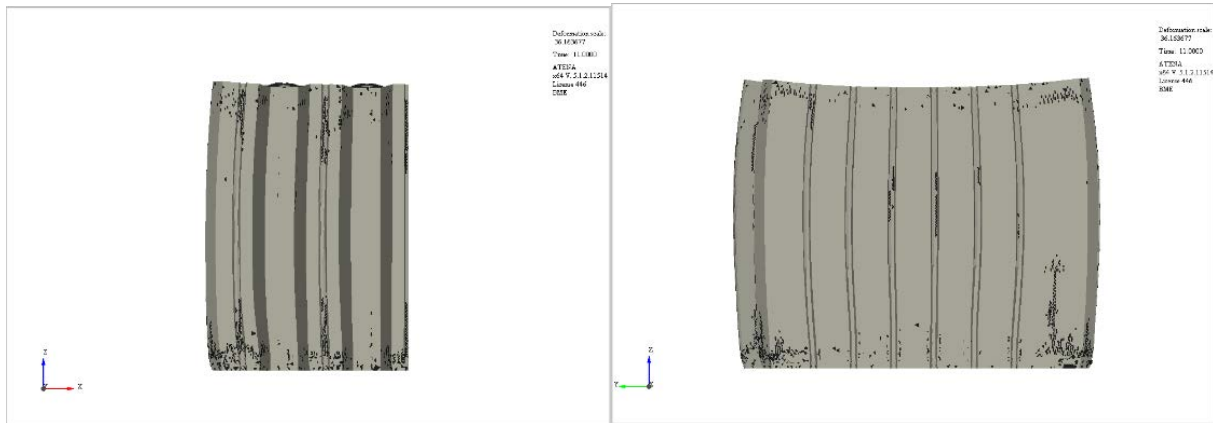
30. ábra: Feszültség-eltolódás diagram

A deformációs ábrák alapján (lásd 31. ábra) először a belső szerkezet repedezik és rendeződik át, (deformálódik többet), majd a külső rész károsodásával merül ki a teljes szerkezeti elem teherbírása.



31. ábra: Deformációs ábra

A 32. és 33. ábrákon látható, jellemző repedésképek azt mutatják, hogy a téglaelem felső és alsó lapjához közel az alapanyag morzsolódik, illetve a bordák mentén függőleges repedezettség jelenik meg. Ez jellegét tekintve jó egyezést mutat a laborkísérletekben megfigyelt tényleges tönkremenetekkel.



32. ábra: Repedezettség x-z síkban

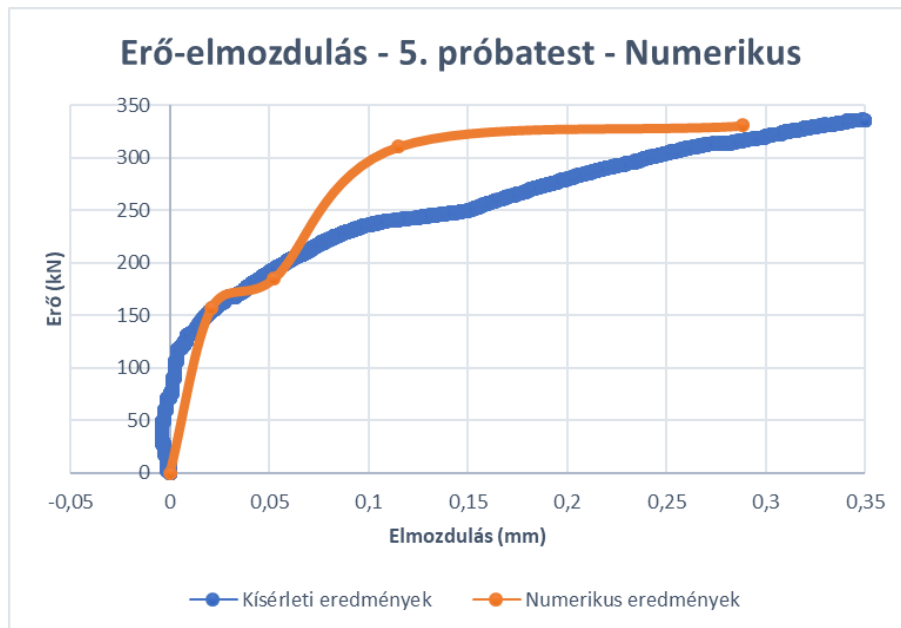
33. ábra: Repedezettség y-z síkban

c) A laborkísérleti és a numerikus eredmények összehasonlítása

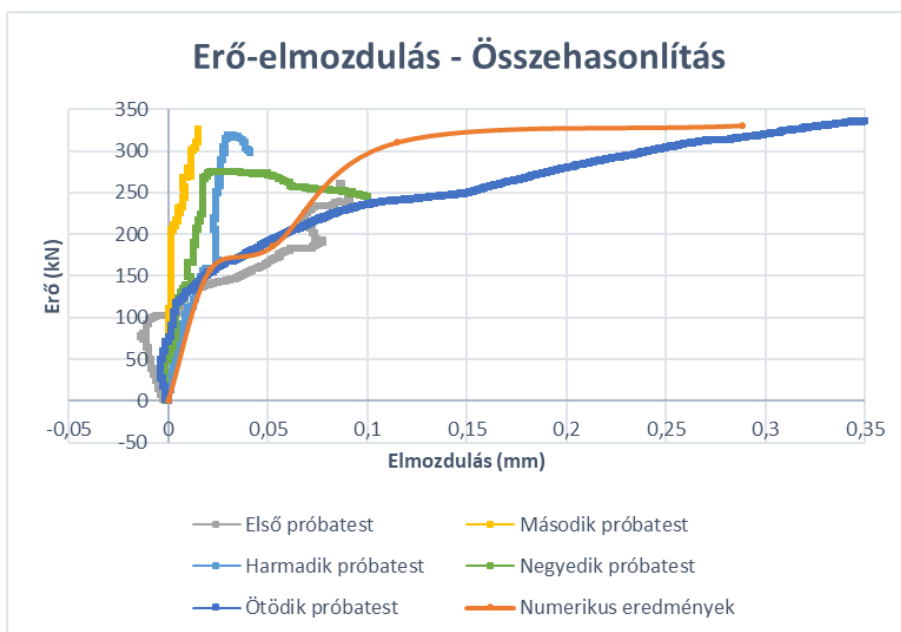
A laborkísérletben tapasztalható nagy szórású eredmények miatt, mely a laborkísérlet pontatlanságainak és hibáinak köszönhető, a numerikus modellt egyetlen laborkísérlettel hasonlítom össze. (lásd 34. ábra). A numerikus eredményeket a legkisebb sebességgel terhelt 5. jelű próbatest mérési eredményeivel vetem össze ebben a fejezetben. A kapott erő-elmozdulás diagramok (lásd 35. ábra) összehasonlításából (lásd 1. táblázat) jól látszik, hogy kezdetben szinte azonos lefutást mutatnak az ábrák, az eltérés mindösszesen 1,3% a 0,021 mm-es összenyomódásnál. A lineáris lágyulással jellemezhető második viselkedési szakasz szintén jó egyezést mutat, az eltérés 0,053 mm nagyságú összenyomódásnál csupán 2,63 %. Ezt követően, a jelentős belső átrendeződésekkel járó harmadik görbeszakaszon a numerikus és laboreredmények eltávolodnak egymástól, az eltérés több, mint 28% a legkedvezőtlenebb pontban (0,116 mm összenyomódásnál). A tönkremeneteli szakasz ismét viszonylag pontosan követhető le a megmutatott modellezési eljárással. A tönkremeneteli erőben mindösszesen 5%-os eltérés mutatkozik.

Összességében elmondható, hogy a vélhetően nagy gyártásminőségi és alapanyag hibákkal terhelt próbatestek közül kiválasztott mérési eredmények az általam ismertett numerikus modellezési eljárással jellegében jól követhetők. A jelentős belső repedezettség mentén, az

amiatt átrendeződő viselkedési szakasz kivételével a valós viselkedés jól modellezhető numerikusan. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy a modellalkotási folyamat továbbfejlesztése mindenképpen szükséges még.



34. ábra: Az 5. próbatest és a numerikus számítás erő-elmozdulás ábrája



35. ábra: A falazóelemek és a numerikus számítás erő-elmozdulás ábrája

A terhelés értékei és azok eltérései adott elmozdulások függvényében				
	0,021 mm	0,053 mm	0,116 mm	0,289 mm
Numerikus vizsgálat	157 kN	185 kN	310 kN	330 kN
Laborkísérlet - 5. elem	155 kN	190 kN	241 kN	316 kN
Eltérés a laborkísérlethez képest	+1,30%	-2,63%	+28,63%	+4,43%

1. táblázat: A numerikus vizsgálat és az 5. elem erő – elmozdulás ábrájának az összehasonlítása

A numerikus modellből kapott törésképet (36. ábra) is összehasonlítottam a kísérleti tapasztalatokkal (37. ábra). Mindkét esetben jól látszik, hogy a próbatest alsó és felső síkjának környékén, illetve a keresztmetszet szélső függőleges bordái mentén koncentrálnak a repedések kezdetben, melyek végig hasadása okozza a tönkremenetelt.



36. ábra: Repedezettség a laboratóriumi kísérletben



37. ábra: Repedezettség x-z síkban

d) A numerikus modell kritikája

A laboratóriumi kísérletek során egymástól annyira eltérő eredmények születtek, hogy nehéz megítélni, melyik viselkedés a „valós”, melyikre lehetne validálni a modellt. Az általam elkészített numerikus számításban feszültség-vezérelt módon definiáltam a terhelést, ami nem feltétlen fedi a valóságot, hiszen a terhelés során valószínűleg nem egyenletes feszültségek alakulnak ki a falazótéglán. Továbbá a laboratóriumban a próbatestek alá és felé egy-egy farostlemez került elhelyezésre. Ez a megoldás nem biztosít befogást egyik síkon sem, sőt, még harántirányú kontrakciót elősegítő mechanizmussal is rendelkezik, hiszen a farostlemez

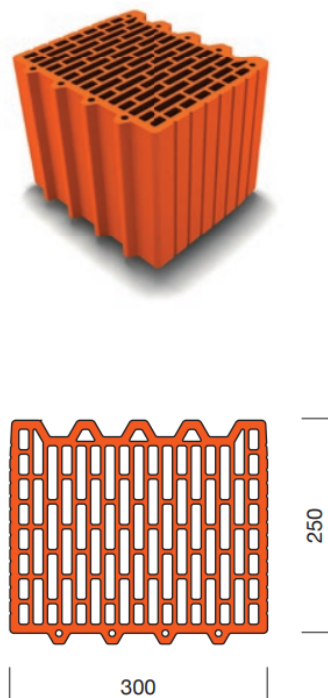
rugalmas anyagú. Ezt a farostlemez, illetve annak a viselkedését nem tudtam megfelelően modellezni, arra nem történt külön vizsgálat, hogy ezek milyen tulajdonsággal rendelkeztek. A jelenség pontos modellezéséhez másfajta megoldásra van szükség.

Olyan kutatásokat kerestem tehát, amelyek más megoldásokkal dolgoznak, mint amit én használtam a kísérleteim során. Így találtam rá egy eddig nem publikált kísérletsorozatra, amely farostlemez helyett habarcsborítást alkalmazott. A továbbiakban ezt a kísérletsorozatot mutatom be, és használom fel egy új, várakozásaim szerint pontosabb numerikus modell felépítéséhez.

6. A mások által végzett laboratóriumi kísérletsorozat

a) A vizsgált falazóelem

A laborkísérletben anizotrop falazóelemként a korszerű Porotherm 30 N+F gyártmányú terméket vizsgálták. A kísérletsorozat három darab próbatest vizsgálatából állt. Egy elem hosszúsága 250 mm, szélessége 300 mm, magassága pedig 238 mm. A falazóelemre megadott gyártói nyomószilárdság karakterisztikus értéke: 11 N/mm². A téglaelemek kialakítását a 38. ábra mutatja. [7]



38. ábra: Leiertherm 30 N+F falazóelem

b) A kísérletsorozat bemutatása

A kísérletsorozat az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok (OTKA) pályázata segítségével jöhetett létre. Az NKFI-K124859 sorszámú futó projekten dolgozó szakemberek a falazott, húzószilárdság nélküli szerkezetek mechanikáját vizsgálják. A kutatás igen sokrétű, többek közt boltozatok és egyedi téglaelemek viselkedését is vizsgálják. A kísérletsorozat jelenleg nagyon kezdeti fázisban van, az adatok kiértékelése, publikálása sem történt még meg.

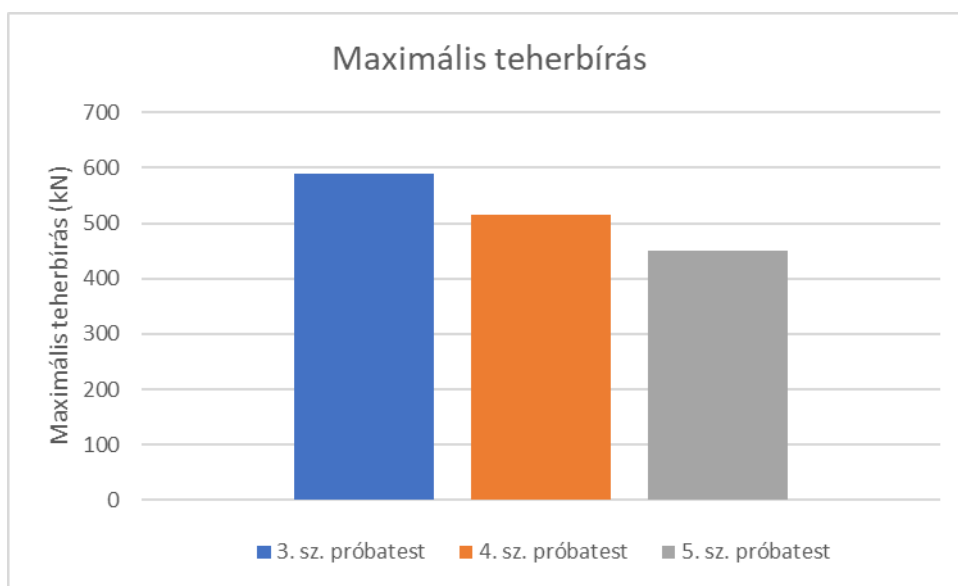
A kísérletek közül a saját témámat érintőbe, a lyukacsos falazóelemek vizsgálatába tekinthettem bele. A laborkísérletsorozat részeként három darab Porotherm 30 N+F típusú terméket terheltek egyirányú nyomással (a bordaírányal párhuzamosan, ahogyan a saját kísérletemben is) tönkremenetelig. A próbatestek alá és fölé kb. 0.8-1 cm vastag habarcsréteg került. A terhelőberendezés vége egy kb. 60 cm x 60 cm oldalhosszúságú, négyzet alakú acélelem volt, melynek négy sarkába helyezték el az elmozdulásmérőket. A kísérleti elrendezést a 39. ábrán lehet megtekinteni. Ezeknek a nyers adatait kaptam meg, és végeztem el azok kiértékelését, majd azt követően a numerikus modellezését is. A habarcs anyagjellemzőit sajnos nem mérték meg a kísérlet elvégzésekor, így a szükséges adatokat mérnöki becsléssel vettem fel.



39. ábra: Kísérleti elrendezés

c) A kísérleti eredmények

A három rendelkezésre álló mérési eredményben jóval kisebb szórás mutatkozott, mint az általam elvégzett próbatestek esetében. A 3-as jelű próbatestnél közel 600 kN-os maximális teherbírás adódott, az 5-ös esetében 450 kN nagyságú erőt mért a berendezés, míg a 4-es esetében a két előbbi érték közötti 515 kN erő következtében ment tönkre a téglaelem. Az eltérő eredmények a próbatestek különféle tönkremeneteli módjából adódtak, ugyanis volt olyan eset, ahol a terhelőberendezés felső nyomólapja elferdült, így kisebb lett az adott téglateherbírása. Ez később az elmozdulási értékekből alátámasztást is fog nyerni. A maximális teherbírasi értékeket a 40. ábra mutatja.

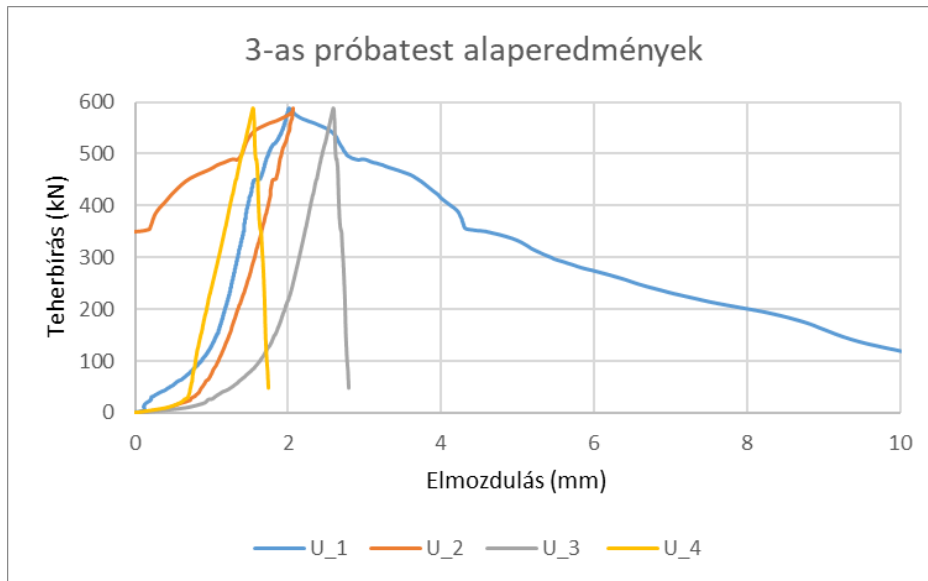


40. ábra: Maximális teherbírás értékei

Ahogy korábban említésre került, a terhelőberendezésre négy-négy darab elmozdulásmérő került a próbatest négy sarkára. Ezek minden esetben nagy mértékben tértek el egymáshoz képest, így a kiértékelésüket részletesen mutatom be az alábbiakban.

i. 3-as jelű próbatest

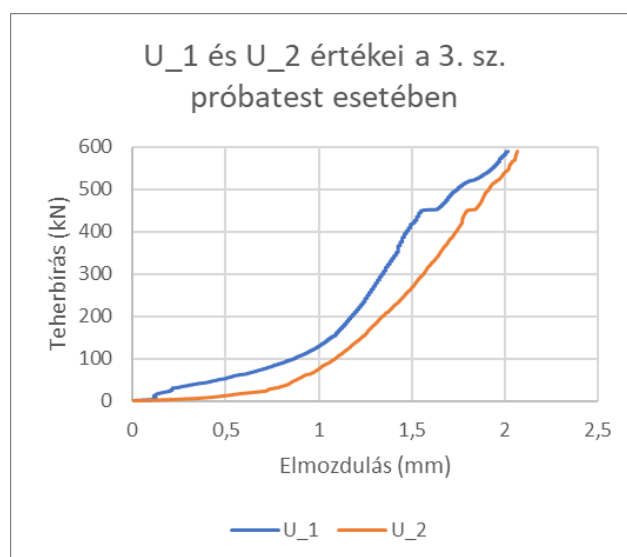
A nyers eredményeket a 41. ábra mutatja. Megfigyelhető, hogy két-két (U_1 és U_2, illetve U_3 és U_4) mérés nagyon hasonló eredményeket mutat, csupán kismértékben térnek el egymástól, a meredekségük és a lefutásuk ugyanaz, de valamelyest eltolódtak egymástól.



41. ábra: 3-as számú próbatest nyers eredményei

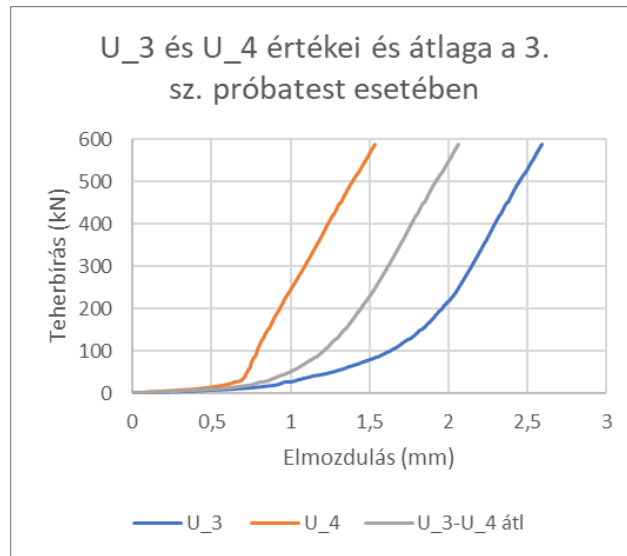
Feltételezhető, hogy az előbb említett mérőpárok (U_1 és U_2, illetve U_3 és U_4) egymással szemben lévő mérőberendezésekből származnak, így külön kell őket kezelni, kiértékelni.

Az U_1 és U_2 grafikonja között minimális az eltérés, így ott nem játszottam közre a mérőberendezések hibája, hanem a terhelőberendezés kezdeti állása dőlt meg a tönkremenetel miatt. A maximális teherbírás elérésekor az értékek ellentétes irányba csökkennek. Mivel nem tapasztalható a közel 600 kN-os teherbírás után többletteherbírás, így a leszálló ágakat nem vettem figyelembe. (42. ábra)



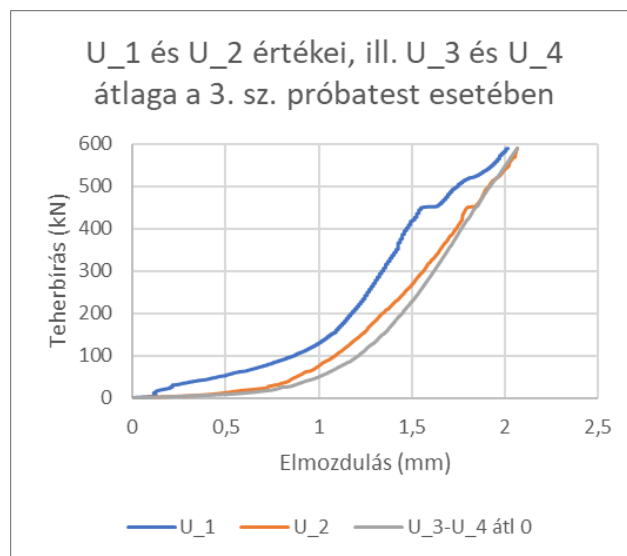
42. ábra: 3-as számú próbatest U_1 és U_2 mérései

A másik páros, az U_3 és U_4 grafikonja között komoly eltérés figyelhető meg, nemcsak abban, hogy a grafikonok egymáshoz képest eltolódtak, hanem egy ponton látványosan megváltozik a meredeksége a két görbének, utána pedig újra megegyezik. A téglá anyaghibái miatt feltételezhető, hogy az elem aszimmetrikus viselkedést mutatott a terhelés közben. Ha átlagoljuk a két értéket, megkaphatjuk a középső elmozdulás reális értékét. A tönkremenetel rideg, így annak ábrázolásától ismét eltekintettem. A nyers adatok az U_3, U_4 esetében és azok átlagát a 43. ábra mutatja.



43. ábra: 3-as számú próbatest U_3 és U_4 mérései, illetve azok átlaga

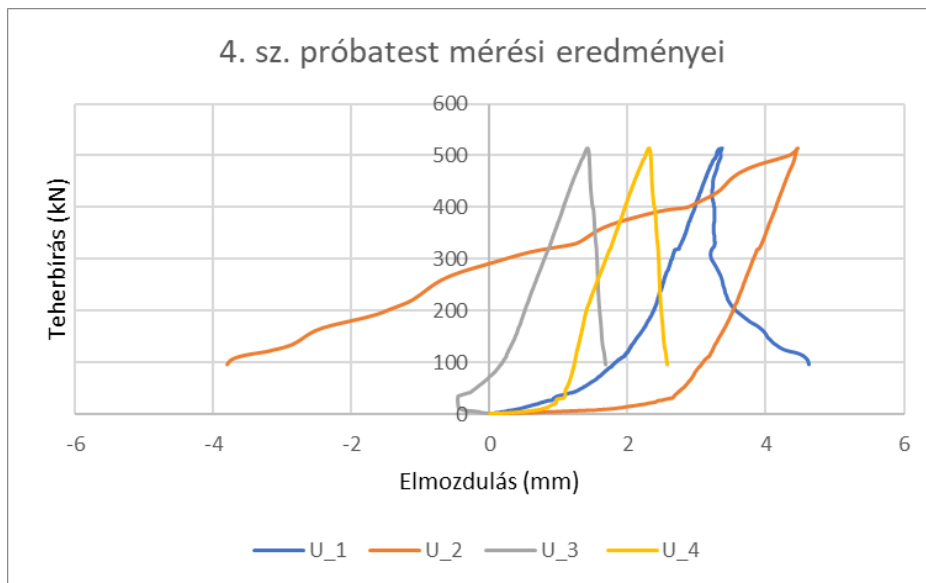
Ha az átlagot ábrázolom az U_1 és U_2 mérésekkel, látható, hogy a gondolatmenet helytálló, illeszkedik az átlag az előbb részletezett eredményekhez. (lásd a 44. ábrán)



44. ábra: 3-as számú próbatest U_1 és U_2 mérései, illetve az U_3 és U_4 átlaga

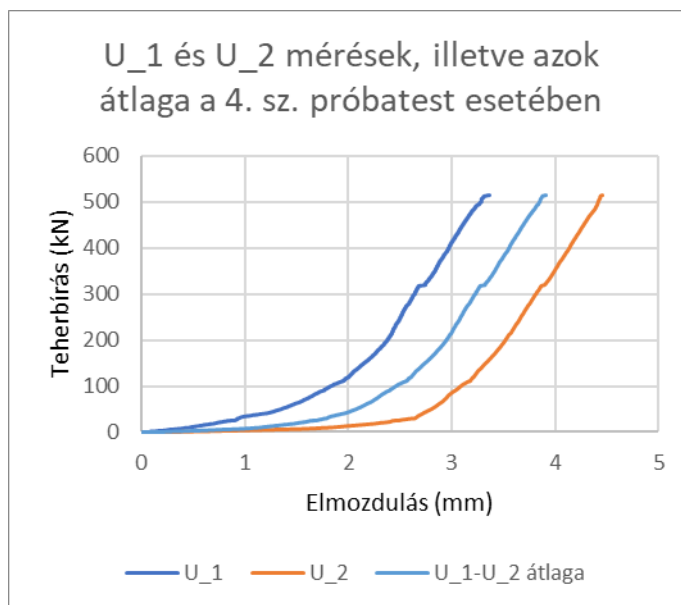
ii. 4-es jelű próbatétel

A 4. számú próbatesten mért eredmények teljesen eltérnek egymástól. Meredekségük ugyanakkor szinte megegyezik minden esetben. Megfigyelhető, hogy az U_3-as eredményeknél negatív tartományban indul a grafikon. Ez a mérőberendezés nem megfelelő adatérzékeléséből származott. A mérés elrendezésekor valószínűleg ugyanazt a mintát követték, amit a 3-as jelűnél feltételeztem, így az eredmények elemzésénél ugyanúgy teszek. A nyers eredmények a 45. ábrán találhatók.



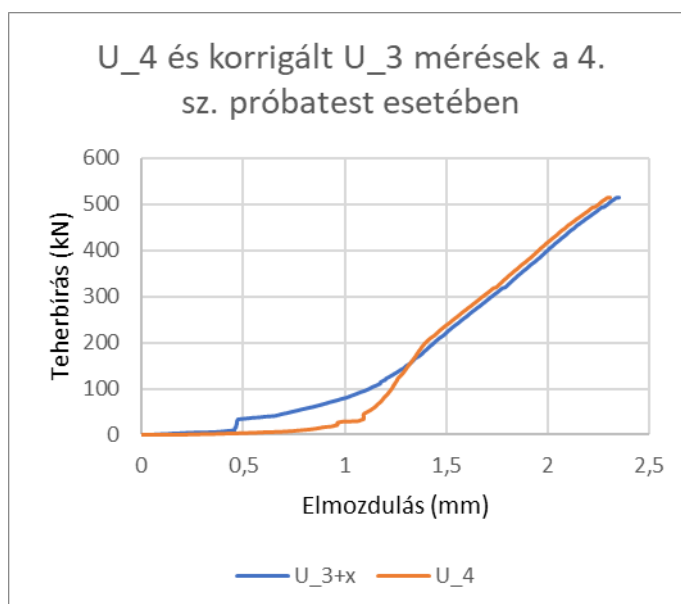
45. ábra: 4-es számú próbatétel nyers eredményei

Az U_1 és U_2 mérések meredeksége megegyezik, ahogy korábban is, csak egymáshoz képest eltolt lefutást mutatnak. Ez azt feltételezi, hogy a terhelésekor a téglaelem aszimmetrikus viselkedést mutatott a terhelés közben, melyet a távol lévő mérési pontok felnagyítottak. A numerikus modell szimmetriája miatt nem várható ilyen megdőlés az elemen. Mindezek miatt a két érték átlaga várható a numerikus számításban. Az átlagolással megbecsülhető a mérési pontok által kijelölt síkon az átlagos elmozdulás értéke, mely összehasonlítható a számítógéppel kiszámított adatokkal. Az átlagolás és az U_1, U_2 mérési eredmények a 46. ábrán találhatók.



46. ábra: 4-es számú próbatest U₁ és U₂ mérései, illetve azok átlaga

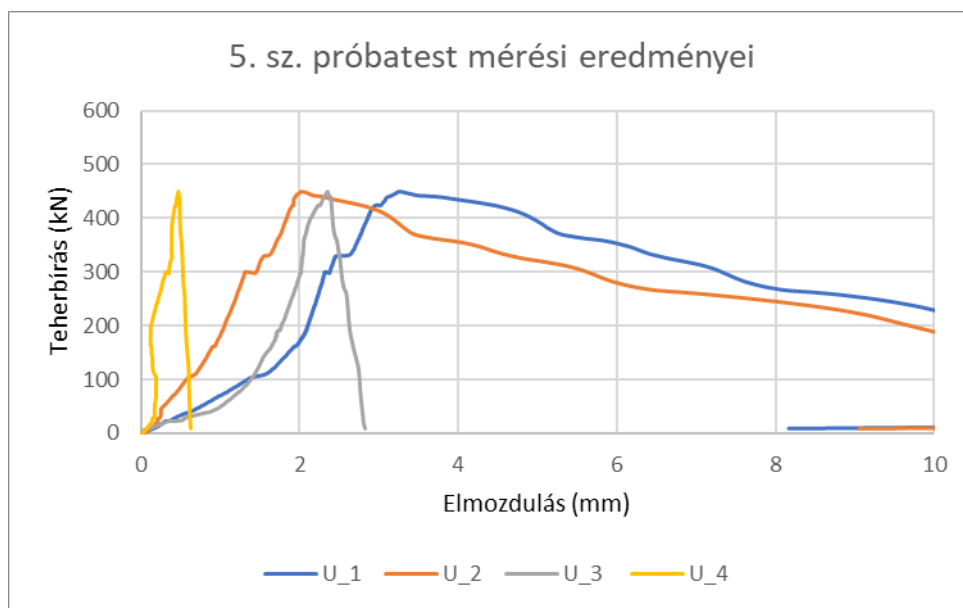
Az U₃ és U₄ mérések grafikonjának meredeksége szintén megegyezik, és ismételtlen egymáshoz képest eltolva helyezkednek el. Az előbbi adatpárostól eltérően nem használható az átlagolás módszere, hiszen az U₃-as esetén negatív irányba indul el a görbe, mely egyértelműen a mérőberendezés pontatlanságát mutatja. Ha a kezdeti negatív irányba történő elindulást a helyes irányra módosítjuk, akkor az U₄-es méréshez tartó eredményt kapunk. E két görbét a 47. ábrán jeleníttem meg.



47. ábra: 4-es számú próbatest U₄ és korrigált U₃ mérései

iii. 5-ös jelű próbatest

Az 5-ös próbatesten két különböző típusú görbe-karakterisztika jelenik meg. Az előzőkkel megegyezve az U_1 és az U_2 mérési eredmények, illetve az U_3 és U_4 esetek hasonlítanak egymásra. Az egyik esetben (U_1-U_2) szinte megegyeznek a meredekségek, csupán egymáshoz képest eltolódtak, míg a másikonál (U_3-U_4) a görbe alaki tulajdonságai hasonlóak, ugyanakkor nagy különbség figyelhető meg a meredekségben. Utóbbi eltérést eredményezheti az egyik mérőberendezésben keletkező ismeretlen hiba, melyet nem lehet a mérés közben kiszűrni. A hibát az eredmények értékelésekor kell kiküszöbölni. A kapott nyers mérési eredményeket a 48. ábra mutatja.



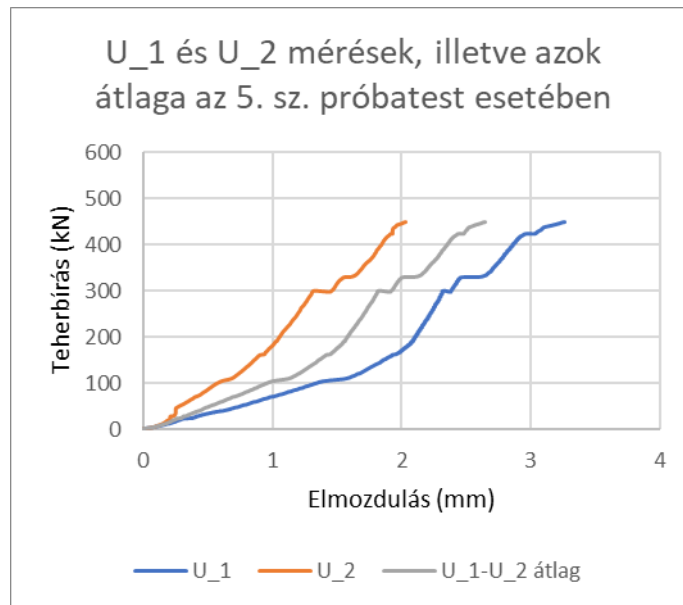
48. ábra: 5-ös számú próbatest nyers eredményei

Az U_1 és U_2 mérési eredmények közti különbséget a téglatest nem egyenlő tönkremenetele okozta, hiszen a grafikonok alakja, végső, a helyezkedés utáni meredekségük azonos. Átlaguk megadja, hogy mennyi lehetett átlagosan egy abba a sík eső elem elmozdulása adott terhelésnél. Az átlagot felrajzolva az eredeti értékekkel együtt a 49. ábrán láthatjuk.

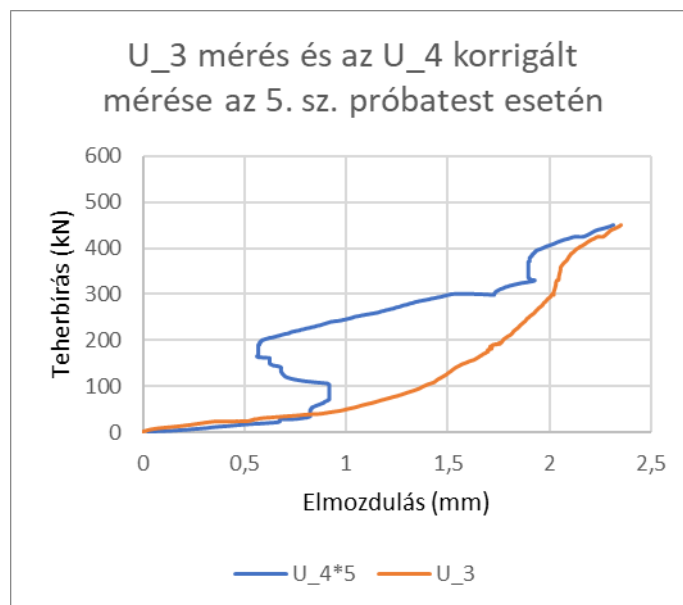
Az U_3 és U_4 esetében kapott értékek - ahogy korábban említettem - igen hasonló lefutást mutatnak. Az U_3-as mérés esetében a viselkedés és az értékek nagyon hasonlítanak az eddig tapasztalt görbékkel, így az U_4-es számú mérést kell felülvizsgálni. Jól látszik az 50. ábrán, hogy a korrigált mérési eredmények jobban hasonlítanak egymáshoz az alsó, kezdeti szakaszon, illetve a végső, tönkremenetelhez közeli oldalán. A közbenső szakaszon viszont nagy eltérés mutatkozik, ami az elmozdulásmérő nem megfelelően közölte az adatokat. Előfordulhat, hogy

a ragasztás csúszott meg, de az is, hogy a mérőberendezés megszorult, így hibás adatokat továbbított az eredményfeldolgozó szoftvernek. Mindezek miatt az U_4-es mérést ki kell zárni az eredmények értékeléséből, csak az U_3-as mérést lehet figyelembe venni.

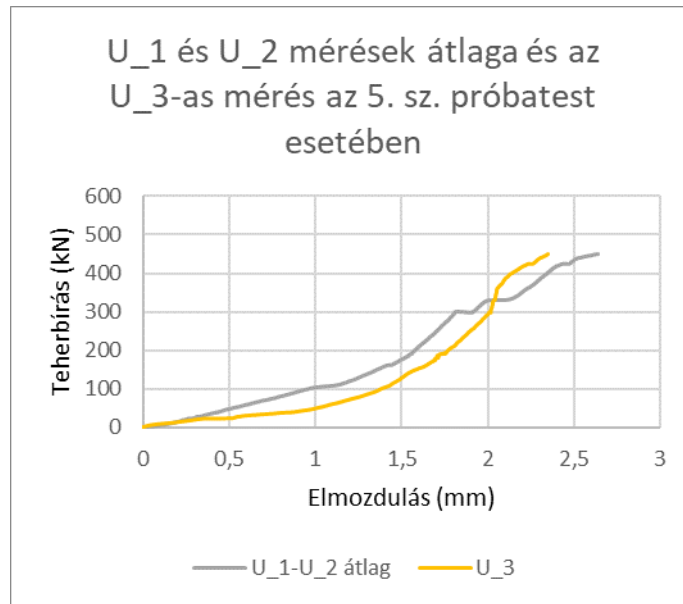
Az U_3-as, illetve az U_1-es és U_2-es mérés átlagából kapott grafikont egyesítve az 51. ábrán található.



49. ábra: 5-ös számú próbatest U_1 és U_2 mérései, illetve azok átlaga

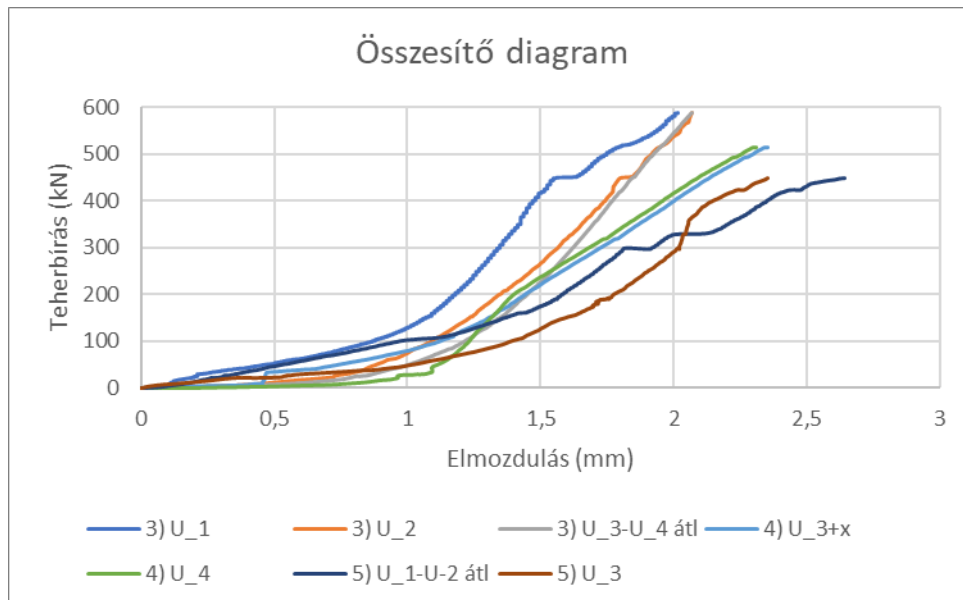


50. ábra: 5-ös számú próbatest U_3-as mérése, illetve U_4 korigált verziója



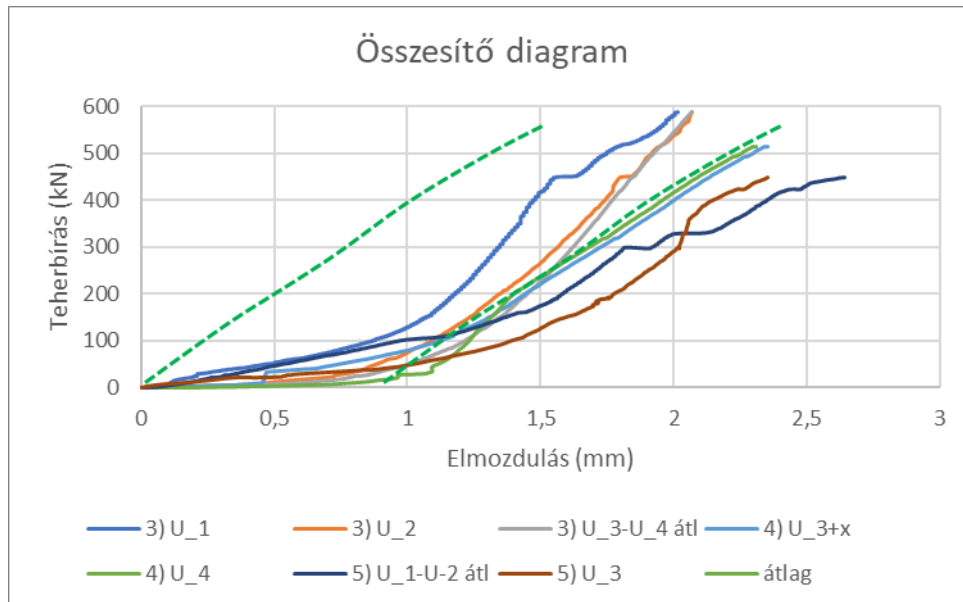
51. ábra: 5-ös számú próbatest U₁ és U₂ mérések átlaga, illetve az U₃-as mérés

Az eddig részletezett diagramokat az alábbi, 52. ábrán összesítettem. Megfigyelhető, hogy kezdetben lágy viselkedést mutat az elrendezés, majd kb. 1 mm-es elmozdulásnál felkeményedik a rendszer. Ez a kezdeti viselkedés az elrendezés helyezkedéséből adódik, a nyomólap téglára való érkezését, a gömbcsukló habarcsolt felületre fordulását mutatja. Szükséges lett volna egy tehermentesítés kb. 100 kN nagyságú erőnél, és az újratelhelés görbéje lehetett volna a kiindulási pont. Így az összesítő diagramot is korrigálni kell.



52. ábra: Összesítő diagram a kapott laboratóriumi mérésekből

Ha a felkeményedett szakaszra egy átlagot számolok és ezt a görbét a grafikon origójába eltolom (az 53. ábrán zöld szaggatott vonal jelzi), azzal az elmaradt tehermentesítést kiküszöbölhetem. Így később a numerikus modell esetében az abban kapott eredményt sokkal pontosabban fogja tükrözni, hiszen abban nem lép fel ilyen probléma, mint a kísérletkor. Az összehasonlításához használt diagram tehát az alábbi, 53. ábrán látható.



53. ábra: Összesítő diagram a kapott laboratóriumi mérésekből és az átlag ábrázolása, betolása origóba

Összességében elmondható, hogy a kapott kísérletek konzisztensebbnek mondhatók, mint az általam végzett kísérletsorozat, illetve már három próbatest esetén is nagyobb részletességű adatok állnak rendelkezésemre. Mindezek miatt a numerikus vizsgálatot a kapott kísérleti elrendezésben is végrehajtottam és azok eredményeivel hasonlítom össze.

A tönkremenetel, ahogy a saját kísérletem során is, hangos pattogással jelentkezett. Itt is megfigyelhető volt, hogy kívülről függőleges repedések jelentek meg. A függőleges repedések a minta külső felén az 54. ábrán láthatók. Amint a külső felület nem bírta a rá terhelő erőt, a téglát teljesen tönkrement, nem bírta el nagyobb terhet. Amint megtörtént a tehermentesítés, azonnal szembetűnő volt, hogy amíg a próbatest látszólag kívülről ép volt (a függőleges repedésektől eltekintve), addig a belső szerkezet darabokra tört. A tönkremeneteli jelenség is egyezik a saját tapasztalataimmal. Az összetöredezett belső szerkezet az 55. ábrán látható.



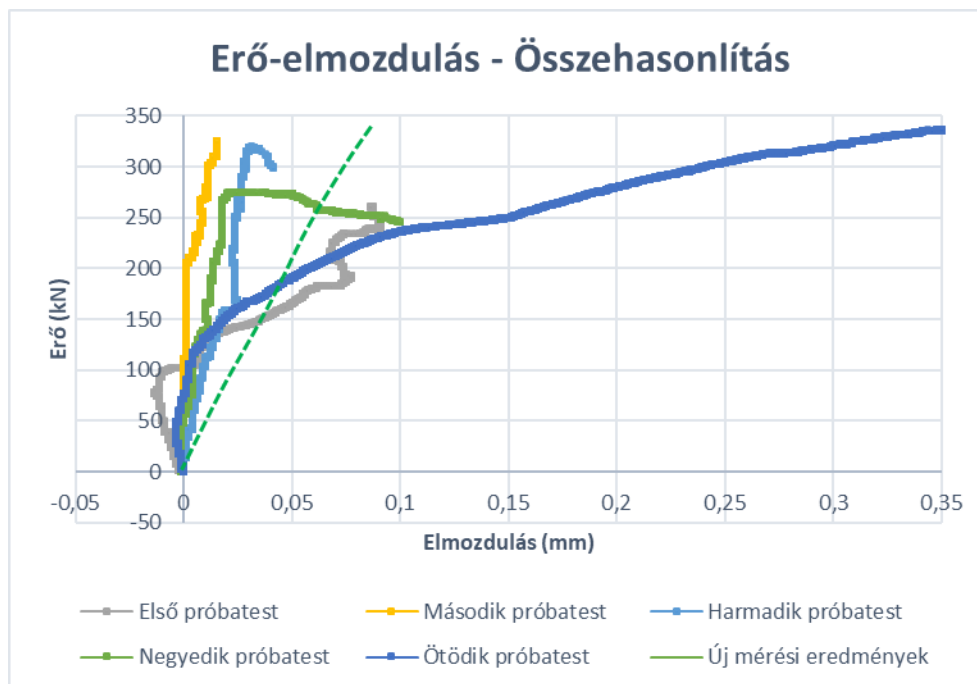
54. ábra: A külső függőleges repedés az egyik falazóelemen



55. ábra: A belső szerkezet tönkremenetele

iv. *A két laborkísérlet eredményeinek összehasonlítása*

Ha összevetem a kapott mérés nyers, korrigált és átlagolt eredményeit a saját laborkísérletben kapott erő-elmozdulás diagramokkal, akkor szembetűnő különbségek fedezhetők fel. Először is észrevehető, hogy a mások által végzett kísérlet görbéjének meredeksége kisebb, mint az általam mért adatok esetében. Ezt az eltérést okozhatja a kísérleti elrendezések közötti különbség, ugyanis a habarcsrétegben nagyobb a felső és az alsó sík befogása, kevésbé képes alakváltozásra, ami a téglatestek teherbírására és viselkedésére is kihatással van. Ugyancsak látványos, hogy nem alakult ki képlékenyedő szakasz, mely azt támasztja alá, hogy a pályázat keretében történt mérésnél a gömbcsukló jól működött, illetve a teher ráengedése is egyenletesebb módon történt. A maximális teherbírás értéke is jóval nagyobb, mint a saját mérésnél tapasztalt erők nagy részénél. Érdekes különbség azonban, hogy az általam elvégzett kísérletben azonnal kimutatható a teherbírás, míg a projekténél kezdetben nagy alakváltozások voltak megfigyelhetőek. Ez a jelenség szintén a kísérleti elrendezésnek köszönhető, hiszen a farostlemezek jóval kisebb merevsége a habarcsához képest kevesebb elrendezésből származtatható helyzetkedést okozott a csukló esetében, az hamarabb ráfordult a falazóelem felső síkjára. Az összehasonlító grafikon az 56. ábrán látható.



56. ábra: A két kísérletsorozat összehasonlítása

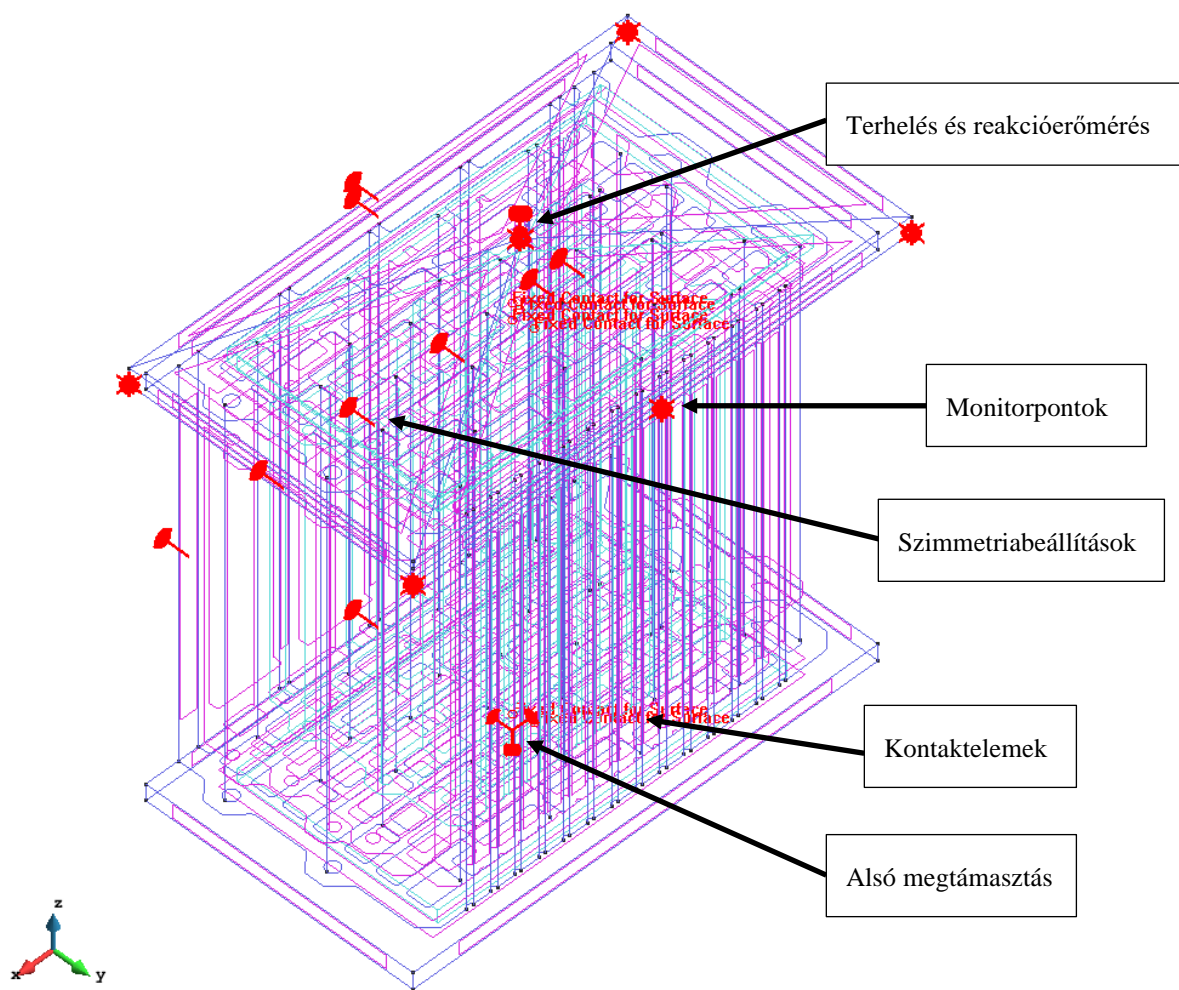
7. A pályázati kísérlethez készített numerikus modell

a) A modell

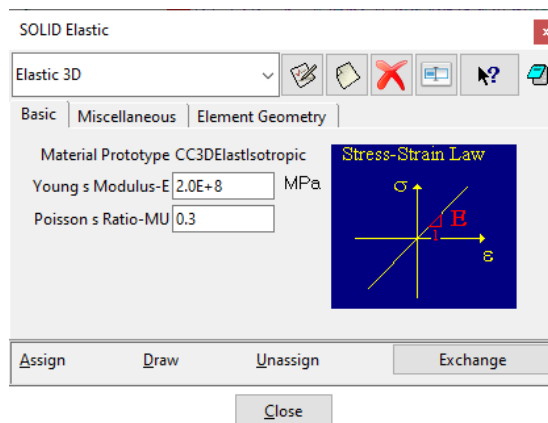
Az előbbi részletes kísérlethez hasonlóan a mostani esetben is egy „fél téglát” modelleztem, hiszen az eredeti falazóelem szimmetria adottságait kihasználtam. A modell felépítése a laborkísérletet mintázza: a próbatest alá és fölé egy-egy 1 cm vastag habarcsréteg került definiálásra. A felső rétegre egy acél elem került, melynek alsó része téglatest alakú, a felső pedig egy téglalap alakú gúla. Az elrendezés az 57. ábrán látható. Ez az acélelem azért került elhelyezésre, hogy a modell elmozdulásvezérelt lehessen. Így tehát a modellre függőlegesen lefelé (azaz -z irányba) összesen 2,5 mm elmozdulást helyeztem 25 lépésben, tehát lépésenként 0,1 mm került működtetésre.

A modell megfelelő oldalán a szimmetria feltételek definiálva lettek, az alsó habarcs alsó síkjára pedig felületi, minden irányban (x, y, z) megtámasztott támasz került. A különböző anyagrétegek (két esetben habarcs-tégla és egy esetben habarcs-acél) közé kontaktelemek kerültek definiálásra. A végelemek a korábbiakhoz hasonlóan tetraéderekből épült fel, melyek 4 mm nagyságú oldalélekkel rendelkeznek. Azért volt szükség ebben az esetben a nagyobb elemmérettel elvégezni a számítást, mert így is minimum 24 órás futtatási idővel kellett számolni. Elmozdulást figyelő monitorpontokat is elhelyeztem, a laborkísérletnek megfelelően az acél elem sarkaiba, valamint az oldalak felezőpontjaiba is egyet-egyét.

Az acél elem esetében a program által lineárisan rugalmas anyagokra definiálható „SOLID Elastic” nevű anyagmodellt használtam. A kezdeti rugalmassági modulus értékét megnöveltem $2E+8$ MPa értékűre, hogy annak az alakváltozása ne befolyásolhassa tégla, illetve a habarcsrétegek tönkremenetelét, így modellezve minél jobban a valódi laboratóriumi kísérleteket. A beállítások az 58. ábrán tekinthetők meg.



57. ábra: A numerikus kísérlet kialakítása

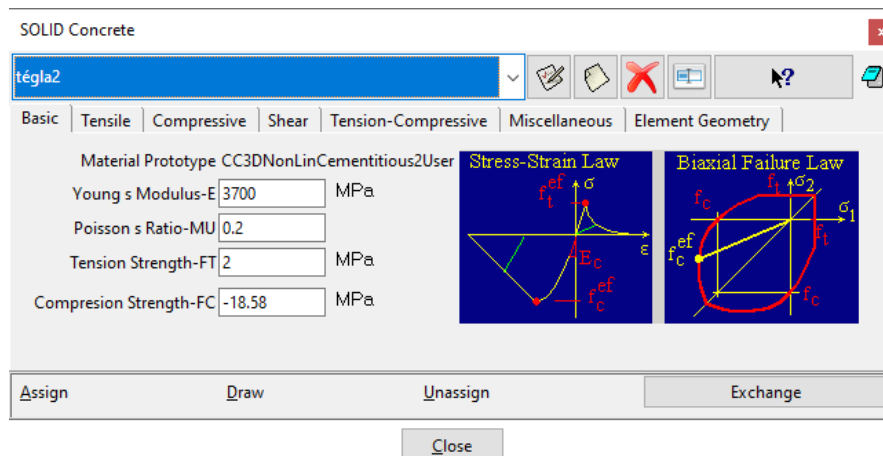


58. ábra: Acél anyagmodell

A kerámia, illetve a habarcs anyagmodelljeként is a korábban használt „3D Nonlinear Cementitious 2” betonokra kifejlesztett, kerámiákra ajánlott modelljét használtam kiindulásul. Az anyagok kezdőértékeihez (rugalmassági modulus, nyomószilárdság, illetve Poisson-tényező) Fódi Anita PhD disszertációjában mért adatokat vettem fel, hiszen ahogyan korábban említettem, semmilyen adat nem áll rendelkezésre a habarccsal kapcsolatban. [8] Kerámiák esetében a gyártók nagyon hiányos műszaki adatlapot rendelnek a falazótermékeikhez. [4][5] Mindezek fényében egy kezdeti értékekkel ellátott modell után további anyagi jellemzőkkel is elvégeztem a számításokat, melyből lehet következtetni egyes változtatások milyen befolyással vannak a numerikus eredményekre. A pontos összefüggéseket és az érzékenységvizsgálatot jelen dolgozat nem tartalmazza, jövőbeni kutatások témája lesz.

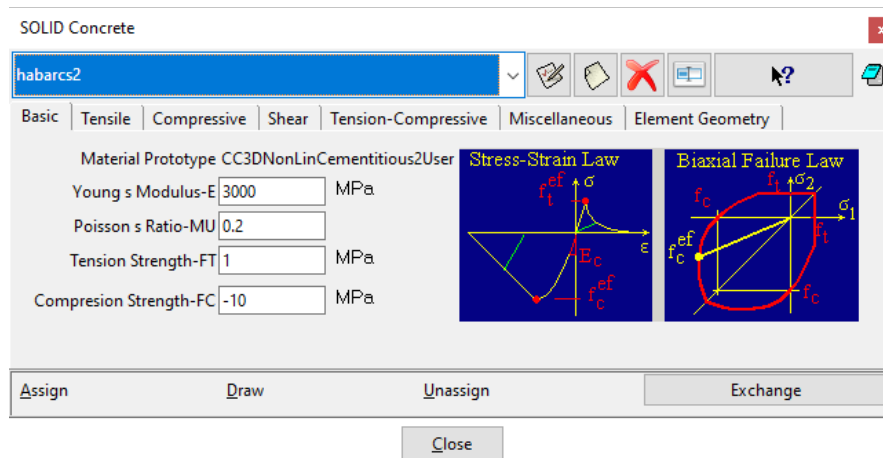
i. A 1. számítás ismertetése és az eredményei

Minden egyes számításnál a modell kialakítása, terhelése, hálózása, a monitorpontok helye és az acél terhelőelem változatlan kialakítású, utóbbinál az anyagmodell is ugyanaz. Mindegyik érték feljebb, a numerikus modell általános ismertetésénél olvasható. Az egyes változatoknál csak a téglá, illetve a habarcs anyagmodelljének nyomó- és húzószilárdságának, illetve rugalmassági modulusuk beállításait változtattam. A kerámiához és a habarcsához használt anyagmodell mindkét esetben a korábbi fejezetekben említett és részletezett 3D Nonlinear Cementitious 2 anyagmodell, ez sem változik a különböző modellek tekintetében. A [8]-as forrás értékei nagyon nagy eltérést mutatnak egymáshoz képest, illetve különböző módszerekkel végzik a kerámiák vizsgálatát. Ezért kezdetben a tömör téglákra vonatkozó vizsgálatuk C típusának A5 nevű mérést vettem fel. A kerámiához használt anyagmodell beállításait az alábbi, 59. ábra mutatja:



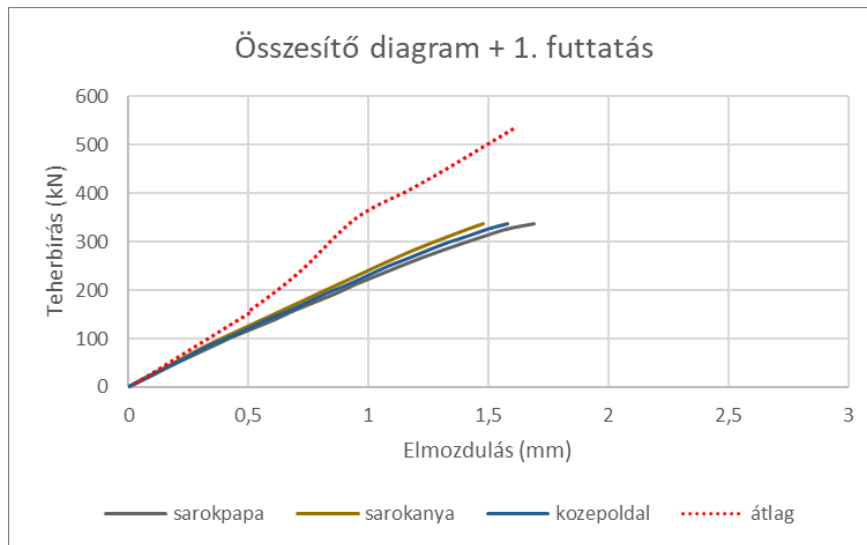
59. ábra: Kerámia anyagmodell beállításai az első számítás esetében

A habarcs esetében kezdetben nem használtam fel a disszertáció értékeit, azt a kapott kísérlet vezetője által javasolt értékekkel láttam el. A habarcsához alkalmazott paramétereket a 60. ábra szemlélteti:



60. ábra: Habarcs anyagmodell beállításai az első számításban

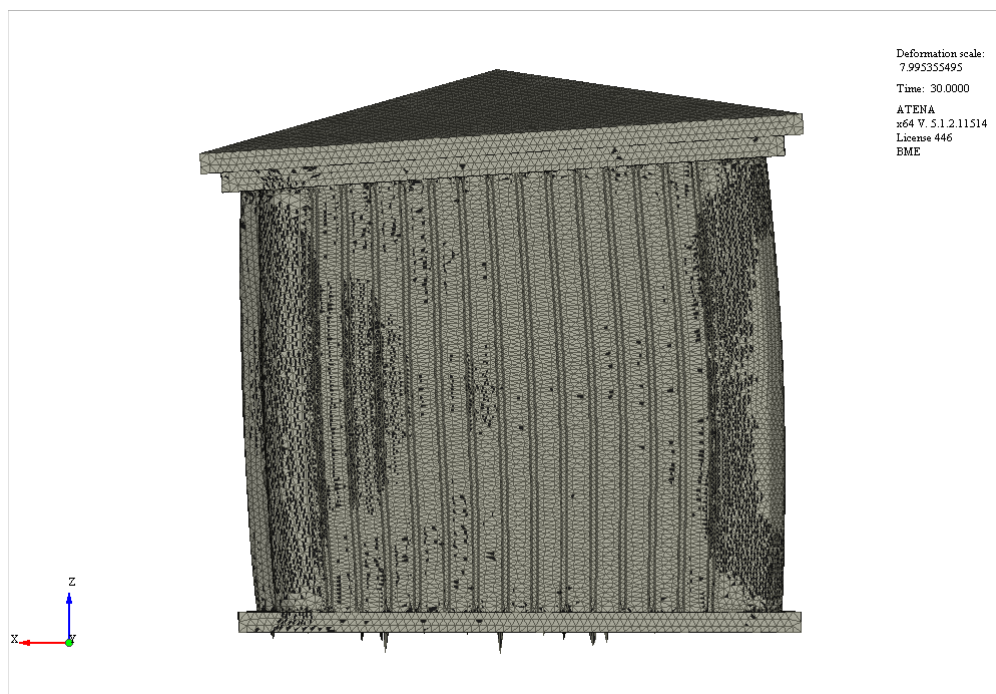
A kapott elmozdulásokat három pontban ismertetem, két sarokpontban és a nem szimmetrikus oldal felezőpontjában. Az eredményeket a 61. ábrán mutatom be:



61. ábra: Az első futtatás eredményei

Az első szembetűnő különbség a mért és számított grafikon között, hogy a numerikus modellnek a maximális teherbírási értéke jóval kisebb, mint a kísérleteknél, illetve a merevsége is csupán a töredéke. Ez azt jelenti, hogy a falazóelem merevségét jóval meg kell emelni, hiszen ez biztosítja a teherbírás legnagyobb részét. Meglepő, hogy ennyivel növelni kell azt, hiszen ahogyan azt már korábban is kiemeltem, a gyártók által biztosított deklarált nyomószilárdsági

érték 11 MPa, jóval kevesebb, mint az általam most beállított 18,58. Nemcsak az anyagjellemzőkben lehet megfigyelni érdekességet, hanem a három monitorpontban mért érték is széttart. Ez a jelenség a tönkremenetelt mutatja be remekül, hiszen a téglá elem egyik oldala nagyobb alakváltozást szenved el, mint a másik, az acél elem pedig el tud csúszni rajta, így modellezve tökéletesen a laborkísérletben tapasztalt viselkedést. Ha a repedéseket is megvizsgáljuk, jól látszik, hogy hosszirányúak és éppen ott jelennek meg nagyon intenzíven, ahol azt a laborkísérletek esetében láthattuk. Felfedezhető, hogy a habarcsrétegekben is repedések jelentek meg, különösen a jobban összenyomódott sarok felett és alatt. Ez szintén megfigyelhető volt a kísérletek során, ahol a habarcs lepattogzását lehetett látni. Az elrendezés végső elmozdulásait és a repedések képeit az alábbi, 62. ábra szemlélteti:

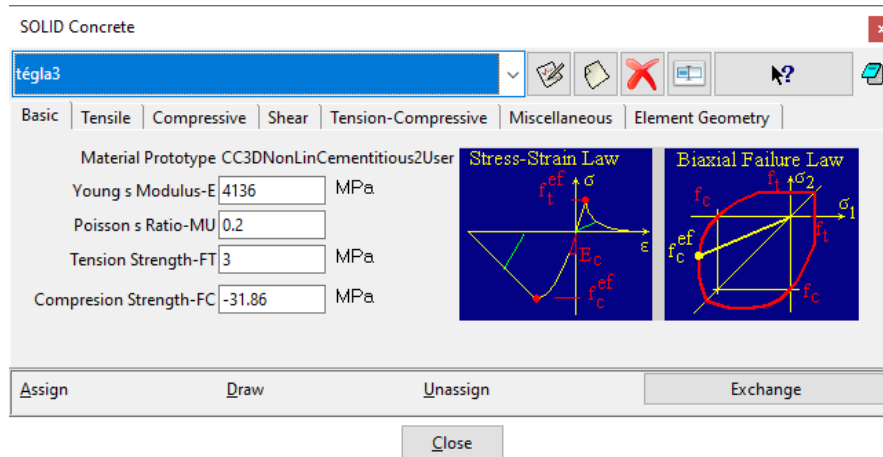


62. ábra: Az 1. modell végső elmozdulásai, repedésképe

Jól látszik, hogy a modell változtatása során mindenképp szükség van a kerámia anyagmodell változtatására, meg kell emelni mind a rugalmassági modulus, mind a szilárdsági értékeket. Kíváncsiságképpen a habarcs értékeit pedig lecsökkentettem, egy másik, a PhD disszertációban mért értékkel futtattam a számítást.

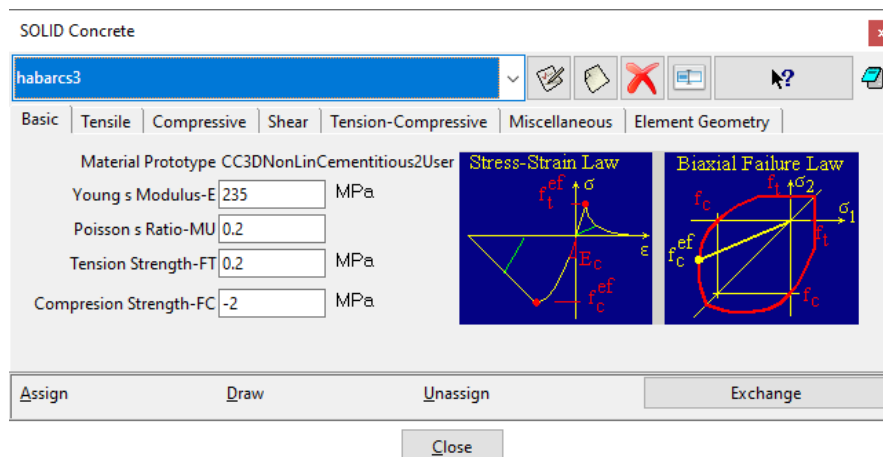
ii. A 2. számítás ismertetése és az eredményei

Tehát a kerámia anyagjellemzőit megemeltem a disszertációban a 2. módszer 3a próbatestből kapott, az alábbi, 63. ábrán jelzett értékekre: [8]



63. ábra: Kerámia anyagmodell beállításai a második számítás esetében

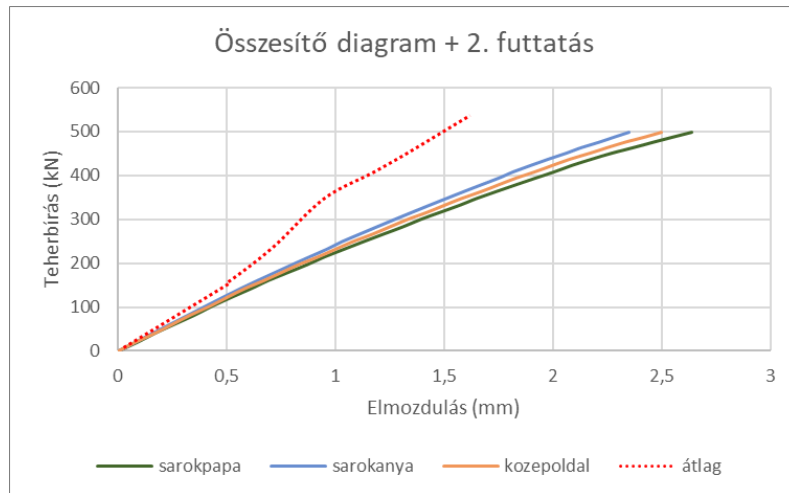
A habarcs anyagmodell értékeit nagyon lecsökkentettem, megnéztem milyen változás következik be ekkor a kísérleti elrendezésben. Földi Aniták a hibrid habarcsra kimért rugalmassági modulusát és egy fiktív, általam felvett szilárdsági értéket használtam együttesen, ahogyan az a 64. ábrán látható.



64. ábra: Habarcs anyagmodell beállításai a második számításban

A kapott erő-elmozdulás értékeket a 65. ábrán tekinthetjük meg. Jól látszik rajta, hogy nőtt a maximális teherbírás, sőt, az anyag tönkre sem ment a ráhelyezett elmozdulás következtében. Ez azt jelenti, hogy a feltételezett kerámia szilárdság túl magas volt, csökkenteni szükséges azt a továbbiakban. Szintén remekül megfigyelhető, hogy az előző számításhoz képest nem nőtt

számottevően a rendszer merevsége. Utóbbi jelenség azzal magyarázható, hogy amíg a téglamodelljében növeltem a rugalmasságot, a habarcs esetében csökkentettem. A számítás további lépéseiben mindkét értéket növelnem kellett, hogy közelebb kerüljek a valósághoz. Újra megfigyelhető a három mérés során keletkező különböző értékek, melyek ismét az aszimmetrikus tönkremenetelt mutatják. A jelenség mindegyik ezt követő mérésben megfigyelhető volt. A későbbiekben csak az oldalközepén mért (átlag)elmozdulást fogom ábrázolni, hiszen ez is megfelelő információértékkel bír.



65. ábra: A második futtatás eredményei

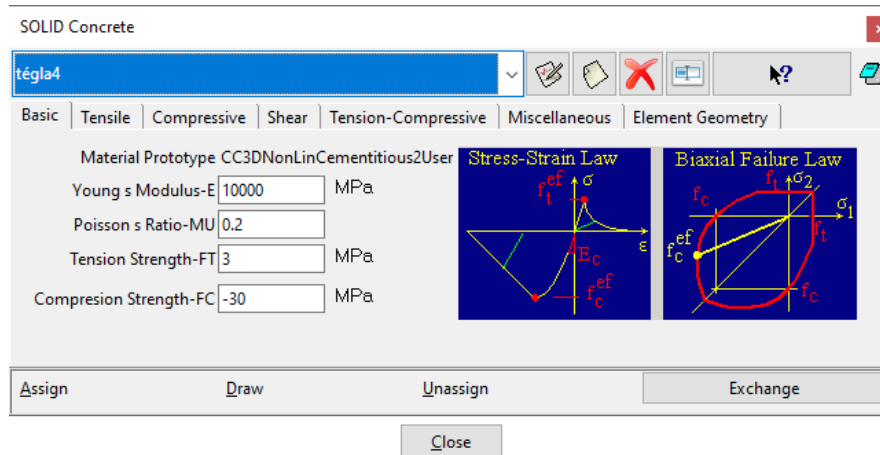
A számítás befejezése után látható, hogy a habarcsrétegek teljesen tönkrementek, repedeztek és a téglasíkjai belefürödtek abba. A téglakülső felén nem tapasztalható nagy tönkremenetel, a belső bordákon azonban már megjelentek a függőleges irányú repedések, ahogyan ezt a 66. ábra mutatja.



66. ábra: A 2. modell végső deformációja, repedéseképe a belső oldalon

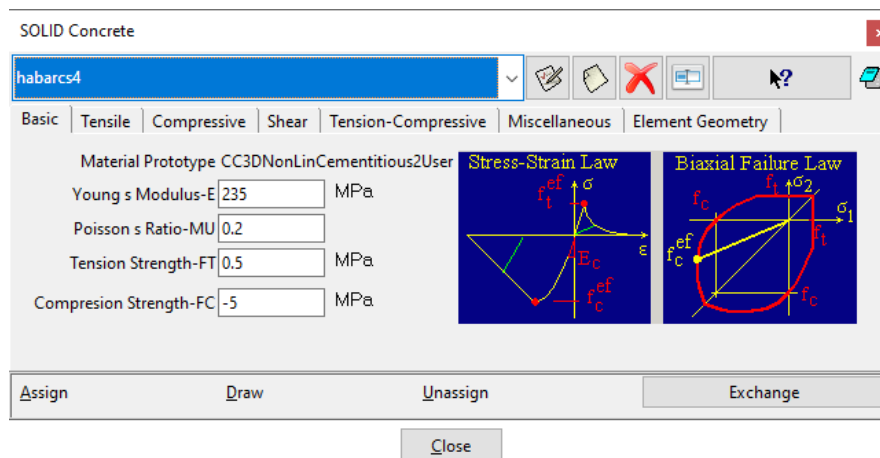
iii. A 3. számítás ismertetése és az eredményei

Ebben a számításban növeltem jóval a kerámia merevségét és csökkentettem valamivel a szilárdságát teljesen fiktív értékekre, ahogyan azt az alábbi 67. ábra mutatja:



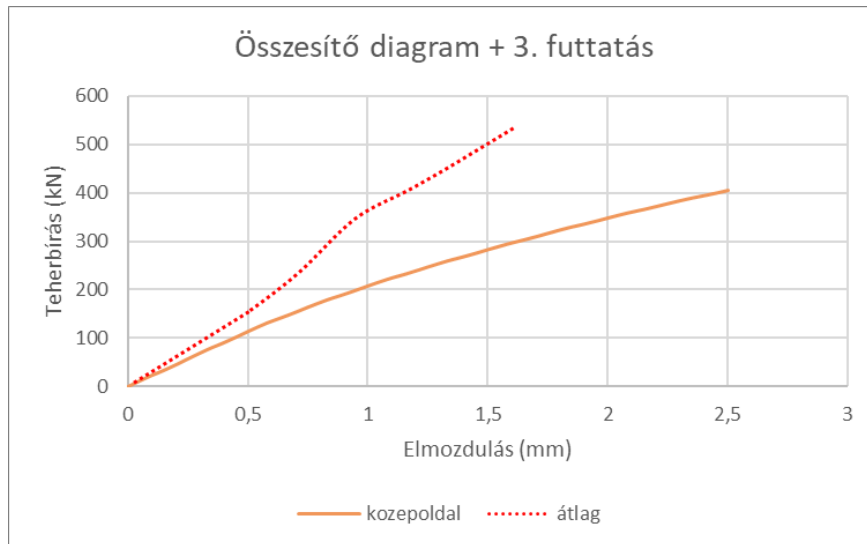
67. ábra: Kerámia anyagmodell beállításai a harmadik számítás esetében

A habarcs esetében a rugalmassági moduluszt változatlanul hagytam, míg a szilárdságát az ahhoz illő, kísérletből kimért értékre írtam át, így kaptam meg a 68. ábra által jelzett értékeket:



68. ábra: Habarcs anyagmodell beállításai a harmadik számításban

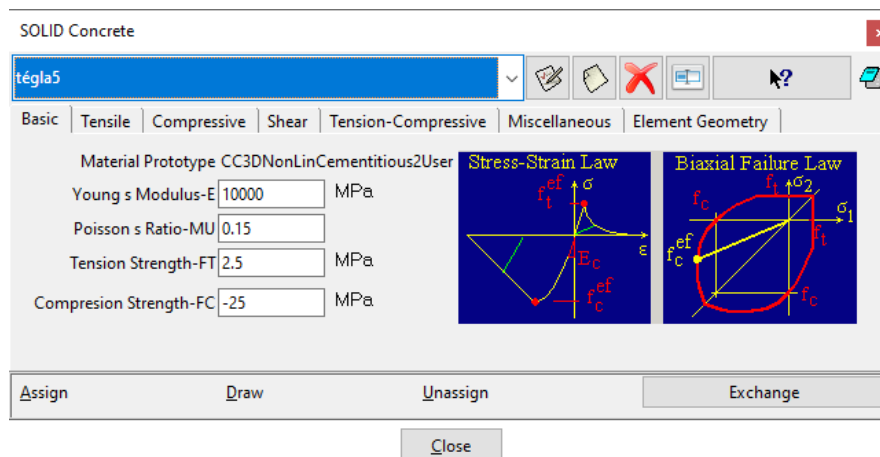
Az erő-elmozdulás grafikonon látható (69. ábra), hogy nemhogy nőtt a merevség, hanem igen nagy mértékben csökkent. A teherbírás is nagy visszaesést mutat. Az ekkora csökkenést egyértelműen a habarcs rossz (gyenge) anyagjellemzői beállításai eredményezték, így a következő számításban azokat mindenképpen növelni szükséges. A tönkremenetel a 3. számítással azonos, a habarcsrétegbe belefűródött a téglá.



69. ábra: A harmadik futtatás eredményei

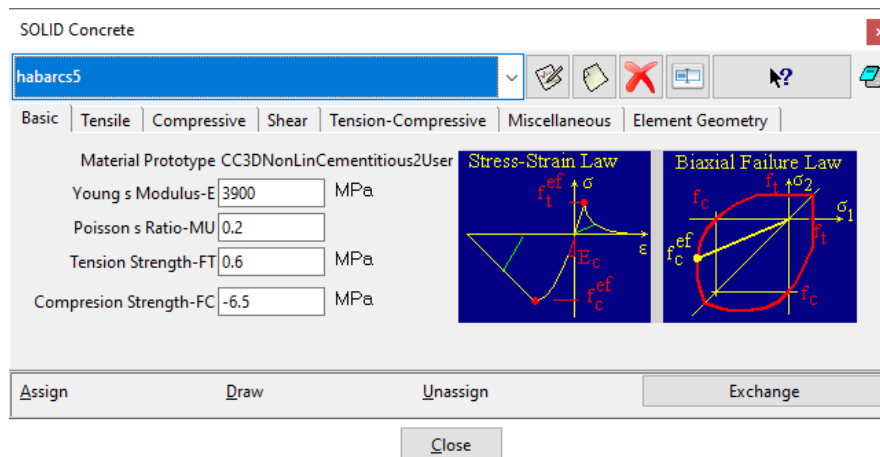
iv. A 4. számítás ismertetése és az eredményei

A téglá rugalmasságát változatlanul hagytam, de a teherbírását csökkentettem a 70. ábra által mutatott értékre:



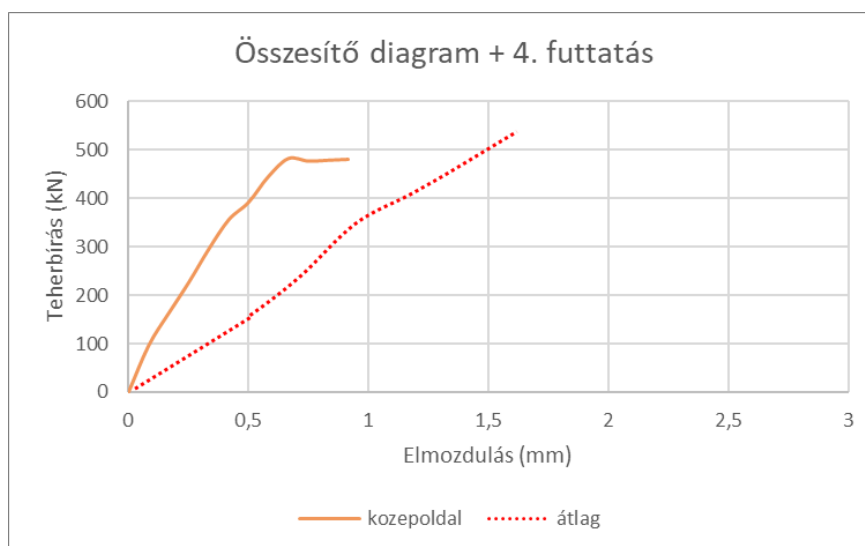
70. ábra: Kerámia anyagmodell beállításai a negyedik számítás esetében

A tégláéval szemben a habarcs anyagmodelljében nagyobb változtatásokat tettem. Többszörösére növeltem a rugalmassági modulusát és megnöveltem valamelyest a szilárdságát. Ettől a falazóelem viselkedésében nagyobb változásokat vártam. A habarcs jellemzőit a 71. ábra szemlélteti.



71. ábra: Habarc5 anyagmodell beállításai a negyedik számításban

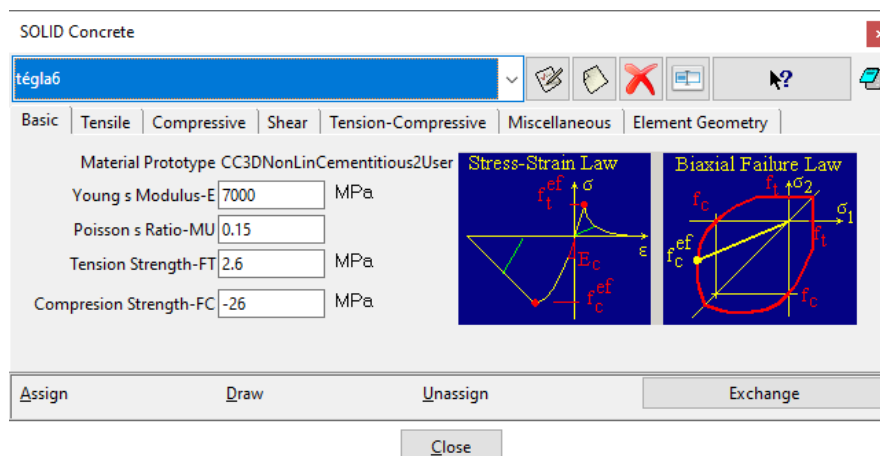
Az eredményekből jól látszik, hogy a rendszer túl merev lett. A teherbírás valamelyest kisebb, mint amennyi a kísérletekben az átlag, így azt növelni szükséges. A számításhoz tartozó erő-elmozdulás diagram a 72. ábrán van.



72. ábra: A negyedik futtatás eredményei

v. Az 5. számítás ismertetése és az eredményei

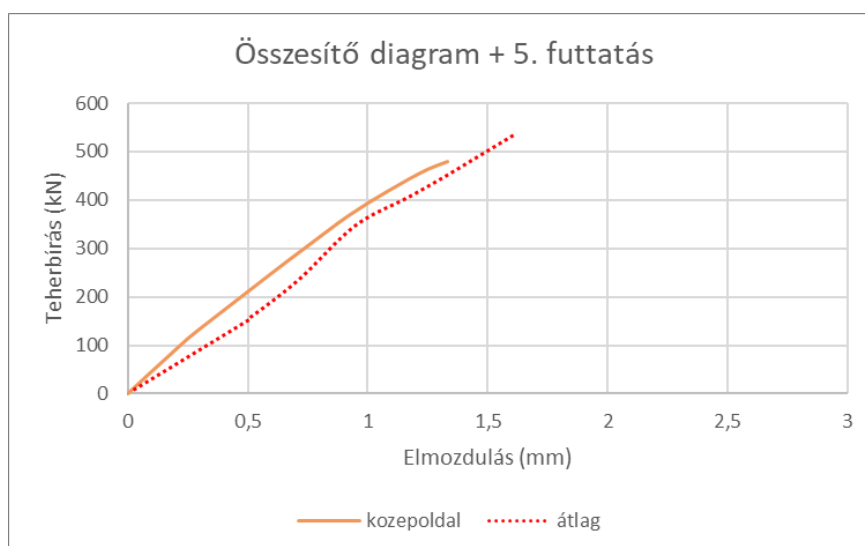
A változtatott értékek csupán a mérnöki becslésre, az előbbieken tapasztaltak alapján kerültek változtatásra. A téglá anyagmodell esetében a rugalmassági modulust az előző mérés 70%-ra módosítottam. A maximális teherbírását viszont csupán 1 MPa-lal növeltem, ahogyan azt a 73. ábra mutatja.



73. ábra: Kerámia anyagmodell beállításai az ötödik számítás esetében

A habarcs értékeit nem változtattam a negyedik számításhoz képest.

Az így kapott futtatás erő-elmozdulás ábrája már nagyon hasonló a kísérlet átlagához viszonyítva. A közel egyező diagramokat a 74. ábrán lehet megtekinteni.

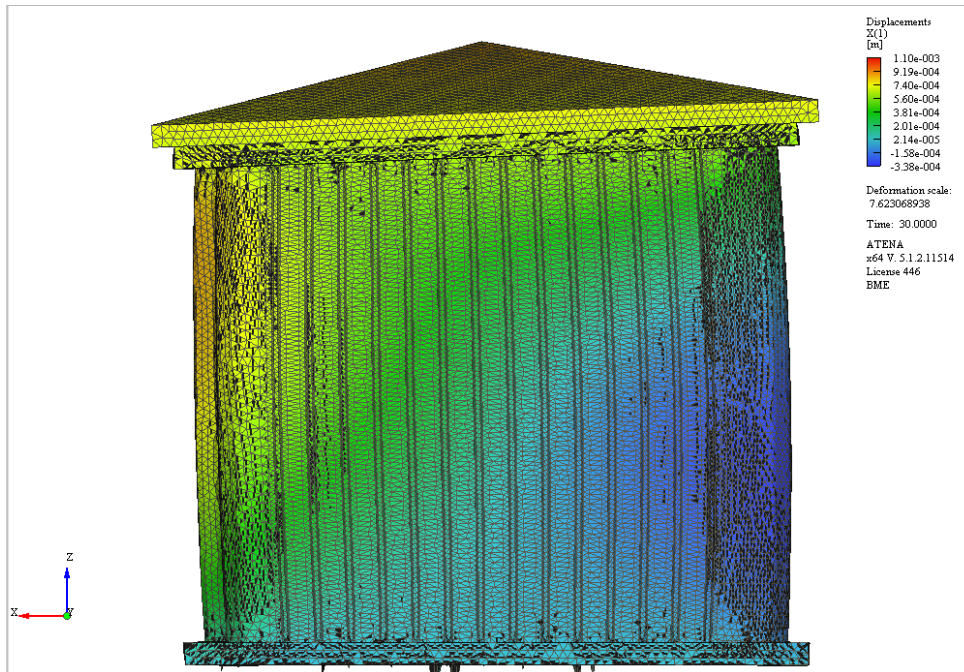


74. ábra: Az ötödik futtatás eredményei

Szükség lenne a rendszer teherbírásának a növelésére, illetve a habarcs anyagjellemzőinek csökkentésére. A rendszer pontosabb viselkedéséhez érzékenységvizsgálatot kell elvégezni, ugyanakkor jelen dolgozat nem tartalmazza ezeket a változtatásokat, ez jövőbeni kutatások során fog megvalósulni.

A végső tönkremenetel esetében, ahogyan ezt minden egyes esetben tapasztaltam, a habarcsrétegek teljes szétrepedezése, illetve a falazóelem sarkaiban fellépő függőleges

töredezettség volt a kiváltó ok. A rendszer, ahogyan minden egyes esetben, aszimmetrikus viselkedést mutatott, az egyik oldalon nagyobb elmozdulásokat tapasztaltam. Ezeket a megfigyeléseket remekül támasztja alá az alábbi, 75. ábra, mely a deformációs és töredezettségi mértéket mutatja az utolsó számítás esetében.



75. ábra: Az ötödik futtatás repedésképe és deformációja

Kijelenthető, hogy a numerikus modell megfelelően tükrözi a laboratóriumi kísérletben tapasztalható viselkedéseket. A lehetőségek száma, melyeket ezen a numerikus modellen el lehet végezni, nagyon sokrétű. Az elképzelhető továbblépési lehetőségek egy részét az ezt követő fejezetben részletezem.

8. Továbblépési lehetőségek

A kapott laborkísérlethez megfelelő numerikus modellt készítettem, melyet a jelen dolgozatban nem elemzett vizuális alapú elmozdulás-méréssel összevetve validálni lehet. Ezt követően a falazóelemeken igen sokrétű vizsgálatok végezhetők el, melyeket az eddigi laborkísérletekkel nem tudunk megtenni. Lehet vizsgálni például a harántirányú viselkedését a téglaelemeknek, valamint azt, hogy a gyártás közben bekövetkező anyaghibák milyen eltérést okozhatnak a viselkedésben.

Igen fontos, hogy az egyes gyártók változataiból ki lehessen választani a leghatékonyabb kialakítást. Egy adott gyártó számára elvégezhető a téglák keresztmetszetének optimalizációja, melyet nemcsak teherbírás szempontjából érdemes vizsgálni, hanem a hőszigetelés hatékonyságával kapcsolatban is.

Lehetőség nyílik a téglák nem megfelelő irányú beépítése során bekövetkező jellemzők vizsgálatára, ugyanis az alkalmazott anyagmodellek esetében bármilyen irányban meg lehet terhelni a kiválasztott falazóelemet.

Nem utolsó sorban vizsgálni lehet teljes falazatok viselkedését is a falazóelemek tulajdonságainak a fényében.

Meg lehet vizsgálni a habarcs téglák lyukaiba való behatolásának hatását is. Megállapíthatóvá válik, hogy növeli-e a merevséget, a teherbírást, hogyan változtatja meg a falazóelem viselkedését terheléssel szemben.

-
- [1] Hortobágyi Tamás (2018), Anizotrop falazóelem numerikus és kísérleti vizsgálata, Tudományos Diákköri Konferencia, Építőmérnöki Kar, Szerkezetépítőmérnöki szekció, Budapest
- [2] Bojtár I. (2015), Mechanikai anyagmodellek, Előadásvázlat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest
- [3] Roszevák Zs. (2015), Előregyártott vasbeton gerendák numerikus és kísérleti vizsgálata, TDK dolgozat, Budapest
- [4] Leiertherm 30 N+F Katalógus, <https://www.leier.hu/downloadmanager/download/nohtml/1/id/1202/>, Letöltés dátuma: 2018.10.26.
- [5] Vladimír Červenka, Libor Jendele és Jan Červenka, 2018, ATENA Program Documentation Part I Theory, https://www.cervenka.cz/assets/files/atena-pdf/ATENA_Theory.pdf, Letöltés dátuma: 2018.10.26.
- [6] VAN MIER J.G.M. (1986), Multi-axial Strain-softening of Concrete, Part I: fracture, Materials and Structures, RILEM, 1986, 19(111).
- [7] Porotherm 30 N+F Műszaki adatlap, https://www.wienerberger.hu/content/dam/wienerberger/hungary/marketing/documents-magazines/technical/technical-product-info-sheet/wall/190901_09_PTH-30-N+F.pdf, Letöltés dátuma: 2019. 10. 15.
- [8] Anita Fódi (2011), EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF REINFORCED AND PLAIN MASONRY WALLS, PhD Dissertation, Budapest