



TDK Dolgozat

Készítette: Bódi Sarolta

Cím: Átszűrődési vasalással szerelt síklemez födémek vizsgálata

Konzulens: Dr. Völgyi István Krisztián

Társ-konzulens: Dr. Hlavicka-Laczák Lili Eszter

2019

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom Dr. Völgyi István Krisztián és Dr. Hlavicka-Laczák Lili Eszter konzulenseimnek támogatásukért és segítőkészségükért, melyet a dolgozatom elkészítése alatt nyújtottak.

A TDK dolgozatot megalapozó kísérletek a Hidak és Szerkezetek Tanszék és az Épszerk Pannónia Invest Kft. segítségével a Vállalati KFI-16 pályázat keretében valósultak meg. Köszönöm, hogy lehetőségem nyílt részt venni benne.

Összefoglalás

Az átszűrődési tönkremenetel egy meghatározó probléma vasbeton födémek tervezésénél. Az évek során több fajta átszűrődési vasalást fejlesztettek ki és alkalmaztak, melyek kiválasztásánál a nyírási teherbírás és duktilitás növelő szerepen kívül figyelembe kell venni a gazdasági és szerelhetőségi szempontokat is.

Dolgozatom témáját a Hidak és Szerkezetek Tanszék egy kutatási témája szolgáltatta. A fejlesztési projekt a monolit vasbeton födémek oszlop-lemez kapcsolatának kialakítására- és a monolit vasbeton lemezek átszűrődési vasalásának továbbfejlesztésére irányul. A cél új szerkezeti megoldások létrehozása. A teljes fejlesztési projekt 4 részfeladatra osztott, és én egy köztes részfeladatba kapcsolódhattam be.

A fejlesztési projekt első részfeladatában új típusú átszűrődési csapokat hoztak létre, melyeket a kísérletek során vizsgáltunk a beton próbatestekben. Az így kapott eredményeket fogom összevetni a kengyelsoros átszűrődési vasalással készült próbatestek, illetve a kovácsolt fejű csapos próbatestek eredményeivel.

A dolgozatomban továbbá célozom ATENA nem lineáris végeeselemes programmal is modellezni a próbatesteket és vizsgálni az átszűrődési jelenséget, majd az így kapott eredményeket is összevetni a kísérleti eredményekkel.

Summary

Punching shear failure is a major problem encountered in the design of reinforced concrete flat slabs. The utilization of shear reinforcement via shear studs or other means has become a choice for improving the punching shear capacity and ductility. Furthermore economic and installation aspects are also important.

This study is a part of an development project at the Department of Structural Engineering. The purpose of this research is to create more economical punching reinforcement for concrete slabs. The whole development project consists 4 parts and I was able to join in an intermediate part.

In the first part a new type of shear reinforcement was developed and tested. The test results of the different types of shear reinforced slabs were compared.

Furthermore my purpose is to create a numerical model in the software ATENA. I will compare the numerical results to the test results.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	- 6 -
1.1. A kutatás célja	- 6 -
1.2. Az átszűrődés definíciója.....	- 6 -
1.3. Az átszűrődés mechanizmusa	- 7 -
1.4. Átszűrődési vasalás típusok.....	- 8 -
2. Szakirodalmi áttekintés átszűrődési kísérletek témakörében.....	- 10 -
2.1. Muttoni és Ruiz kísérletének bemutatása és eredményei	- 10 -
2.2. Lips, Ruiz és Muttoni kísérletének bemutatása és eredményei [3]	- 13 -
2.3. Nyírási kengyel kialakítás hatásának vizsgálata [4]	- 20 -
3. Szakirodalmi áttekintés numerikus modellezés témakörben	- 22 -
4. A kísérleti program	- 25 -
4.1. A kísérleti elemek kialakítása és összeállítása	- 25 -
4.2. A kísérlet menete	- 28 -
5. A kísérleti eredmények feldolgozása	- 32 -
5.1. A próbatestek számított teherbírása.....	- 32 -
5.1.1. A szakítóvizsgálati eredmények.....	- 32 -
5.1.2. A nyomószilárdság vizsgálat eredményei	- 32 -
5.1.3. A teherbírások számítása.....	- 33 -
5.2. A mérési eredmények feldolgozása és kiértékelése.....	- 34 -
5.2.1. Az eredmények kalibrálása	- 34 -
5.2.2. Az elért törőerők vizsgálata.....	- 35 -
5.2.3. A nyers adatokkal végzett műveletek.....	- 37 -
5.2.4. Az eredmények kiértékelése.....	- 44 -
5.2.5. Az egész kísérlet eredményeire vonatkozó elemzés	- 50 -
6. ATENA numerikus modellezés	- 54 -
6.1. Numerikus modell bemutatása	- 54 -
6.2. Numerikus eredmények	- 54 -

1. Bevezetés

1.1. A kutatás célja

Diplomamunkám során részt veszek a Hidak és Szerkezetek Tanszék „*Nagy teljesítőképességű betonból készülő vasbeton rúdszerkezetek vasalási módszereinek fejlesztése*” című projektjében. A projektgazda az ÉPSZERK-PANNÓNIA INVEST Építőipari Kft. (1031 Budapest, Szentendrei u. 202.), aki alvállalkozóként a Tanszékot bízta meg a szakmai tartalom, azaz a kísérleti vizsgálatok végrehajtásával és a kiértékelésével.

A fejlesztési projekt a monolit vasbeton födémelek oszlop-lemez kapcsolatának kialakítására- és a monolit vasbeton lemezek átszűrődési vasalásának továbbfejlesztésére irányul. A cél új szerkezeti megoldások létrehozása. A teljes fejlesztési projekt 4 részfeladatra osztott, én egy köztes részfeladatba kapcsolódhattam be.

A fejlesztési projekt első részfeladatában új típusú átszűrődési csapokat hoztak létre, melyeket a kísérletek során vizsgáltak beton próbatestekben. A jelenleg futó részfeladatban oszlop-lemez kapcsolatokat vizsgáltunk, tehát lemez-szerű próbatesteket különböző típusú átszűrődési vasalásokkal vagy anélkül. Dolgozatomban bemutatom a kísérleti eredményeket. Célom többek között a mért törőerők összehasonlítása a szabvány szerint számított teherbírás értékekkel. Ezen felül megvizsgálom, hogy a nyírási és hajlítási vashányad, valamint a beton szilárdsága milyen hatással van a teherbírásra és az alakváltozó képességre.

A dolgozatomban továbbá célom ATENA nemlineáris végelelemes programmal is modellezni néhány próbatestet és vizsgálni az átszűrődési jelenséget. Egy olyan modellel, ami kielégítő pontossággal leköveti a lemezelemek valós viselkedését, jóval részletesebb megállapításokat és következtetéseket lehetne tenni, illetve a vizsgált paramétereket is ki lehetne bővíteni vele a későbbiekben.

1.2. Az átszűrődés definíciója

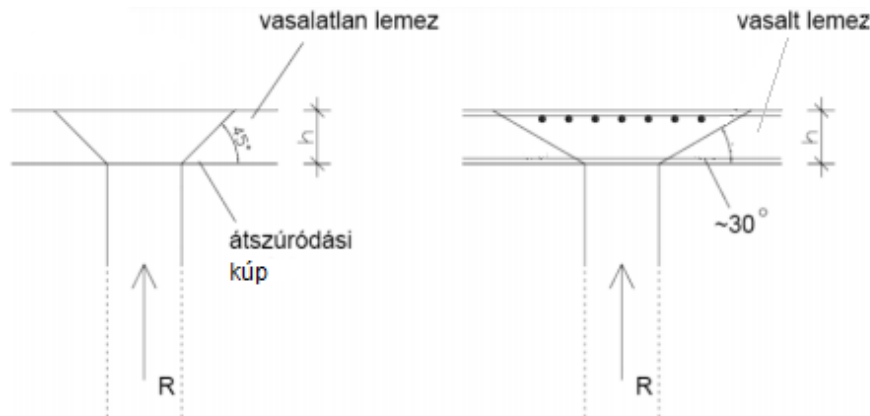
Kis felületen átadódó terhelés következtében a síklemez födémelek tönkremenetelt szenvedhetnek, amely tönkremeneteli módot nevezük átszűrődésnek. Pontonként alátámasztott síklemez födémelek esetén az oszlopok, falsarkok éppen ilyen kis felületű támaszt képeznek. A támaszok közelében a nagy nyomaték mellett a nyíróerő is nagy és a két igénybevétel külön-külön és együttesen is eredményezheti a tönkremenetelt. Az átszűrődés tehát gyűjtő fogalom, érdemes megkülönböztetni a tönkremenetelt okozó igénybevétel alapján az eltérő jelenségeket [1]:

- Nyíróerő és annak számottevő külpontossága esetén átlukadásról beszélünk.
- Számottevő nyomaték nélkül, közel központos nyíróerő esetén átszűrődés következik be.
- Átgombolódásról beszélünk, amikor a törést a koncentráltan átadott oszlopnomaték okozza.

A pontokon alátámasztott vasbeton lemezek teherbírását nagyon erősen befolyásolja az alátámasztás környezetének megfelelő kialakítása. Erre vonatkozóan az évek folyamán folyamatosan fejlesztettek és a ma is fejlesztenek különböző szerkezeti kialakításokat, méretezési eljárásokat, nyírási vasalásokat [2].

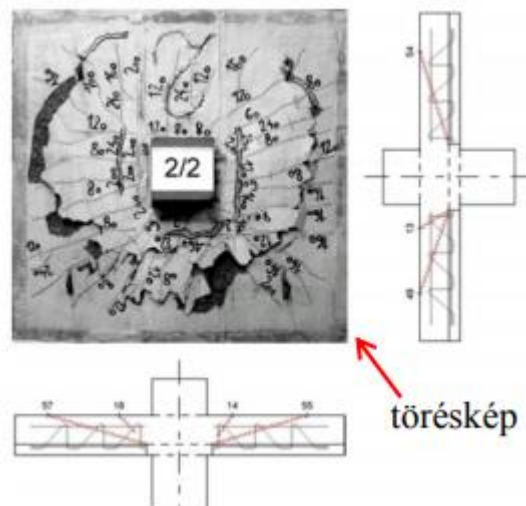
1.3. Az átszűrődés mechanizmusa

Egy vasbeton lemez átszűrődési tönkremenetelekor a húzott szélső száltól repedések indulnak, melyek a nyomaték-nyíróerő interakció miatt ferdék. Nyírásra vasalatlan lemez esetén $\sim 45^\circ$ -os szöget, míg nyírásra vasalt lemez esetén ~ 30 - 40° -os szöget zárnak be a lemez síkjával (1. ábra) [1].



1. ábra: Nyírásra vasalatlan illetve vasalt lemez repedéseinek a lemez síkjával bezárt szöge [1]

A törési felület függ az oszlop geometriájától. Négyzög keresztmetszetű oszlop esetén csonka gúla-, míg kör keresztmetszetű oszlop esetén csonkakúp a kiszakadó idom. Ezen túl a körszimmetrikus erőjáték következtében radiális repedések is fellépnek (2. ábra).

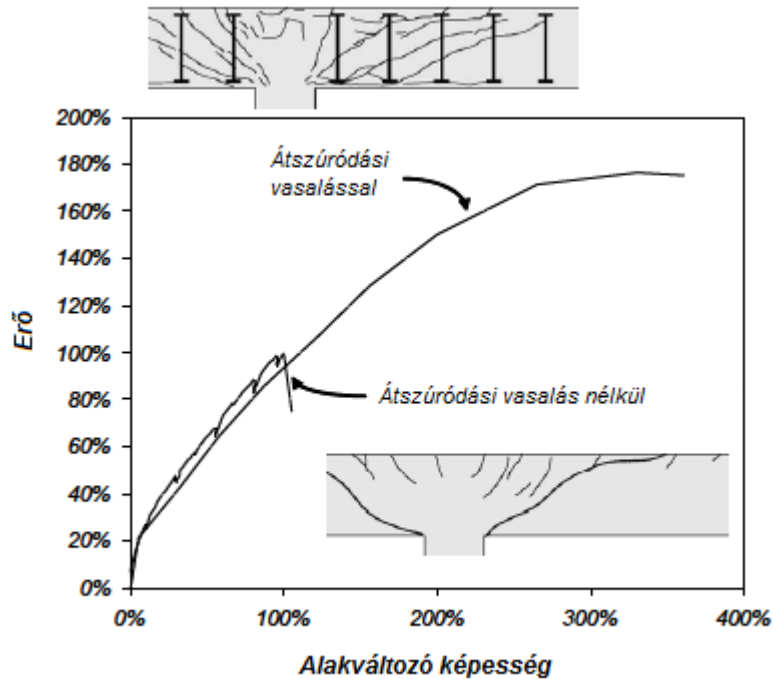


2. ábra: Töréskép [1]

Átszűrődésre vasalatlan lemeznél a nyomatéki ellenállást a húzott oldali hajlítási vasalás és a repedésmentes betonzóna biztosítja, a nyíróerőt pedig a nyomott-nyírt betonzóna viseli. A tönkremenetel során a repedések megnyílásával folyamatosan csökken a nyomott betonzóna, majd a teherbírásának kimerülésével létrejön az átszűrődési tönkremenetel.

Az átszűrődési kapacitás növelése történhet a megtámasztási felület növelésével, lemez vastagítással, a betonszilárdság növelésével vagy nyírási vasalás alkalmazásával. Vasalással történő megerősítés esetén az adott átszűrődési kúpot metsző, annak mindkét oldalán

lehorgonyozott vasalást kell beépíteni. A szerkezet teherbírása így jelentősen megnövelhető, a viselkedése pedig kevésbé lesz rideg (3. ábra). Az elhelyezett vasalásban a repedés megnyílásakor húzóerő lép fel, ami gyakorlatilag felfüggeszti az oszlopfejre a lefelé elmozduló lemezrész [3] [1].



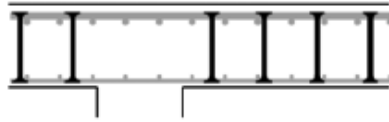
3. ábra: Nyírásra vasalt és vasalatlan lemezek viselkedésének és teherbírásának összehasonlítása [3]

A tönkremenetellel szembeni ellenállás a beton és a betonacél teherbírásának összegzésével adódik, viszont a vasalás maximális teherbírásához tartozó alakváltozás esetén a betonrész teherbírása már csökken. Ha az átszúródás kialakul, a mértékadó repedéstől az oszlop irányába eső betonrész a helyén marad, míg a tőle kifelé található lefelé mozdul el az oszlopfejhez képest [1].

1.4. Átszúródási vasalás típusok

Átszúródási vasalást a lemezekben főként azért alkalmaznak, hogy növeljék a lemez teherbírását és alakváltozó képességét. Az évek során többfajta átszúródási vasalást fejlesztettek ki és alkalmaztak. Az átszúródási vasalás típusának kiválasztásakor a teherbírás- és duktilitás növelésén kívül figyelembe kell venni gazdasági- és szerelhetőségi szempontokat is. Néhány manapság használt átszúródási vasalás típus:

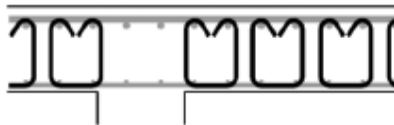
- nyírócsapok (4. ábra)
- folytonos nyírókengyel (5. ábra)
- kengyelkosár (6. ábra)
- felhajlított nyírási vasalás (7. ábra)
- spirálkengyel
- távtartó vasalás
- stb.



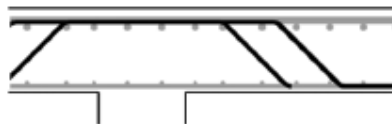
4. ábra: Nyírócsapok alkalmazása átszűrődési vasalásként [4]



5. ábra: Folytonos nyírókengyel alkalmazása átszűrődési vasalásként [4]



6. ábra: Kengyelkosár átszűrődési vasalásként [4]



7. ábra: Felhajlított nyírási vasalás/ Bajuszvasalás [4]

Kutatásom során főként nyírócsapos és kengyelkosaras átszűrődési vasalásokkal végzett kísérletekkel foglalkoztam, mivel az ezek során tapasztalt eredményeket és következtetéseket tudom felhasználni a kutatási programban végzett kísérletek eredményeinek feldolgozásánál.

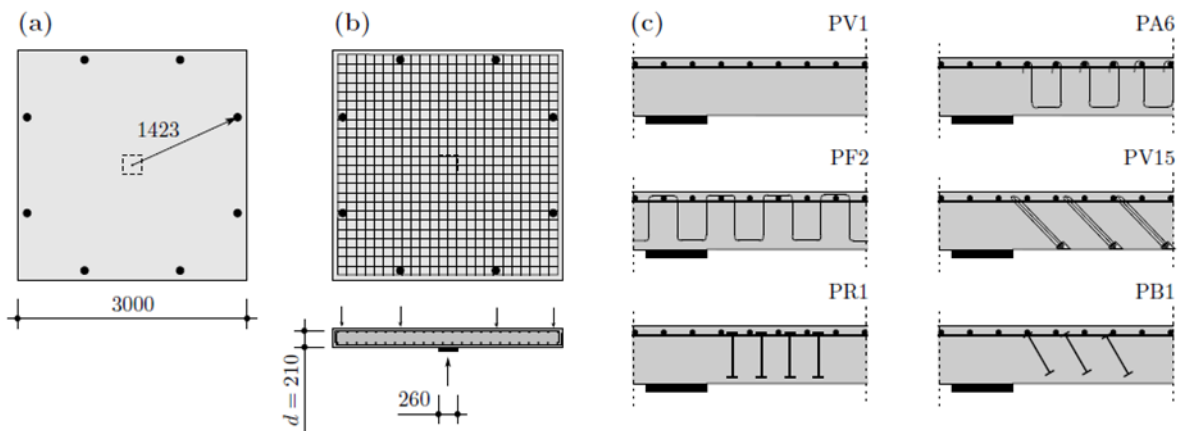
2. Szakirodalmi áttekintés átszűrődési kísérletek témakörében

2.1. Muttoni és Ruiz kísérletének és eredményeinek bemutatása [3]

Miguel Fernández Ruiz és Aurelio Muttoni a svájci EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) professzorai 6-féle átszűrődési vasalással készült lemezt vizsgáltak. A kísérlet során a próbatetek azonos geometriával és mechanikai tulajdonságokkal rendelkeztek (8. ábra és 1. táblázat):

- Hajlítási vashányad (ρ) 1.5 %,
- Névleges hatékony magasság (d) 210 mm,
- A földém próbatetek egy (260×260 mm méretű) négyzet alakú acéllemezen keresztül vannak terhelve,
- A beton nyomószilárdsága 28.4 és 36.8 MPa közötti [3].

Az összes próbatest kb. azonos nyírási (átszűrődési) vashányaddal rendelkezett ($\rho_w \approx 1.0\%$) kivéve a PF2 próbatestet, ahol a nyírási vashányad $\rho_w \approx 0.8\%$ volt, illetve a PV1 próbatestet (nyírási vasalás nélküli földém).



8. ábra: Kísérleti próbatetek: (a) geometria; (b) vasalás (mindegyik földém azonos hajlítási vashányaddal, $\rho = 1,50\%$); (c) átszűrődési vasalás típusok [3]

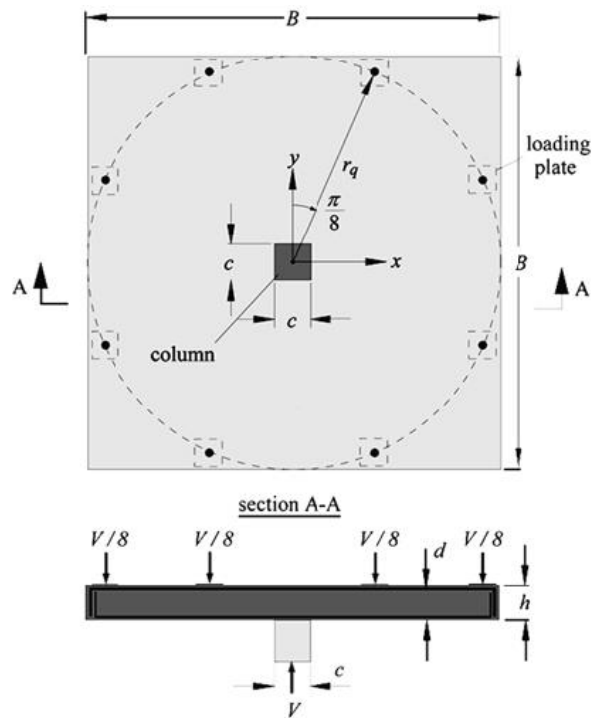
Slab ^{Ref}	ρ_w [%]	f_c [MPa]	f_y [MPa]	f_{yw} [MPa]	V_R [kN]	ψ_R [%]	$\frac{V_R}{b_0 \cdot d_v \cdot \sqrt{f_c}}$ [-]
PV1 ⁹	–	34.0	709	–	974	0.76	0.470
PA6 ¹⁶	1.01	33.8	N/A	N/A	1345	N/A	0.648
PV15 ¹⁵	0.95	36.8	527	547	1609	3.11	0.741
PF2 ²⁰	0.80	32.0	583	500*	1567	1.83	0.776
PR1 ¹⁸	1.04	31.0	515	580	1654	1.98	0.832
PB1 ¹⁹	1.04	28.4	576	388	1960	2.35	1.03

N/A: Nem elérhető

* Az acél névleges karakterisztikus folyási feszültsége. A próbatestre vonatkozó mért érték nem elérhető.

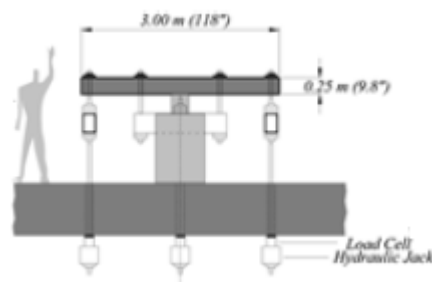
1. táblázat: Az egyes próbatetek főbb tulajdonságai (ρ_w : nyírási vashányad, f_c : beton nyomószilárdság, f_y : hajlítási vasalás folyáshatára, f_{yw} : nyírási vasalás folyáshatára, V_R : maximális terhelő erő, ψ_R : elfordulás a maximális tehernél) [3]

Mindegyik próbatestre monoton növekvő teher hatott, egészen a tönkremenetelig [3]. A próbatestek 8 pontban voltak terhelve a kerület mentén koncentrált erőkkel (9. ábra).



9. ábra: Kísérleti elrendezés [5]

Az erőkifejtést munkahengerrel végezték. A kísérleti elrendezést mutatja a 10. ábra [5].

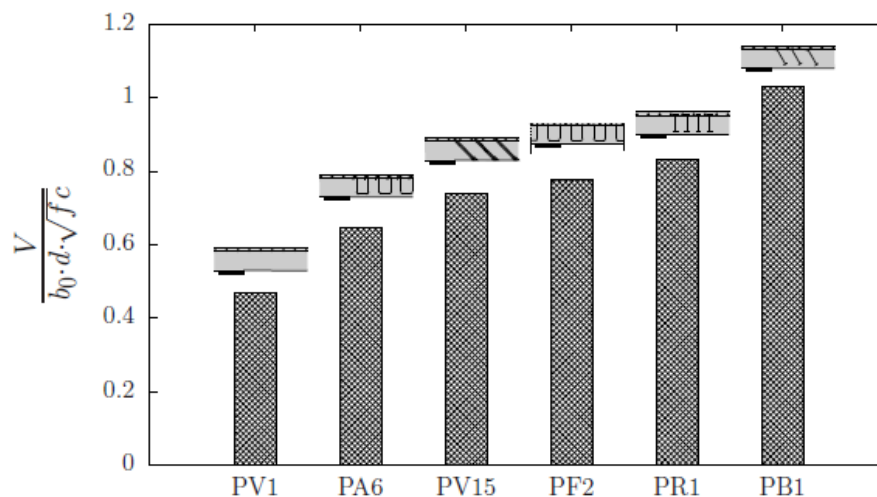


10. ábra: Kísérleti elrendezés [5]

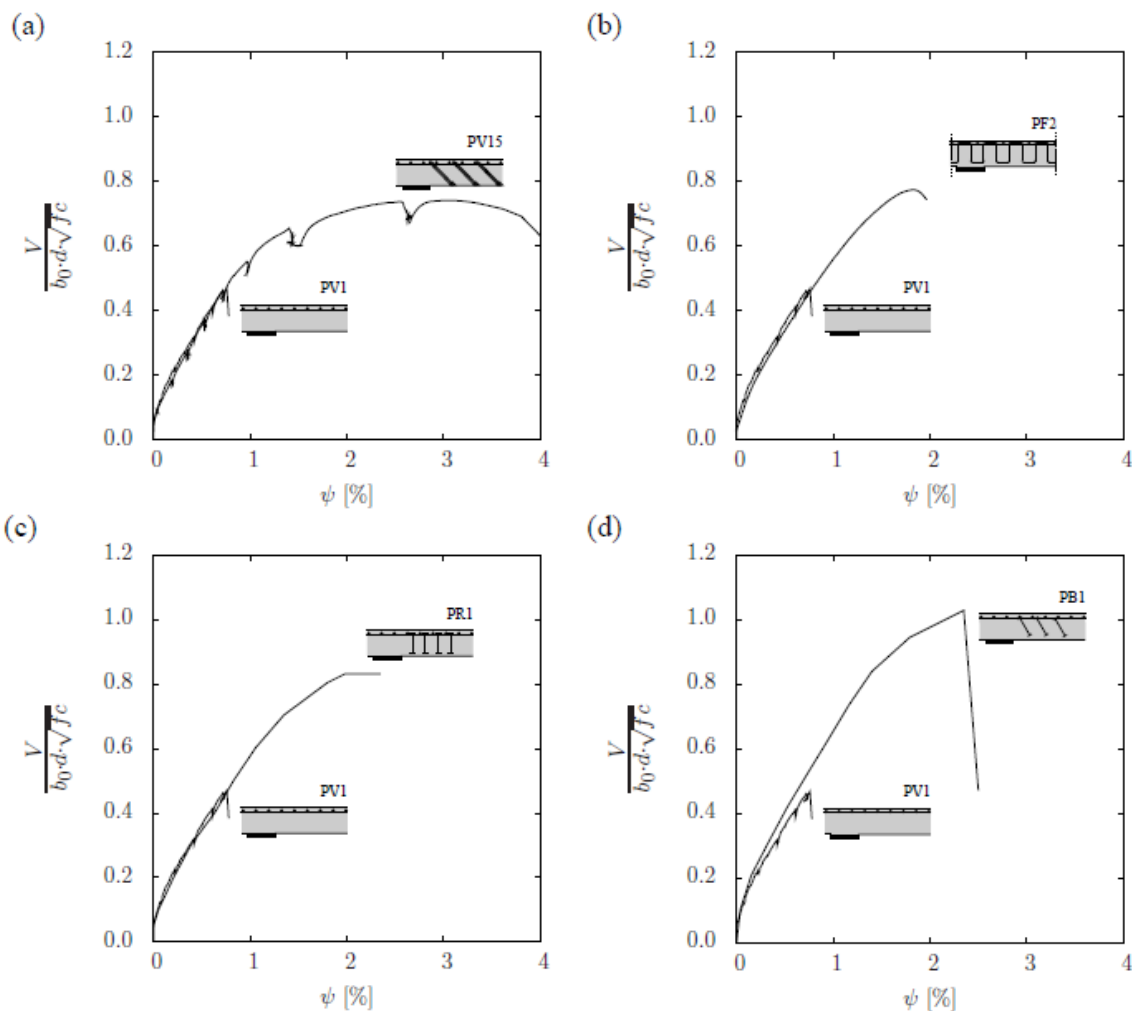
A 11. ábra mutatja a különböző nyírási vasalással ellátott próbatestek kísérleti eredményeit. A PV1 referencia teszt (átszűrődési vasalás nélküli lemez) esetén a megtámasztás környezetében klasszikus átszűrődési kúp keletkezett. A PR1 próbatest (csapos kialakítású átszűrődési vasalás) esetén a tönkremenetelt a beton összemorzsolódása okozta az acéllemez környezetében. A PF2 próbatest (folytonos kengyelezés) tönkremeneteléről nem találtam információt.

A kísérleti eredmények alapján a lemez teherbírása és alakváltozó képessége jelentősen függ az átszűrődési vasalás típusától. Az egyik oldalon megfelelő lehorgonyzással kialakított kengyelekkel vasalt próbatest (PA6) mutatta a legkisebb - 38%-os növekedést a teherbírásban a referencia próbatesthez képest, míg az utólag beépített nyírási vasalással ellátott próbatesttel (PV15) ennél majdnem 20%-kal jobb eredmény lehetett elérni (11. ábra). A folytonos kengyelezéssel kialakított próbatesttel (PF2) némileg jobb teherbírási teljesítmény érhető el

(70%-os növekedés), de a törés meglehetősen rideg (12b ábra). Csapos kialakítás esetén viszont a teherbírás növekedése mellett az alakváltozó képesség is jelentősen javul (12c ábra).



11. ábra: Normált teherbírési értékek összehasonlítása [3]



12. ábra: Mért erő-elfordulás diagram az egyes próbatestek esetén: (b) PVI és PF2; (c) PVI és PR1 [3]

Fontos megjegyezni, hogy ennél a kísérletnél mindegyik típusú próbatestet csak egyszer tesztelték, így a kísérleti eredmények és következtetések is csupán egy terhelés eredményéből lettek levonva. Általános, megalapozott következtetések levonásához további kísérleti eredményekre van szükség.

2.2. Lips, Ruiz és Muttoni kísérletének bemutatása és eredményei [6]

Lips S., Fernández Ruiz M., Muttoni A. 16 próbatestből álló kísérletet végeztek, amelynek során oszlopokkal alátámasztott lemezeket vizsgáltak átszűrődásra. A próbatestek alaprajzi mérete megegyezett (3,0×3,0 m). Az alátámasztó oszlopok mérete 130 és 520 mm között, a lemez vastagság pedig 250 és 400 mm között változott. Ezen túl az egyes próbatesteknél különbözött az átszűrődési vasalás típusa (csapok, vagy kengyel), illetve a mennyisége.

A kísérleti eredmények lehetővé tették egyértelmű következtetések levonását azzal kapcsolatban, hogy a különböző nyírási vasalás kialakítások, valamint a különböző fizikai paraméterek milyen hatással vannak a nyírási teherbírásra és az alakváltozó képességre.

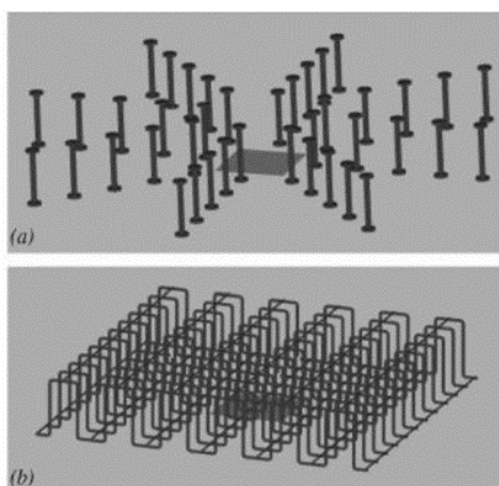
A 2. táblázat mutatja az egyes próbatestek főbb paramétereit. Mindegyik próbatest azonos alaprajzi mérettel rendelkezett és állandó 1,50%-os hajlítási vashányaddal. Erre a

vasmennyiségre azért volt szükség, hogy a szerkezetek ne hajlítási tönkremenetelt szenvedjenek.

Specimen	h , mm (in.)	c , mm (in.)	d , mm (in.)	f_c , MPa (psi)	ρ , %	f_s , MPa (psi)	ρ_s , %	f_{st} , MPa (psi)	System
PL1	250 (9.8)	130 x 130 (5.12 x 5.12)	193 (7.6)	36.2 (5250)	1.63	583 (84.6)	—	—	—
PL6	250 (9.8)	130 x 130 (5.12 x 5.12)	198 (7.8)	36.6 (5300)	1.59	583 (84.6)	1.01	519 (75.3)	Studs
PF1	250 (9.8)	130 x 130 (5.12 x 5.12)	209 (8.2)	31.1 (4500)	1.50	583 (84.6)	0.79	536 (77.7)	Stirrups
PV1 ¹⁸	250 (9.8)	260 x 260 (10.2 x 10.2)	210 (8.3)	34.0 (4900)	1.50	709 (102)	—	—	—
PL7	250 (9.8)	260 x 260 (10.2 x 10.2)	197 (7.8)	35.9 (5200)	1.59	583 (84.6)	0.93	519 (75.3)	Studs
PF2	250 (9.8)	260 x 260 (10.2 x 10.2)	208 (8.2)	30.4 (4400)	1.51	583 (84.6)	0.79	536 (77.7)	Stirrups
PL3	250 (9.8)	520 x 520 (20.5 x 20.5)	197 (7.8)	36.5 (5000)	1.59	583 (84.6)	—	—	—
PL8	250 (9.8)	520 x 520 (20.5 x 20.5)	200 (7.9)	36.0 (5200)	1.57	583 (84.6)	0.85	519 (75.3)	Studs
PF3	250 (9.8)	520 x 520 (20.5 x 20.5)	209 (8.2)	37.1 (5400)	1.50	583 (84.6)	0.79	536 (77.7)	Stirrups
PL4	320 (12.6)	340 x 340 (13.4 x 13.4)	267 (10.5)	30.5 (4400)	1.58	531 ϕ 20 580 ϕ 26 (77.0 ϕ 0.8 84.1 ϕ 1.0)	—	—	—
PL9	320 (12.6)	340 x 340 (13.4 x 13.4)	266 (10.5)	32.1 (4650)	1.59	531 ϕ 20 580 ϕ 26 (77.0 ϕ 0.8 84.1 ϕ 1.0)	0.93	516 (74.8)	Studs
PF4	320 (12.6)	340 x 340 (13.4 x 13.4)	274 (10.8)	32.5 (4700)	1.54	531 ϕ 20 580 ϕ 26 (77.0 ϕ 0.8 84.1 ϕ 1.0)	0.79	550 (79.8)	Stirrups
PL5	400 (15.7)	440 x 440 (17.3 x 17.3)	353 (13.9)	31.9 (4650)	1.50	580 (84.1)	—	—	—
PL10	400 (15.7)	440 x 440 (17.3 x 17.3)	343 (13.5)	33.0 (4800)	1.55	580 (84.1)	0.82	563 (81.7)	Studs
PF5	400 (15.7)	440 x 440 (17.3 x 17.3)	354 (13.9)	33.4 (4850)	1.50	580 (84.1)	0.79	550 (79.8)	Stirrups
PL11	250 (9.8)	260 x 260 (10.2 x 10.2)	201 (7.9)	34.2 (4950)	1.56	554 (80.4)	0.23	592 (85.9)	Studs
PL12	250 (9.8)	260 x 260 (10.2 x 10.2)	201 (7.9)	34.6 (5000)	1.56	554 (80.4)	0.47	592 (85.9)	Studs

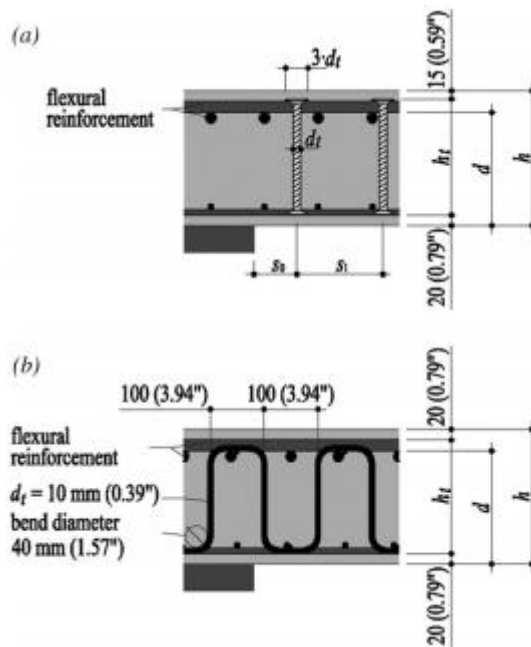
2. táblázat: A próbatestek főbb tulajdonságai [6]

Átszűrődési vasalásként kétféle rendszert alkalmaztak: bordázott nyírócsapokat, illetve folytonos kengyelezést (13. ábra).

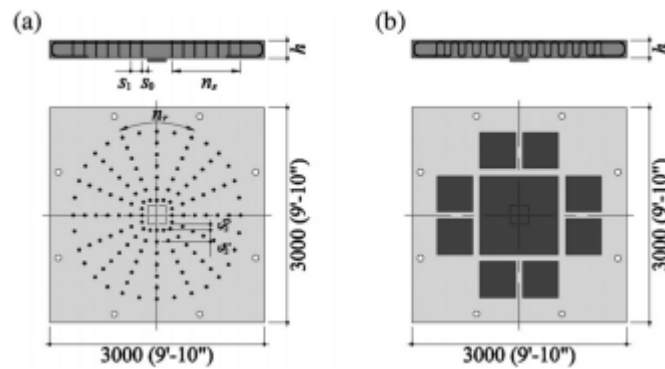


13. ábra: Alkalmazott átszűrődési vasalás rendszerek: (a) bordázott nyírócsapok; (b) folytonos kengyelezés [6]

A nyírócsapokat sugárirányban helyezték el, egyenletes kiosztással. A folytonos kengyelezés 10 mm átmérőjű hajlított vasakból készült, melyeket egymás között egyenlő távolságot hagyva, egyenes 6 mm átmérőjű vasakkal hegesztettek össze. Így jöttek létre a különböző méretű kosárvasalások. Az 1200×1200 mm-es kosarat helyezték el középen, közvetlenül a megtámasztás felett, és ezt körbevették 8 kisebb kosárral melyek mérete 600×600 mm volt. A 14.-15. ábra mutatja a vasalások részleteit illetve elhelyezését.

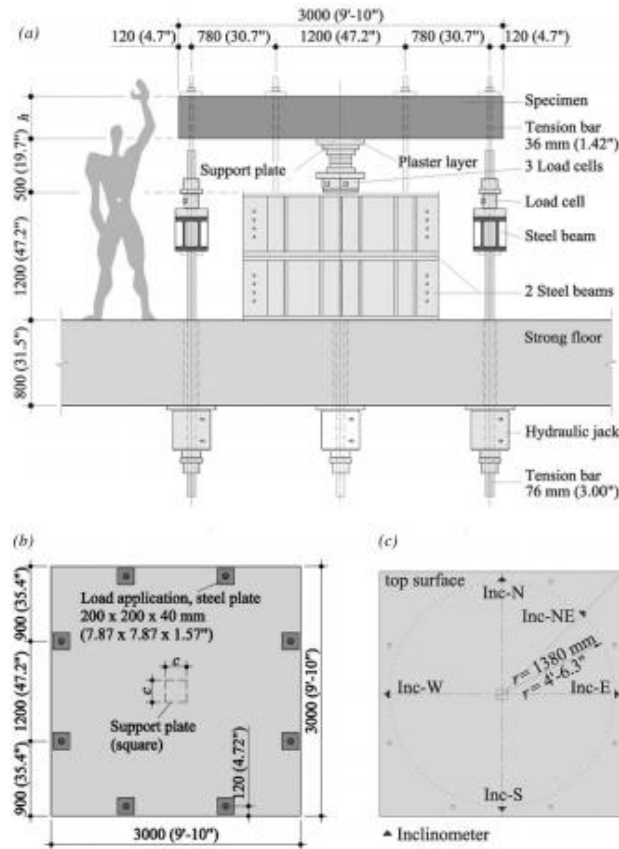


14. ábra: A vasalás paramétereit: (a) bordázott nyírócsapok; (b) folytonos kengyelezés [6]



15. ábra: Az átszűrődési vasalások elhelyezése: (a) nyírócsapok; (b) folytonos kengyelezés [6]

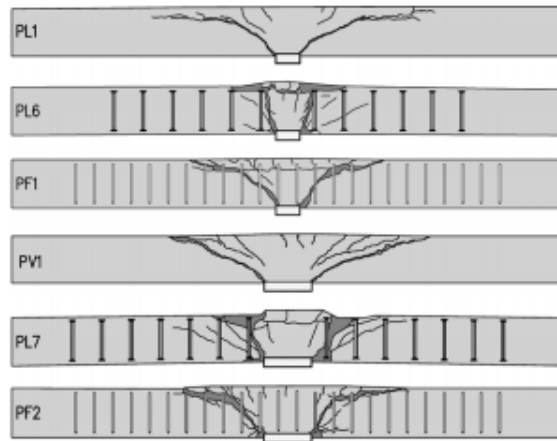
A terhelést négy munkahengerrel végezték. A munkahengereket négy lehorgonyzó rúd kötötte össze a teherelosztó acél gerendákkal, ezek továbbították a lemez felé a terhet nyolc húzott rúdon keresztül. A rudak így lefele irányuló terhelést fejtettek ki a lemezek felső felületén. A próbatestek alátámasztása az oszlop méretének megfelelő nagyságú acéllemezen keresztül történt. A 16. ábra szemlélteti a kísérleti elrendezést és a terhelési pontokat.



16. ábra: (a) Kísérleti elrendezés; (b) próbatest geometriája; (c) erőbevezetések helye [6]

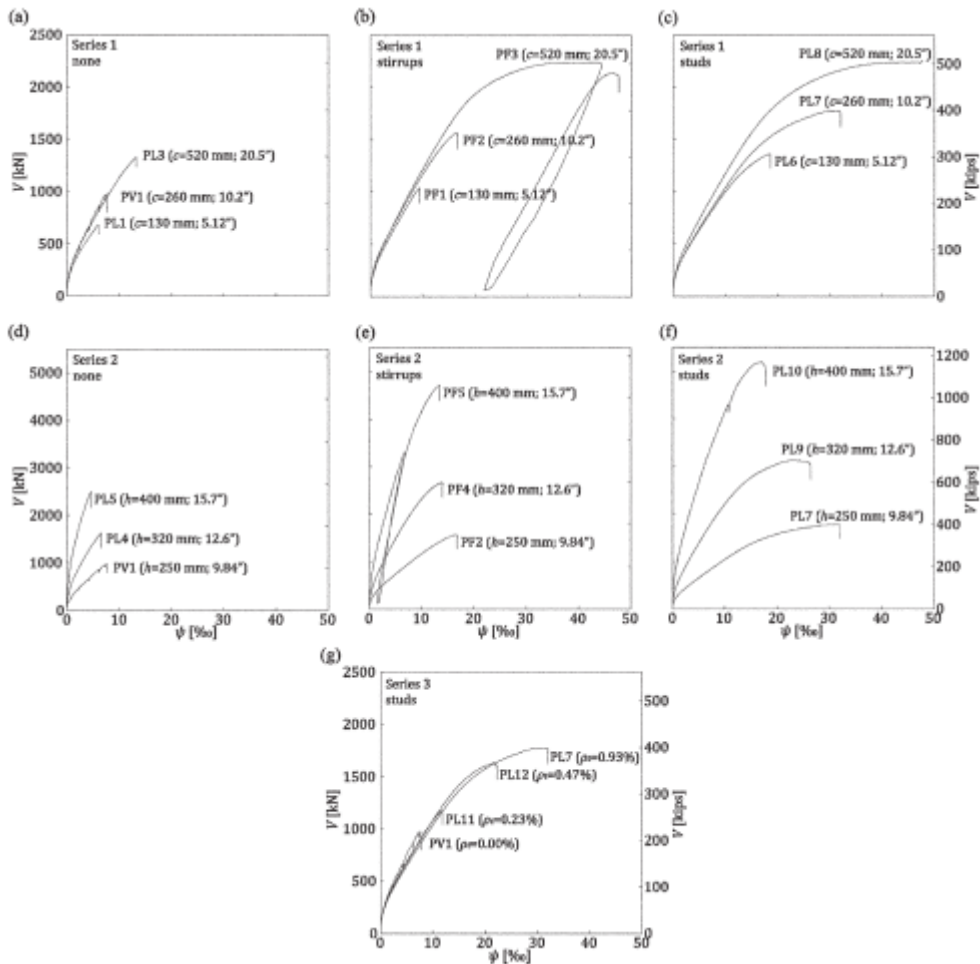
A kísérlet során több mérési adatot rögzítettek: erő a hidraulikus csatlakozókban és reakcióerő az alátámasztásnál, elfordulás, eltolódás, lemezvastagság változása, felületi deformáció alul és felül, feszültség a nyírási vasakban. A kísérlet végén a próbatesteket félbevágták, hogy megvizsgálhassák az átszűrődási felületet.

Néhány lemez tönkremenetelt követően kialakult törésképe a 17. ábrán látható. A törésképek alapján, a repedések meredeksége nagyobb kengyeles nyírási vasalás esetén, mint csapos kialakításnál. A kevesebb átszűrődási vas és a kengyeles kialakítás 45 fok körüli repedés szögeket eredményezett, a kritikus repedés 2-3 nyírási kengyelsoron halad át.



17. ábra: Néhány próbatest törésképe [6]

A különböző próbatestek átszűrődással szembeni teherbírása és elfordulási képessége az erő-elfordulás görbék segítségével hasonlítható össze (18. ábra). Látható, hogy a nyírási vasalás növeli a teherbírást és az elfordulási képességet. A PV1 próbatesthez hasonlítva, mely nyírási vasalás nélküli lemez, a PF2 próbatest (kengyelekkel) és a PL7 próbatest (csapokkal) a PV1 próbatest teherbírásának 161 %-át illetve 182 %-át érte el, míg az elfordulás képesség a referencia eset 220 %-át illetve 421 %-át. Következésképpen a teherbírás és az alakváltozó-képesség nagyban függ az átszűrődási vasalás típusától is, és csapok esetén jobb eredményt mutat. Ez a jelentős eltérés a vasalási típusok lehorgonyzottságának mértékével magyarázható.

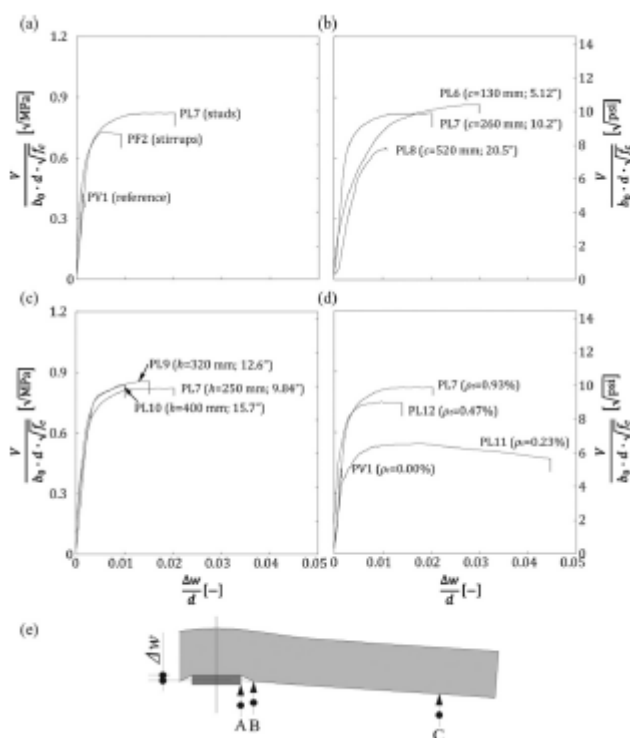


18. ábra: Erő-elfordulás diagramok: (a)-(c) oszlop méret változása; (d)-(f) lemezvastagság változása; (g) nyírási vashányad [6]

A 18c diagramon látható az oszlopméret változásának hatása. Növelve az oszlop keresztmetszetét nagyobb teherbírás érhető el és nő az elforduló képesség is az oszlop és a lemez között. A PL6 próbatest teherbírása 77 %-a, míg az alakváltozó képesség 58 %-a a PL7 próbatestének..

A 18g diagramról leolvasható a nyírási vasalás mennyiségének hatása. Már kis mennyiségű átszűrődési vasalás is jelentősen növeli a teherbírást és az alakváltozó-képességet. A kísérleti eredmények azt mutatták, hogy ha bizonyos nyírási vasmennyiség felett tovább növeljük a vasalást, az szintén a próbatest tönkremeneteléhez vezet, tehát egy bizonyos pont felett már nem növelhető tovább a teherbírás.

A 19. ábra mutatja a normált, erő-alakváltozás diagramokat, a vizsgált alakváltozás a nyírási deformáció. A nyírási deformációt a lemez alján mért függőleges elmozdulásokból határozták meg a 19e ábra szerint.



19. ábra: Normált nyírási deformációk a normált nyíróerő függvényében: (a) nyírási vasalás típusának változása; (b) oszlop keresztmetszeti méretének változása; (c) lemez vastagság változása; (d) nyírási vashányad változása; (e) elmozdulásmérők helyzete a nyírási deformáció számításához [6]

A 19a diagram mutatja a nyírási vasalás hatását a nyírási deformációra. Látható, hogy csak abban az esetben keletkeznek nyírási alakváltozások, ha van nyírási vasalás, és ezek nagysága függ a nyírási vasalás típusától. Csapos kialakítás esetén nagyobb deformációk lépnek fel, mint kengyeles kialakítás esetén.

A 19b diagram szemlélteti az oszlop keresztmetszeti méretének hatását. Kisebb oszlop esetén nagyobb nyírási deformációk keletkeznek.

A 19c diagramon látható a lemezvastagság hatása. Vékonyabb lemez esetén kisebb nyírási deformációk keletkeznek.

Végezetül a 19d diagram megmutatja, hogy a nyírási vasalás mennyisége, hogyan befolyásolja a nyírási deformációkat.

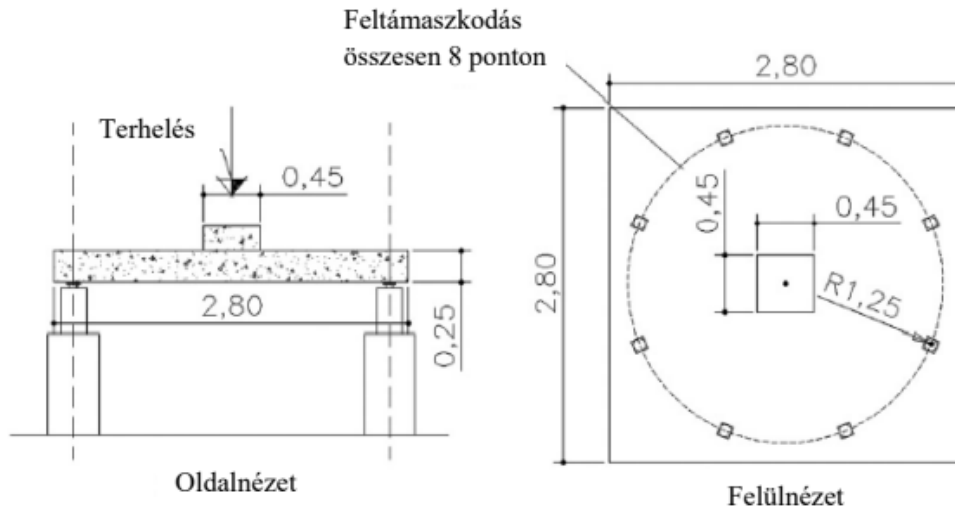
Átszűrődés nem csak a beton nyírási tönkremenetele miatt következhet be, hanem a nyírási vasalás elszakadásával is. Emiatt a kísérlet során mérték a nyírási vasalásban ébredő feszültségeket is. Összehasonlítva egy nagyobb nyírási vashányaddal rendelkező próbatestet (PL7) egy kisebb nyírási vashányaddal rendelkező próbatesttel (PL12), az tapasztalható, hogy a PL7 esetén az első és második körben lévő csapok is elérték a folyáshatárt a tönkremenetel közeledtével. Ezzel szemben a PL12 esetén az első körben lévő csapok nem érték el a folyáshatárt, a második körben lévő csapok viszont nagy deformációkat szenvedtek a tönkremenetel előtt. A viselkedés közti különbség oka az eltérő tönkremeneteli mód. A PL7 próbatest az oszlop közelében szenvedett tönkremenetel, a PL12 próbatest pedig a nyírásra vasalt területen. [6]

Összefoglalva, a kísérlet során 16 próbatestet teszteltek nyírási vasalással vagy anélkül. A cél az volt, hogy bemutassák, hogy különböző paraméterek (pl. lemezvastagság, oszlopméret, átszűrődési vasalás mennyisége és típusa stb.) miként befolyásolják a nyírási teherbírást és az elforduló képességet. A fontosabb következtetések a következők voltak [6]:

- A beton rácsrúd törése nagymértékben függ a nyírási vasalás paramétereitől (típus, távolság a megtámasztástól, csapok távolsága, lehorgonyozottság, stb.)
- A nyírási vasalásban fellépő feszültségek akár jóval a folyáshatár alatt is maradhatnak, ami éppen ellentétes a várt eredménnyel.
- A lemezvastagság növelésével minden esetben nő a teherbírást és csökken az elfordulási képesség.
- A nyírási vasalás lehetővé teszi a nyírási repedés megnyílását, így ezáltal csökken a nyírást felvevő ferde nyomott rácsrúd teherbírást, ami a CSCT (Critical Shear Crack Theory) elméletét igazolja.
- A tapasztalt nyírási deformációk a tönkremeneteli zónában megmutatták, hogy a deformáció nem hanyagolható el nyírásra vasalt próbatestek esetén és a nyírószilárdsággal együtt nő.
- A mérési eredmények azt mutatták, hogy a nyomott rácsrúd törési eredményeinél a lemez méretének hatása a nyírásra vasalt és vasalatlan próbatesteknél hasonló.
- Az EC2 a biztonság kárára közelít, ha a beton rácsrúd tönkremenetel a mértékadó. Ez különösen nagy oszlopméreteknél jelentkezik, a számított és mért nyírási teherbírást különbsége pedig jelentős is lehet.

2.3. Nyírási kengyel kialakítás hatásának vizsgálata [7]

A:P. Caldentey, P.P. Lavaselli, H. Corres és F.A. Fernandez a kengyelezés kialakításának teherbírást való hatásával foglalkoztak. Kutatásaik során 8 lemezt vizsgáltak 4 különböző vasalási rendszerrel. A lemezek geometriai paraméterei minden esetben megegyeztek, 2,80×2,80 m-es alapterülettel és 25 cm vastagsággal készültek. A próbatestek 8 ponton támaszkodtak fel egy kerület mentén és a közepén elhelyezett oszlopcsonkon kapták meg a terhelést (20. ábra). A hajlítási vasalást úgy tervezték, hogy átszűrődési tönkremenetel jöjjön létre.



20. ábra: A kísérleti elrendezés [7]

A próbatetek nyírási vasalásának kialakításai a következők voltak:

- 1. csoport (1 és 2. sz. lemez): átszűrődési vasalás nélküli,
- 2. csoport (3 és 4. sz. lemez): a szabvány által nem támogatott nem átfogó kengyelsoros, vagyis kengyelkosaras átszűrődési vasalás,
- 3. csoport (5 és 6. sz. lemez): a szabvány előírásainak megfelelő, a hálóvasalást átfogó kengyelsoros átszűrődési vasalás,
- 4. csoport (7 és 8. sz. lemez): megegyezik a 3. csoporttal, ám a hálóvasalást megszakították az oszlop-lemez kapcsolat helyén.

A kísérleti eredmények alapján a lemezek viselkedése közel azonos volt a lehajlásokat tekintve. A repedések megjelenését követően csökkent a merevség, de folytatódott a lehajlás.

A tapasztalt elfordulások alátámasztják a CSCT eredményeit, miszerint a kritikus nyírási repedés csökkenti a nyírást felvevő ferde nyomott beton rácsrúd teherbírását, vagyis a teherbírás a kritikus repedés megnyílásától függ [8].

Az eredmények továbbá azt mutatták, hogy a nem átfogó kengyelsoros és az átfogó kengyelsoros átszűrődési vasaláshoz tartozó teherbírások közötti eltérés kevesebb, mint 10%. A mért teherbírásokat összevetve az EC2 által számított teherbírásokkal a különbség elhanyagolható volt, de a számítási eredmények minden esetben meghaladták a mért értékeket [7].

Összességében a kísérleti eredmények kiértékelése során nem volt számottevő különbség a kengyelkosaras és a kengyelsoros próbatetek teherbírásában. Annak ellenére, hogy elméletben a kengyelkosaras vasalással ellátott próbatest nem tudja tisztán követni a rácsostartó analógiát, mégis hatékony a repedések korlátozásában és ezáltal ugyanúgy növeli az átszűrődési teherbírást, mint a kengyelsoros vasalás.

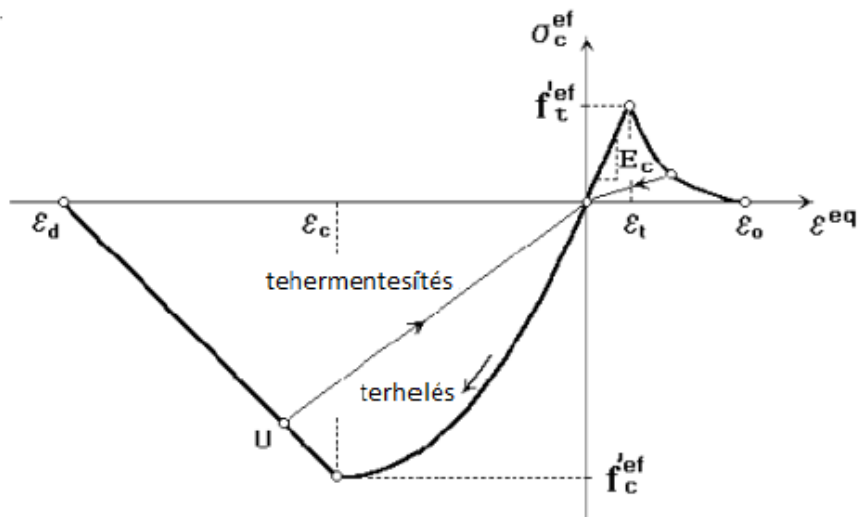
3. Szakirodalmi áttekintés numerikus modellezés témakörben

A numerikus modellezés a számítástechnika fejlődésével jelent meg és vált meghatározó részévé a kutatásoknak. Manapság egyre inkább előtérbe kerül az a törekvés, hogy a szerkezetek viselkedése lekövethető legyen numerikus modellekkel és a laboratóriumban végzett kísérletek egyre inkább kibővíthetők legyenek.

Dolgozatom során nekem is elsődleges célom, hogy a kísérleti eredményeket és a szoftverből kapott numerikus eredményeket minél inkább megfeleltessem egymásnak.

Több nyírással kapcsolatos szakirodalmat is átnéztem, illetve volt egyetemi hallgatótársam munkáját is felhasználtam. Azért tartom ezt fontosnak, mert a már megoldott modellezési kérdéseket így hasznosítani tudom a saját modellemnél is majd a későbbiekben. A modellezéssel kapcsolatos szakirodalmi áttekintés a cseh Cervenka Consulting által kifejlesztett ATENA programmal kapcsolatos eredményekre korlátozódik, mivel a saját modellem is ebben a szoftverkörnyezetben készül. Az ATENA egy a beton, vasbeton és feszített beton nemlineáris viselkedésének követésére irányuló célszoftver, mely széles körben alkalmazható méretezési feladatok és virtuális kísérletek esetében is [10].

A modellezés folyamán a geometria elkészítését követően az anyagmodelleket kell definiálni. A terhelést a legtöbb modellezési szakirodalomban acél terhelőlemezeken keresztül működtetik. Az acél terhelő lemezek modellezésére lineárisan rugalmas anyagmodellt használtak. A beton modellezése mindegyik esetben a fejlett betonmodelleknek megfelelően történt (21. ábra) [10].



21. ábra: ATENA szoftver beton anyagmodellje [10]

A hosszvasalás modellezése a legtöbb szoftverben a betonba ágyazott vasalásként működik, ennek anyagmodellje lehet lineáris, bilineáris vagy lineáris-felkeményedő. A betonacéloknál tökéletes tapadást feltételezett az általam áttekintett legtöbb kísérlet, de megcsúszási modellek alkalmazása is lehetséges.

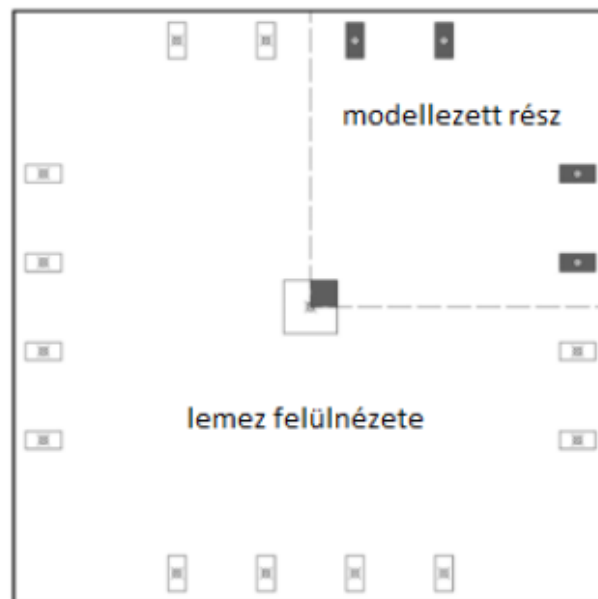
A nyírási vasalás a [11] kísérletben merev acélbetétként van figyelembe véve lineárisan rugalmas-tökéletesen képlékeny anyagmodellel. A [12] forrás test elemként modellezi a nyírási vasat. Ez azért fontos, mert a nyírócsapok hajlítási és nyírási viselkedését csak test elemmel

lehet figyelembe venni, a beágyazott rúdként történő modellezés esetén a vasaknak csak húzóerevsége van. A megfelelő eredményekhez azonban testelemes modell esetén az átmérő mentén 4-6 végelemet kell elhelyezni, amivel könnyen lehet, hogy nem tudjuk biztosítani a szükséges számítógépes memóriát [13].

A következő nagy modellezési kérdés a végelem hálóméret. A [11] kísérlet a vastagság mentén 7 elemet használt, ami megfelelőnek bizonyult, a támasz mentén pedig sűrítették a hálót.

A terhelést illetően a legtöbb modellben elmozdulás terhet adtak meg melynek értéke 0,1 mm vagy 0,05 mm volt, de ez a futtatási tapasztalatok és a konkrét probléma esetében módosítható.

Szimmetria feltételeket gyakorlatilag minden modellben alkalmaztak, hiszen így egyszerűsíteni és gyorsítani lehet a számítást (22. ábra). A szimmetria síkok mentén gátolták a szimmetriasík normálisának irányába eső elmozdulásokat.



22. ábra: Szimmetria kihasználása a modellezésnél [10]

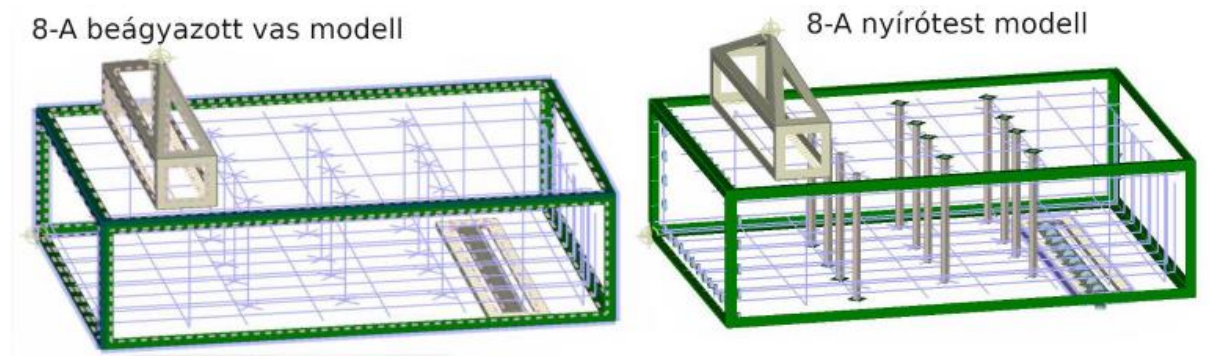
Az általam is feldolgozott kísérletsorozat egy előző fázisában a Hidak és Szerkezetek Tanszék 54 db, különböző nyírási vasalással ellátott gerendaszerű próbatestet vizsgált nyírásra. A kísérlet célja a különböző nyíróvas típusok összehasonlító vizsgálata volt. Laza Máté Miklós volt egyetemi hallgatótársam diplomamunkájában feldolgozta e kísérleti eredményeket és néhány próbatestet modellezett ATENA szoftverben. Több modellezési kérdésnél is az ő eredményeire fogok hagyatkozni.

Tapasztalata szerint elsőfokú és másodfokú tetraéder (Tetra) elem, valamint hasáb alakú (Brick) másodfokú végelem is használható a modellezéshez. Fontos azonban, hogy elsőfokú Tetra elemnél duktilis tönkremenetel várható, míg másodfokú Tetra elemnél és másodfokú Brick elemnél, a valóságnál merevebb, rideg tönkremenetel [9].

A nyíróvasalás testelemként modellezve követi leginkább a valóságos viselkedést (23. ábra). A valós teherbíráshoz közeli (90%) értéket kapunk, ha külön testként, tökéletes tapadással, 'X'

alakú lehorgonyzó fejjel modellezzük a nyírócsapokat. A valós repedésképre a beágyazott vasat tartalmazó modellek azonban jobb eredményt adtak, mint a test elemet tartalmazó modellek [9].

Az elmozdulások helyes előrejelzéséhez szükséges a nyíróvasak megcsúszásának modellezése. Ez azonban igen nagy számítógépes memóriát igényel és a megcsúszási modell felvétele bizonytalan, ami testelemes nyíróvasat tartalmazó modellnél bonyolult [9].



23. ábra: A nyíró csapok modellezése beágyazott vasalásként és testelemmel [9]

4. A kísérleti program

4.1. A kísérleti elemek kialakítása és összeállítása

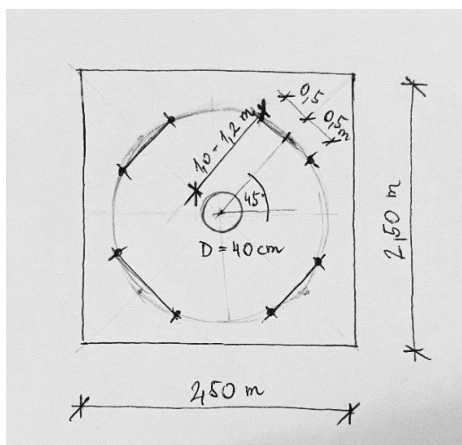
A kísérletsorozat ezen részfeladatában a Hidak és Szerkezetek Tanszék 24+2 db vasbeton próbatestből álló átszűrődési kísérletet valósított meg, melynél a kísérletek elvégzésében én is részt vehettem. A próbatestek különböző átszűrődési vasalással készültek az alábbi kialakításokban:

- 2 db nyírásra vasalatlan próbatest kétféle lemezvastagsággal
- 2×4 db zömített fejű, kovácsolt technológiával készült nyírócsappal ellátott próbatest
- 2×4 db új fejlesztésű, súrlódásos hegesztési technológiával készült nyírócsappal ellátott próbatest
- 2×4 db kengyelkosaras próbatest

A próbatestek második körben csökkentett nyírési vasalással készültek, ezért készült mindegyik típusból kétszeres mennyiség. Az eltérő technológiával készült nyírócsapos próbatesteknél nem tettek különbséget sem a tervezés során, sem a kialakításban. A nyírásra vasalt próbatestek három különböző lemezvastagsággal és végül négy eltérő betonminőséggel készültek. A nyírócsapos próbatestek 200 mm és 250 mm-es vastagságban, míg a kengyeles vasalású próbatestek 250 mm és 350 mm-es vastagságban készültek, az alkalmazott betonminőségek C20/25, C25/30, C35/45 és C40/50. A próbatestek kialakítását a 3. táblázat foglalja össze.

A 3. táblázatban a próbatestek jelölésében található „k” betű utal a kovácsolt csapos nyírési vasalásra, az „s” betű a súrlódásos csapra, míg a betű nélküli elnevezések jelentik a kengyeles kialakítású próbatesteket. A könnyebb követhetőség érdekében a próbatest paramétereire utaló elnevezéssel láttam el az összes próbatestet. A kísérleti eredmények feldolgozása során erre a 4. táblázatban bemutatott jelölésre fogok hivatkozni. Az „1/k-C33-v25-0,22” elnevezésben „1/k” utal a kísérleti jelölésre, „C33,1” a tényleges, nyomószilárdsági kísérletek alapján megállapított, beton henger szilárdságra MPa-ban, „v25” a lemezvastagságra cm-ben és „0,22” a nyírési vashányadra %-ban. A jelölésben azért választottam a tényleges betonszilárdság megnevezését, mert ahogy arra majd a későbbiekben kitérek, sok esetben ez igen eltérő a tervezetthez képest.

A lemez próbatestek alaprajzi méretüket tekintve nem különböztek, mindegyik 2,50×2,50 m-es befoglaló mérettel készült. Az alátámasztó oszlopocsonk 40 cm átmérőjű, kör keresztmetszetű volt. Mivel a lemez elemeket nyírásra vizsgáljuk, így a nyomatéki nullvonalon célszerű azokat terhelni, ami jelen esetben kör. A próbatestek 8 pontban voltak terhelve, amelyek éppen a nullkörön helyezkednek el a 24. ábrán látható módon. Csapos vasalású próbatesteknél az így kialakított erőkar 1000 mm, míg kengyeles vasalású próbatesteknél 1200 mm lett, mellyel 4,5 - 5,5 m fesztávolságú raszterek vizsgálhatók legjobban, de áttételesen egyéb támaszközökre is levonhatók következtetések.



24. ábra: A próbatestek terhelési pontjai

	A próbatest terv száma	Gyártás időpontja	Törés időpontja	Tervezett beton- szil.	Lemez- vastagság [cm]	A nyírási vasalás típusa
	0.	29.ápr	11.jún	C20/25	25	üres
"Alap" nyírási vasalású próbatestek	1./k	21.máj	18.jún	C35/45	25	kovácsolt csap
	1./s	26.jún	26.júl	C40/50	25	súrlódásos csap
	2./k	28.máj	26.jún	C20/25	25	kovácsolt csap
	2./s	19.júl	09.aug	C25/30	25	súrlódásos csap
	3./k	21.máj	18.jún	C35/45	20	kovácsolt csap
	3./s	26.jún	26.júl	C40/50	20	súrlódásos csap
	4./k	29.ápr	12.jún	C20/25	20	kovácsolt csap
	4./s	10.júl	29.júl	C25/30	20	súrlódásos csap
	5.	03.máj	14.jún	C35/45	35	kengyelkosár
	6.	29.ápr	14.jún	C20/25	35	kengyelkosár
	7.	03.máj	11.jún	C35/45	25	kengyelkosár
	8.	29.ápr	11.jún	C20/25	25	kengyelkosár
	Csökkentett nyírási vasalású próbatestek	9./k	03.máj	14.jún	C35/45	25
9./s		26.jún	29.júl	C40/50	25	súrlódásos csap
10./k		10.júl	29.júl	C25/30	25	kovácsolt csap
10./s		19.júl	09.aug	C25/30	25	súrlódásos csap
11./k		03.máj	12.jún	C35/45	20	kovácsolt csap
11./s		19.júl	09.aug	C40/50	20	súrlódásos csap
12./k		28.máj	26.jún	C20/25	20	kovácsolt csap
12./s		10.júl	09.aug	C25/30	20	súrlódásos csap
13.		21.máj	18.jún	C35/45	35	kengyelkosár
14.		28.máj	26.jún	C20/25	35	kengyelkosár
15.		21.máj	18.jún	C35/45	25	kengyelkosár
16.		28.máj	26.jún	C20/25	25	kengyelkosár
		ref.		12.aug	C20/25	35

3. táblázat: A próbatestek összefoglaló táblázata

A próbaterv száma	A próbaterv jele	Tervezett beton-szil.	Lemezvastagság [cm]	ρ [%] hajlítási vashányad	ρ_s [%] nyírási vashányad	Tényleges hengerszilárdság várható érték [MPa]
0.	0-C26-v25-0	C20/25	25	1,47	0	25,7
1./k	1/k-C33-v25-0,22	C35/45	25	2,07	0,22	33,1
1./s	1/s-C26-v25-0,22	C40/50	25	2,07	0,22	25,7
2./k	2/k-C24-v25-0,14	C20/25	25	1,48	0,14	23,7
2./s	2/s-C23-v25-0,14	C25/30	25	1,48	0,14	23,2
3./k	3/k-C33-v20-0,24	C35/45	20	2,85	0,24	33,1
3./s	3/s-C26-v20-0,24	C40/50	20	2,85	0,24	25,7
4./k	4/k-C26-v20-0,16	C20/25	20	2,04	0,16	25,7
4./s	4/s-C22-v20-0,16	C25/30	20	2,04	0,16	21,9
5.	5-C44-v35-0,26	C35/45	35	1,19	0,26	43,3
6.	6-C26-v35-0,20	C20/25	35	1,05	0,20	25,7
7.	7-C43-v25-0,27	C35/45	25	1,86	0,27	43,3
8.	8-C26-v25-0,24	C20/25	25	1,47	0,24	25,7
9./k	9/k-C43-v25-0,20	C35/45	25	2,07	0,20	43,3
9./s	9/s-C26-v25-0,20	C40/50	25	2,07	0,20	25,7
10./k	10/k-C22-v25-0,12	C25/30	25	1,48	0,12	21,9
10./s	10/s-C23-v25-0,12	C25/30	25	1,48	0,12	23,2
11./k	11/k-C43-v20-0,21	C35/45	20	2,85	0,21	43,3
11./s	11/s-C39-v20-0,21	C40/50	20	2,85	0,21	39,2
12./k	12/k-C24-v20-0,14	C20/25	20	2,04	0,14	23,7
12./s	12/s-C22-v20-0,14	C25/30	20	2,04	0,14	21,9
13.	13-C33-v35-0,20	C35/45	35	1,19	0,20	33,1
14.	14-C24-v35-0,15	C20/25	35	1,05	0,15	23,7
15.	15-C33-v25-0,20	C35/45	25	1,86	0,20	33,1
16.	16-C24-v25-0,17	C20/25	25	1,47	0,17	23,7
ref.	ref-C26-v35-0	C20/25	35	1,05	0	25,7

4. táblázat: Próbatestek néhány számított tulajdonsága, és az általam alkalmazott, a táblázatban megtalálható tulajdonságokra utaló jelölés

A betonfedés minden próbatestnél 20 mm-ben volt meghatározva. A hajítási vasalás minden esetben úgy lett kialakítva, hogy a próbatestek nyírásra menjenek tönkre. Ez igen erős hajlítási vasalást igényelt, így figyelni kellett arra, hogy bedolgozható maradjon a beton és kivitelezhető maradjanak a próbatestek. Az alkalmazott hajlítási vashányad megtalálható a 4. táblázatban próbatestenként.

10 és 12 mm átmérőjű nyírócsapokat alkalmaztak, a 4. táblázatban olvashatók az alkalmazott nyírási vashányadok.

A próbatestek terhelése a 25. ábrán látható acélszerkezetű terhelőkeret segítségével történt. A 10 tonnás acélszerkezet gyártásával az ÉPI egy alvállalkozót bízott meg és a keret júniusra készült el.



25. ábra: A terhelő keret

A lemezelemek zsaluzását, vasszerelését, betonozását és utókezelését is a projektgazda végezte az üzemében (Alsónémedi, Tankcsapda u. 2.). A lemezelemek betonminőségének ellenőrzésére minden esetben próbakockákat is betonoztak. A kizsaluzást változó korban végezték, de minden esetben megvárták az 5 napos kort [14].

4.2. A kísérlet menete

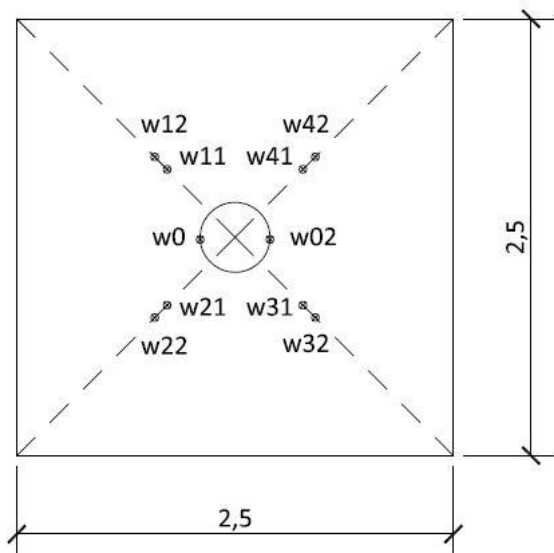
A próbatestek terhelése a már említett terhelőkeret segítségével történt. A vizsgálatokat 4 db, egyenként 100 tonna erő kifejtésre alkalmas hidraulikus sajtóval végeztük. A sajtók olajnyomás által fejtik ki a terhet a teherelosztó gerendákra a 26. ábrán látható módon. A teherelosztó gerendák 2 pontban továbbítják ezt a terhet a lemezelemekre, ahogy azt a 24. ábra mutatja.

A sajtók ugyanarra a tápegységre voltak kötve. A tápra egy nyomásmérő műszert kötve megkaptuk a csövekben mért nyomást. A nyomás és a munkahengerek keresztmetszeti területének ismeretében könnyen számíthatók voltak a kifejtett erő értékek.



26. ábra: Hidraulikus sajtoló erő kifejtése a teherelosztó gerendákra

A lemezelemek kezdetben 25 vagy 50 bar-os lépcsőkben terheltük, ami 200 vagy 400 kN-nak felel meg. A lehajlásokat összesen 10 pontban mértük HBM W50-es induktív adók segítségével. Ezeket a pontokat w_0 , w_{11} , w_{12} , w_{21} , w_{22} , w_{02} , w_{31} , w_{32} , w_{41} és w_{42} -nek neveztük el, elhelyezkedésük a 27. ábrán látható. Az induktív adók mV/V feszültség alapon mérnek, így a tényleges lehajlás értékek kalibráció segítségével kaphatók meg.



27. ábra: Induktív adók helyzete

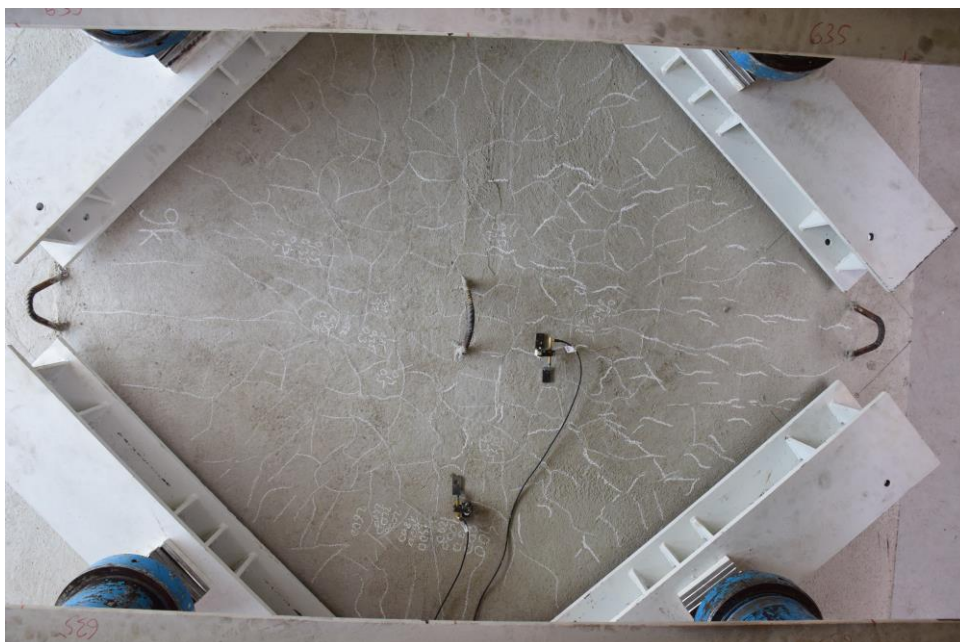
A w_0 és w_{02} induktív adókat mindig a lehető legközelebb helyeztük el az oszlopcsonk kerületéhez. A többi induktív adót az oszlopcsonk felétől értelmessé 45°-os irányokba helyeztük el. Mind a négy irányban kimértünk 2d távolságot, amitől előre- és hátrafele mérve 50-50 mm-re helyeztük el az adókat (28. ábra). Az így egymástól 100 mm-re elhelyezett adók

lehajlás értékeinek segítségével meg tudjuk határozni az elfordulást az oszloptól mért 2d távolságra futó kerület mentén.



28. ábra: Induktív adók elhelyezkedése a próbatestek alsó síkján

A lehajlásmérőkön túl a próbatestek felső síkján WETA típusú repedéstágasság mérőket is elhelyeztünk. Az első nyírási repedések megjelenésekor a próbatestek tehermentesítve lettek és ekkor rögzítettük a megfelelő repedéseken a műszereket. A repedéskép fejlődését és a repedések megnyílását ezen felül minden terhelési lépcsőben krétával rajzoltuk és jegyeztük fel a próbatesteken. A fejlődő repedésképeket fotókon is rögzítettük (29. ábra).



29. ábra: A 9./k próbatest repedésképe a tönkremenetel előtt (felülnézet)

A mérési eredmények feldolgozásánál sokat segíthet a repedésképek vizsgálata. A kísérleteknél hajlított-nyírt lemezeket vizsgáltunk, így először hajlítási repedések jelentek meg. A hajlítási

repedések már viszonylag alacsony teherszinten kialakultak, dominánsan az egyik irányban, hiszen az egyes irányokban eltérőek a hatékony magasságok.

A teherszint növelésével megjelennek a fővasalással párhuzamos repedések, illetve sugárirányú repedések is. A tönkremenetelkor az esetek többségében szépen látható volt az átszűrődési kúp körvonala a lemezek felső síkján (30. ábra).



30. ábra: Átszűrődési kúp a 15. jelű próbatesten (a kúp körvonalát a piros szaggatott vonal jelzi)

5. A kísérleti eredmények feldolgozása

5.1. A próbatetek számított teherbírása

A lemezelemek teherbírásának pontos számításához szükség van a beton és a betonacél szabványos vizsgálatainak, vagyis a szakítóvizsgálat és a nyomószilárdsági vizsgálatok eredményeire. Az ezek alapján meghatározott teherbírás értékek összevethetők a kísérleti eredményekkel.

5.1.1. A szakítóvizsgálati eredmények

A szakítóvizsgálatokat a Hidak és Szerkezetek Tanszék laboratóriumában végezték el. A laborban csupán a $\phi 10$ mm-es átmérőjű súrlódásos hegesztésű nyírócsapokat és $\phi 10$ mm-es betonacélt (kengyelkosár) vizsgálták, a hajlítási vasalást, illetve a nagyobb átmérőjű csapokat nem. Az eredmények alapján meg lehetett határozni az egyes próbateteknél a folyáshatárt és a szakítószilárdságot, ezek átlagolt eredményei láthatók az 5. táblázatban [14].

	Folyáshatár, f_y [Mpa]	Szakítószilárdság, f_u [Mpa]
$\phi 10$ betonacélok	556,2	659,8
$\phi 10$ súrlódásos csapok	542,1	639,9

5. táblázat: A szakítóvizsgálati eredmények átlaga [14]

Azoknál a betonacéloknál, melyekhez nincs mért anyagszilárdsági jellemző, a szabvány által megadott 500 MPa karakterisztikus folyáshatárt használom.

5.1.2. A nyomószilárdság vizsgálat eredményei

Nyomószilárdsági vizsgálat minden bedolgozott betonminőségről készült, melyek eredményeként a vizsgált kockaszilárdság várható értékének átlagát kaptuk meg (f_{cm}), mely értékeket át kellett számítani hengerszilárdságra. A számítási eredményeket az 6. táblázatban foglalom össze.

Próbatestek	Tervezett betonminőség	Jegyzőkönyv dátuma	$f_{cm, \text{átl.kocka}}$ [MPa]	$f_{cm, \text{henger}}$ [MPa]
0.	C20/25	2019.04.29	30,9	25,7
1./k	C35/45	2019.05.21	41,9	33,1
1./s	C40/50	2019.06.26	34,4	25,7
2./k	C20/25	2019.05.28	30,8	23,7
2./s	C25/30	2019.07.19	30,1	23,2
3./k	C35/45	2019.05.21	41,9	33,1
3./s	C40/50	2019.06.26	34,4	25,7
4./k	C20/25	2019.04.29	30,9	25,7
4./s	C25/30	2019.07.10	26,9	21,9
5.	C35/45	2019.05.03	53,3	43,3
6.	C20/25	2019.04.29	30,9	25,7
7.	C35/45	2019.05.03	53,3	43,3
8.	C20/25	2019.04.29	30,9	25,7
9./k	C35/45	2019.05.03	53,3	43,3
9./s	C40/50	2019.06.26	34,4	25,7
10./k	C25/30	2019.07.10	26,9	21,9
10./s	C25/30	2019.07.19	30,1	23,2
11./k	C35/45	2019.05.03	53,3	43,3
11./s	C40/50	2019.07.19	49,2	39,2
12./k	C20/25	2019.05.28	30,8	23,7
12./s	C25/30	2019.07.10	26,9	21,9
13.	C35/45	2019.05.21	41,9	33,1
14.	C20/25	2019.05.28	30,8	23,7
15.	C35/45	2019.05.21	41,9	33,1
16.	C20/25	2019.05.28	30,8	23,7
ref.	C20/25	2019.05.29	31,8	25,7

6. táblázat: Nyomószilárdsági eredmények és az átszámított hengersizilárdsági értékek

A táblázatban látható, hogy a 06.26. dátumú nyomószilárdság vizsgálatnál a mért értékek átlaga átszámítva hengersizilárdságra (25,7 MPa) jelentősen alul maradt a tervezett C40/50 betonminőséghez képest. Ez a típusú beton került az 1./s, 3./s és 9./s jelű próbatestekbe. Sajnos nem csak ennél a mérésnél született ekkora differencia, több esetben is jóval a tervezett betonminőség alatt maradtak az eredmények, de ennél a mérésnél volt a legjelentősebb a különbség.

5.1.3. A teherbírások számítása

A próbatestek tervezésénél [14] minden próbatestnek ki lett számítva a teherbírása, a szabványos anyagminőségek várható értéke alapján. A nyomószilárdsági eredmények alapján módosítottam a betonszilárdságot és az abból származtatott paramétereket és meghatároztam a számított (várt) teherbírás értékeket. A számítás menetét a 9./k jelű, csapos nyírási vasalású, 25 cm vastag és C35/45 betonszilárdságú próbatesten mutatom be az 1. Mellékletben.

A hajlítási teherbírás számításnál figyelembe vettem a nyomott oldali vasalást is, ahogy az a próbatestek tervezésénél is történt [14]. A próbatestek sűrűbb vasalással készültek az oszlophoz

közel, így a teherbírás számításnál külön kezelem a belső és a külső zónát, és külön számítom az egyes zónák fajlagos nyomatéki teherbírását.

A számítást a nyírás vizsgálatával folytattam. Vizsgáltam a beton teherbírását ferde nyomásra a pillér u_0 kerülete mentén, majd nyírásra az u_1 kerület mentén. Ezt követően számítottam a nyírási vasalás teherbírását. A próbatest teherbírása végül a nyírási acélbetétek teherbírásának és a beton ferde nyomásra való teherbírásának minimum értéke lett.

A próbatestek számított teherbírás értékei összefoglalva a 7. táblázatban található. Fontosnak tartom hangsúlyozni, hogy a számítás során a tényleges, tehát várható anyagszilárdságokkal dolgoztam. Nincsenek figyelembe véve a szabvány által alkalmazott parciális biztonsági tényezők.

A próbatest terv száma	A próbatest jele	R_{ny} [kN] hajlítónyomatéki teherbírás	R_{max} [kN] beton teherbírása ferde nyomásra	R_{min} [kN] beton teherbírása nyírásra	R_{cs} [kN] nyírási acélbetétek teherbírása	R_c [kN] a próbatest teherbírása
0.	0-C26-v25-0			1035		1035
1./k	1/k-C33-v25-0,22	2839	2274	2662	1781	2274
1./s	1/s-C26-v25-0,22	2708	1827	2591	1781	1827
2./k	2/k-C24-v25-0,14	2011	1729	1811	1815	1729
2./s	2/s-C23-v25-0,14	2147	1701	1806	1815	1701
3./k	3/k-C33-v20-0,24	2156	1733	2014	1357	1733
3./s	3/s-C26-v20-0,24	1997	1392	1968	1357	1392
4./k	4/k-C26-v20-0,16	1590	1424	1460	1391	1424
4./s	4/s-C22-v20-0,16	1630	1233	1432	1391	1233
5.	5-C44-v35-0,26	3274	4182	3111	2630	3111
6.	6-C26-v35-0,20	2720	2691	2519	2630	2519
7.	7-C43-v25-0,27	2263	2833	1963	1781	1963
8.	8-C26-v25-0,24	1712	1823	1674	1781	1674
9./k	9/k-C43-v25-0,20	2952	2833	2197	1781	2197
9./s	9/s-C26-v25-0,20	2708	1827	2043	1781	1827
10./k	10/k-C22-v25-0,12	1989	1609	1457	1815	1457
10./s	10/s-C23-v25-0,12	2147	1701	1473	1815	1473
11./k	11/k-C43-v20-0,21	2287	2158	1674	1357	1674
11./s	11/s-C39-v20-0,21	2241	1993	1653	1357	1653
12./k	12/k-C24-v20-0,14	1564	1325	1171	1391	1171
12./s	12/s-C22-v20-0,14	1630	1233	1157	1391	1157
13.	13-C33-v35-0,20	3203	3357	2480	2630	2480
14.	14-C24-v35-0,15	2699	2504	2139	2630	2139
15.	15-C33-v25-0,20	2183	2274	1574	1781	1574
16.	16-C24-v25-0,17	1690	1696	1354	1781	1354
ref.	ref-C26-v35-0			1490		1490

7. táblázat: A próbatestek számított teherbírás értékei

5.2. A mérési eredmények feldolgozása és kiértékelése

5.2.1. Az eredmények kalibrálása

Az induktív úradók mV/V feszültség alapon mérnek, és az így kapott értéket a mérés közben lejátszódó kalibrációval módosítják mm dimenzióba. A műszerek mindegyike rendelkezik egy gyári pontos kalibrációval, ám a helyszínen a mérések egy kezdeti durva kalibrációval felül lettek írva. A nyers mérési adatokat így utólag kellett korrigálni a szabványos kalibrációval. A

durva és a pontos kalibráció között egy arányszám megállapításával lettek módosítva az értékek [13].

Az eredmények feldolgozásánál lényeges lehet, hogy az útdók pontosan csak a gyári mérésstartományukon belül képesek mérni.

5.2.2. Az elért törőerők vizsgálata

A 8. táblázatban összefoglaltam a számított és mért teherbírás értékeket. A mérés során tapasztalt teherbírás többletet vagy éppen alulmaradást százalékosan tüntettem fel.

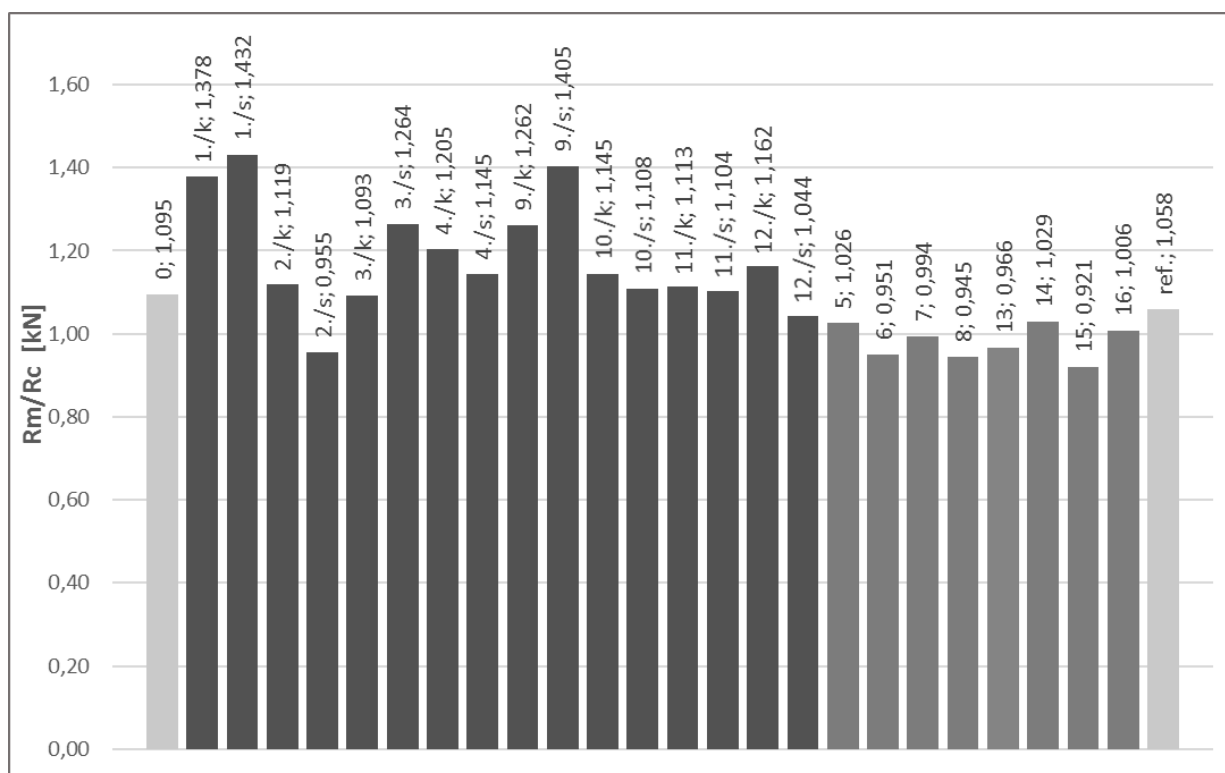
A próbatest terv száma	A próbatest jele	Számított teherbírás R_c [kN]	Mért teherbírás R_m [kN]	R_m/R_c	$R_m/R_c - 1$
0.	0-C26-v25-0	1035	1133	1,095	9,48%
1./k	1/k-C33-v25-0,22	2274	3133	1,378	37,76%
1./s	1/s-C26-v25-0,22	1827	2616	1,432	43,15%
2./k	2/k-C24-v25-0,14	1729	1935	1,119	11,93%
2./s	2/s-C23-v25-0,14	1701	1625	0,955	-4,47%
3./k	3/k-C33-v20-0,24	1733	1893	1,093	9,25%
3./s	3/s-C26-v20-0,24	1392	1760	1,264	26,41%
4./k	4/k-C26-v20-0,16	1424	1716	1,205	20,54%
4./s	4/s-C22-v20-0,16	1233	1412	1,145	14,52%
5.	5-C44-v35-0,26	3111	3192	1,026	2,59%
6.	6-C26-v35-0,20	2519	2395	0,951	-4,93%
7.	7-C43-v25-0,27	1963	1952	0,994	-0,56%
8.	8-C26-v25-0,24	1674	1582	0,945	-5,51%
9./k	9/k-C43-v25-0,20	2197	2773	1,262	26,23%
9./s	9/s-C26-v25-0,20	1827	2567	1,405	40,47%
10./k	10/k-C22-v25-0,12	1457	1668	1,145	14,47%
10./s	10/s-C23-v25-0,12	1473	1632	1,108	10,82%
11./k	11/k-C43-v20-0,21	1674	1863	1,113	11,30%
11./s	11/s-C39-v20-0,21	1653	1826	1,104	10,44%
12./k	12/k-C24-v20-0,14	1171	1361	1,162	16,20%
12./s	12/s-C22-v20-0,14	1157	1208	1,044	4,38%
13.	13-C33-v35-0,20	2480	2396	0,966	-3,37%
14.	14-C24-v35-0,15	2139	2202	1,029	2,95%
15.	15-C33-v25-0,20	1574	1449	0,921	-7,92%
16.	16-C24-v25-0,17	1354	1363	1,006	0,64%
ref.	ref-C26-v35-0	1490	1577	1,058	5,83%

8. táblázat: Az elért törőerők és a számított teherbírások összehasonlítása

Az 5.1.2. pontban kiemeltem az 1./s, 3./s és 9./s próbatesteket érintő nyomószilárdsági eredmények alacsony értékeit. A 8. táblázat százalékos eredményei láttán azt tapasztaltam ezeknél a lemezelemeknél, hogy a mért szilárdságok alapján számított teherbírások (7. táblázat) jóval az elért törőerők alatt maradtak.

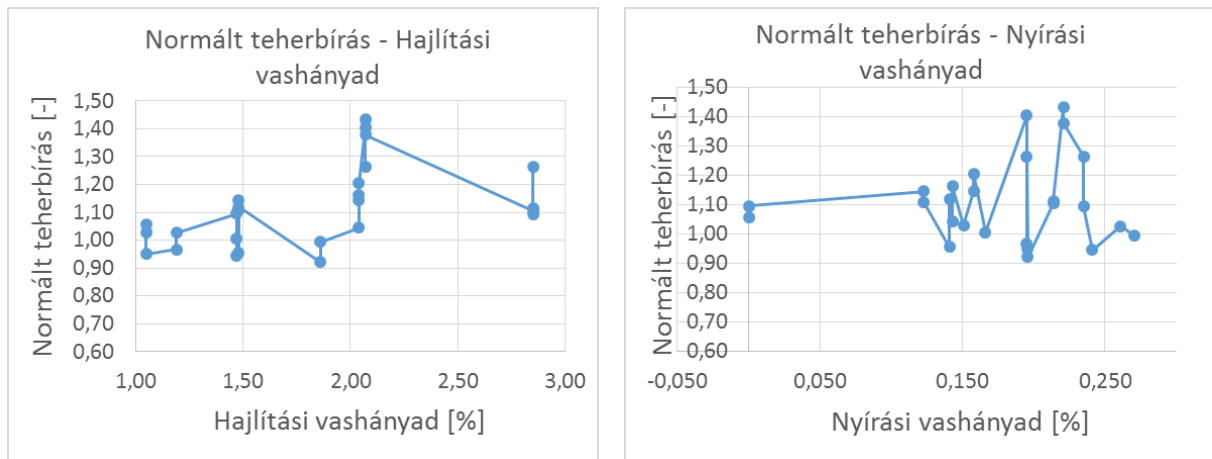
Alapvetően az látható az eredmények alapján, hogy a kengyeles nyírási vasalású próbatesteknél elért törőerő jobban megközelíti a számított teherbírást, mint a csapos próbatestek esetében. Negatív eredmény viszont, vagyis olyan eset, hogy az elért törőerő kisebb, mint a számított teherbírás a 2./s csapos próbatest kivételével csak kengyeles vasalású lemezelemeknél fordult elő (31. ábra).

A csapos próbatestek teherbírása a 2./s próbatest kivételével minden esetben meghaladta az EC2 alapján számított teherbírásokat. A normált teherbírás értékeket tekintve (R_m/R_c) megállapítható, hogy a 2. pontban tárgyalt szakirodalmi kísérletek eredményei nálunk is beigazolódtak, a csapos vasalású próbatestek általában nagyobb teherbírás értékeket produkáltak.



31. ábra: Normált teherbírás értékek ábrázolása

A 32. ábra szemlélteti a normált teherbírás értékeket a hajlítási vashányad és a nyírási vashányad függvényében. Olyan tendenciát, amely arra utalna, hogy a próbatestek valamelyik egyéb paramétere (betonszilárdság, lemezzvastagság, nyírási vashányad, hajlítási vashányad) egyértelműen befolyásolja az R_m és R_c különbségét nem találtam. Sejtésem szerint az eltérések oka inkább a nyomószilárdsági eredmények nagy szórása lehet.

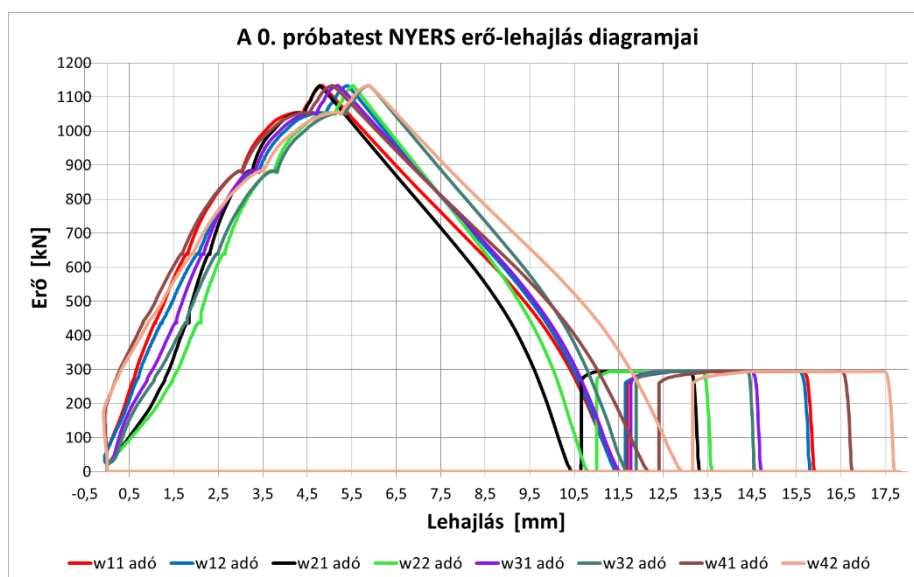
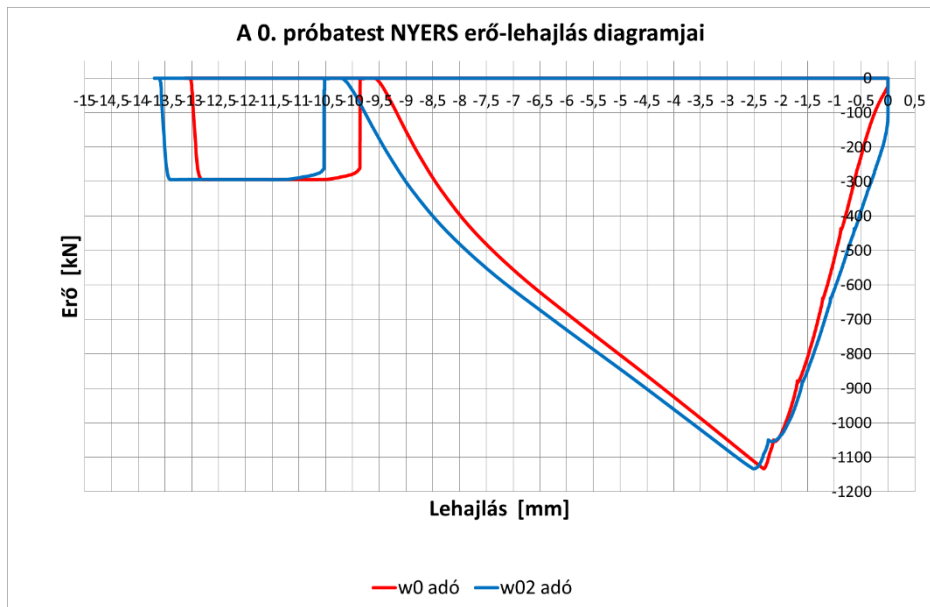


32. ábra: Normált teherbírás értékek a hajlítási- és a nyírási vashányad függvényében

5.2.3. A nyers adatokkal végzett műveletek

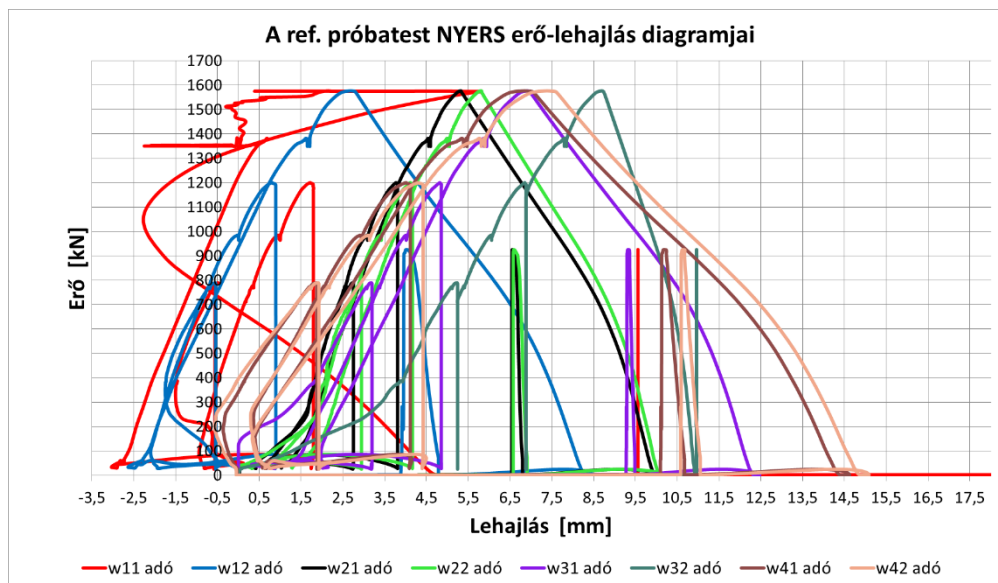
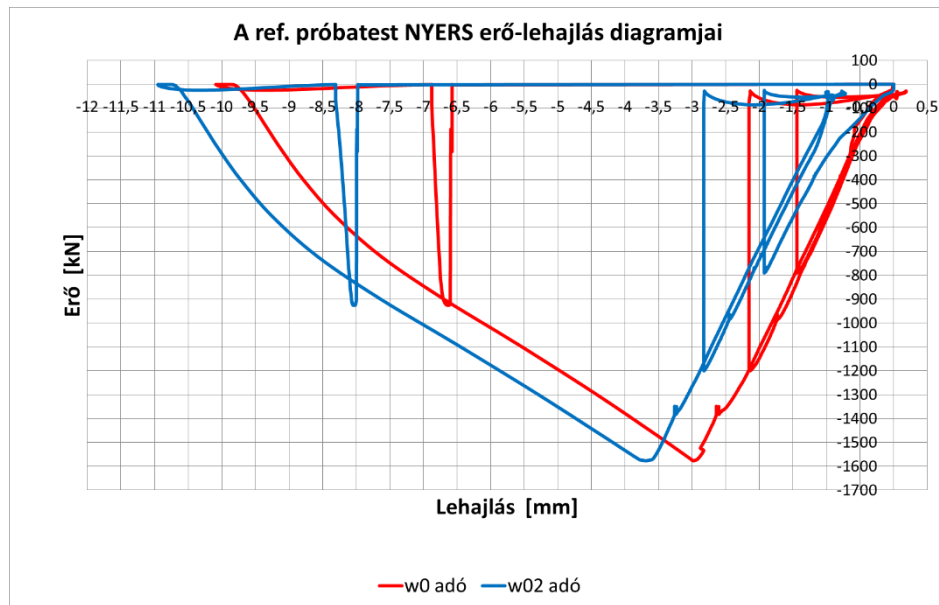
A nyers mérési eredmények feldolgozását a nyírási vasalás nélküli 0. és ref. próbatesteken mutatom be. A részletezett műveletek megegyeznek az összes próbatestnél. Gyuricza Arnold diplomamunkájában [14] már elkezdte e mérési eredmények feldolgozását, 9 db próbatestet értékelt ki. Az ő munkáját folytatva elemzem a maradék 17 db kísérleti lemezelemet mérési eredményeit.

A cél minden próbatestnél, hogy értékelhető erő-lehajlás, erő-elfordulás és erő-repedéstágasság ábrákat kapjunk. A txt fájlban kapott mérési eredményeket Excel táblázatban helyeztem el és a módosításokat már ott végeztem. Először az oszlopcsomkhoz közeli w_0 és w_{02} útdókból származó lehajlásokat ábrázoltam az erő függvényében, majd a távolabbi w_{11} - w_{42} adókból származókat (33. ábra).



33. ábra: A 0. próbatest nyers mérési eredményei

Az oszlopcsomokhoz közeli lehajlások vizsgálatával érdemes kezdeni, hiszen a diagramon jól megfigyelhető, ha ferdén helyezkedik el a próbatest. Az ilyen esetekben az átszűrődés akár féloldalasan is létrejöhet, ami a 2d távolságra elhelyezett adóknál már igen sokat torzíthat az eredményeken. A másik nyírási vas nélküli referencia próbatest diagramján (34. ábra) például megfigyelhető egy kezdeti ferdeség és annak hatása a külső adókra. A w_0 és w_{02} diagramokról továbbá a teherbírás értékek is leolvashatók.

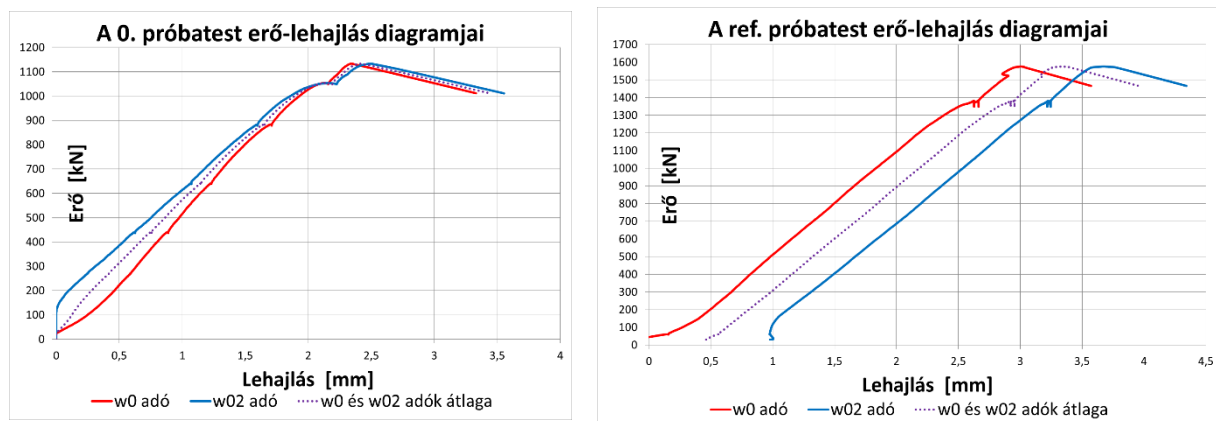


34. ábra: A ref-C26-v35-0 próbatest nyers mérési eredményei

A ref-C26-v35-0 próbatestnél továbbá látható, hogy ellentétben a 0. próbatesttel, itt volt egy kezdeti terhelési majd tehermentesítési szakasz és ezt követően terheltük a teherbírásig a próbatestet. Ennek oka, hogy a WETA repedéstágasság mérőket az első repedések megjelenését követően helyeztük fel mindig, a lemez tehermentesítésével. A 0. próbatesthez még nincsenek repedéstágasság eredmények, így ott hiányzik ez a kezdeti szakasz. A próbatestek jelentős többségénél volt repedéstágasság mérés. A tehermentesítési szakasz leszálló ága meredek, gyakorlatilag függőleges, mivel az olajnyomás azonnal nullára esik le. A sajtókba ekkor még csak elkezd leépülni a nyomás, vagyis a próbatestek terhelése nem szűnik meg valójában ennyire hirtelen. Az erő-lehajlás diagramokról a továbbiakban levágtam ezt a kezdeti szakaszt, hiszen nem követi helyesen a valós leszállóágot.

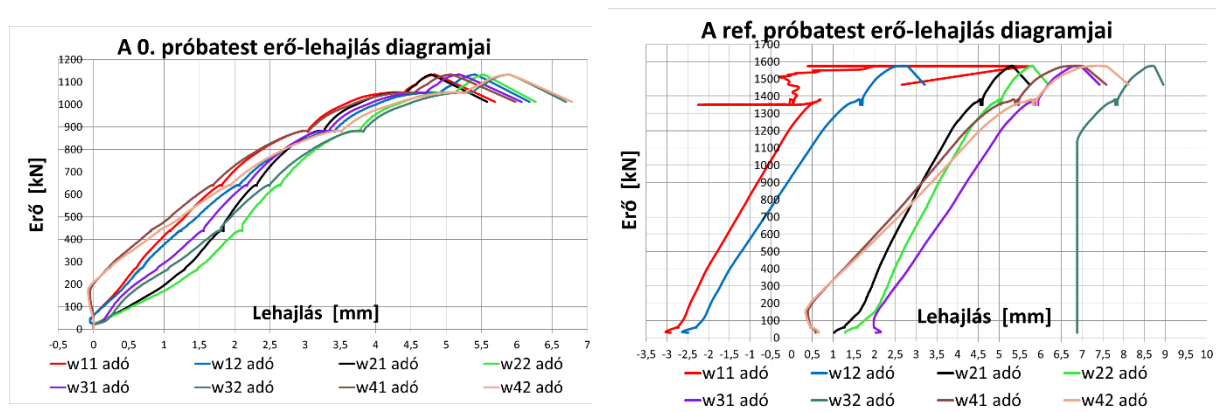
A hidraulikai rendszerből származó további hiba még, ami megfigyelhető néhány próbatestnél, az ábrán megjelenő függőleges kiugró szakaszok. Ilyenkor a hidraulikus rendszer súrlódás révén dolgozik az erőátadás kezdeti fázisában és az ábra függőleges szakasza feleltethető meg a súrlódási erő kétszeresének [14].

A nyers eredményeket a kalibrációból származó szorzótényezővel módosítottam. Az eredmények kiértékelésében nincs további szerepe a teherbírást követő teljes leszállóágnak, így azt minden esetben levágtam egy rövid szakaszt hagyva (35. ábra).



35. ábra: A próbatestek erő-lehajlás diagramja

A w_{11} - w_{42} adóknál megfigyelhető, hogy ellentétes értelemben mérték a kísérlet elején (36. ábra). A lemezelem ebben a fázisban helyezkedik, billen az alatta levő gumilemez miatt. A billenést benne hagytam az eredményekben, és úgy kezeltem, hogy a végén az egymással szemközti lehajlások átlagolt értékét vettem fel.

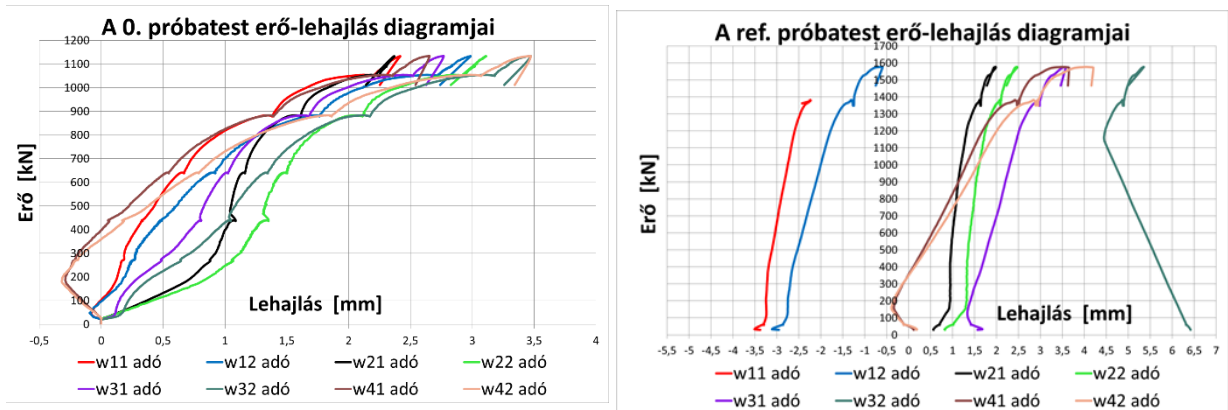


36. ábra: A w_{11} - w_{42} adókból származó erő-lehajlás diagramok a kalibráció miatti átszorzást követően

A diagramokon jól látszik, hogy a w_{x2} adók minden esetben nagyobb lehajlásokat mértek, mint a w_{x1} jelű adók. Ez volt a várt eredmény, hiszen a 2-es indexű adók helyezkedtek el távolabb az oszlopcsonktól. A különbség kismértékű kell, hogy legyen, hiszen az adók közötti távolság csupán 100 mm. A ref-C26-v35-0 próbatest esetén a w_{31} és w_{32} adók eredményei viszonylag nagy differenciát mutatnak. Az azonos körön mért lehajlások tendenciája is hasonló kellene, hogy legyen, ám a ref. próbatest esetén ez sem teljesül mindenhol. Ezek az eltérések valószínűleg a kezdeti billenésnek tudhatók be, elképzelhető, hogy itt ferdén alakult ki az átszúródás. Ezen kívül a w_{11} adó nagy valószínűséggel meglazult mérés közben, ezért egy bizonyos szakasz után már téves eredményt adott, ezt a további diagramokon levágtam.

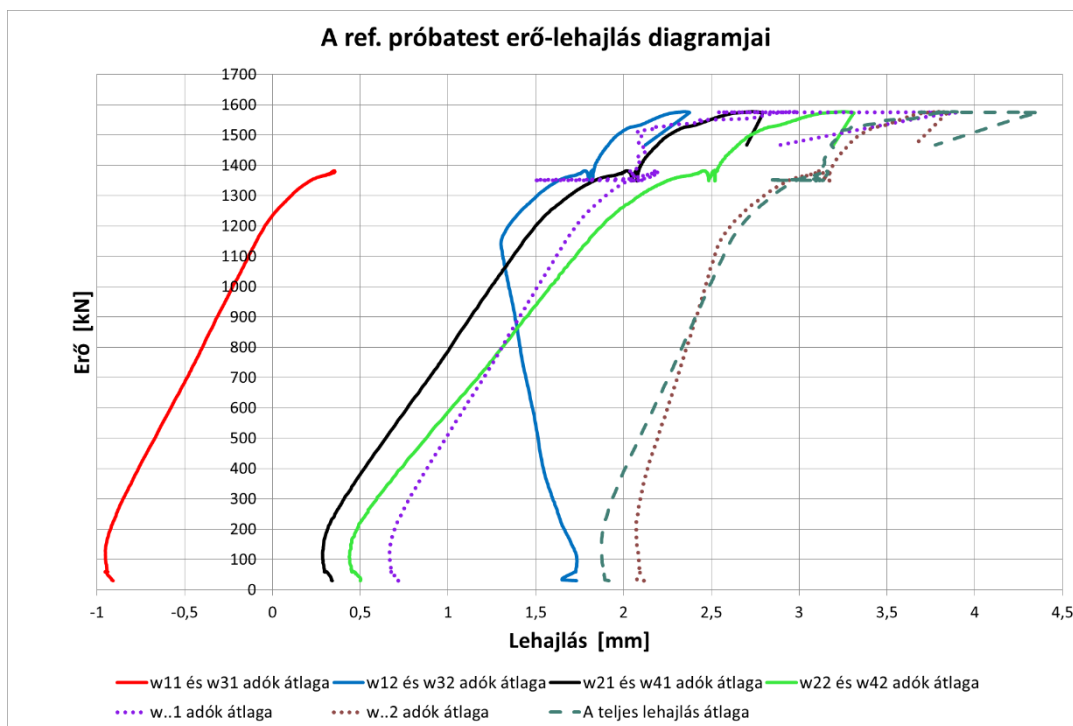
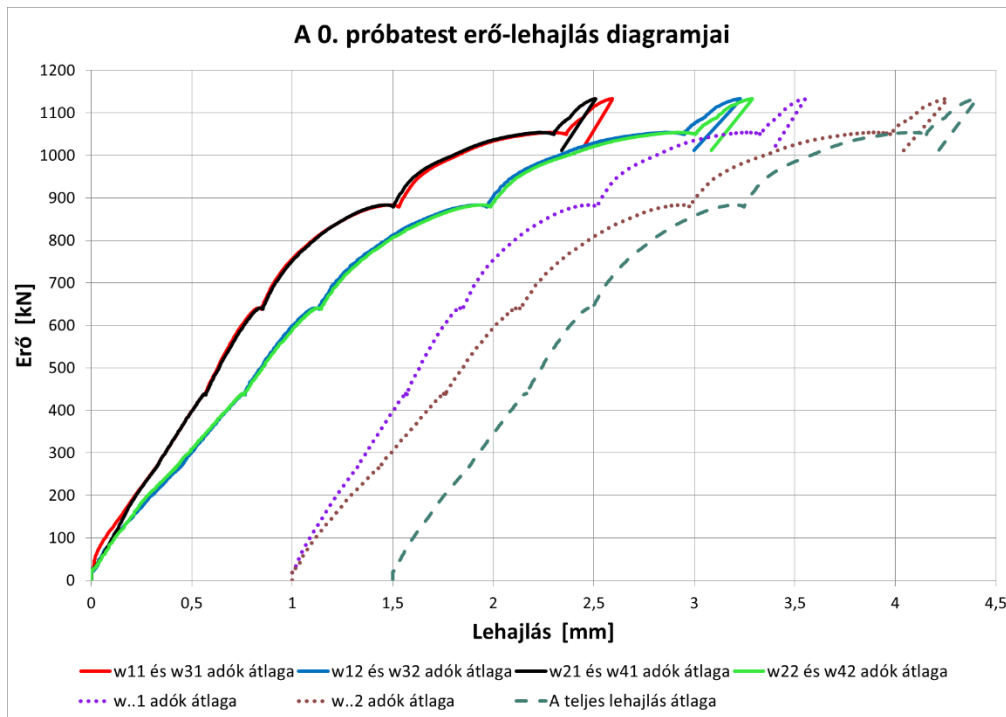
A w_{11} - w_{42} értékeket ezt követően módosítottam a w_0 és w_{02} lehajlásokkal, olyan módon, hogy az oszlopcsonk közeli lehajlások átlagát (35. ábra) kivontam a w_{11} - w_{42} értékekből. Így vettem

figyelembe a gumilemez- és az oszlopcsonk összenyomódását, illetve a terhelőkeret alakváltozását (37. ábra).



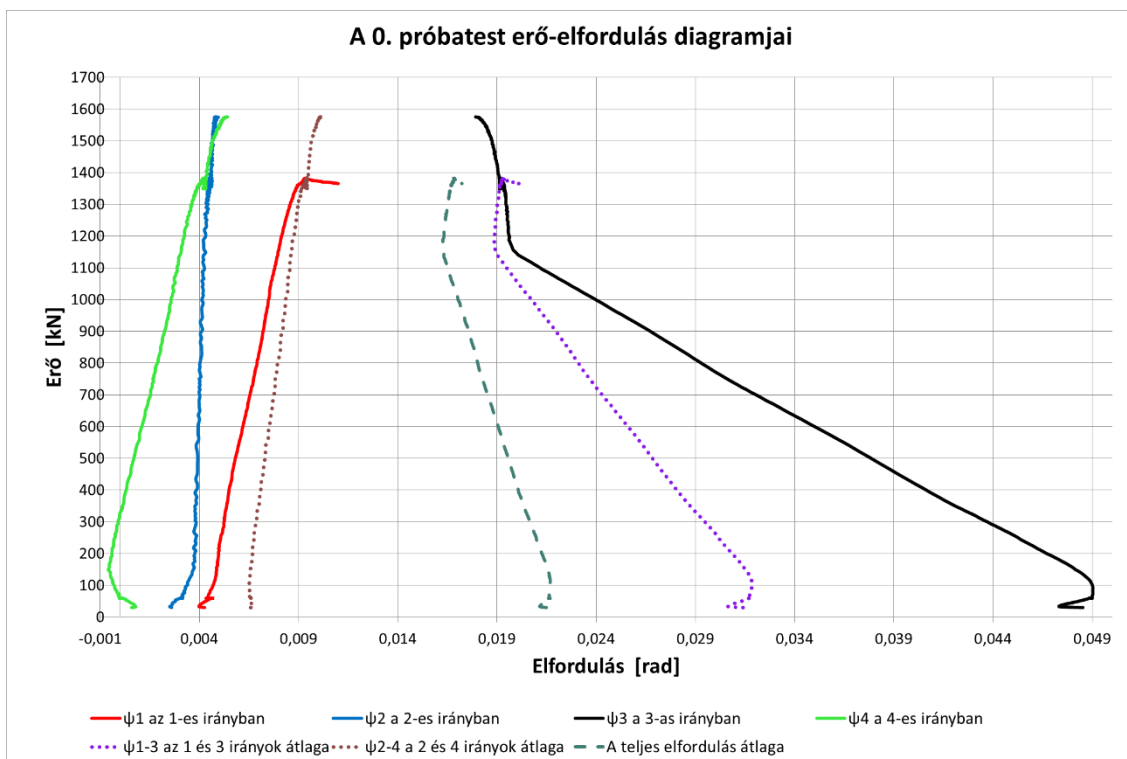
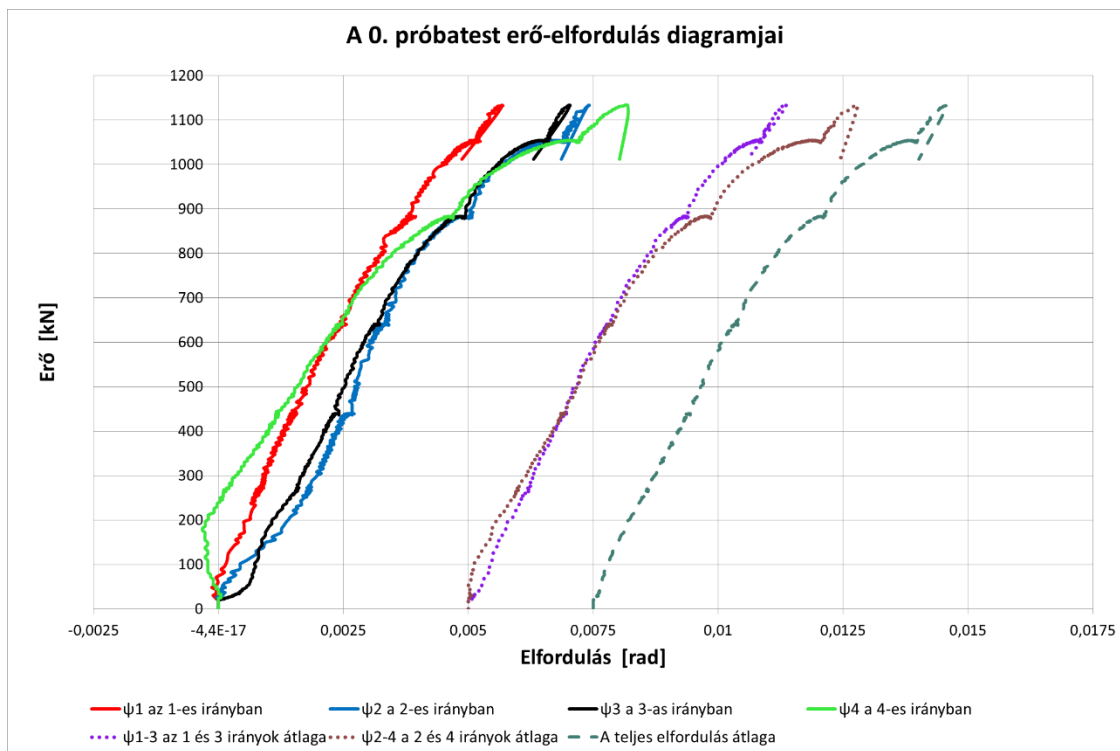
37. ábra: A w_{11} - w_{42} adók módosított értékei a w_0 és w_{02} -vel való korrigálás után

Ezt követően, ahogy már korábban említettem az egymással szemben levő lehajlások átlagolt értékeit ábrázoltam a 38. ábrán. Az átlagolással a billenés hatása kiegyenlítődik, ha a billenés tengelye átmegy a középponton. Az adók átlagolását eltolva ábrázolom. A ref. próbatestnél az tapasztalható, hogy a kezdeti billenés mértéke nem kompenzálódott teljesen, csak enyhült. Ennek az az oka, hogy a billenés tengelye nem ment át a középponton.



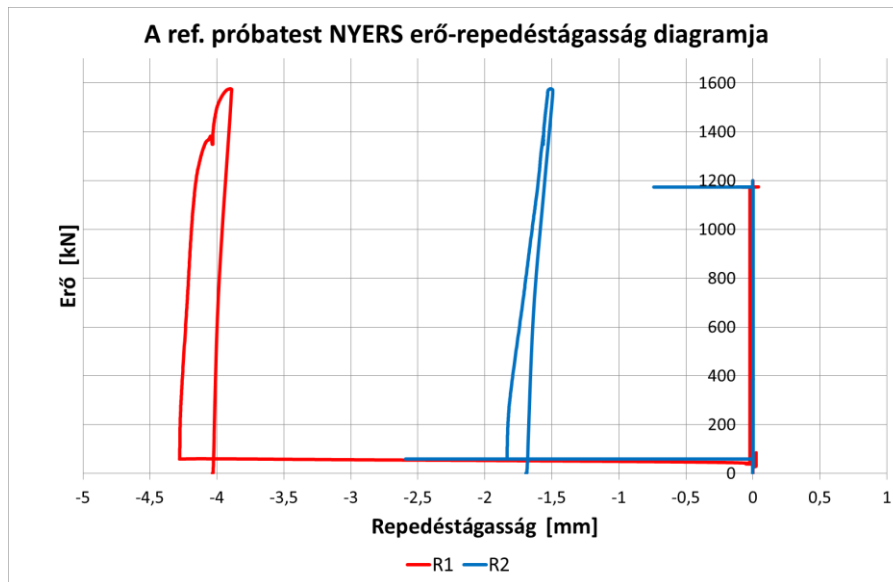
38. ábra: Átlagolt erő-lehajlás görbék

A lehajlás feldolgozását követően az erő-elfordulás görbék megrajzolásával foglalkoztam. A négyirányban elhelyezett adók segítségével négyirányban tudjuk számítani az elfordulásokat. A w_{x2} és w_{x1} indexű adók által mért lehajlások különbségét elosztva a 100 mm-es távolságukkal megkaptam az ψ elfordulás értéket radiánban. A törőerő elérését követően, ahogy megtörténik az átszűrődés az így kapott elfordulás érték már nem releváns, így azt nem veszem figyelembe. Továbbá a ref. próbatest esetén törölöm a w_{11} - és az ahhoz kapcsolódó görbék azon részét, ahol már nem helyesen mért az útdó. Az átlagolt elfordulás értékek mindkét próbatest esetén a 39. ábrán láthatók.

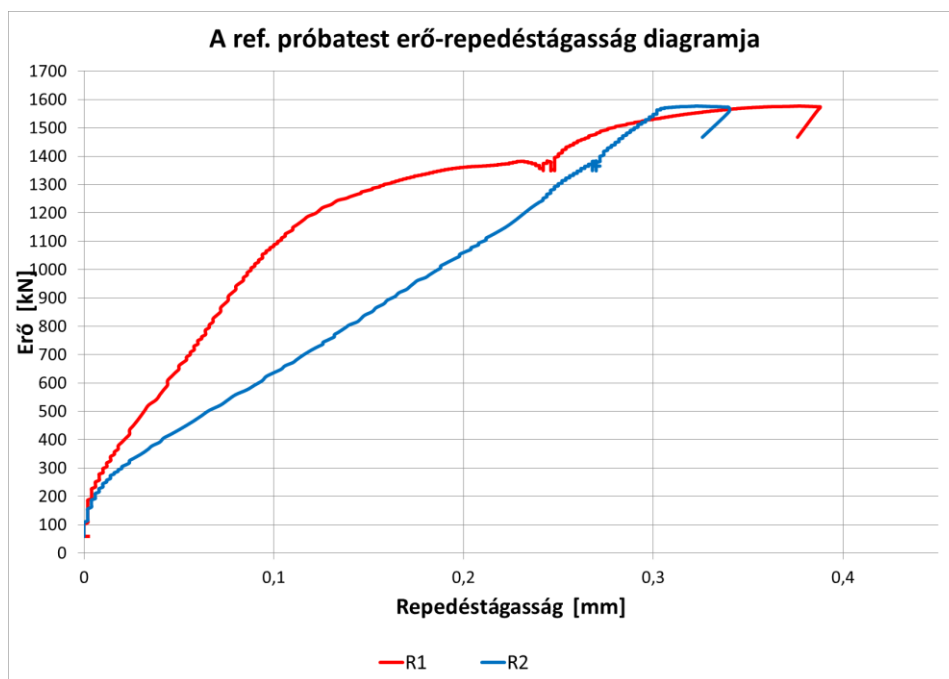


39. ábra: A próbatestek átlagolt erő-elfordulás diagramja

Ahogy azt már korábban említettem a ref. próbatestnél készült repedéstágasság mérés is. A repedéstágasság mérőket a mérés közben helyeztük fel, ott, ahol az átszűrődési kúp kialakulását vártuk, tehát az oszlopfejtől kb. 2d távolságra a lemez felső síkján. A nyers mérési eredmények ábrázolását követően (40. ábra) levágtam a felhelyezés előtti és a törés utáni szakaszt, illetve az origóba toltam a görbék kiindulópontját (41. ábra).



40. ábra: Erő repedéstágasság diagram a nyers mérési eredményekből



41. ábra: Korrigált erő-repedéstágasság diagram

5.2.4. Az eredmények kiértékelése

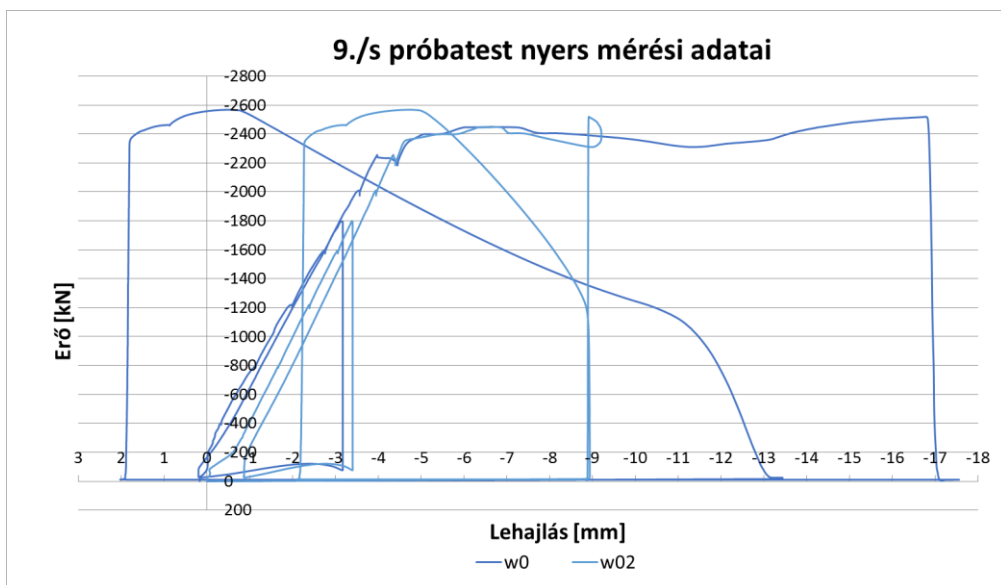
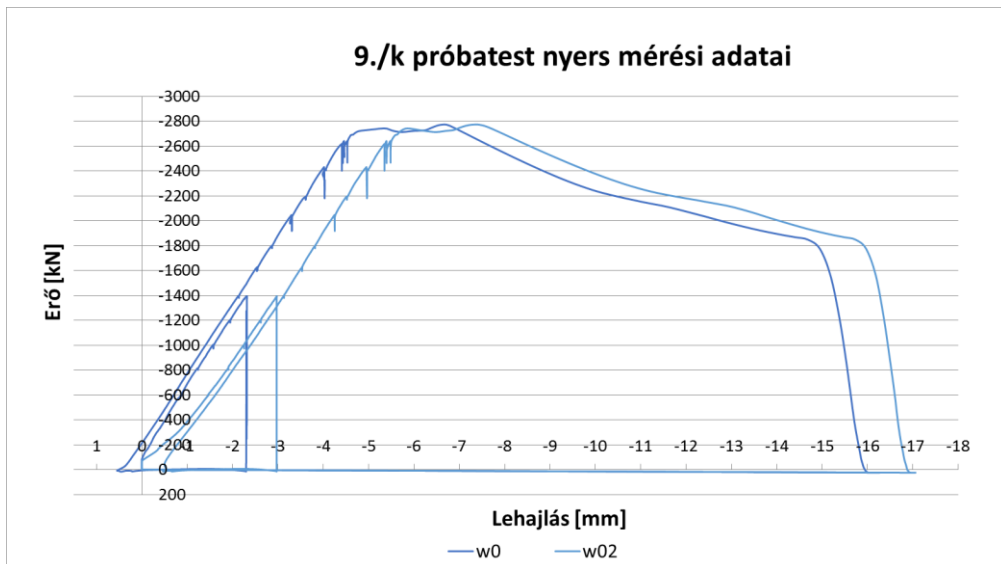
Dolgozatomban, részletesebben a 9./k és 9./s jelű próbatestek diagramjait elemzem. Azért erre a két próbatestre esett a választásom, mert mindkettő ugyanolyan geometriával, anyagminőséggel és hajlítási vasalással készült, csupán a nyírási vasalás típusában különböznek. A 9./k próbatest az elterjedt kovácsolt fejű csapokkal, míg a 9./s próbatest az új fejlesztésű sűrűlódásos hegesztésű csapokkal lett kialakítva. A 9. táblázatban látható összefoglalva a két próbatest adatai. A későbbiekben bemutatott modellezés során is ezt a próbatestet vettem alapul.

A próbatest terv száma	A próbatest jele	Számított teherbírás R_c [kN]	Mért teherbírás R_m [kN]	R_m/R_c	$R_m/R_c - 1$
9./k	9/k-C43- $\sqrt{25}$ -0,20	2197	2773	1,262	26,23%
9./s	9/s-C26- $\sqrt{25}$ -0,20	1827	2567	1,405	40,47%

9. táblázat: A 9./k és 9./s próbatest adatai és normált teherbírása

A többi kísérleti elem eredményeit a későbbiekben összesített diagramokon fogom különböző paraméterek függvényében ábrázolni és összehasonlítani.

A próbatestek nyers w_0 és w_{02} adatai a 42. ábrán láthatók. A 9./k próbatest teljesen szokványosan viselkedett. Az első nyírási repedések megjelenéséig terheltük, majd a repedéstágasság mérők felhelyezéséig tehermentesítettük, ezt követően pedig újra terheltük egészen a tönkremenetelig. Mindkét próbatest esetén a megtámasztás környezetében klasszikus átszűrődési kúp keletkezett.

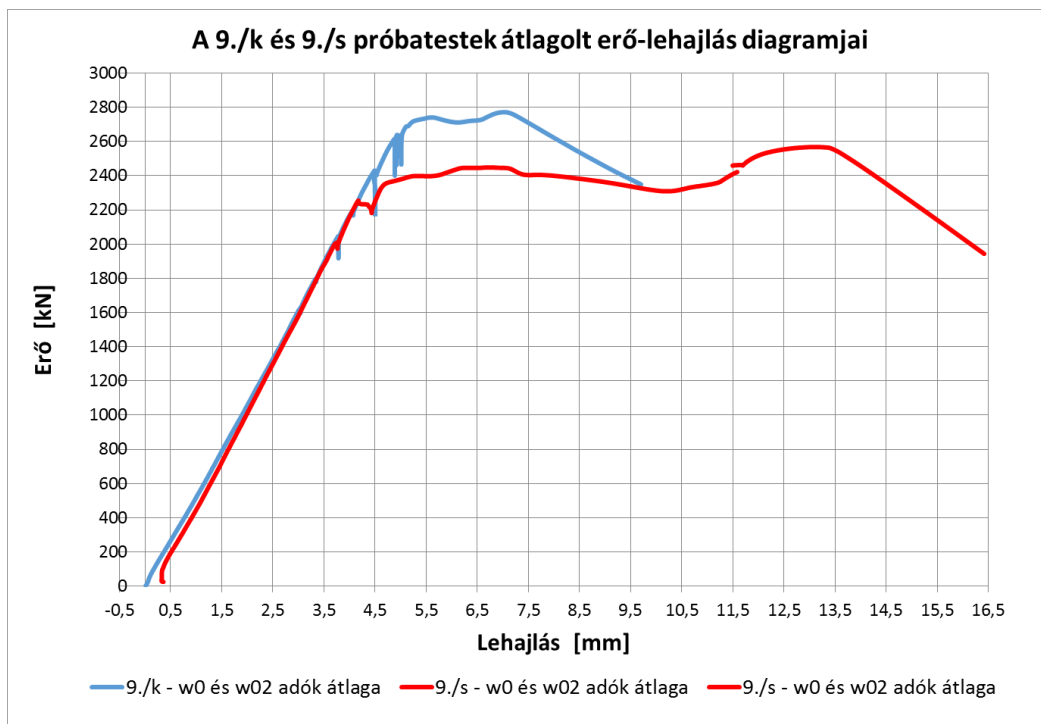


42. ábra: A 9./k és 9./s próbatestek nyers w_0 és w_{02} adatai

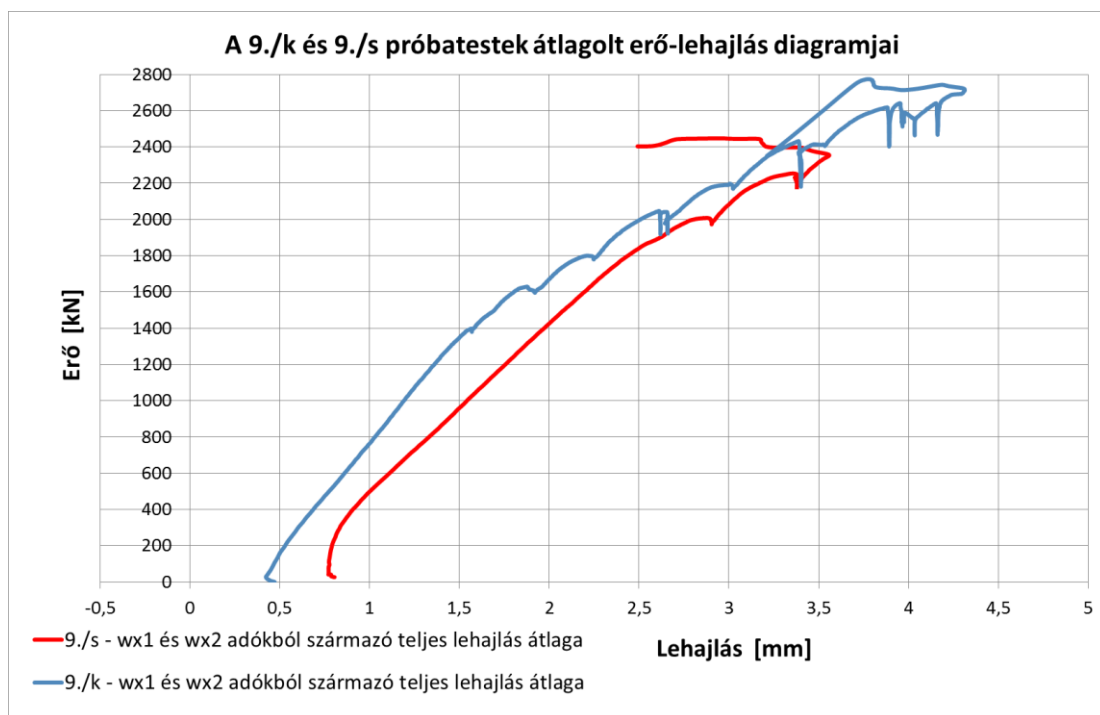
A 9./s próbatestnél az újra terhelést követően az induktív adók elérték mérési tartományuk határát. Az adókat át kellett állítani és helyezni, majd ezt követően folytathattuk a mérést. A 41. ábrán látható, hogy a 9./s próbatest stabilan tartotta az elért teherszintet (~2400 kN) több mm alakváltozáson keresztül, sőt még vett is fel erőt. Mindezek miatt a 9./s próbatest diagramja némi korrekcióra szorult. Az adók átállítás alatti olajnyomás leesést, majd újra visszaterhelést levágtam, és a hátrébb mozdult, de ugyanazt a teherszintet elérő görbét az eredeti szakasz végére toltam. Így jöttek létre a végleges erő-lehajlás görbék, illetve azok átlaga, mely a 43. ábrán látható a 9./k próbatest átlagolt erő-lehajlás görbéje mellett.

A 43. ábrán látható, hogy a két különböző típusú csappal készült próbatest a terhelési szakaszban hasonlóan viselkedett, szinte tökéletesen párhuzamosan, egymást fedve fut a két egyenes. A 9./k jelű lemezelemmel kb. 10 %-kal nagyobb törőterhet értünk el, mint a 9./s jelű lemezzel. Mindkét görbén látható, hogy van egy első plató, majd kismértékben visszaesik a teher és a következő maximum érték a törőteher. Ennek az alaknak az az oka, hogy kezdetben a beton viseli az átszűrő erőt, majd bereped, és ekkor csökken a merevség. A merevség csökkenés miatt visszaesik az olajnyomás. Ekkor kezd el dolgozni a csap, aminek köszönhetően

további terhet tud felvenni a próbatest. Ha a hidraulikus terhelő berendezés helyett súlyteherrel terhelnénk a lemezeket, nem lenne erő visszaesés a két plató közötti szakaszon, hanem vízszintesen futna a diagram.

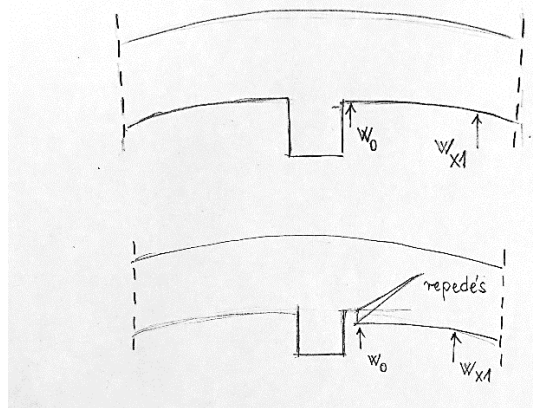


43. ábra: A 9./k és 9./s próbatestek átlagolt w_0 és w_{02} adókból származó erő-lehajlás diagramjai



44. ábra: A 9./k és 9./s próbatestek átlagolt w_{x1} és w_{x2} indexű adókból származó erő-lehajlás diagramjai

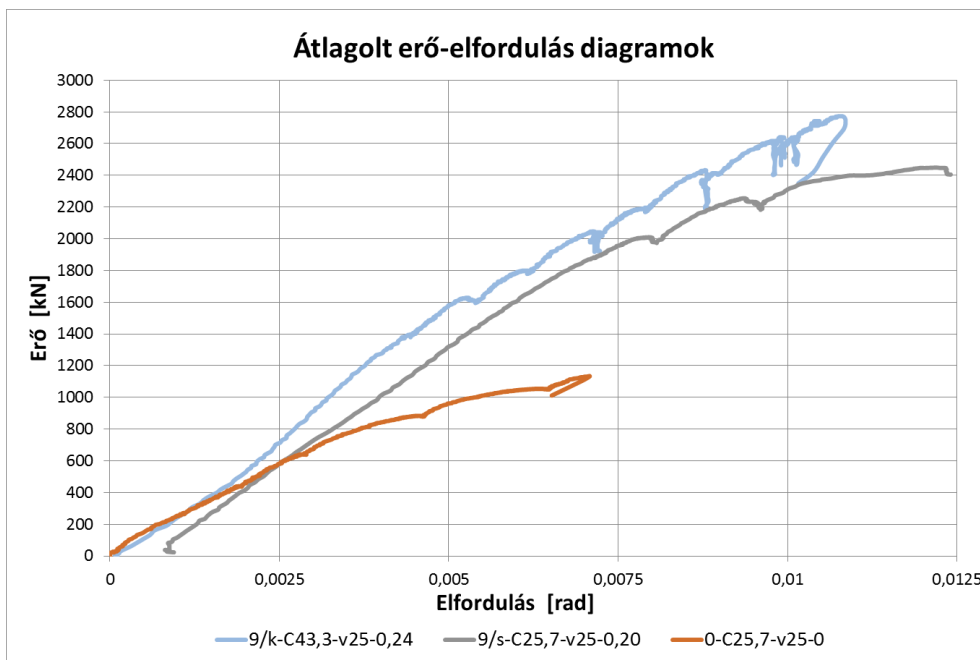
A 44. ábrán látható erő-lehajlás görbék már az oszlop és lemez összenyomódásával korrigált görbék, vagyis a w_0 és w_{02} adók által mért értékek átlaga ki van vonva a külső útdók által mért lehajlásokból. Mindkét próbatestnél a törőteher elérése után visszafordult a korrigált görbe. A terhelés közben először hajlítási deformációt szenved a tartó, ekkor még nagyjából párhuzamos a lemez alsó és felső síkja, ahogy a 45. ábra felső skiccén is látszik. Ahogy azonban az oszlopcsonk mellett megnyílik a repedés az átszűrődési kúp kialakulása miatt, az alsó sík görbülete már nem fogja követni a felső sík görbületét. Hirtelen megnő a w_0 és w_{02} elmozdulás és a kettő átlagát kivonva a kintebb elhelyezkedő adók által mért lehajlásokból az így kapott érték csökkenni kezd. Ez a hatás az egyik hátránya az alsó síkon való alakváltozás mérésnek, a hátrány azonban nem jelentős, hiszen a törőerő elérése utáni viselkedést ez a mérési módszer amúgy sem tudja tökéletesen lekövetni.



45. ábra: Próbatestek alakváltozása az oszlopcsonk melletti repedésmegnyílás hatására

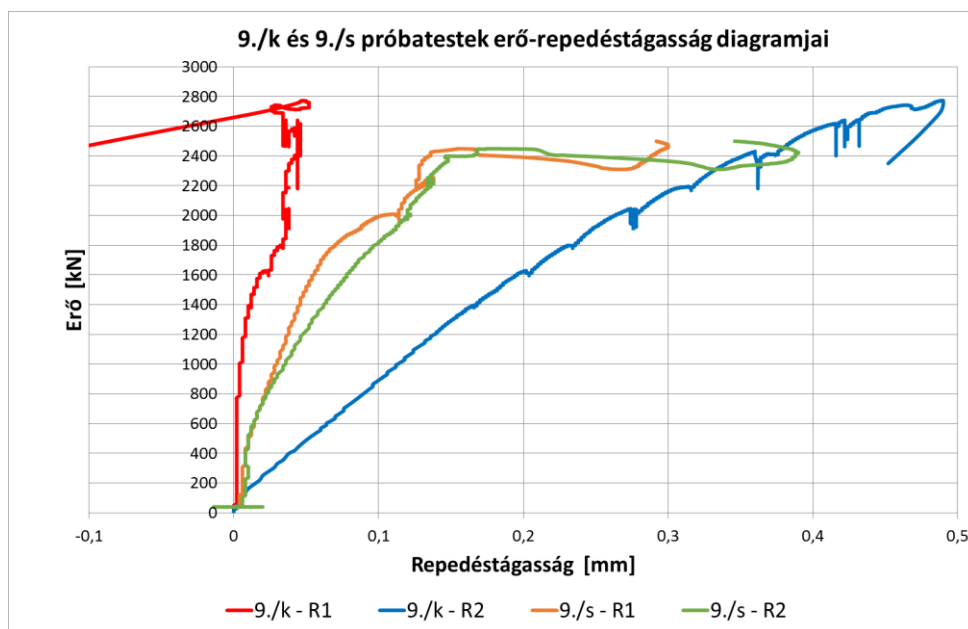
Általánosságban elmondható, hogy a két próbatest viselkedése inkább rideg. A kezdeti közel lineáris szakasz után kisebb-nagyobb képlékenyedési szakaszok láthatók. Amíg az átszűrődés nem veszi kezdetét addig tehát az oszlopcsonk és a lemez közötti alakváltozások lineárisak. A lehajlás tengelyen látható, hogy a kezdeti terhelés-tehermentesítés után kb. 0,5, illetve 0,8 mm a maradó alakváltozás. A szakaszok elején látható eltérő merevség a kezdeti billenésnek tudható be.

A két csapos próbatest erő-elfordulás görbéje (46. ábra) is hasonló, ahogy azt vártuk az erő lehajlás görbe hasonlósága után. Ezek alapján a diagramok alapján is inkább rideg viselkedés tapasztalható. Az összehasonlítás miatt a 9./k és 9./s görbék mellett ábrázoltam a nyírási vasalás nélküli 0. jelű próbatest erő-elfordulás görbéjét is. A szakirodalomban fellelhető információknak megfelelő viselkedést tapasztaltam, a kisebb hajlítási vashányadú 0. jelű próbatest kisebb alakváltozásnál és alacsonyabb törőerőnél ment tönkre.



46. ábra: A 9./k, 9./s és 0. próbatetek átlagolt erő-elfordulás diagramjai

Végezetül az erő-repedéstágasság görbéket vizsgálom meg (47. ábra). Ehhez hasznos lehet a mérés közben készült fényképeket felhasználni, hiszen látszik rajtuk a repedéskép is és az is, hogy az egyes WETA adók hova lettek elhelyezve (48. ábra). A 9./k próbatest esetén az R1 mérő görbéje eltérő jellegű, mint a többi. Ez a fajta visszafordulás, ami megjelenik az R1 adó görbéjénél, akkor szokott előfordulni, mikor a mért repedés záródni kezd egy közvetlenül mellette nyíló új repedés miatt. Alapvetően a két próbatest görbéi eltérő jellegűek. A 9./s lemezelem esetén egy kezdetben nagyon meredek szakasz tapasztalható, ahol az erőnövekedés mellett alig nő a repedéstágasság, majd ezt egy közel vízszintes lineáris szakasz követi. Ezzel szemben a 9./k próbatestnél a kezdeti szakasz jóval laposabb, alakja nagyon hasonlít az erő-elfordulás görbe alakjához.



47. ábra: A 9./k és 9./s próbatetek erő-repedéstágasság diagramja



48. ábra: Felül a 9./k, alul a 9./s próbatestek repedésképe, és a repedéstágasság mérők elhelyezkedése

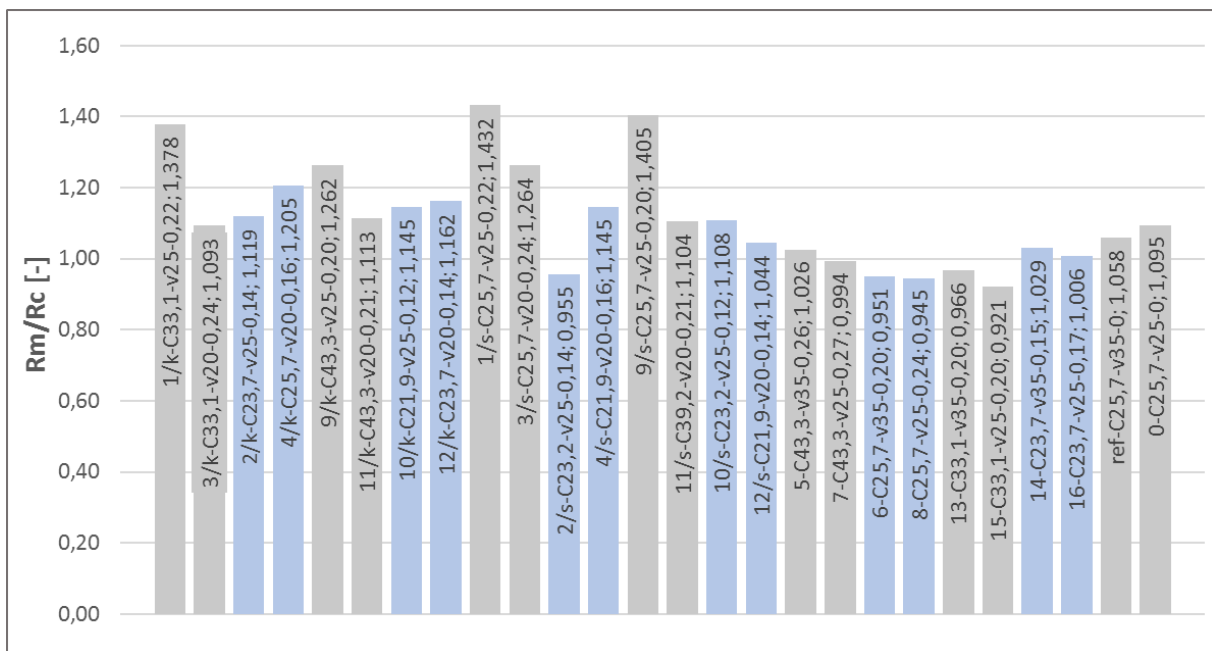
A két próbatest repedésképe hasonló, ahogy azt a tapasztalt viselkedésük alapján vártuk is. Érdekeltek, hogy vajon van-e olyan próbatest, aminek jelentősen eltér a repedésképe akár ettől a kettő elemtől, akár a többitől, de azt tapasztaltam, hogy típustól függetlenül elég hasonlóak a rajzolt képek. Nem találtam olyan különbséget, ami egyértelmű következtetés levonására adna okot. Úgy gondolom, hogy ha lenne lehetőség a próbatestek félbe vágására, a metszeten tapasztalt repedésképe jóval informatívabb lenne. A repedésképek alapján meg lehetne állapítani az egyes próbatestek tönkremeneteli módját, amiből következtetéseket tudnák levonni a tönkremeneteli mód és a törőerő kapcsolatára. Látnánk, hogy az egyes teherbírások közötti különbség esetenként a tönkremeneteli módból adódik-e. A szakirodalmi kísérletek feldolgozása során is azt tapasztaltam, hogy a legtöbb esetben a vágási felületen tapasztalt repedésképekkel dolgoztak a kutatók.

5.2.5. Az egész kísérlet eredményeire vonatkozó elemzés

Dolgozatomban az előző pontban taglalt két próbatest eredményeinek részletes bemutatásán túl, a többi próbatestre csak kvalitatív elemzéseket végzek. Az 5.2.2. pontban már tárgyaltam az elért teherbírás értékeket és azok viszonyát az EC2 által számított teherbírás értékekhez. A törőerők nyers értékei alapján történő összehasonlításokkal óvatosan kell bánni, hiszen a

nyomószilárdságok értékei jelentősen eltérnek és ezek nagymértékben befolyásolhatják a lemezelemek eredményeit. Emiatt a normált teherbírás értékekkel fogok tovább dolgozni, melyek megtalálhatók a 8. táblázat 5. oszlopában.

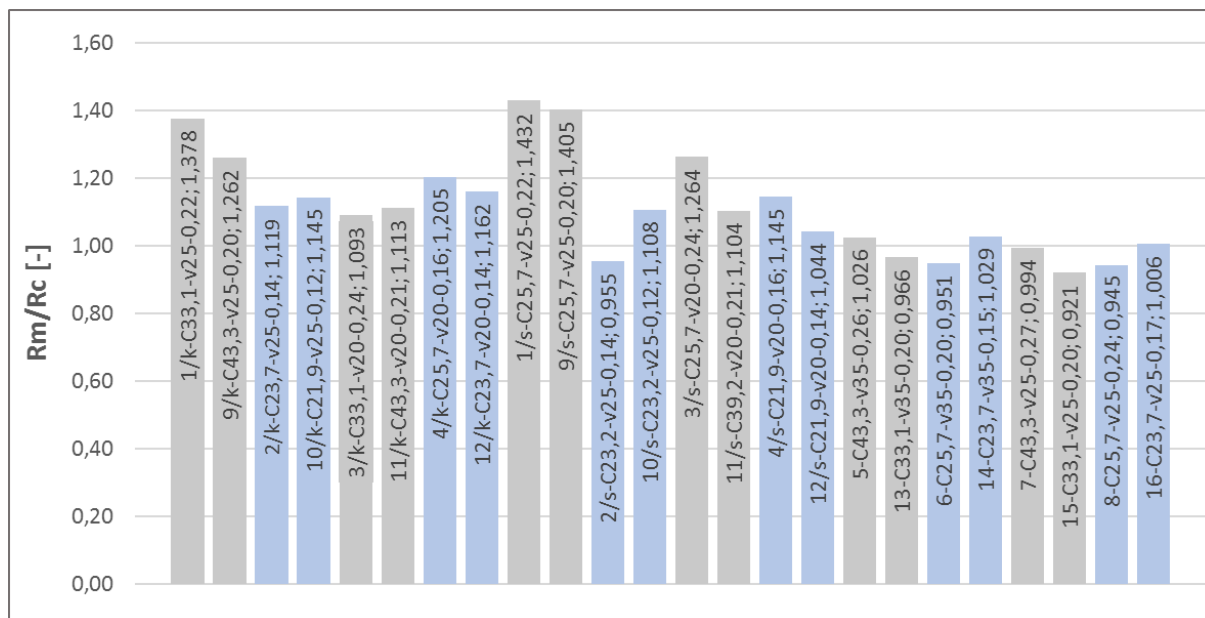
Először az azonos betonminőségű, hajlítási vashányadú és nyírási vasalású, de eltérő vastagságú próbatest párokat vettem össze a normált teherbírásuk alapján (49. ábra). Az ábrán látható párokból sajnos nem adnak releváns eredményt a 2./k-4./k, 10./k-12./k, 2./s-4./s, 9./s-11./s és a 10./s-12./s párok, hiszen ezeknek a tényleges nyomószilárdsága már különbözött, hiába lettek ugyanarra a betonminőségre tervezve. A többi próbatest párnál, viszont általában jól láthatóan megjelenik a szakirodalomban is tapasztalt tendencia, miszerint a nagyobb vastagságú próbatestekkel magasabb teherbírás érhető el.



49. ábra: Normált teherbírás értékek összehasonlítása eltérő vastagságú próbatest pároknál

Meg kell említeni, hogy az eredményeket természetesen befolyásolja a nyírási vashányad is, ami bár csak kis mértékben, de különbözik a legtöbb így összeállított párnál.

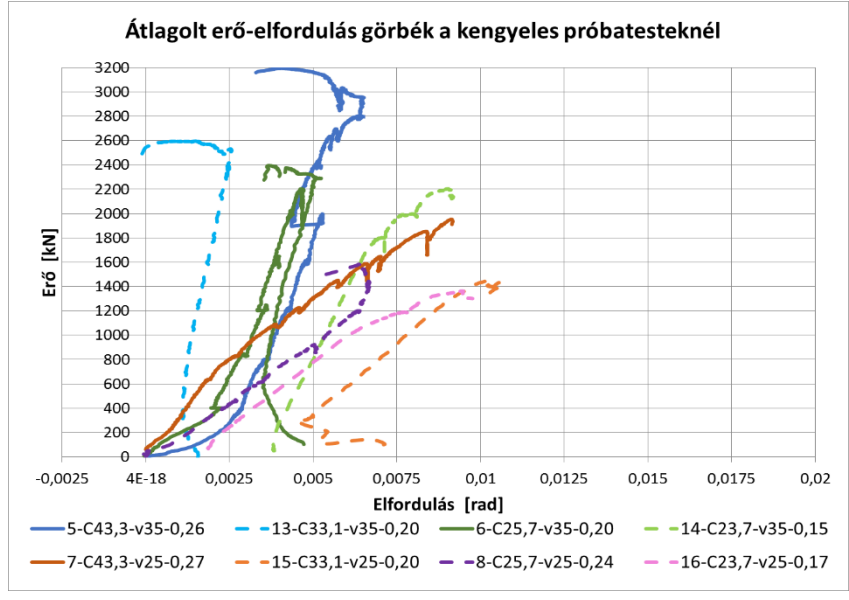
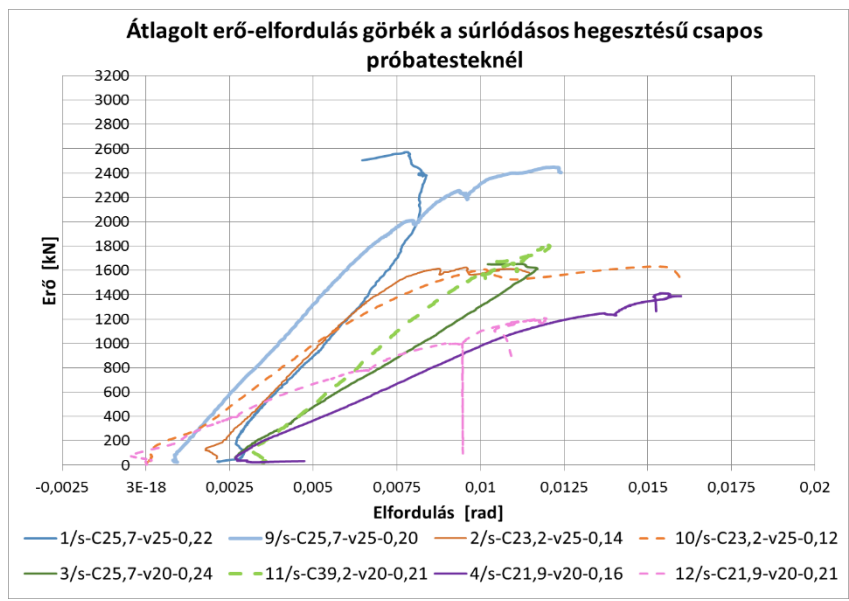
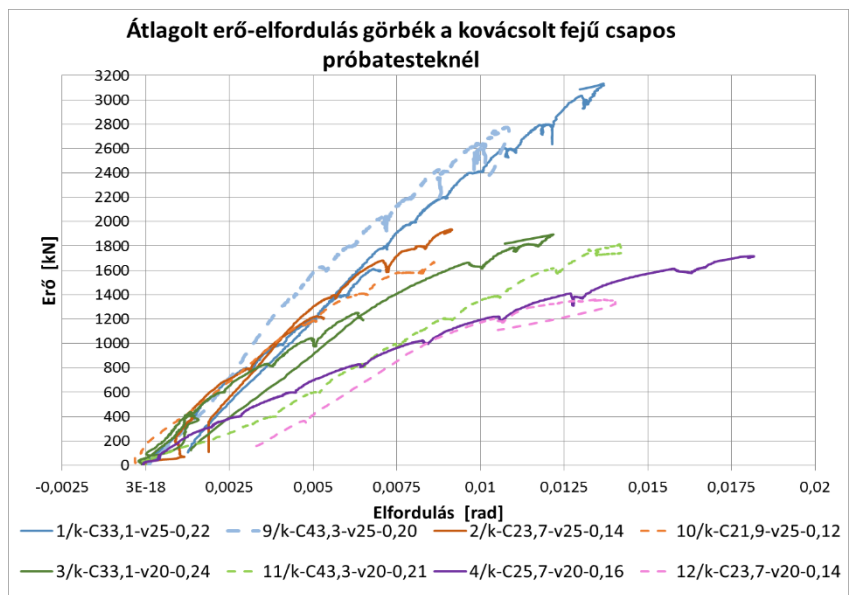
Elméletileg az eltérő nyírási vashányad teherbírásra mért hatásának összehasonlítására is fel lehetne venni próbatest párokat ez látható az 50. ábrán. A tervezés során ezek a párok egy paraméterben különböztek, mégpedig a nyírási vashányadban. Sajnos a legtöbb párnál a tényleges nyomószilárdság különbözött ennél a csoportosításnál is. Gyakorlatilag a ténylegesen összehasonlítható próbatest párok az 1./s-9./s, 2./s-10./s és a 4./s-12./s. A 2./s próbatest volt az egyetlen olyan csapos lemezelem, amelynél az elért törőerő alacsonyabb volt, mint a számított teherbírás. Ennek megfelelően a normált értéke is kisebb, mint 1 és annak ellenére, hogy nagyobb nyírási vashányaddal rendelkezik, mint a 10./s próbatest mégis alacsonyabb a normált teherbírása. A másik két próbatest párnál nagyobb nyírási vashányaddal magasabb teherbírás érhető el.



50. ábra: Normált teherbírás értékek összehasonlítása eltérő nyírási vashányadú próbatesteknél

Érdeemes még összevetni az egyes próbatestek átlagolt erő-elfordulás görbéit (51. ábra). A különböző nyírási vasalású próbatesteket külön diagramokon ábrázoltam a könnyebb átláthatóság kedvéért. Minden diagramon ugyanolyan lépésközt és maximális értéket használtam az azonos elnevezésű tengelyeknél, hogy össze lehessen hasonlítani az egyes görbéket. Részletesen nem fogom az összes görbét elemezni, erre majd diplomamunkámban szándékozom mélyebben kitérni. Most csak egy átfogó képet szeretnék mutatni és általános megállapításokat tenni.

A diagramokon alapvetően két jellemző teherbírási szint van. A kovácsolt fejű csapos és a kengyeles próbatesteknél ~2800-3000 kN és ~1800-2000 kN. A súrlódásos hegesztésű csapos próbatesteknél valamivel alacsonyabb teherbírás szint jelenik meg. A görbék jellege hasonló, mindegyikre inkább rideg viselkedés a jellemző. A kengyeles próbatestek görbéi valamivel meredekebben futnak, kisebb alakváltozásnál érik el a törőterhet.



51. ábra: Próbatestek átlagolt erő-elfordulás diagramja

6. ATENA numerikus modellezés

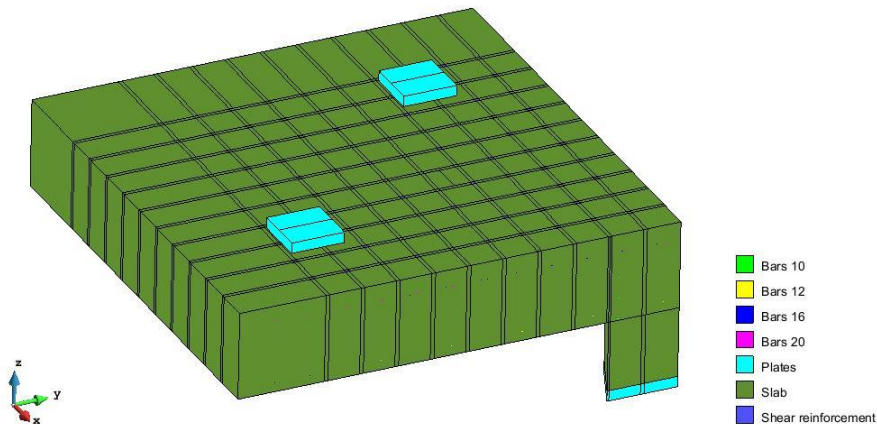
A numerikus modellezést az ATENA szoftver GID modellező környezetében végeztem. A szoftver kifejezetten vasbeton nemlineáris végeleemes vizsgálatára alkalmas.

6.1. Numerikus modell bemutatása

6.1.1. Geometria kialakítása

A modellezés során két próbatestet vizsgáltam numerikusan, a 0. jelű nyírási vasalás nélküli 25 cm vastag próbatestet és a 9./k csapos nyírási vasalású szintén 25 cm vastag próbatestet. Kihasználtam a szimmetria adta lehetőségeket és mindkét esetben csak a kísérleti elemek negyedét modelleztem. Az eredetileg kör alaprajzú oszlopcsonkot egyenes szakaszokkal közelítettem.

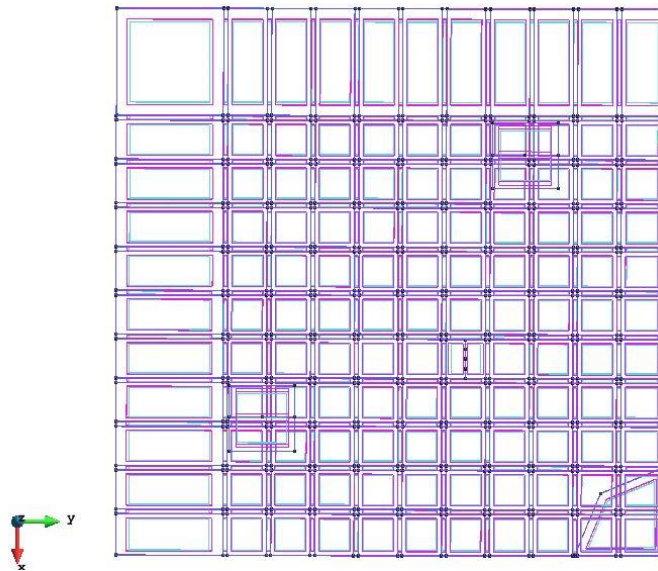
Az elkészült modellben a földémrészlet mindkét esetben egy $1,25 \times 1,25$ m alaprajzi méretű, 25 cm vastagságú négyzet alapú hasáb volt alatta a két lineáris szakasszal határolt, 20 cm magas, negyed oszlopcsonkkal. A geometria az 52. ábrán látható. A modellezéshez szükség volt még acél terhelő lemezek felvételére, hogy a későbbiekben a pontszerű elmozdulás terheket és a megtámasztást ne közvetlenül működtessem a vasbeton elemre. Ezeket 3 mm vastagságúra vettem fel és a kísérleti terhelési pontok helyén a lemez felső síkján, illetve az oszlopcsonk alatt helyeztem el.



52. ábra: A modellezett negyed próbatest

A hajlítási vasakat a vasalási terveknek megfelelően vettem fel vonalelemként. A modell beágyazott vasként kezeli ezeket, tökéletes tapadást feltételezve a beton és az acélbetétek között. A nyírási vasaknál ez a modellezési módszer nem lett volna célravezető, hiszen így a hajlítási és nyírási viselkedésüket nem lehet vizsgálni. Éppen ezért a 3. pontban taglalt szakirodalmak eredményeit alapul véve testelemként definiáltam a nyírócsapokat. A modellezett nyíró testek némileg eltérnek a valóságtól. Egyszerűsítésként henger helyett megegyező alapterületű négyzet alapú hasábokat alkalmaztam, melyek betonfedés nélkül végig mennek a teljes vastagságon. A csapokat külön térfogatelemekből építettem fel a negyed modellben a nyírócsapok helyének megfelelő módon. Ehhez egy raszter hálót definiáltam, ahol a hálópontok között először felületeket hoztam létre, majd ezekből az alapfelületekből 3 dimenziós prizmatikus térfogatelemeket alkottam. A földém modell felülnézete a felület és

térfogatelemekkel az 53. ábrán látható. Az alkalmazott modellezési szint nem tesz különbséget kovácsolt fejű, illetve súrlódásos hegesztéssel készült nyírócsapok között.

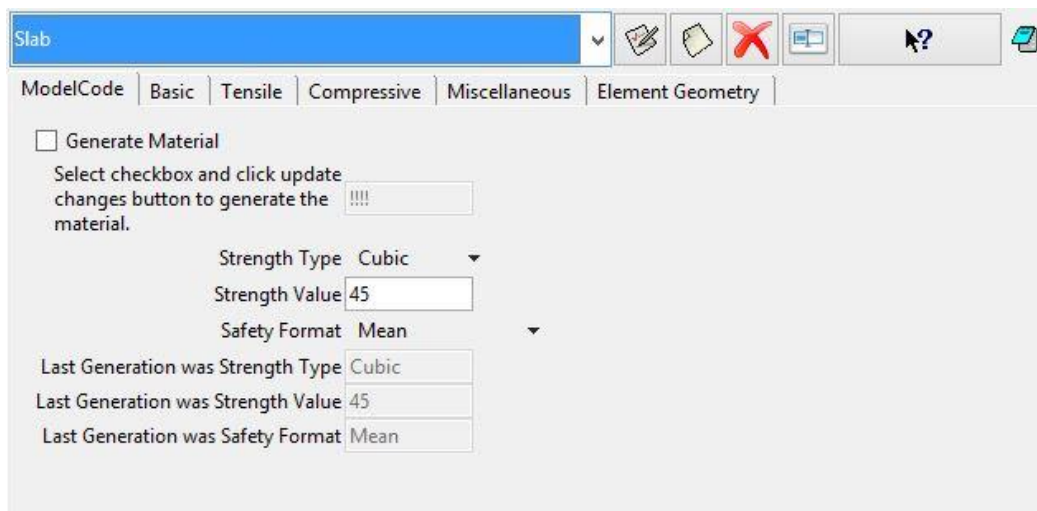


53. ábra: A modellezett negyed próbatest felülnézete

6.1.2. Anyagmodellek definiálása

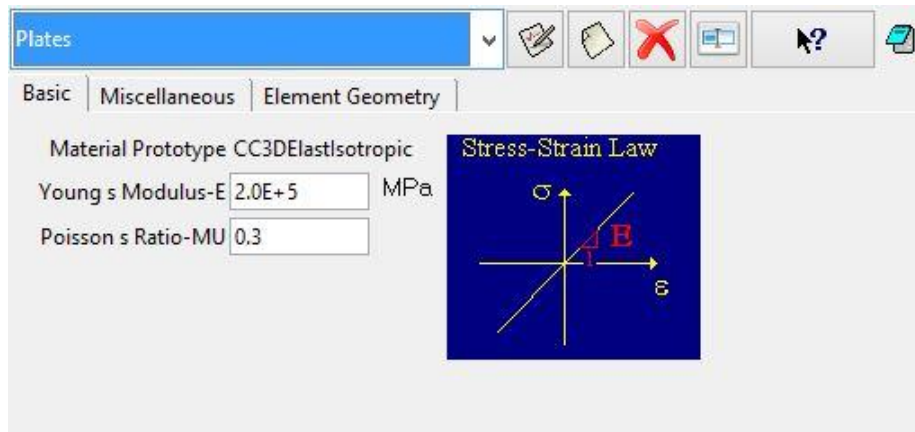
A két modellnél ugyanúgy jártam el az anyagmodellek felvétele során, azt leszámítva, hogy a 0. jelű próbatestnél nem volt szükség a nyírási vasak anyagmodelljének definiálására. Részletesen ezért csak a 9./k modell beállításait mutatom be.

A geometria kialakítását követően definiáltam az anyagmodelleket. A 9./k próbatest C35/45 betonminőségre volt tervezve így én ennek megfelelően definiáltam az 54. ábrán látható anyagmodellt. Később a nyomószilárdsági eredmények feldolgozásánál tapasztaltam, hogy a valóságban kb. 15%-kal nagyobb nyomószilárdságot ért el a próbatest. Mindkét esetben a „3D Nonlinear Cementious 2” nevű anyagmodellt választottam, és a nyomószilárdságot állítottam be. A program ezt követően automatikusan generálja a többi húzáshoz, nyomáshoz és nyíráshoz tartozó paramétert.



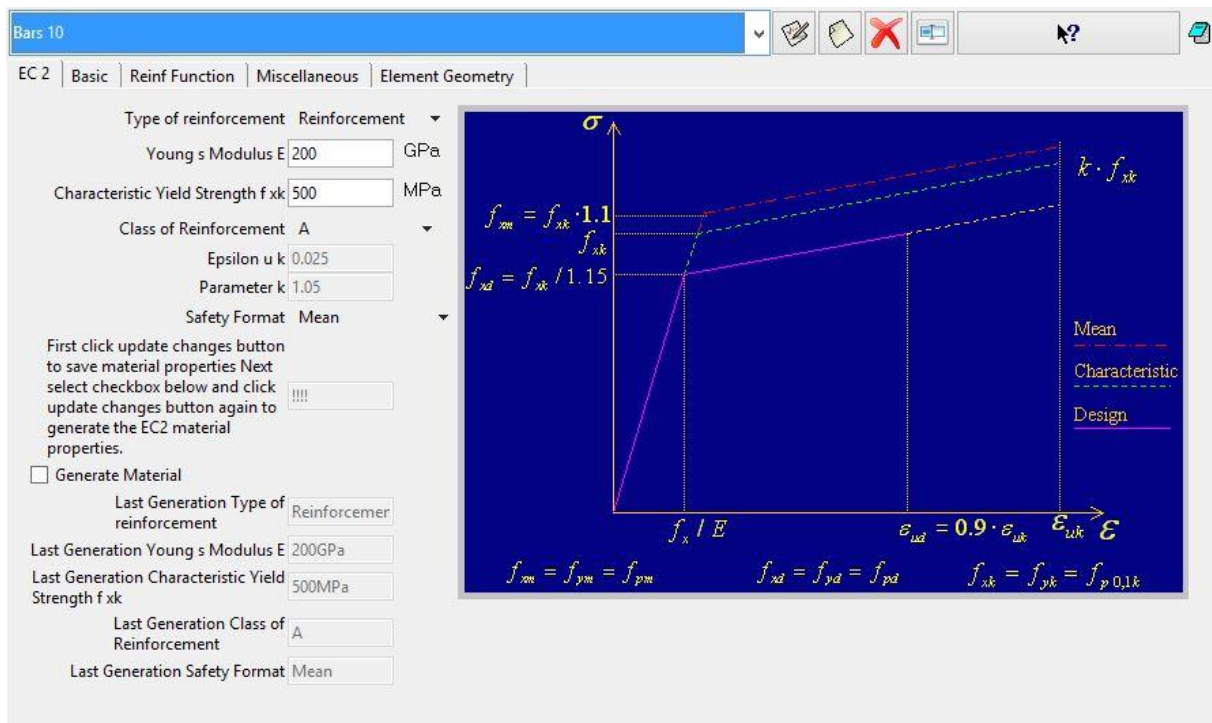
54. ábra: Beton anyagmodell definiálása

Az acél terhelő lemezeknél egy izotrop lineárisan rugalmas modellt alkalmaztam, ebben az esetben a rugalmassági modulus és a Poisson tényező értéke adható meg (55. ábra).



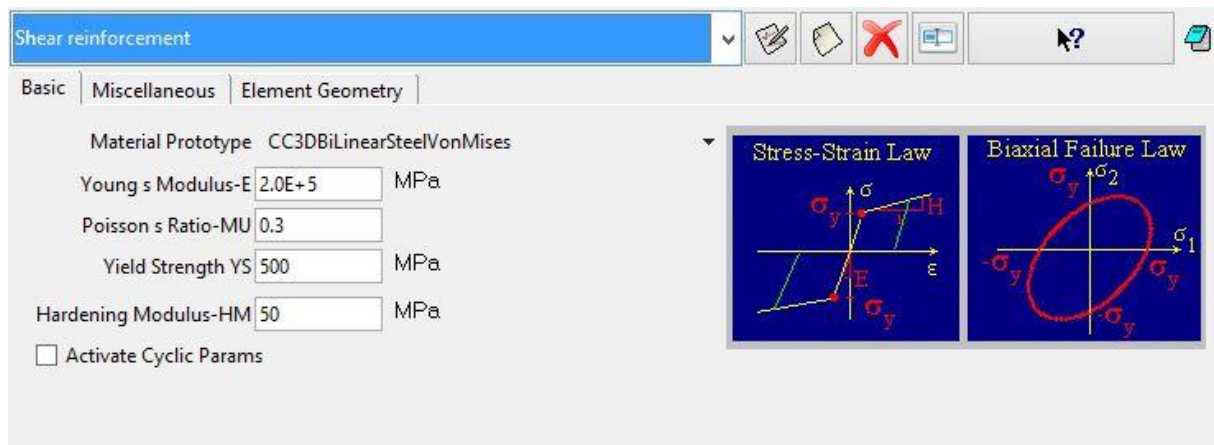
55. ábra: Acél terhelő lemez anyagmodell definiálása

A hajlítási betonacélokra a beépített „1D reinforcement” anyagmodellt választottam. Az alkalmazott vasátmérőknek megfelelően ($\phi 10$, $\phi 12$, $\phi 16$ és $\phi 20$) négy egyéni anyagmodellt hoztam létre, melyeknél csak az átmérő értékét módosítottam a második „Basic” fülön (56. ábra).



56. ábra: Hajlítási vas anyagmodell definiálása

Végül a nyírási vasak anyagmodellét állítottam be. Az acél anyagmodellek közül a „Steel VonMises” típusút választottam, ami egy lineárisan rugalmas és lineárisan felkeményedő anyagmodell (57. ábra). Fontos megjegyezni, hogy az alkalmazott modell tökéletes tapadást feltételez a beton és a nyírócsapok között, ami eltér a valóságos viselkedéstől.



57. ábra: Nyírási csap anyagmodell definiálása

6.1.3. Megtámasztások és terhelés

Első lépésben a szimmetriát állítottam be x és y irányban. Ezt követően az oszlopcsonk alján elhelyezett acéllemezen pontszerű támaszként definiáltam a megtámasztást a lemez alsó síkján a szimmetriasíkok találkozásánál. A támasz csuklós és csak a függőleges z irányú elmozdulást gátolja, hiszen a szimmetria beállításával a másik két irányú megtámasztást már biztosítottuk.

A terhet elmozdulásként működtettem a szerkezeten. Az elmozdulás 0,05 mm értékű és a -z tengely irányában (a lemez síkjára merőlegesen lefelé), a terheléshez elhelyezett acéllemezek felső síkján, közepén hat. A 9./k fődémmódelnél 300 teherlépcsőt állítottam be, melyet 80 lépés alatt működtetett a program a szerkezetre. Ez végeredményben 15 mm elmozdulást jelent a terhelési pontban. A számítás végeztével ez elégnék is bizonyult.

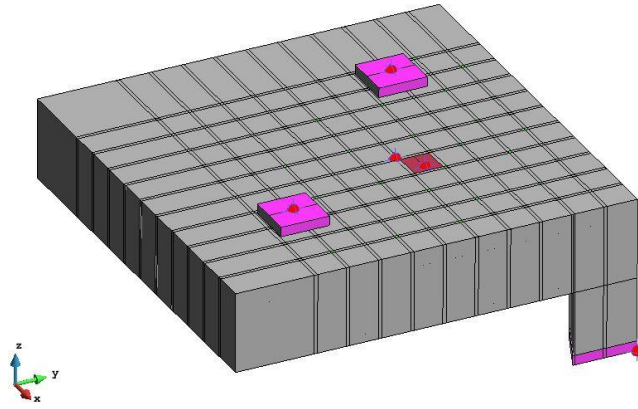
6.1.4. Végeselem háló definiálása

A végeselem hálót a programban megtalálható automatikus háló generálóval hoztam létre. Tetraédes elemet alkalmaztam 3,5 cm-es él hosszal az 5. pontban olvasható szakirodalmi kutatások eredményei alapján. Szintén a kutatások nyomán a nyírási testeknél sűrítettem a hálón és a vastagságuk mentén 4 elemet vettem fel.

A nemlineáris analízis során a program egy implicit megoldási módszert használ, jelen esetben a Newton-Raphson iterációs eljárást alkalmazza.

6.2. Numerikus eredmények és azok összevetése a kísérleti eredményekkel

Annak érdekében, hogy a keletkező deformációkat és ébredő erőket mérni tudjam, el kell helyeznem monitor pontokat. Elsősorban olyan erő-lehajlás diagramot szeretnék kapni, ami a kísérletek során létrejött erő-lehajlás diagramokkal összevethető. Ennek megfelelően elhelyeztem egy monitor pontot a megtámasztás helyén és abban a két pontban a lemez alsó síkján, ahol a kísérletek során elhelyeztük az úradókat (w_{x1} és w_{x2} indexű adók $\sim 2d$ távolságra a középponttól). A megtámasztásnál elhelyezett monitor pont erőt rögzít MN mértékegységgel, míg a másik két monitor pont függőleges elmozdulást méterben. Ezekon kívül ellenőrzés céljából felvettem még a két terhelési pontban is 1-1 monitor pontot és két alaprajzi értelemben megegyező helyzetű monitor pontot az elmozdulás mérő pontok függőlegesében, a lemez felső síkján. A monitor pontok elhelyezkedését az 58. ábra mutatja, az ábrán a két alsó elmozdulást mérő pont nem látszik.



58. ábra: Monitor pontok elhelyezkedése a lemezelemen

A számítások ideje nagyban függ a számítógép teljesítményétől, a végelem háló méretétől. A 9./k próbatestről készített modellben a végelemek számának mennyiségét erősen megnöveli a nyíróvasak sűrített hálózása. Ennél a modellnél a 80 lépés lefuttatása hozzávetőlegesen 120 órába telt. Átlagosan 2-3 iteráció volt a jellemző lépésenként, de a tönkremenetelhez közeledve ez elérte a 20-25 iterációt is. Ezzel szemben a 0. jelű nyíróvas nélküli próbatest modelljének futási ideje jóval alacsonyabb (~ 5 óra) volt, köszönhetően a lényegesen kevesebb végelemnek.

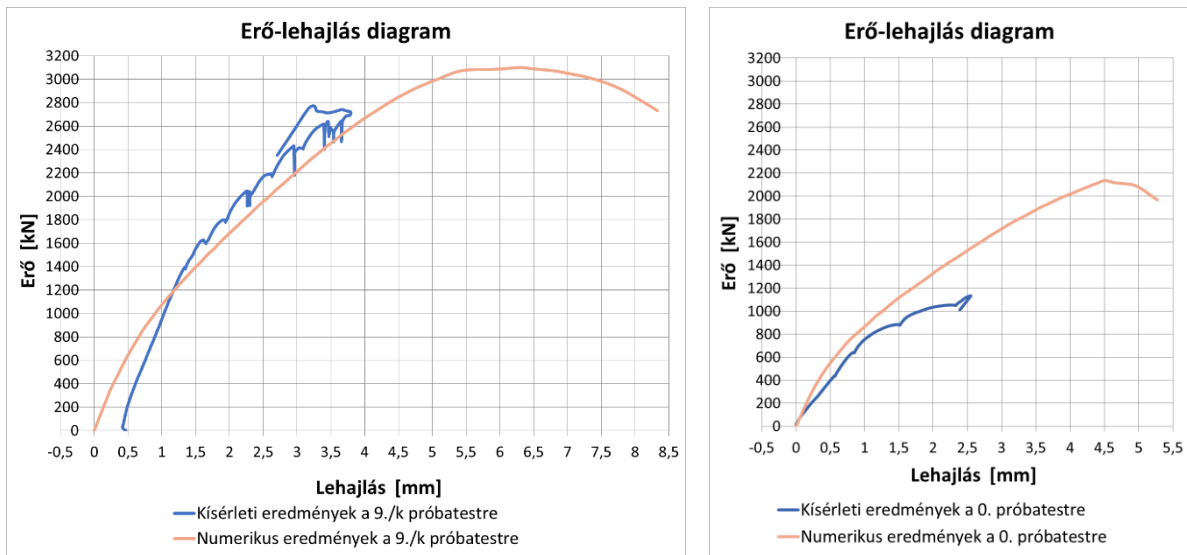
A két modellnél szeretném bemutatni az elért teherbírás értékeket, az erő-lehajlás görbéket, az elmozdult alakot és a repedések alakulását, illetve ezeket összehasonlítom a kísérletek során kapott eredményekkel.

A próbatestek kísérleti eredményét, valamint a numerikus vizsgálatok eredményét az 59. ábra szemlélteti. A 9./k lemezelem kísérleti eredmény görbéjén tapasztalható egy kezdeti maradó alakváltozás, ami a repedéstágasság mérők felhelyezésekor történt tehermentesítés során keletkezett. Látható, hogy a 0. jelű elem esetén még nem volt repedéstágasság mérés. A kísérleti görbéken található minimum értékek a már korábban tárgyalt teherlépcsőknél történő olajnyomás visszaesésből adódnak. A vázolt grafikonok az oszlopcsonk és a gumilemez összenyomódásával korrigált görbék, ezért látható a teherbírás elérését követő visszafordulás (ld. 5.2.4. szakasz) a 9./k esetén. A grafikonokon megfigyelhető, hogy a terhelés kezdeti szakaszában a görbék jól közelítik egymást, jellegükben hasonlóak.

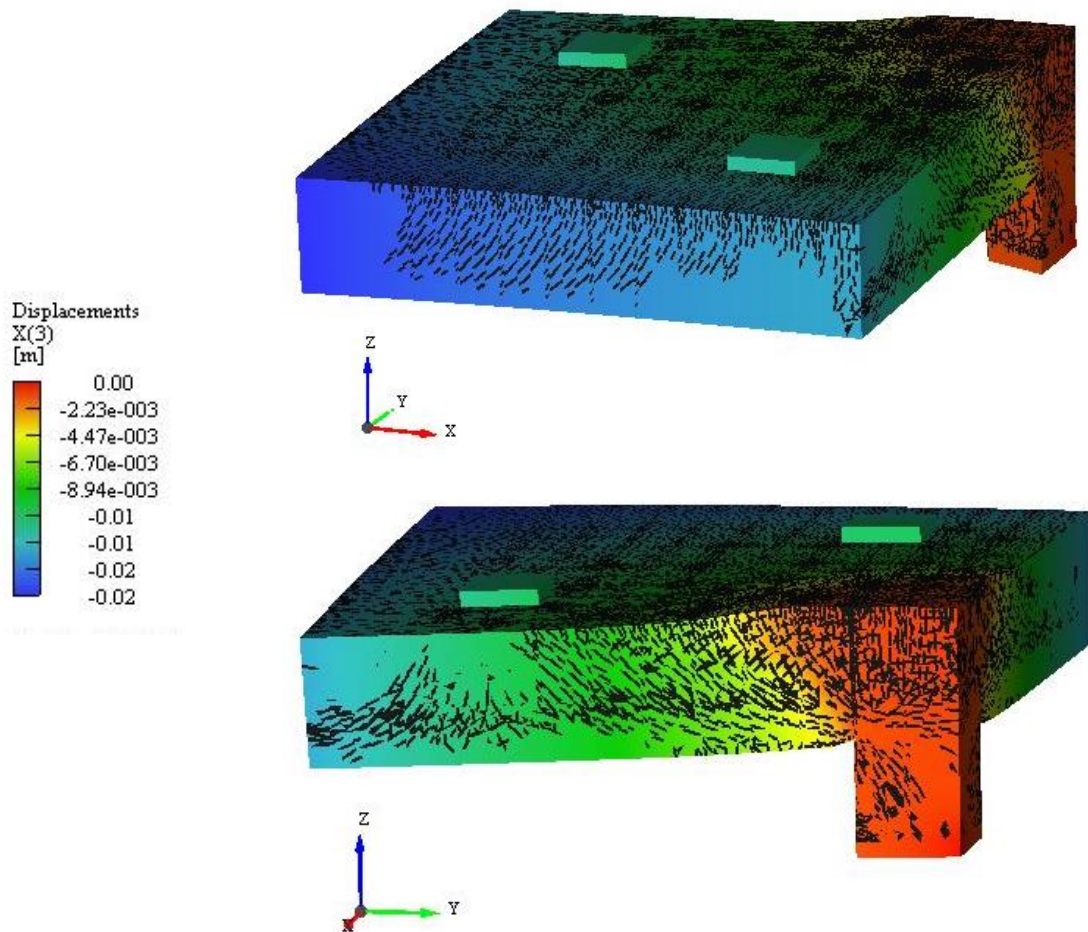
A numerikus modell mindkét esetben nagyobb teherbírást eredményezett, mint a kísérleti próbatest. A 9./k negyed lemezelem által elért teherbírás 775 kN lett, ami a teljes modellt tekintve ennek négyszerese, vagyis 3100 kN. A kísérletek során 2773 kN volt ugyanennek a próbatestnek a törőereje, a két érték eltérése $(1-3100/2773)=-12\%$. A 0. próbatest esetében jóval nagyobb eltérés tapasztalható. A kísérletek során 1133 kN volt az elért törőerő, míg a numerikus modellben 2136 kN, tehát majdnem a kísérleti érték duplája. Ez a vártnak megfelelő viselkedés, hiszen a modellben, a hajlítási és nyírási vasalás is tökéletes tapadással kapcsolódik a betonhoz, a megcsúszás hatása nincs modellezve.

Az 60. ábra szemlélteti a 9./k modellben kapott z irányban elmozdult alakot. Ez szinte tökéletesen leköveti az általunk a kísérletek során tapasztalt viselkedést. A megtámasztástól távolodva körszimmetrikusan nőnek az elmozdulások. Látható, hogy a modellben tökéletesen helyben maradt a megtámasztás, ahogyan azt vártuk is, a valóságban ez nem tudott tökéletesen

teljesülni például a gumilemez összenyomódása miatt. A 0. próbatest esetében jellegre szintén ugyanilyen elmozdult alakokat kaptunk.



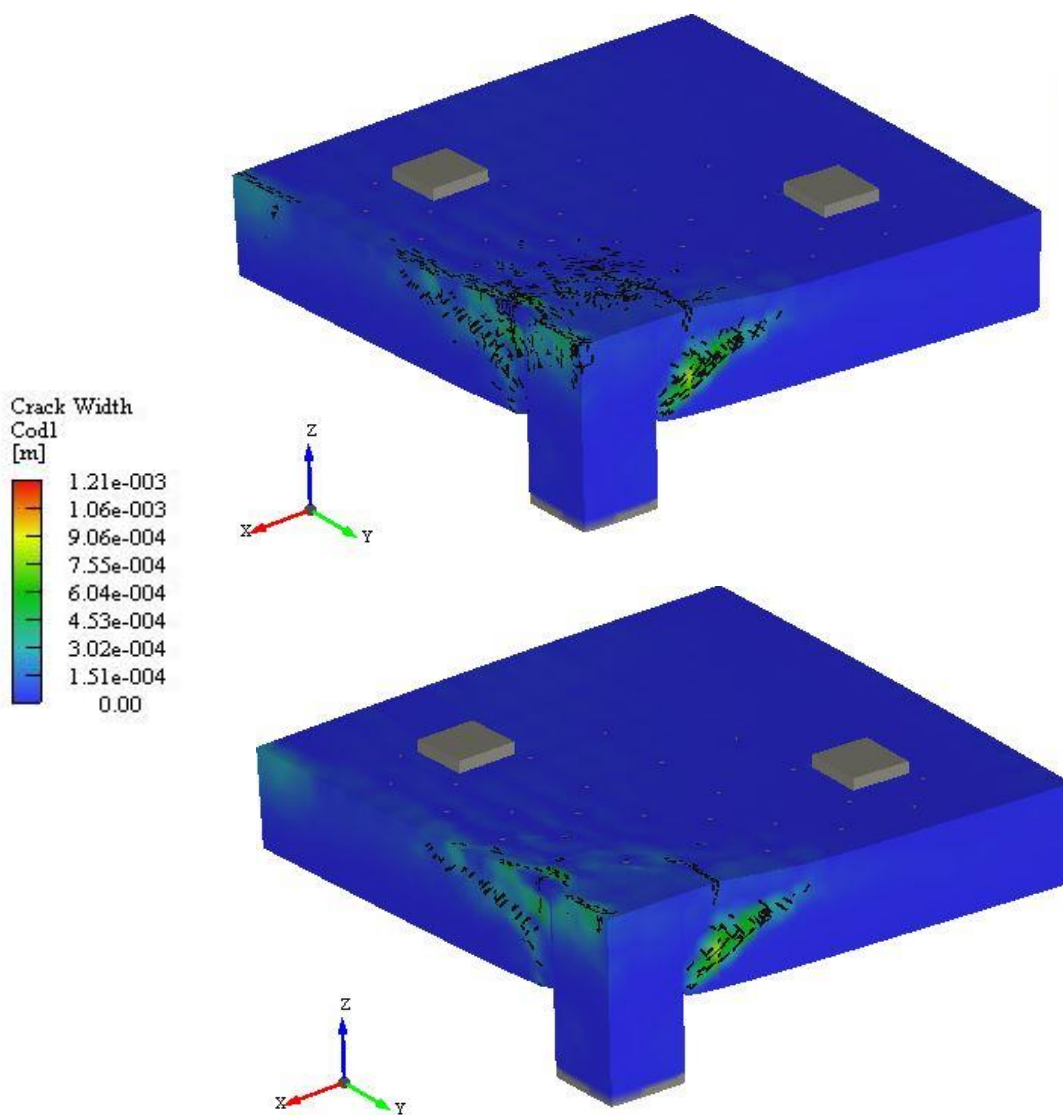
59. ábra: A kísérleti és numerikus eredményekből származó erő-lehajlás diagram



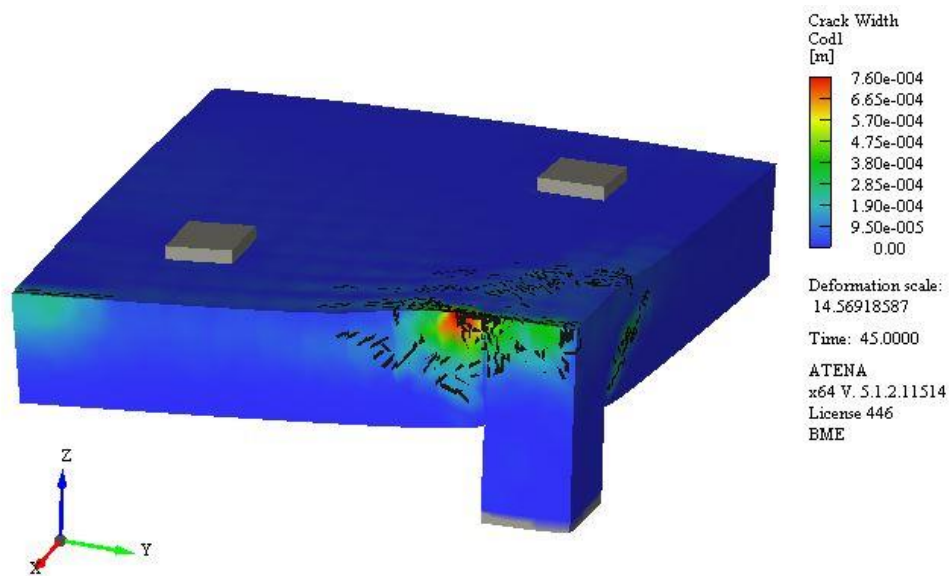
60. ábra: A modellezett 9./k lemezelem z irányú elmozdult alakja és az elmozdulás értékei

Az 60. ábrán minden repedés ki van rajzolva, a valóságban ilyen sok nem keletkezik, hiszen, ha kialakul egy repedés, már nem tud hozzá végtelen közel kialakulni a következő is. Valamint ezek többsége olyan vékony, hogy szabad szemmel nem is látható. A végeelem modellben ezzel szemben minden olyan végeelemen kialakul egy-egy repedés, amelyben elértük a húzószilárdság értékét. Ettől függetlenül az átszűrődési kúp kialakulása jól megfigyelhető a modell eredményeit bemutató ábrán is.

A 61. ábrán látható rajzokon már beállítottam minimális ábrázolandó repedésméretet, így csak azokat rajzolta ki a program, melyek a beállított értékeknél nagyobb tágasságúak. A felső képen ez az érték 0,1 mm, míg az alsó képen 0,4 mm. Ez alapján az a következtetés vonható le, hogy az 60. ábrán látható repedések többsége még hajlítási repedés és nem felel a tönkremenetelért. A 0,4 mm-nél nagyobb repedések egyértelműen nyírási repedések és határozottan a tönkremenetel helyén találhatóak, tehát azok okozói.



61. ábra: Modellezett 9./k próbatest repedésképe minimális repedésméret beállításával



62. ábra: Modellezett 0. próbatest repedésképe minimális repedésméret beállításával

A 62. ábrán látható a 0. próbatest repedésképe 0,1 mm alsó korlát beállításával. Összehasonlítva az oszlop széltől induló nyírási repedések dőlésszögét a 61. ábrán látható nyírásra vasalt próbatest repedéseinek meredekségével, láthatjuk, hogy a repedések meredekebben, a vízszintessel $\sim 45^\circ$ -os szöget bezárva haladnak az elem felső síkja felé. Ezzel szemben a nyírásra vasalt próbatest repedései laposabban a vízszintessel $\sim 30^\circ$ -os szöget bezárva futnak. Ez megfelel az irodalomban is fellelhető információknak.

Ha a kísérleti próbatesteket a későbbiekben félbe tudjuk vágni, akkor a valóságban kapott repedésképet és az itt látható eredményt összehasonlítható lenne, amiből egyértelművé válna, hogy hol jött létre a tönkremenetel és minek a hatására.

7. Tapasztalatok és további kutatási lehetőségek megfogalmazása

A kísérleti eredmények alapján megfogalmazható, hogy a csapos vasalású próbatestek általában nagyobb teherbírás értékeket eredményeznek, mint a kengyeles vasalású lemezek. A próbatestek viselkedése minden esetben inkább ridegnek mondható.

A próbatestek eredményeinek összehasonlítása elég nehéz a valóságban kapott, tervezettől jelentősen eltérő nyomószilárdsági eredmények miatt. A nagy eltérést mutató valós értékek következtében a próbatestek többségénél legalább két paraméter különbözött, ami megnehezítette az eredmények összevetését.

Szintén a nyomószilárdsági eredmények miatt, és mivel nem minden próbatestnél egyértelmű a tönkremeneteli mód, nehéz a mért törő terhek és számított teherbírás értékek eltéréseit megmagyarázni, illetve azt, hogy miért tapasztalható olyan nagymértékű szórás az eltérések esetében.

Az elkészített numerikus modellek az alkalmazott egyszerűsítések ellenére az általam remélnél jobban megközelítik a kísérleti eredményeket. Ez biztató, hiszen a nyírócsapok modellezésének fejlesztésével vélhetően előáll majd egy olyan modell, ami ténylegesen leköveti a valós viselkedést. Egy ilyen modellel növelni lehetne a kísérletek számosságát és könnyebben ki lehetne szűrni az egyes mérési hibákat, ez különösen fontos lehet jelen kísérletsorozat esetében, hiszen láttuk, hogy a nyomószilárdságok szórása nagyban megnehezíti általános következtetések levonását.

További, az eddigiekhez közvetlenül kapcsolódó kutatási lehetőségek:

1. A próbatestek félbevágásával meg lehetne állapítani az egyes próbatestek tönkremeneteli módjait, amiből következtetéseket tudnák levonni a tönkremeneteli mód és a törőerő kapcsolatára. Látnánk, hogy az egyes teherbírások közötti különbség esetenként a tönkremeneteli módból adódik-e.
2. A próbakocka nyomószilárdsági eredményeit érdemes lenne felülvizsgálni az eltört próbatestekből való mintavétellel. A számított teherbírások eredményeit nagyban befolyásolják ezek az értékek, és talán sok próbatestnél, a jelenleginél jobb egyezés lenne tapasztalható a mért és számított értékek között.
3. A numerikus modell szempontjából érdemes lenne megfontolni a nyolcad lemezelem modellezését, hogy a számítási idő csökkenthető legyen.
4. A nyírótestek modellezésének fejlesztése szükséges. Első lépésként a teljesen átmenő csapok helyett a betonfedést is tartalmazó modell építése célszerű, illetve a továbbiakban a megcsúszás hatását is célszerű figyelembe venni.

Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Kovács Imre PhD: Vasbetonszerkezetek II. VI.-VII. előadás, Gombafödémek és síklemez födémek igénybevételei, vasalási rendszerei
- [2] Bogdándy, B. „Átszűrődásra vasalatlan vasbeton lemezek átszűrődási teherbírása”, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar Hidak és Szerkezetek Tanszék, PhD értekezés, 2016
- [3] Fernandez Ruiz, M, Muttoni, A „Performance and design of punching shear reinforcing systems”, 3rd fib International Congress, 2010
- [4] Einpaul J., Brantschen F., Fernández Ruiz M., Muttoni A., Performance of punching shear reinforcement under gravity loading: Influence of type and detailing, ACI Structural Journal, Vol. 113, No 4, Farmington Hills, USA, 2016, pp. 827-838.
- [5] Guandalini, S., Burdet, O.L., Muttoni, A., “Punching Tests of Slabs with Low Reinforcement Ratios”, ACI Structural Journal, Farmington Hills, Mich., Vol. 106, No. 1, 2009, pp. 87-95
- [6] Lips S., Fernández Ruiz M., Muttoni A., Experimental Investigation on Punching Strength and Deformation Capacity of Shear-Reinforced Slabs, ACI Structural Journal, Vol. 109, USA, 2012, pp. 889-900.
- [7] Pérez Caldentey, A. et al.: Influence of Stirrup Detailing on Punching Shear Strength of Flat Slabs, Engineering Structures, 49 (2013) pp. 855-865.
- [8] fib Model Code for Concrete Structures 2010
- [9] Laza Máté Miklós Diplomamunka – Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Hidak és szerkezetek tanszék.
- [10] „www.cervenka.cz,” [Online]. Available: https://www.cervenka.cz/assets/files/atena-pdf/ATENA_Theory.pdf. [Hozzáférés dátuma: 2 11 2018].
- [11] R. V. A. E. T. A.-F. M.A. Eder, „Modelling and experimental assessment of punching shear in flat slabs with shearheads,” Engineering Structures, %1. kötet32, pp. 3911-3924, 2010.
- [12] M. A. P. Aikaterini Genikomsou, „Finite element simulation of concrete slabs with various placement and amount of shear bolts,” *Procedia Engineering*, %1. kötet193, pp. 313-320, 2017.
- [13] D. P. a. J. Červenka, „ATENA Program Documentation Part 11 /Troubleshooting Manual,” Prague, 13. 6. 2018.
- [14] Gyuricza Arnold Diplomamunka – Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Hidak és szerkezetek tanszék.

1. Melléklet

A. Kiindulási adatok

A.1. Anyagjellemzők

Beton:

Nyomószilárdsági kísérletek alapján számított szilárdság: $f_{cm, \text{átl. henger}} := 43.27 \cdot \text{MPa}$

Betonacél: $f_{yk} := 500 \cdot \text{MPa}$

A.2. Geometria

Lemezvastagság: $v := 250 \cdot \text{mm}$

Oszlop átmérő: $d := 400 \cdot \text{mm}$

Betonfedés: $c_{\text{nom}} := 20 \cdot \text{mm}$

A.3. Alkalmazott vasalás

Hajlítás:

Húzott fővasalás: $s_s := 100 \text{mm}$

$\phi_{s,1} := 20 \text{mm}$

$\phi_{s,2} := 16 \text{mm}$

Nyomott vasalás: $\phi_{s,ny} := 12 \text{mm}$

$s_{ny} := 2 \cdot s_s = 200 \cdot \text{mm}$

belső zóna vasalása:

$$a_{s,b} := \left(\frac{\phi_{s,1}^2 \cdot \pi}{4} + \frac{\phi_{s,2}^2 \cdot \pi}{4} \right) \cdot \frac{1}{s_s} = 5152 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$a_{s,ny} := \frac{\phi_{s,ny}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{1}{s_{ny}} = 565 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

külső zóna vasalása:

$$a_{s,k} := \frac{\phi_{s,1}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{1}{s_s} = 3142 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Nyírás: $\phi_{csap} := 12 \text{mm}$ $A_{csap} := \frac{\phi_{csap}^2 \cdot \pi}{4} = 113.1 \cdot \text{mm}^2$

A dolgozó nyírási vasak száma: $n := 36 \cdot \text{db}$

Hasznos magasságok számítása:

$d_{f\ddot{o}} := v - c_{\text{nom}} - 0.5 \cdot \phi_{s,1} = 220 \cdot \text{mm}$

$d_{\text{mellék}} := d_{f\ddot{o}} - \phi_{s,1} = 200 \cdot \text{mm}$

$d_{\text{átl}} := \frac{d_{f\ddot{o}} + d_{\text{mellék}}}{2} = 210 \cdot \text{mm}$

$$d_{ny.mellék} := c_{nom} + 1.5 \cdot \phi_{s.ny} = 38 \cdot \text{mm}$$

$$z_s := d_{mellék} - d_{ny.mellék} = 162 \cdot \text{mm}$$

B. Teherbírások meghatározása

B.1. Hajlítási teherbírás csak húzott vasalással

Belső zóna teherbírása:

$$x_{c.b} := \frac{a_{s.b} \cdot f_{yk}}{f_{cm.átl.henger} \cdot l} = 59.54 \cdot \text{mm} \quad \xi_{c.b} := \frac{x_{c.b}}{d_{mellék}} = 0.298 \quad \xi_{c.b} \leq 0.49 = 1$$

$$m_{Rd.b} := f_{cm.átl.henger} \cdot x_{c.b} \cdot l \cdot \left(d_{mellék} - \frac{x_{c.b}}{2} \right) = 438.5 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Külső zóna teherbírása:

$$x_{c.k} := \frac{a_{s.k} \cdot f_{yk}}{f_{cm.átl.henger} \cdot l} = 36.30 \cdot \text{mm} \quad \xi_{c.k} := \frac{x_{c.k}}{d_{mellék}} = 0.182 \quad \xi_{c.k} \leq 0.49 = 1$$

$$m_{Rd.k} := f_{cm.átl.henger} \cdot x_{c.k} \cdot l \cdot \left(d_{mellék} - \frac{x_{c.k}}{2} \right) = 285.6 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

B.2. Hajlítási teherbírás a nyomott vasalással együtt

Belső zóna teherbírása, azzal kiindulva hogy a nyomott vas is folyik:

$$x_{c.ny.b} := \frac{(a_{s.b} - a_{s.ny}) \cdot f_{yk}}{f_{cm.átl.henger} \cdot l} = 53.00 \cdot \text{mm} \quad \xi_{c.ny.b} := \frac{x_{c.ny.b}}{d_{ny.mellék}} = 1.395 \quad \xi_{c.ny.b} \geq 2.11 = 0$$

Mivel a nyomott vas nem folyik, újra kell számolni!

$$a_{s.b} \cdot f_{yk} + a_{s.ny} \cdot \left(560 \cdot \frac{d_{ny.mellék}}{x_{c.ny.b}} - 700 \right) \cdot \text{MPa} - x_{c.ny.b} \cdot f_{cm.átl.henger} = 0$$

$$x_{c.ny.b.új} = 55.41 \cdot \text{mm} \quad \xi_{c.b.új} := \frac{x_{c.ny.b.új}}{d_{mellék}} = 0.277 \quad \xi_{c.b.új} \leq 0.49 = 1$$

$$\xi_{c.ny.b.új} := \frac{x_{c.ny.b.új}}{d_{ny.mellék}} = 1.458 \quad \xi_{c.ny.b.új} \leq 2.11 = 1$$

Az első feltételezés nem volt helyes, az új kiindulás, hogy a húzott vas folyik, a nyomott vas ne

$$\sigma_{s.ny.b} := \left(\frac{560}{\xi_{c.ny.b.új}} - 700 \right) \cdot \text{MPa} = -315.931 \cdot \text{MPa}$$

$$m_{Rd.ny.b} := f_{cm.átl.henger} \cdot x_{c.ny.b.új} \cdot \left(d_{mellék} - \frac{x_{c.ny.b.új}}{2} \right) + a_{s.ny} \cdot |\sigma_{s.ny.b}| \cdot z_s = 442.01 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

A belső zóna szélessége: $b_{belső} := 1.6 \cdot \text{m}$

$$M_{\text{belső}} := m_{\text{Rd.ny.k}} \cdot b_{\text{belső}} = 707.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Külső zóna teherbírása, azzal kiindulva hogy a nyomott vas nem folyik:

$$a_{\text{s.k}} \cdot f_{\text{yk}} + a_{\text{s.ny}} \cdot \left(560 \cdot \frac{d_{\text{ny.mellék}}}{x_{\text{c.k}}} - 700 \right) \cdot \text{MPa} - x_{\text{c.k}} \cdot f_{\text{cm.átl.henger}} = 0$$

$$x_{\text{c.ny.k.új}} = 35.08 \cdot \text{mm} \quad \xi_{\text{c.k.új}} := \frac{x_{\text{c.ny.k.új}}}{d_{\text{mellék}}} = 0.175 \quad \xi_{\text{c.k.új}} \leq 0.49 = 1$$

$$\xi_{\text{c.ny.k.új}} := \frac{x_{\text{c.ny.k.új}}}{d_{\text{ny.mellék}}} = 0.923 \quad \xi_{\text{c.ny.k.új}} \leq 2.11 = 1$$

Rendben, tehát a húzott vas folyik, a nyomott pedig nem.

$$\sigma_{\text{s.ny.k}} := \left(\frac{560}{\xi_{\text{c.ny.k.új}}} - 700 \right) \cdot \text{MPa} = -93.411 \cdot \text{MPa}$$

$$m_{\text{Rd.ny.k}} := f_{\text{cm.átl.henger}} \cdot x_{\text{c.ny.k.új}} \cdot \left(d_{\text{mellék}} - \frac{x_{\text{c.ny.k.új}}}{2} \right) + a_{\text{s.ny}} \cdot |\sigma_{\text{s.ny.k}}| \cdot z_{\text{s}} = 285.5 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

A külső zóna szélessége: $b_{\text{külső}} := 0.9 \cdot \text{m}$

$$M_{\text{külső}} := m_{\text{Rd.ny.k}} \cdot b_{\text{külső}} = 257.0 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

A számított hajlítónyomatéki teherbírás:

Erőátadás távolsága a középponttól: $d_{\text{erő}} := 1000 \cdot \text{mm}$

$$\text{átlag} := \frac{d_{\text{erő}} \cdot \cos\left(22.5 \cdot \frac{\pi}{180}\right) + d_{\text{erő}} \cdot \cos\left(67.5 \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{2} = 0.653 \cdot \text{m}$$

$$R_{\text{ny}} := \frac{M_{\text{belső}} + M_{\text{külső}}}{2 \cdot \text{átlag}} \cdot 4 = 2952 \cdot \text{kN}$$

B.3. Beton teherbírása ferde nyomásra a pillér u_0 kerülete mentén

$$r_0 := \frac{d}{2} = 200 \cdot \text{mm} \quad u_0 := 2 \cdot r_0 \cdot \pi = 1257 \cdot \text{mm}$$

$$\nu := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{\text{cm.átl.henger}}}{250 \text{MPa}} \right) = 0.496 \quad v_{\text{Rk.max}} := 0.5 \cdot \nu \cdot f_{\text{cm.átl.henger}} = 10.734 \cdot \text{MPa}$$

$$R_{\text{max}} := v_{\text{Rk.max}} \cdot u_0 \cdot d_{\text{átl}} = 2832.7 \cdot \text{kN}$$

B.4. Beton teherbírása nyírásra u_1 kerület mentén

$$u_1 := 2 \cdot \pi \cdot (r_0 + 2 \cdot d_{\text{átl}}) = 3896 \cdot \text{mm}$$

$$k := 1.38 \quad \rho_1 := 0.02 \quad C_{\text{Rk.c}} := 0.18$$

$$v_{\text{min}} := \left[0.035 \cdot (k)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{f_{\text{cm.átl.henger}}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \cdot \text{MPa} = 0.373 \cdot \text{MPa}$$

$$v_{\text{Rk.c}} := \max \left[v_{\text{min}}, \left[C_{\text{Rk.c}} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_1 \cdot \frac{f_{\text{cm.átl.henger}}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \text{MPa} \right] = 1.573 \cdot \text{MPa}$$

$$R_{\text{min}} := v_{\text{Rk.c}} \cdot u_1 \cdot d_{\text{átl}} \cdot k = 1776 \cdot \text{kN}$$

B.5. Nyírási acélbetétek teherbírása

A nyírási vasalás szilárdsága: $\sigma_{\text{sw}} := \min \left(f_{\text{yk}}, 250 \cdot \text{MPa} + 0.25 \cdot d_{\text{átl}} \cdot \frac{\text{MPa}}{\text{mm}} \right) = 302.5 \cdot \text{MPa}$

A nyírási vasalás teherbírása: $v_{\text{Rk.cs}} := 0.75 \cdot v_{\text{Rk.c}} + \frac{n \cdot \sigma_{\text{sw}} \cdot A_{\text{csap}}}{d_{\text{átl}} \cdot u_1} = 2.685 \cdot \text{MPa}$

$$R_{\text{cs}} := v_{\text{Rk.cs}} \cdot u_1 \cdot d_{\text{átl}} = 2197 \cdot \text{kN}$$

A próbatest teherbírása:

$$R_{\text{c}} := \min(R_{\text{max}}, R_{\text{cs}}) = 2197 \cdot \text{kN}$$