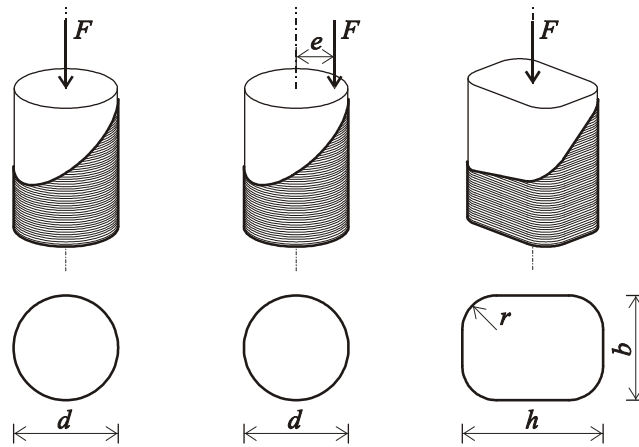


## AXIÁLISAN TERHELT, KOMPOZITTEL ERŐSÍTETT VASBETON KERESZTMETSZETEK



Csuka Bernát

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék

Témavezető: Kollár László P.

## 1. BEVEZETÉS

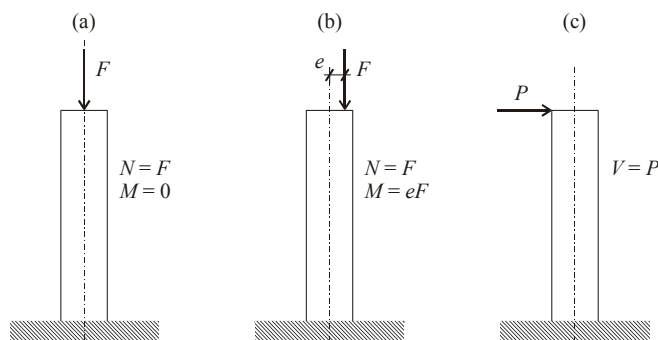
Beton és vasbeton oszlopok axiális teherbírása jelentősen megnövelhető a beton harántirányú alakváltozásának korlátozásával. Erre a célra leggyakrabban spirálkengyelezést vagy acélköpenyezést használnak.

Az elmúlt 20 évben erősítőanyagként – acélköpeny helyett – elterjedt a kompozitok (szálerősítésű polimerek) használata, azok korrózióállósága, nagy szakítószilárdsága és utólagos megerősítésként történő könnyű alkalmazhatósága miatt. Kompozit erősítés szinte bármilyen konvex keresztmetszet esetén alkalmazható, de a legelterjedtebbek a kör- illetve lekerekített sarkú téglalap keresztmetszetű oszlopok megerősítése.

A terhek hatására különböző igénybevételek alakulnak ki az oszlopokban, ezek lehetnek:

- központos nyomásból eredő axiális erő (1a ábra),
- külpontos nyomásból (vagy nyomásból és vízszintes erőből) eredő axiális erő és nyomaték (1b ábra) és
- vízszintes teherből ébredő nyíróerő (1c ábra – a vízszintes teher nyomatékot is okoz).

Ebben a dolgozatban csak az első két esetet vizsgáljuk.



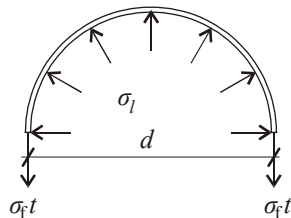
**1. ábra:** Oszlopok tipikus igénybevételei: központos nyomás (a), külpontos nyomás (b) és vízszintes (nyíró-) erő (c).

*Erősített anyagok viselkedése:* Az axiálisan terhelt oszlop beton magja a Poisson-hatás következtében harántirányban tágul. Ezt az alakváltozást gátolja az erősítés, így a beton háromtengelyű feszültségállapotba kerül, és ennek következtében axiális teherbírása megnő.

A megtámasztó feszültség,  $\sigma_l$  kör keresztmetszetek és központos terhelés esetén a kazánképlet segítségével számolható (2. ábra):

$$\sigma_l = \frac{2\sigma_f t}{d}, \quad (1)$$

ahol  $\sigma_f$  az erősítésben fellépő gyűrűirányú feszültség,  $t$  az erősítés vastagsága és  $d$  a keresztmetszet átmérője.



2. ábra: Erősített kör keresztmetszet.

A terhelés irányára merőlegesen gátolt deformációjú rideg anyagokat már 100 évvel ezelőtt is vizsgálták. Kármán [3] kísérleti úton elemezte márvány és homokkő viselkedését háromtengelyű feszültség-állapotban, és azt találta, hogy megfelelő erősítés esetén az eredetileg rideg anyag képlékenyen viselkedik.

### 1.1 Központosan terhelt kör keresztmetszetek

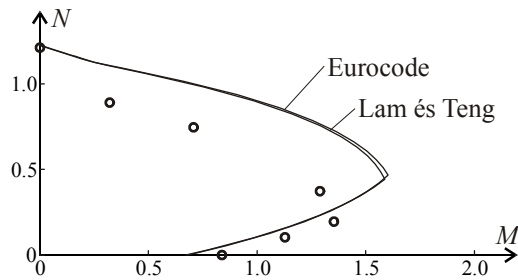
Számos kísérleti eredmény és modell található az irodalomban *központosan terhelt*, kompozittal erősített *kör* keresztmetszetű oszlopok esetére. A modellek lehetnek a kísérleti eredményekre illesztett empirikus (design-oriented) modellek, vagy valamilyen beton anyagmodellre épülő (analysis-oriented) modellek.

A modellek szerint az erősített oszlop teherbírását nem befolyásolja az erősítés merevsége. Ez ellentmondani látszik a szemléletnek, hiszen nagyon kis merevségű erősítés esetén a beton tönkremehet az erősítő hatás megjelenése előtt, illetve nagyon merev erősítés esetén az erősítés tönkremehet, mielőtt a beton képlékenyedni kezd.

### 1.2 Külpontosan terhelt kör keresztmetszetek

Meglehetősen kevés kísérleti eredmény van az irodalomban *külpontosan terhelt*, kompozittal erősített *kör* keresztmetszetű oszlopoka. Két eltérő modelltípus van: egyszerűsített modellek [1,2], amelyekben a Bernaulli-Navier hipotézis alapján meghatározott nyúlásokat és egy, a központos terhelésre vonatkozó modell [4] által javasolt erősített szigma-epszilon diagramot használnak; és numerikus 3D modellek, melyek a kereskedelemben elérhető végeselemes programokat, illetve azok beépített triaxiális beton modelljeit használják.

Az egyszerűsített modellek nem adnak elfogadható becslést a külpontosan terhelt, erősített oszlopok teherbírására (3. ábra), míg a numerikus modellek csak kvantitatív összehasonlítást adnak néhány kísérleti eredménnyel. A szerzők is beismerik [1], hogy „további vizsgálat szükséges”.

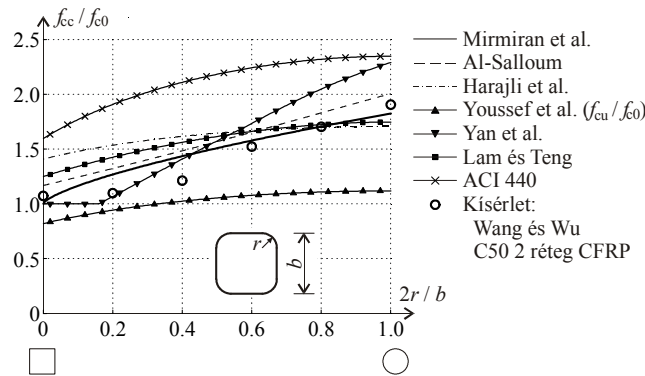


3. ábra: Kísérleti eredmények és egyszerűsített modellek összehasonlítása.

### 1.3 Központosan terhelt téglalap keresztmetszetek

*Központosan terhelt*, kompozittal erősített (lekerekített sarkú) *téglalap* keresztmetszetű oszlopok esetére számos kísérleti eredmény található az irodalomban. Vannak egyszerűsített modellek, melyek különböző módon meghatározott „egyenértékű átmérő” és határos terület segítségével a kör keresztmetszetű esetre meghatározott szigma-epsilon görbéket használják; és vannak numerikus modellek, melyek a központosan terhelt oszlopok esetén használtakhoz hasonlóak.

A numerikus modellek megint csak kvantitatív összehasonlításokat adnak, míg az egyszerűsített modellek között nincs olyan, amely a kísérleti úton meghatározott teherbírás megbízható becslését adja. Ez látható a 4. ábrán, ahol a kísérleti adatokat és a különböző modellek által szolgáltatott eredményeket a lekerekítési sugár függvényében tüntettük fel.



4. ábra: A sarok lekerekítési sugár hatása az erősített ( $f_{cc}$ ) és erősítetlen ( $f_{c0}$ ) betonszilárdság arányára téglalap keresztmetszetek esetén.

## 2. A KUTATÁSI FELADAT MEGFOGALMAZÁSA

Az irodalomban talált információ alapján a következő kérdések vetődnek fel *központosan terhelt*, kompozittal erősített *kör* keresztmetszetű oszlopok esetén:

- Hogyan befolyásolja a kompozit erősítés merevsége az erősített oszlop viselkedését?
- Milyen feltételek mellett teljesül, hogy a kompozit erősítés merevsége nem befolyásolja az oszlop teherbírását?

Ezeknek a kérdéseknek gyakorlati jelentőségét az adja, hogy a kompozit merevsége nagyon változó lehet, és a jövőben megjelenő kompozitok rugalmassági modulusa jelentősen meghaladhatja a napjainkban használt anyagokét.

*Külpontosan terhelt*, kompozittal erősített *kör* keresztmetszetű oszlopok esetén célunk egy olyan új modell megalkotása, melynek segítségével megmagyarázható és számszerűen követhető a kísérletek során tapasztalt viselkedés.

*Külpontosan terhelt*, kompozittal erősített *téglalap* oszlopok esetén célunk egy modell és tervezési összefüggések megalkotása a teherbírás meghatározásához.

## 3. MEGOLDÁS MÓDJA

Mint korábban említettük, az egyszerűsített modellek nem adnak elfogadható becslést a kompozittal erősített beton teherbírására. Ezért mi egy az irodalomban található megbízható beton anyagtvényre [5] épülő, „analysis-oriented” modellt alkotunk a következő lépésekkel:

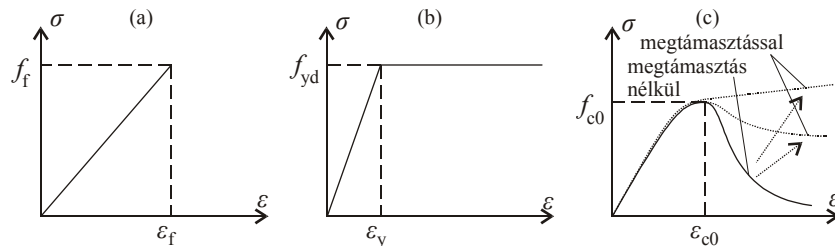
- nemlineáris végeselemes modell kifejlesztése,
- a modell verifikálása kísérleti eredmények segítségével,
- numerikus számítások végzése különböző bemenő adatokkal (eltérő geometriai- és/vagy anyagjellemzők),
- a numerikus számítások eredményei alapján a tervezési gyakorlatban használható empirikus összefüggések megalkotása.

## 4. MODELL

*Anyagmodellek*: Az erősítő anyagot lineárisan rugalmas ortotrop lemezként modelleztük. Vasbeton keresztmetszetek esetén a vasalást egyszerű rugalmas-képlékeny anyagmodellel vettük figyelembe. A beton modellezésére egy az irodalomban talált új, a háromtengelyű feszültségállapotot figyelembe vevő (felkeményedő-puhuló, nem kapcsolt) anyagmodellt [5] használtunk. A tipikus szigma-epszilon görbék az 5. ábrán láthatók.

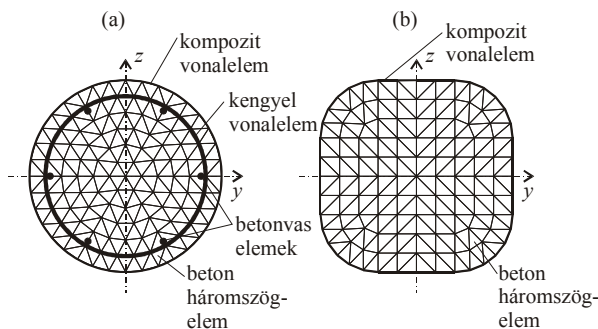
Az 5c ábrán erősítetlen beton esetén a tönkremeneteli állapot elérése után a beton anyagszerkezete fellazul, egy eső ág figyelhető meg a görbén (folytonos vonal). Ez a tönkremeneteli állapot utáni viselkedés változik meg a kompozit erősítés hatására (pontosított vonalak) és így az erősített szilárdság ( $f_{cc}$ ) nagyobb, mint az erősítetlen beton szilárdsága ( $f_{c0}$ ). (1. Tézis)

Az alkalmazott beton anyagtvény nem tartalmazza a beton lassú alakváltozásának hatását, ezt munkánk során nem vizsgáltuk.



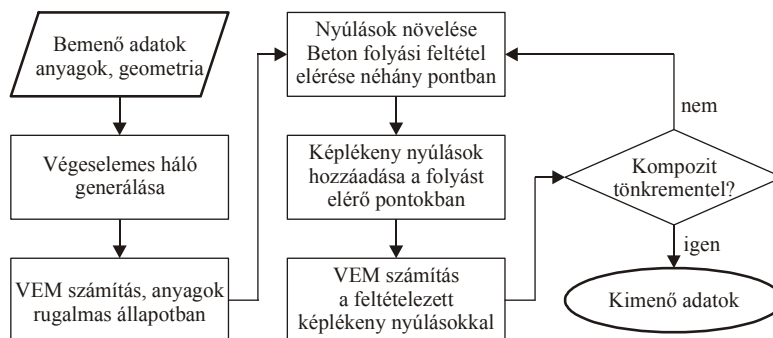
5. ábra: A modellben használt anyagok tipikus szigma-epsilon diagramjai: kompozit erősítés (a), acél (b) és beton (c).

*Numerikus modell:* Egy kétdimenziós végeleemes modellt alkottunk a keresztmetszet számítására (6. ábra). Bár a háló kétdimenziós, a feszültségek és nyúlások számítása háromdimenziós: lineárisan változó axiális nyúlásokat tételezünk fel a keresztmetszetben (a nemlineárisan változó axiális feszültségeket pedig a numerikus modell segítségével számítjuk).



6. ábra: Kör alakú vasbeton keresztmetszethez tartozó végeleemes háló (a) és beton téglalap keresztmetszethez tartozó végeleemes háló (b).

A beton anyagmodell nemlinearitása miatt nyúlásvezérelt növekményi eljárást alkalmaztunk, melynek folyamatábrája a 7. ábrán látható. (4., 5. Tézis)

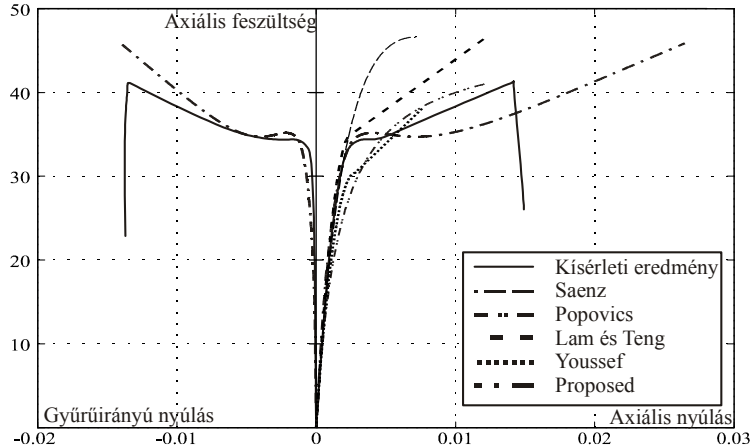


7. ábra: A számítás folyamatábrája.

## 5. VERIFIKÁCIÓ

### 5.1 Központosan terhelt kör keresztmetszetek

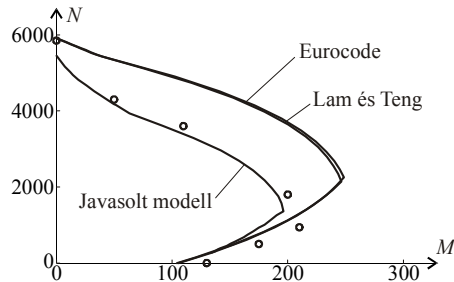
Az axiális teherbírás értékét minden irodalomban talált kísérlethez (154 eset) kiszámítottuk, és a számítási eredményeket összevetettük a kísérleti eredményekkel: az átlagos abszolút eltérés 9.95%-ra adódott. Néhány kísérleti feszültség-nyúlás görbét összehasonlítottunk az irodalomban talált modellek által javasolt görbékkel és saját modellünk eredményeivel (8. ábra). Látható, hogy a javasolt modellel követhető a görbe alakja, bár a modell pontossága kifogásolható. Ennek az az oka, hogy a beton anyagmodell kalibrálásához szükséges adatok közül sok nem állt rendelkezésünkre.



8. ábra: A kísérleti eredmények és a számított  $\sigma(\epsilon)$  diagramok összehasonlítása.

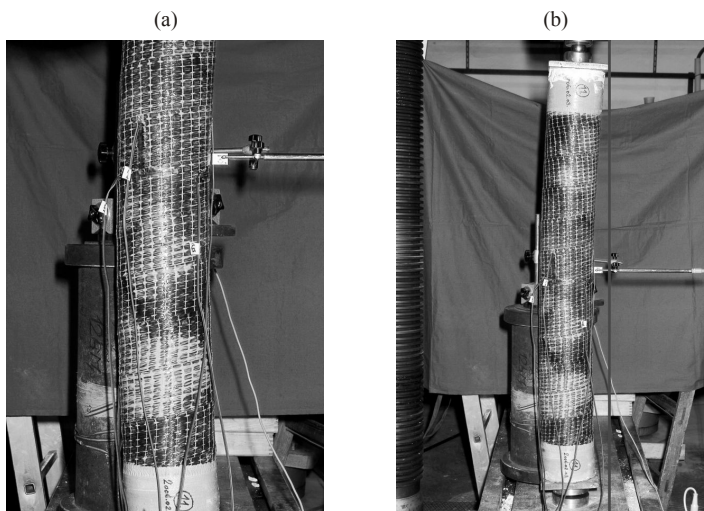
### 5.2 Külpontosan terhelt kör keresztmetszetek

A kísérleti eredmények és a numerikus számítások eredményének egy összehasonlítása látható a 9. ábrán.



9. ábra: Az irodalomban talált kísérleti eredmények és a modellek összehasonlítása.

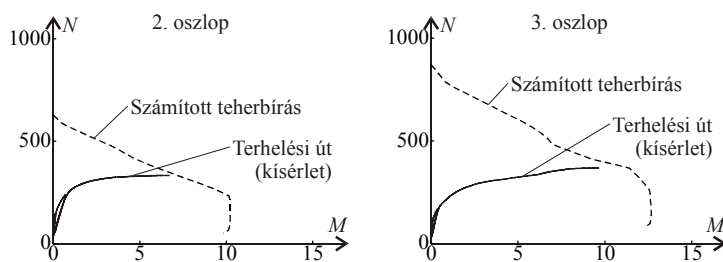
*Saját kísérletek:* Tizenöt kör keresztmetszetű próbatest vizsgálatára került sor 2006-ban a BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék laboratóriumában. Hat vasbeton oszlop szén-, hat pedig üvegszálal erősítésű kompozit tekercselést kapott. A fennmaradó három oszlop kontrollként szolgált. Egy szénszálal erősítésű oszlop látható a 10. ábrán.



**10. ábra:** 11. oszlop műszerezése (a) és a terhelés alatt meggörbült oszlop (b).

A mért terhelési utak és teherbírási vonalak összehasonlítása látható a 11. ábrán két különböző üvegszálal erősítésű oszlop esetén. A teherbírás számításakor a szál szakadási nyúlása helyett a mért gyűrűirányú nyúlásokat vettük figyelembe. A terheléses vizsgálat után a tönkrement oszlopokat elvágtuk, a beton és az erősítés között leválásra (delaminációra) utaló nyomokat nem láttunk.

Sajnos szénszálal erősítés esetén a numerikus számítások nem mutattak jó egyezést a kísérleti eredményekkel. Ennek oka lehet a próbatestekhez használt nagyon rossz minőségű beton.



**11. ábra:** A mért terhelési út és a számított teherbírási vonalak összehasonlítása.

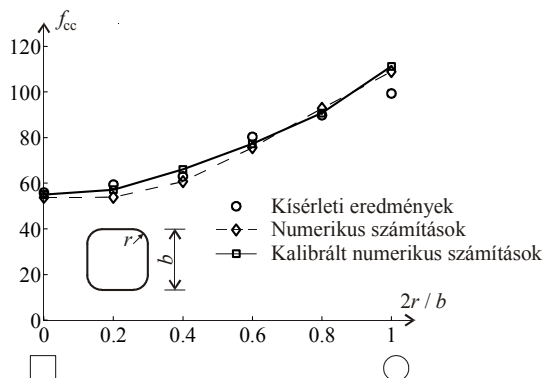


### 5.3 Központosan terhelt téglalap keresztmetszetek

A verifikáció első lépéseként Wang és Wu [6] kísérleti eredményeit hasonlítottuk össze saját numerikus számításaink eredményével (12. ábra).

Számításaink jó egyezést mutatnak, különösen, ha a publikált erősítetlen betonhoz tartozó szigma-epszilon diagramot felhasználjuk az anyagmodell kalibrálásához (az ábrán „kalibrált” számítások). Hangsúlyozzuk, hogy az általunk javasolt modell az egyetlen modell (lásd. 4. ábra), amely a kísérleti eredmények által meghatározott konkáv görbét követni tudja. (5.1. Tézis).

Kiszámítottuk – kalibráció nélkül –  $f_{cc}$  értékét minden irodalomban talált kísérletre (105 eset), az átlagos abszolút eltérés 16.33%-ra adódott.



12. ábra: A kísérleti és a modell alapján számolt eredmények összehasonlítása.

## 6. EREDMÉNYEK

### 6.1 Központosan terhelt kör keresztmetszetek

A kialakított modell segítségével vizsgáltuk az erősítés merevségének hatását. Egy példa látható a 13. ábrán C30 beton esetén csak gyűrűirányú erősítő szálakkal kialakított kompozit esetére. Minden folytonos vonal egy adott merevség-arányhoz ( $\rho_s$ ) tartozik, amit a következőképpen definiáltuk (1. Tézis):

$$\rho_s = \frac{2E_f t}{dE_c}, \quad (2)$$

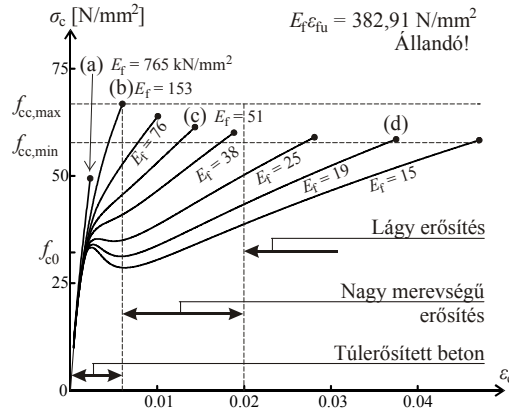
ahol  $E_c$  a beton rugalmassági modulusa.

Látható (13. ábra), hogy nagy merevség esetén az alakváltozás-feszültség ábra monoton növekvő („c” görbe), míg lágyabb (kisebb merevségű) erősítés esetén a görbének lokális maximum- és minimumpontja van („d” görbe). Az erősítés (és így a teljes szerkezet) tönkremenetele az erősítés mértékétől ( $\rho_c$ ) függ [4]:

$$\rho_c = f_t / f_{c0}, \quad (3)$$

A 13. ábrán látható, hogy az erősítés merevsége befolyásolja az erősített beton teherbírását (1. Tézis). Nyolc feszültség-nyúlás diagramot adtunk meg, melyek különböző merevségű erősítésekhez tartoznak úgy, hogy a kompozit szakítószilárdsága (így az erősítés mértéke is) azonos.

Ha merevség nagyon nagy, a kompozit elszakad, mielőtt a beton elérné a tönkremeneteli állapotot („a” görbe,  $E_f = 765 \text{ kN/mm}^2$ ). Ezt az esetet hívjuk „túlmerevítés”-nek, amit el kell kerülni. (1.2. Tézis).



13. ábra: Az erősítés merevségének hatása a feszültség-nyúlás görbére C30 beton esetén.

Adott mértékű erősítéshez meghatározható egy „hatékony merevség” ( $\rho_{s,opt}$ ), amikor a teherbírás maximális („b” görbe a 13. ábrán). Ez egyben a túlmerevítés és a nagy merevségű erősítés közötti határ is. Ennek megadásához az alábbi összefüggést illesztettük a numerikus számítási eredményekre (2.1. Tézis):

$$\rho_{s,opt} = -0.1 + 0.22 \rho_c^{0.2} \left( \frac{f_{c0}}{20} \right)^{0.3} \quad (4)$$

Ha az erősítés merevsége nagy (de kisebb, mint  $\rho_{s,opt}$ ) nagyobb teherbírás érhető el, mint lágy erősítés esetén. A nagy merevségű- és a lágy erősítés közötti határt numerikusan vizsgáltuk. A számítás eredményei a következő összefüggéssel becsülhetők (2.1. Tézis):

$$\rho_{s,limit} = \begin{cases} 0.0195 + \frac{f_{c0} - 40}{3100}, & \text{ha } f_{c0} \leq 40 \\ 0.0195 + \frac{f_{c0} - 40}{12000}, & \text{ha } 100 > f_{c0} > 40 \end{cases} \quad (5)$$

Egyszerű összefüggéseket is megadtunk a szilárdság számítására. Lágú erősítés számításához a következő összefüggést vezettük le a modell lapján (2.2. Tézis):

$$f_{cc} = \max \begin{cases} f_{cc,\min} \\ f_{c0} \end{cases}, \quad (6)$$

nagy merevségű erősítés esetén a pedig következő (görbe illesztéssel nyert) közelítés alkalmazható (2.3. Tézis):

$$f_{cc} = f_{cc,\min} + (f_{cc,\max} - f_{cc,\min}) \frac{\rho_s - \rho_{s,\text{limit}}}{\rho_{s,\text{opt}} - \rho_{s,\text{limit}}}, \quad (7)$$

ahol a modelltől levezetett határértékek (2.2. Tézis):

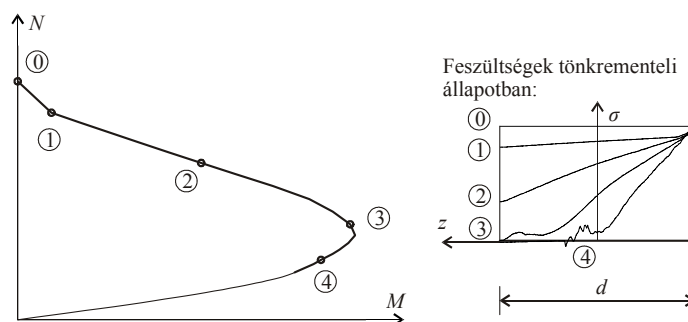
$$f_{cc,\min} = f_l + \sqrt{10.16 f_l f_{c0}}, \quad (8a)$$

$$f_{cc,\max} = f_l + \sqrt{10.16 f_l f_{c0} + f_{c0}^2}. \quad (8b)$$

A fent bemutatott egyszerűsített modell eredményeit összehasonlítottuk a kísérleti eredményekkel, az átlagos abszolút eltérés 11.72%-ra adódott.

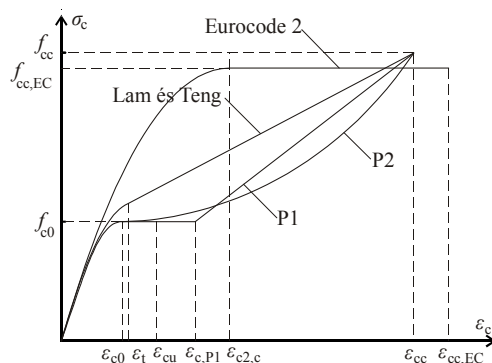
## 6.2 Külpontosan terhelt kör keresztmetszetek

Egy számított teherbírási vonal látható a 14. ábrán, ahol egyes pontokhoz a tönkremenetelhez tartozó átlagos axiális feszültségeket is megadtuk. Az axiális feszültség jelentősen csökken, ahogy távolodunk a keresztmetszet legjobban nyomott pontjától, gyorsabban, mint ahogyan azt a Lam és Teng [4] által javasolt, központos terheléshez tartozó (lineáris) szigma-epszilon diagramra épülő egyszerűsített modellek [1,2] jósolják. (4.1. Tézis).



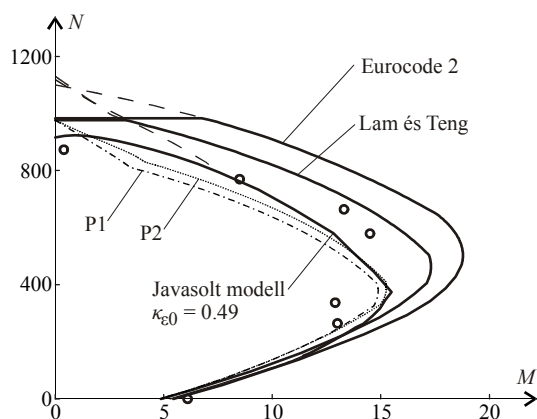
14. ábra: Átlagos axiális feszültségek tönkremenetelkor.

Egyszerűsített tervezés során javasoljuk a 15. ábrán mutatott szigma-epszilon diagramok (P1 vagy P2) használatát, melyeket a numerikus modellel számított átlagos axiális feszültségek alapján határoztunk meg. (4.2. Tézis).



15. ábra: Közelítő tervezéshez használható szigma-epszilon diagramok.

Kiszámítottuk az irodalomban található kísérletek próbatesteihez tartozó teherbírási vonalakat, és azt találtuk, hogy az Eurocode 2 [2] vagy a Lam és Teng [4] által javasolt görbék használatával a különösen terhelte oszlop teherbírását túlbecsüljük, míg a P1 vagy P2 görbe használata elfogadható közelítést ad (16. ábra).

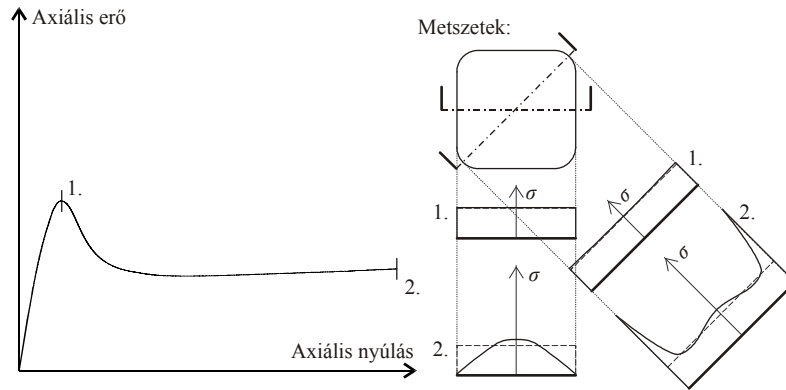


16. ábra: Közelítő teherbírási vonalak (Bisby és Ranger [1]).

### 6.3 Központosan terhelt téglalap keresztmetszetek

A végeelemes modell alapján számított két tipikus feszültség-eloszlás látható a 17. ábrán. Az axiális feszültségek a lekerekített sarkoknál a legnagyobbak, és a keresztmetszet egyenes oldalánál a legalacsonyabbak (5.1. Tézis).

A keresztmetszeten belüli feszültség-eloszlás bonyolultabb annál, hogy csak „hatásosan erősített” és „erősítetlen” zónákra osszuk (ahogyan az egyszerűsített modellek javasolják). Egyszerűsített modellünkben a keresztmetszetbe beírt körhöz tartozó  $f_{cc}$  értéket (ahol  $d = b$ , jele:  $f_{cco}$ ) használjuk a számítás alapjaként. Kizárólag lekerekített sarkú négyzet ( $b = h$ ) keresztmetszetekkel foglalkozunk, ahol  $f_{cco}$  a (6 és 7) egyenletek segítségével számítható  $d = b$  feltételezésével.



17. ábra: Axiális feszültségek eloszlása téglalap keresztmetszetekben ( $f_{c0}$  értékét szaggatott vonal jelzi).

Lekerekített sarkú téglalap keresztmetszetekben az átlagos axiális feszültséget ( $f_{cc}$ ) a következőképpen becsülhetjük: Lágú erősítés esetén ( $\rho_{so} \leq \rho_{s,limit}$ ):

$$f_{cc} = f_{cco} \left( 1 - \left( 1 - \left( \frac{2r}{b} \right)^2 \right) \left( 1 - \frac{7.23}{\left( \frac{f_l}{f_{c0}} + 2.22 \right)^3} - 29.68 \frac{f_l}{f_{c0}} (\rho_{s,limit} - \rho_{so}) \right) \right) \quad (9)$$

(A numerikus futtatások eredményei alapján nagy lekerekítési sugár alkalmazásakor ( $1 > 2r / b > 0,9$ ) hirtelen esés figyelhető meg  $f_{cc}$  értékében. Az egyszerűsített számításhoz javasolt fenti összefüggés emiatt alábecsüli  $f_{cc}$  értékét lágú erősítésű kör – és ahhoz nagyon közeli – keresztmetszetek esetén.)

Nagy merevségű erősítés esetén ( $\rho_{so} > \rho_{s,limit}$ ):

$$f_{cc} = f_{cco} \left( 1 - \left( 1 - \left( \frac{2r}{b} \right)^2 \right) \left( 1 - \frac{7.23}{\left( \frac{f_l}{f_{c0}} + 2.22 \right)^3} \left( \frac{\rho_s \text{ limit} + 0.1061}{\rho_{s0} + 0.1061} \right) \right) \right). \quad (10)$$

(Megjegyezzük, hogy mindkét összefüggés alsó korlátja  $f_{c0}$ .)

Az egyszerűsített összefüggéseket az irodalomban talált kísérleti eredmények segítségével verifikáltuk, és 13.18% átlagos abszolút eltérést találtunk (6. Tézis).

## 7. TÉZISEK

1. Egy új modellt dolgoztam ki – a beton képlékeny viselkedését figyelembe vevő, háromdimenziós anyagtörvény felhasználásával – *központosan nyomott*, FRP-vel erősített, *kör alakú* beton és vasbeton keresztmetszetek számítására. (Az irodalomban csak lényegesen egyszerűbb és kevésbé megbízható beton anyagtörvényre épített modellek találhatók.) A modellt a ráépülő számítógépes program eredményei és az irodalomban található kísérleti adatok összehasonlításával verifikáltam [7].

A modell alapján a következő megállapításokat tettem:

- 1.1. Az irodalomban található állításokkal ellentétben, az erősített oszlop teherbírása függ a megtámasztás merevségétől, de ez a hatás „alacsony merevségű” megtámasztás esetében elhanyagolható [7].
- 1.2. Megállapítottam, hogy lehetséges a megtámasztás „túlmerevítése”, amelynél lényegesen kisebb a szerkezet teherbírása, mint lágy- vagy nagy merevségű erősítés esetén [7].
- 1.3. Megállapítottam, hogy a megtámasztásnak van egy „hatékony merevsége”, amelynél (adott teherbírású FRP esetén) a megtámasztott beton szilárdsága maximális [7].
2. Új összefüggéseket javasoltam *központosan nyomott*, FRP-vel erősített, *kör alakú* beton keresztmetszetek számítására [7]:
  - 2.1. Numerikus számítás alapján közelítő képleteket dolgoztam ki az alacsony merevség, nagy merevség, a hatékony merevség és a „túlmerevítés” meghatározására [7].
  - 2.2. A modell alapján új összefüggéseket *vezettem le* „hatékony merevségű” és „kis merevségű” megtámasztás esetén a teherbírás számítására (átlagos eltérés < 15%) [7].
  - 2.3. Numerikus számítás alapján közelítő képletet dolgoztam ki „nagy merevségű” erősítés esetén a teherbírás számítására (átlagos eltérés < 15%) [9].

3. A gyakorlatban használt erősítések vizsgálatával megállapítottam, hogy tipikusan az üvegszálás megerősítés alacsony merevségű, míg karbonszálás kompozit használatával nagy merevségű erősítés is létrehozható [7].
4. Egy új modellt dolgoztam ki – a sík keresztmetszetek elvének felhasználásával – *külpontosan nyomott*, FRP-vel erősített, *kör keresztmetszetű* beton és vasbeton oszlopok számítására. (Az irodalomban – tudomásom szerint – nincs olyan háromdimenziós anyagtörvényre épített modell, amely alkalmas kvalitatív eredmények létrehozására.) A modellt a ráépülő kifejlesztett végeleemes program eredményei és az irodalomban található kísérleti adatok összehasonlításával verifikáltam [8,9].

A modell alapján a következő megállapításokat tettem:

  - 4.1. Megállapítottam, hogy nagy külpontosság esetén a teherbírás sok esetben lényegesen kisebb, mint azt az irodalomban közölt egyszerűsített számítások mutatják [8]. (A kísérleti eredmények is ezt igazolják.)
  - 4.2. Javaslatot tettem egy közelítő axiális beton nyúlás-feszültség diagramra, amely alapján egy külpontosan terhelt kör keresztmetszet teherbírása közelítően számítható [8].
5. A 4. tézisben megfogalmazott modellt alkalmaztam *központosan nyomott*, FRP-vel erősített, *lekerekített sarkú négyzet vagy téglalap alakú* beton és vasbeton keresztmetszetek számítására. (Az irodalomban csak lényegesen egyszerűbb és kevésbé megbízható beton anyagtörvényre épített modellek találhatók.) A modellt a ráépülő számítógépes program eredményei és az irodalomban található kísérleti adatok összehasonlításával verifikáltam [10].

A modell alapján a következő megállapításokat tettem:

  - 5.1. Meghatároztam a keresztmetszetben található pontos axiális feszültség-eloszlást [10]. (Az irodalomban – tudomásom szerint – erre csak közelítő eljárások vannak.)
  - 5.2. Meghatároztam, hogy keresztmetszet sarkain található lekerekítés mértéke hogyan befolyásolja az axiális teherbírást [10]. (Az irodalomban – tudomásom szerint – nincs olyan modell, amely megfelelő pontossággal követi ezt a hatást.)
  - 5.3. Új, közelítő összefüggést javasoltam a *központosan nyomott*, FRP-vel erősített, *lekerekített sarkú négyzet alakú* beton keresztmetszetek teherbírásának számítására, amely kellő pontosságú (<15%) eredményt ad [10].

## HIVATKOZÁSOK

### Hivatkozott cikkek

- [1] Bisby, L. és Ranger, M., "Axial-flexural interaction in circular FRP-confined reinforced concrete columns", *Construction and Building Materials*, 24, 1672-1681 (2010).
- [2] Eurocode 2: "Design of Concrete Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings", *ENV 1992-1-1*, (2003).
- [3] Kármán, T., "Mitől függ az anyag igénybevétele?", *Magyar Mérnök- és Építész Egylet Közlönye*, 44(10), 212-226 (1910).
- [4] Lam, L. és Teng, J. G., "Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete", *Construction and Building Materials*, 17, 471-489 (2003).
- [5] Papanikolaou, V. K. és Kappos, A. J., "Confinement-sensitive plasticity constitutive model for concrete in triaxial compression", *International Journal of Solids and Structures*, 44, 7021-7048 (2007).
- [6] Wang, L-M. és Wu, Y-F., "Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test", *Engineering Structures*, 30, 493-505 (2008).

### Publikációk

- [7] Csuka, B. és Kollár, L. P., "FRP confined circular columns subjected to concentric loading", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(23), 3504-3520 (2011).
- [8] Csuka, B. és Kollár, L. P., "FRP confined circular columns subjected to eccentric loading", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, (közlésre elfogadva, 2011).
- [9] Csuka, B. és Kollár, L.P., "Analysis of FRP confined columns under eccentric loading", *Composite Structures*, (közlésre elfogadva, 2011).
- [10] Csuka, B. és Kollár, L. P., "FRP confined rectangular columns subjected to concentric loading", (kézirát, tervezett megjelenés: *Journal of Reinforced Plastics and Composites*).