

# **TMDK-dolgozat**

Alt Zsolt  
építőmérnök Bsc

2011. november

# **Acélszálak tapadó szilárdságának vizsgálata kísérleti úton**

## **Adhesive strength of steel fiber test experimentally**



Kézirat lezárása: 2011.november 21.

Hazánkban kevés vizsgálati eredmény ismeretes szálerősítésű betonból készült szerkezeti elemekkel kapcsolatosan. A legnagyobb lemaradás a szálerősítésű beton viselkedésének modellezésében tapasztalható. Általános érvényű és általánosan elfogadott modellek még világviszonylatban sem állnak a tervezők rendelkezésére. Ebből kifolyólag a szálerősítésű betonok szabványosításában is jelentős lemaradások tapasztalhatók. Napjainkig a szálerősítésű betonokat alkalmazzák például ipari betonpadlók, löttbeton, alagútelelemek, csövek, homlokzat panelek, előregyártott elemek, utépítés, kifutópályák, előregyártott betonelemek, dinamikus igénybe vett szerkezetek esetén. A szálerősítéses betonok felhasználásnak egyik ígéretes területe az acélszálak nyírási teherbírás növelő hatásának kihasználásában rejlik. Ezen szálak alkalmazásának eredményeképpen elérhetjük, hogy a szükséges „hagyományos” nyírási vasalás (kengyelek) mennyiségét minimálisra csökkentjük vagy akár egyes esetekben száz százalékosan helyettesítsük őket. Ezzel rövidíthetjük az építési időt, egyszerűsíthetjük a munkafázisokat (kevesebb vasszerelés) és gazdaságossági előnyt is formálhatunk belőle. Az irodalomban fellelhető, az acélszálerősítéses vasbeton gerendák nyírási teherbírásával foglalkozó, kutatásokból láthatjuk, hogy a nyírási teherbírásban fontos szerepet játszik a szálak és az őket körülvevő beton (mátrix) közti  $\tau_f$  tapadószilárdság. Jelen TDK munka vizsgálódásának célja, hogy a beton és az acélszál együttes viselkedését jobban megismerjük, ennek érdekében falazóhabarcsba ágyazott acélszálakkal végzett száلكihúzó kísérletben mérjük ezen paramétert különböző beágyazási hossz és száltípus esetén.

In our country, we known only a few experimental result about the fiber reinforced concrete structural elements. The biggest backwardness is in modelling fiber reinforced concretes behavior. There is no generally accepted model or design method which the engineers can use. Consequently in the standardization there is also a big lag. Nowadays fiber reinforced concrete is used for industrial concrete floors, frontage panels, precast elements, airstrips, structures with dynamic loads, tunnel elements. One promise area of using fiber reinforced concrete lies in steel fibers can enhance shear strength. Application of this fibers can result a reduction in the amount of conventional shear reinforcement stirrups to minimum or maybe, in some cases, we can absolutely replace them. With this shorter building time can be obtained, process can be simplified (less iron assembly) and economic benefit can be reached. From experimental results found in literature we can see that the bond strength between fibers and the surrounding concrete (matrix) plays an important role in determining the shear capacity. This TMDK work aims to know better the behavior of fiber and matrix, for this purpose pull-out tests were made with different embedded length and fiber-type to measure the bond strength between fiber and matrix.

# **Tartalomjegyzék**

## **1. BEVEZETÉS**

### **1.1 Fogalmak**

### **1.2 Száltípusok**

### **1.3 A szálerősítéses beton keverése**

### **1.4 A szálerősítéses beton viselkedése**

## **2. A NYÍRÁSi teherbírás**

### **2.1 Nyírási teherbírás-kísérletek**

### **2.2 Tapadószilárdság és szál-kihúzó kísérletek**

### **2.3 Acél szálakkal végzett szálkihúzó vizsgálat**

## **3 A kísérlet**

### **3.1 A kísérlet bemutatása**

### **3.1 A mérési eredmények**

### **3.2 Következtetések és megállapítások**

## **Irodalom jegyzék**

## **Táblázatjegyzék**

## **Ábrajegyzék**



## 1. BEVEZETÉS

A szálerősítésű anyagok ötlete évezredekre nyúlik vissza. Már az egyiptomiak keverték szalmát és állati eredetű szőrszálakat az agyaghoz, hogy annak szívósságát és tartósságát javítsák. A beton esetén hasonló hatást szeretnénk elérni azzal, hogy különböző anyagú szálakat keverünk hozzá. Acélszálak alkalmazását betonban Romualdi és Batson (1963) valamint Romualdi és Mandel (1964) kísérletei alapozták meg a 60-as évek elején. Beigazolódott, hogy a szálak javítják a beton mechanikai jellemzőit és esetenként akár lehetővé teszik a hagyományos vasalás részleges helyettesítését. A normál betonokhoz képest a szálerősítéses betonok számos előnyös tulajdonsággal rendelkeznek:

- friss állapotukban állékonyabbak, zsugorodási repedésérzékenységük kisebb,
- gőzölés nélkül is korán kizsaluzhatók
- hajlító-húzószilárdságuk, ütőszilárdságuk, dinamikai ellenállásuk, kopásállóságuk nagyobb,
- vízzáróságuk, korrózió állóságuk jobb, a hálósan vasalt betonnál könnyebben kivitelezhetők,
- a szálerősítésű lőtt betonok visszahullása az átlagosnál kisebb.
- nő a beton berepedés utáni szilárdsága
- nő a beton törési összenyomódása
- nő a beton szívóssága ( $\sigma$ - $\varepsilon$  ábra alatti terület)
- szálak jobban szétosztják a repedéseket, csökken a repedéstágasság

E kedvező tulajdonságok teszik a szálerősítésű betont alkalmassá arra, hogy belőle vékonyfalú és egyéb monolit vagy előre gyártott szerkezetek és elemek készüljenek. A szálerősítésű betonok felhasználási területei:

- repülőtéri, út- és térburkolati pályabetonok,

- ipari padlóburkolatok,
- lőtt betonok,
- alagút elemek,
- csatorna elemek,
- trezor építmények,
- ipari olajfelfogó tálcák,
- dinamikusan igénybe vett szerkezetek,
- előre gyártott betonelemek.

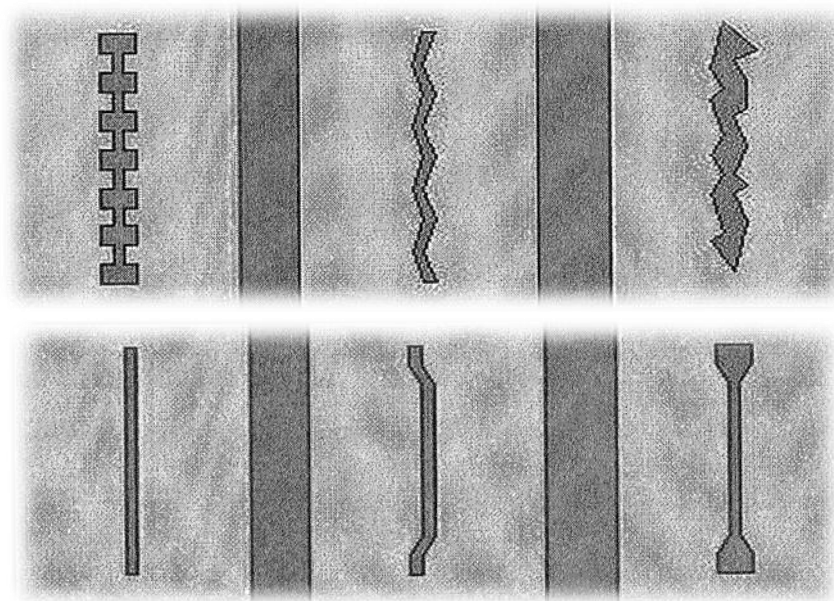
Azt, hogy ezen biztosan jó tulajdonságaikat a teljes élettartamuk alatt képesek-e kifejteni, nem tudjuk, hiszen alig ötven éve kezdtek el vele komolyan foglalkozni. Egy épületet kb. 100 évre tervezünk, míg egy vízépitési műtárgyat, esetleg egy hidat még többre. A különféle szálak alkalmazása a vasbetonépítésben világviszonylatban és hazánkban is dinamikusan fejlődött az elmúlt évtizedben annak ellenére, hogy az ismeretek még hiányosak.[1]

## 1.1 Fogalmak

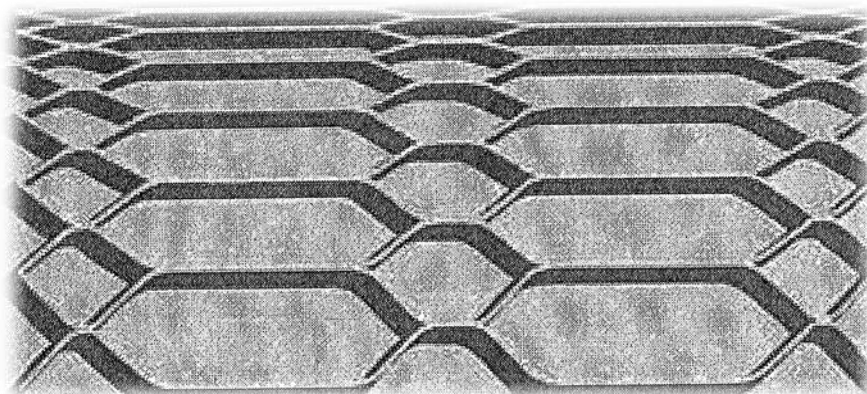
„A szálerősítésű *betonok* angol nyelvű rövidítése FRC (fiber reinforced concrete). A szál anyagát ezen szavak előtt betűvel tüntetjük fel és így kapjuk az acél erősítésű betonok estén az SFRC (S=steal), a polipropilénszál erősítésű betonok estén PPFRC, az üvegszál erősítésű betonnál GFRC (G=glass) illetve a szénszál erősítésű betonnál CFRC (C=carbon) megnevezését. A szálak befogadó anyagát *ágyazó anyagnak* nevezzük (angolul: matrix). Az ágyazó anyag esetünkben a beton (ill. esztrich vagy habarcs). A *száltartalom* adja meg a szálak térfogatát a szálerősítésű beton egységnyi térfogatára vonatkoztatva. Az egységnyi térfogathoz a szálak tömege könnyedén átszámítható, így például 1 térfogatszázalék acélszál  $78,5 \text{ kg/m}^3$ -nek felel meg. A szálak átmérőjét D-vel, a hosszukat L-lel jelöljük. A *szálhossznak* (L) határt szab egyrészt a keverhetőség, részben a szál kihasználhatósága. A túl rövid szálak kihúzódhatnak, túl hosszú szálak jelentős része nincs kihasználva. A szálak mentén ébredő kapcsolati feszültség fordítottan arányos a szálhosszal. A *kritikus hossz* adja meg azt a szálhosszat, mely épp elegendő a szál folyási határának az eléréséhez. Ennél rövidebb szálak kihúzódása várható, ennél hosszabb szálak szakadása. A szálak egyik fő geometriai jellemzője a *szálkarcsúság*  $L/D$  (angolul: aspect ratio), mely a szálhossz és szálátmérő aránya. Acélszálak karcsúsága jellemzően az 50-100 tartományba esik. A műanyag szálak szálkarcsúsága kis átmérőjük miatt ettől nagyságrendekkel eltérő.”(Balázs L. György [1999] 3.old.)

## 1.2 Száltípusok

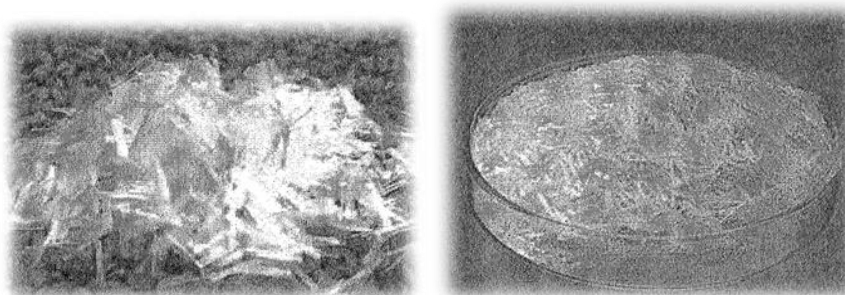
A száltípusok kínálata az elmúlt időszakban jelentősen kiszélesedett. A kezdeti próbálkozásoknál felhasznált sima felületű, egyenes acélszálak után megjelentek a különböző geometriai kialakítású acélszálak pl. kampós végű, hullámos, gombostű fejű stb, ezekre láthatunk példát az 1. ábrán. Az anyagok terén is szélesedett a paletta. Megjelentek a műanyag-, az aramid és a szénszálak is. Az alak változásának egyik célja a minél jobb lehorgonyzó képesség biztosítása. A 2. ábrán műanyag szálra, a 3. ábrán üvegszálra láthatunk példát.



1. ábra különböző alakú acél szálak



2. ábra műanyag szál



3. ábra különböző üvegszálak

A szálak anyaga, geometria, és mechanikai jellemzői nagyon eltérőek, így a velük készített szálerősítéses betonok tulajdonságai is eltérőek lesznek. Ebből következően a szálak anyagának megválasztását az befolyásolja, hogy a beton mely jellemzőit kívánjuk javítani.

Ha a szálakat nem megfelelően dolgozzák be, akkor a szálak a beton tulajdonságait akár kedvezőtlenül is befolyásolhatják (pl. megnőhet a betonban a porozitás (légzárványok alakulhatnak ki), csökkenhet a szilárdság, illetve nem alakul ki megfelelő tapadás). A keverésre és a bedolgozásra ezért nagy figyelmet kell fordítani.

Mivel a szálakat betonba keverjük, így követelmény a szállal szemben, hogy

- kémiaiilag stabil legyen cementes közegben
- a betonban egyenletesen oszolják el
- jól tapadjon
- az építési helyeken jól bedolgozható legyen
- szivattyúzható és lövelhető legyen
- a felület jól simítható legyen
- ne kerüljön túl sok szál a felületre, a felszínre került szálak rozsdája ne vezetődjek a beton belsejébe, illetve ne alakulhasson ki akkora rozsdanyomás, ami a beton felületéhez közel eső rétegekben repedést idézhet elő
- a beton egyéb tulajdonságait ne rontsa

Az acél szálak ezeket a követelményeket csak részben elégítik ki. Gyengén teljesítik a bekeverhetőségi követelményt, mert sok esetben csomósodás következik be, a szivattyúzást is megnehezíti, igazán pontos számítható méretezésre is csak jelenleg fejlesztik az eljárásokat.

Az 1. táblázat a szálak geometriai és mechanikai tulajdonságait tartalmazza.

**1. táblázat: a különböző anyagú és mechanikai tulajdonságai**

| Száltípus         | Ø<br>átmérő<br>mm | l<br>hossz<br>mm | γ<br>térf.<br>súly<br>kN/m <sup>3</sup> | E<br>Rugmod.<br>N/mm <sup>2</sup> | ν<br>Poisson<br>tényező | f <sub>t</sub><br>húzószil.<br>N/mm <sup>2</sup> | szakadó<br>nyúlás<br>% |
|-------------------|-------------------|------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------|------------------------|
| acél              | 100-<br>600       | 10-60            | 78,5                                    | 200000                            | 0,28                    | 700-<br>2000                                     | 3,5                    |
| polipro-<br>pilén | 100-<br>2000      | 5-75             | 9,0                                     | <5000                             | 0,29-<br>0,46           | 400                                              | 8-18                   |
| nylon             | >4                | 5-50             | 11,4                                    | <4000                             | 0,40                    | 750-900                                          | 13,5                   |
| E-üveg            | 8-10              | 10-50            | 25,4                                    | 72000                             | 0,25                    | 3500                                             | 4,8                    |
| AR-üveg           | 8-10              | 10-50            | 27,4                                    | 78000                             | -                       | 25000                                            | 2,5                    |
| aramid            | 10-12             | 10-20            | 14,4                                    | 50000-<br>150000                  | -                       | 3500                                             |                        |
| szén              | 8-10              | 10-20            | 18,0                                    | 150000-<br>300000                 | 0,35                    | 1800-<br>3500                                    | 0,8-1,6                |
| azbeszt           | 0,1-30            | 5-40             | 25,5                                    | 164000                            | 0,3                     | 200-<br>1800                                     | 2,3                    |

forrás[Balázs L. György, [1999] 6.old)]

Az *acélszálak* alkalmazása azzal a nagy előnnyel jár, hogy tulajdonságai hasonlóak a vasbeton betonacéljához. Legjobb tulajdonsága, hogy nagy a rugalmassági modulusa ( $\approx 210000 \text{ N/mm}^2$ ) és ezért a betonban a törésig megtartja erősítő szerepét. A hőtágulási együtthatójának nagyságrendje is azonos a betonszövetével. További előnye, hogy a szennyeződésmentes betonszövetben stabilis, passzív állapotú.

Hátránya, hogy az elkarbonátosodott, s így 9 pH értéknél alacsonyabb lúgosság, illetve főleg kloridion szennyeződés esetén magasabb pH érték esetén is rozsdásodik. Korróziója azonban még így is kisebb hibát okoz, mint a vasbeton szerkezetek nagyságrendekkel nagyobb átmérőjű betonacéljai, ugyanis a kis átmérő, illetve a keresztmetszet miatt csak egészen a felület közelében jöhet létre

betonszövet repedés, amely makroszkopikusan nem veszélyezteti a beton elemet. Ilyen okok miatt a szennyező ionok behatolása sem könnyebbedik meg a betonszövet belsejébe. Ez a tulajdonság jól szabályozható az acélszálak méret és alak kialakításával. Ebből a szempontból a lehető legkisebb szálátmérő a kedvezőbb, de a vékony acélszál bekeverése a betonba nagy nehézségekbe ütközik. A szálak összegömbösödnek keverés közben és az így kialakult szálcsomók belsejébe a beton nem tud bejutni. Ezen jelenség valamint a szálak gyárthatósága adja a szálak méretének határát. Természetesen a nagyobb szálvastagság a gazdaságosságot rontja, mivel az acél ára jelentősen nagyobb a beton alkotókéhoz képest. Általában  $60-70 \text{ kg/m}^3$  acélszálnál többet a betonba keverni gazdaságossági okok miatt gyakorlati alkalmazások esetén nem szokták. A másik behatároló tényező a vastagság tekintetében a kritikus rozsdanyomás kialakulása. Ezt általában  $3 \text{ mm}^2$  feletti keresztmetszeti terület esetében figyelték meg. Ugyancsak behatárolja az acélszál fajlagos felületének nagyságát a bekevert levegő mennyisége. Ez különösen hullámos-lemezes, illetve lemezes-perforált kiképzésű szálak esetén jelentős. Ilyen esetekben a légtartalom akár egy nagyságrendet is nőhet, ami nagyon jelentős szilárdság csökkenéshez vezethet, ez kerülendő.

A fenti okok miatt az acélszálak mérete erősen behatárolt. Az acélszálak jelentős adagolásával a beton test „filcelődése” erőteljesen nem növelhető, mert a szálak merevek. Ahhoz, hogy a bekevert szálak „összefilcelődjenek” s ezáltal egy magasabb rendű kohéziót okozzanak a betontestben a következők szükségesek:

- a szálak hosszának és keresztmetszeti területének aránya legyen nagyobb 100:1 (acélszálnál ez 50:1 alatt van)
- a szálak olyan mértékű flexibilitására, hogy egymásra tekeredjenek.

Az acél szálak hatása így is kedvezőbb, mint a vasbeton armatúráé, mert az erősítés egyenletes és háromdimenziójú.

Az acélszálak tapadása a betonszövetben az első időben nem tökéletes a felületi állapot, a nagy levegőbevitel és merevsége miatt. Ez csak akkor válik megfelelővé, ha a felületen kialakul a passzív réteg, a cementhidrátok kristályai „ránőnek” a felületre. A tapadást az acélszálak alakjával lehet javítani. A szálak

alakjának megválasztása a szálak tapadását és lehorgonyzó-képességét hivatott segíteni. Az acélszálak lehetnek egyenesek, hullámos, kampós végű, gombosfejtű végű, kampós-lapos végű rovátkolt vagy bordázott felületű szálak. A műanyag szálak simák, hullámosak vagy egymással hálószerűen összekapcsoltak lehetnek. A szénszálak sima felületűek és egyenesek.

| Megnevezés                     | Alaki jellemző                                                                      | Megjegyzés                                                                       |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| huzal                          |    | tapadása rossz, már nem használják                                               |
| gömbös huzal                   |    | ömlesztett gombokban végződnek                                                   |
| "iratkapocs" huzal és lemezsál |    | laza és sorbarendezett vízzeloldható ragasztóval rögzített állapotban is kapható |
| hullámos huzal és lemezsál     |    | összezsomósodásra hajlamos                                                       |
| golyónyomott lemezsál          |    | összezsomósodásra hajlamos                                                       |
| forgácsolt lemez               |  | jó tapadású                                                                      |
| öntött szál                    |  | jó tapadás, de merev                                                             |

4. ábra Az acélszálak alaki megjelenései forrás(Balázs L. György [1999] 54.old)

A szálak hosszmérete általában 10-60 mm közötti

A szál átmérő általában 0,5-2 mm között változik

A lemezek szélessége általában 1-3 mm

vastagsága 0,2-0,8 mm

A szálak szilárdsága általában a kereskedelmi forgalomban kapható acéltípusok értékeinek felel meg ( $950 \text{ N/mm}^2$ - $1100 \text{ N/mm}^2$ )

### 1.3 A szálerősítéses beton keverése

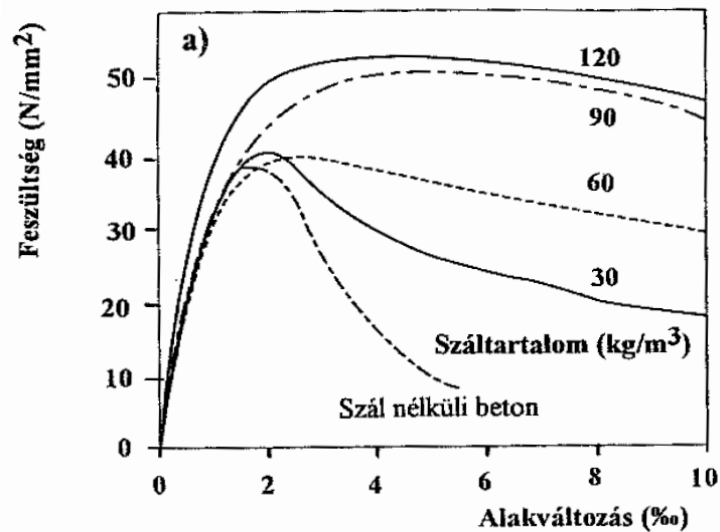
„A szálerősítéses beton keverése sokáig komoly nehézséget jelentett. Keverés közben a legfontosabb cél az, hogy elkerüljük a szálak egymásba kapaszkodását, mert az így kialakuló labdaszerű képződmény nem esik szét, hanem tovább növekszik. Ennek elkerülésére különböző technikák alakultak ki.

Egyik lehetséges út, hogy a szálakat keverés előtt szétválasztjuk és folyamatosan adagoljuk (ez egy nagyon hosszadalmas eljárás). A másik lehetőség éppen az előbbinek a fordítottja. A szálakat vízdékony ragasztóval összeragasztják és ezeket a lapokat a keverőbe dobják. Ezt követően azok csak a nedves keverékben válnak szét fokozatosan. Kaphatók mind acélszálból, mind műanyag szálból olyan kiszerelések is, melyeket elegendő zacskóstól az építés helyszínén a keverőbe dobni és néhány percre tovább keverni. A keverhetőséget a szilikapor alkalmazása is javítja. A nagyobb finomrész tartalmú keverékbe a szálak könnyebben és nagyobb mennyiségben keverhetők bele.” (Balázs, [1999] 9.old.)

Keveréskor figyelembe kell vennünk, hogy a szálak mind a bedolgozhatóságot, mind a beton pórustartalmát befolyásolják. A száltartalom és a szállhossz növelésével a bedolgozhatóság romlik. Ennek kiküszöbölésére (valamint a kis víz-cement tényező miatt) folyósító adalékszereket alkalmazunk (képlékenyítőszer). Bedolgozás közben a betont vagy a zsaluzatot megfelelő frekvencián vibrálni kell. A műanyag szálak egyik kiváló tulajdonsága, hogy csökkentik a friss betonkeverék repedésérzékenységét a betonozást követő 1-2 órában. Ezért ezeket a szálakat jellemzően olyan elemeknél alkalmazzák, ahol ez komoly előnyt jelent.[1]

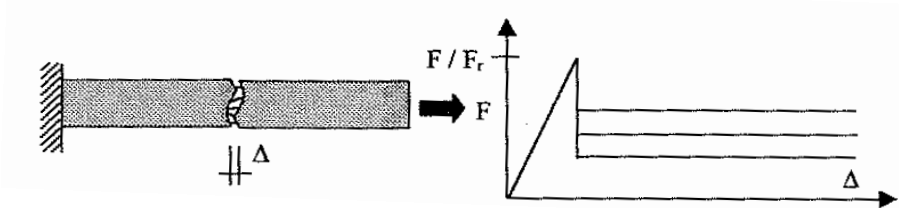
#### **1.4 A szálerősítéses beton viselkedése**

- a) Nyomó-, húzó-, és hajlító-húzószilárdság
- A kísérletek alapján a kis (0,1-2,0 V%) száltartalmú betonoknál sem az acél-, sem a műanyag szál esetén nem várhatunk el jelentős nyomószilárdság növekedést. A szívósság (energiaelnyelő képesség) azonban növekedni fog. A  $\sigma$ - $\varepsilon$  diagramm érintőmodulusa a szálakkal adódhat kisebbre, vagy nagyobbra, mint a szál nélküli betonban, a beton porozitásától függően.



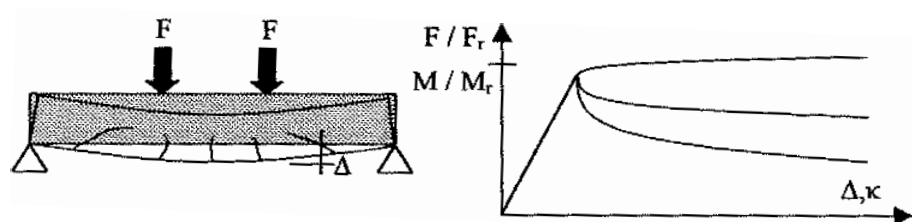
5. ábra szálnélküli és szálerősítés beton nyomási viselkedése kampós végű acélszálak alkalmazása esetén,  $\sigma$ - $\varepsilon$  diagramm forrás (Balázs, [1999] 13.old)

A húzószilárdság tiszta húzás esetén az első repedések megjelenésekor nem esik le zérusra. A maradó szilárdság a szál típusának és a száltartalomnak a függvénye.



6. ábra. Szálerősítésű betonelemek erő-elmozdulás ábrái acélszál alkalmazása esetén forrás (Balázs, [1999] 2.old. 1.ábra)

A hajlító-húzószilárdság növekedését  $90 \text{ kg/m}^3$  ( $\sim 1,5 \text{ V\%}$ ) acéltartalomig elhanyagoljuk a tervezés során. A kísérletekben az energiaelnyelő képesség növekedése a  $0\text{-}30 \text{ kg/m}^3$  száladagolás tartományban adódik a relatíve legnagyobbra.  $30$  és  $60 \text{ kg/m}^3$  száladagoláskor a berepedést követően az erő visszaesik, majd stabilizálódik, vagy enyhén növekedik.  $90$  és  $120 \text{ kg/m}^3$  adagoláskor visszaesés már nem tapasztalható. Vagyis a repesztő teher utáni többletteherbírás a száltartalom függvénye.



7. ábra Szálerősítésű betonelemek erő-elmozdulás ábrái acélszál alkalmazása esetén

Forrás (Balázs, [1999] 2.old. 1.ábra)

#### b) Tartósság:

A tartósság szempontjából a legnagyobb jelentősége az acélszálak korróziójának, illetve a műanyag szálak alkáli ellenálló képességének van. Az acélszálak korróziója a felületi, karbonátosodott rétegre korlátozódik. Kísérleti eredmények szerint a klorid ionok behatolása nem befolyásolja a szálak korrózióját. A polipropilén-, a nylon- és a szénszálak hosszú távon tartósnak tekinthetők.

#### c) Tűzállóság

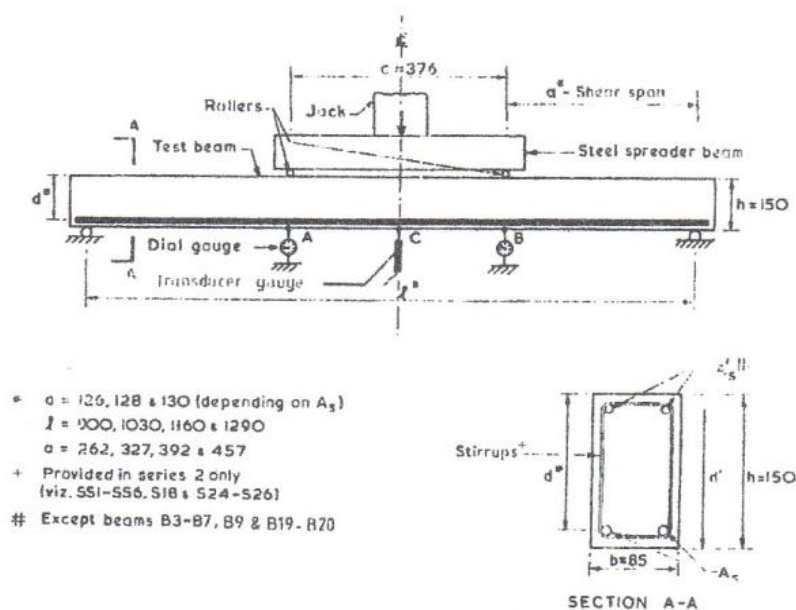
Műanyag szálak használata a tűzállóság szempontjából kedvező. Hő hatására ugyanis kiolvadnak a betonból, teret adva a betonban lévő víz eltávozására. Ezáltal kisebb lesz a belső feszítő hatása a betonban.

## 2. A NYÍRÁSI TEHERBÍRÁS

A szálerősítésű betonok felhasználásának egyik ígéretes területe az acélszálak nyírási teherbírás növelő hatásának kihasználásában rejlik. Ezen szálak alkalmazásának eredményeképpen elérhetjük, hogy a szükséges „hagyományos” nyírási vasalás (kengyelek) mennyiségét minimálisra csökkentsük vagy akár egyes esetekben száz százalékosan helyettesítsük őket. Ezzel rövidíthetjük az építési időt, egyszerűsíthetjük a munkafázisokat (kevesebb vasszerelés) és gazdasági előnyt is formálhatunk belőle. Mind ezeknek az alapfeltétele, hogy legyen egy szabványosított, a tervezők által könnyen használható, az eddigi méretezési eljárásokhoz jól illeszkedő számítási módszert, mellyel számítani tudjuk egy szálerősítéses vasbeton elem nyírási teher bírását. Ez napjainkban még nem áll rendelkezésre.

## 2.1 Nyírási teherbírás-kísérletek

Számos kísérletet végeztek el az elmúlt 70 évben arra vonatkozóan, hogy a szálerősítéses vasbeton gerendák nyírási teherbírását vizsgálják. Többek között ilyen kísérleteket végzett Narayanan és Darwish[2], D. H. Lim és B. H. Oh[3] valamint Kwat et al. Narayanan[4] és Darwish kísérleteik [2] során 49 db kéttámaszú, derékszögű négyszög keresztmetszetű, négypontos terheléssel terhelt vasbeton gerendát vizsgált azzal a céllal, hogy tanulmányozzák a szálak hatását az elem nyírási teherbírására különböző betonszilárdság esetén, a kengyelek szálakkal történő helyettesítésének lehetőségét valamint, hogy meghatározzák a szálerősítésű gerendák nyírási teherbírását.



8. ábra Narayanan és Darwish kísérleti gerendák forrás (R. Narayanan-I.Y.S Darwish [1987])

A kísérlet változó paramétereit a következők voltak: nyírt szakasz és hatékony magasság aránya ( $a/d$ ), kengyelek és hosszvasak mennyisége ( $\rho_{str}$ ,  $\rho_s$ ), beton mennyiség ( $f_{cu}$ ), acélszálak mennyisége ( $\rho_f$ ) és a száلكarcsúság ( $L/D$ =száلكhossz/átmérő). A vizsgálathoz 0,3 mm átmérőjű hullámos acélszálakat alkalmaztak, a száلكarcsúság 100 illetve 133 volt. A kísérletek során azt tapasztalták, hogy mindegyik gerenda  $\sigma$ - $\epsilon$  diagrammja lineáris volt az első ferde repedés megjelenéséig. A repedés a vízszintessel közel  $45^\circ$ -os szöget zár be. A nyírási vasalás nélküli gerendák ezután nem sokkal tönkre mentek. A kengyeleket vagy szálakat tartalmazó gerendák azonban az első repedés után még nagy nyírófeszültség felvételére voltak képesek. A szálerősítésű illetve a „hagyományos” nyírási vasalást

tartalmazó gerendáknál megfigyelhető nyírási repedések nem különböztek jelentősen egymástól, attól eltekintve, hogy az acélszálak esetén a repedések egymástól való távolsága kisebb volt az egyenletes feszültségelrendeződés miatt, azaz a szálak jobban szétosztották a repedéseket. A kengyelezésekkel készült gerendák esetén a tönkremenetelkor tapasztalható beton lemorzsolását a szálak megakadályozták. A kengyelezéssel készített gerendák és az azonos jellemzőjű, kengyelek helyett acélszálakat tartalmazó gerendák eredményei közel azonosak voltak, csak kismértékű növekedés tapasztalható a duktilitásban és a törő-nyírószilárdságban acélszálak esetén. A kutatók azt a megállapítást tették, hogy a szálak alkalmasak arra, hogy nyírási vasalásként helyettesítsék a hagyományos kengyeleket.

Narayanan és Darwis saját, és más kutatók által végzett kísérleti eredményeket tanulmányozva a következő összefüggést írták fel szélerősítéses vasbeton gerendák törőszilárdságának becslésére:

$$v_u = e * \left[ 0,24 * f_{fcst} + 80 * \rho_s * \frac{d}{a} \right] + v_b, \text{ ahol}$$

$f_{fcst}$ : a szálerősítéses beton (számított) hasító-húzószilárdsága

$$f_{fcst} = \frac{f_{cf}}{20 - \sqrt{F}} + 0,7 * F + \sqrt{F}$$

F száltényező,  $F = d_f * \frac{L_f}{D_f} * \rho_f$

$$e = \begin{cases} 1,0 & \text{ha } \frac{a}{d} \geq 2,8 \\ 2,8 * \frac{d}{a} & \text{ha } \frac{a}{d} \leq 2,8 \end{cases}$$

$\rho_s$ : húzott hosszvasak mennyisége

$v_b$ : szálak által felvehető nyírószilárdság

$$v_b = 0,41 * \tau * F = 0,41 * \tau_f * d_f * \frac{L}{D} * \rho_s$$

$\tau_f$ : átlagos tapadószilárdság, a kutatók 4,15 N/mm<sup>2</sup>-el számoltak Swamy, Mangat és Rao alapján

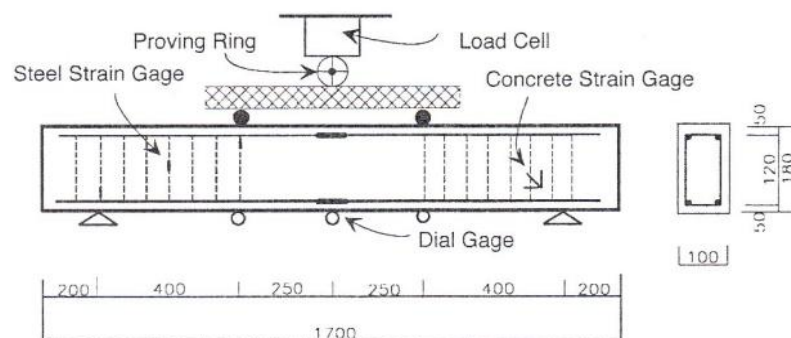
$d_f$ : egyenes szálak esetén 0,5; hullámos szálaknál 0,75

$L$ : a szálak hossza (mm)

$D$ : a szálak átmérője (mm)

$\rho_f$ : szálak mennyisége (V%)

D.H. Lim és B.H. Oh [3] hasonló kísérletet hajtottak végre. Ők kilenc kéttámaszú tartót vizsgáltak a változó paraméterek a szálak valamint a kengyelek mennyisége volt. A 11. ábrán látható a kísérlet elrendezése.



9. ábra D.H. Lim és B.H. Oh kísérleti gerendái

Lim és Oh is dolgozott ki egy formulát a szálerősítéses vasbeton gerendák nyírási teherbírásának kiszámítására:

$$v_u = v_{uc} + v_{uf}$$

$v_{uc}$ : a nyírási vasalás nélküli vagy azt tartalmazó beton nyírási teherbírása

$v_{uf}$ : száلكihúzó erő függőleges komponense (a szálak miatti nyírási teherbírás többlet)

$$v_{uf} = 0,5 * \tau_f * \rho_f * \frac{L_f}{D_f} * b * (h - x_c)$$

$\tau_f$ : átlagos tapadószilárdság

$L_f$ : szálak hossza

$D_f$ : szálak átmérője

$\rho_f$ : szálak mennyisége (V%)

$b$ : keresztmetszet szélessége

$h$ : a keresztmetszet magassága

$x_c$ : a nyomott betonzóna magassága

## 2.2 Tapadószilárdság és szál-kihúzó kísérletek

Az irodalomban fellelhető, a nyírási teherbírás számítására javasolt összefüggéséből látható, hogy a szálak és az őket körülvevő beton (mátrix) közti  $\tau_f$  tapadószilárdság fontos szerepet játszik a nyírási teherbírás megállapításában. Az eddig említett kutatók nem adnak egyértelmű választ arra, hogy ezen jellemzőt hogyan határozzuk meg, legtöbbször Swamy, Mangot és Tao alapján az értéket  $4,15 \text{ N/mm}^2$ -re veszik fel.

A szálak és a mátrix közötti kapcsolat vizsgálatára a szálkihúzó kísérletet használjuk. Ezen vizsgálat alapján általában cement alapú mátrixba ágyaznak szálakat, melyek különböző alakúak és változó beágyazási hosszal rendelkeznek. A szálkihúzás során az erő-elmozdulás értékét mérjük.

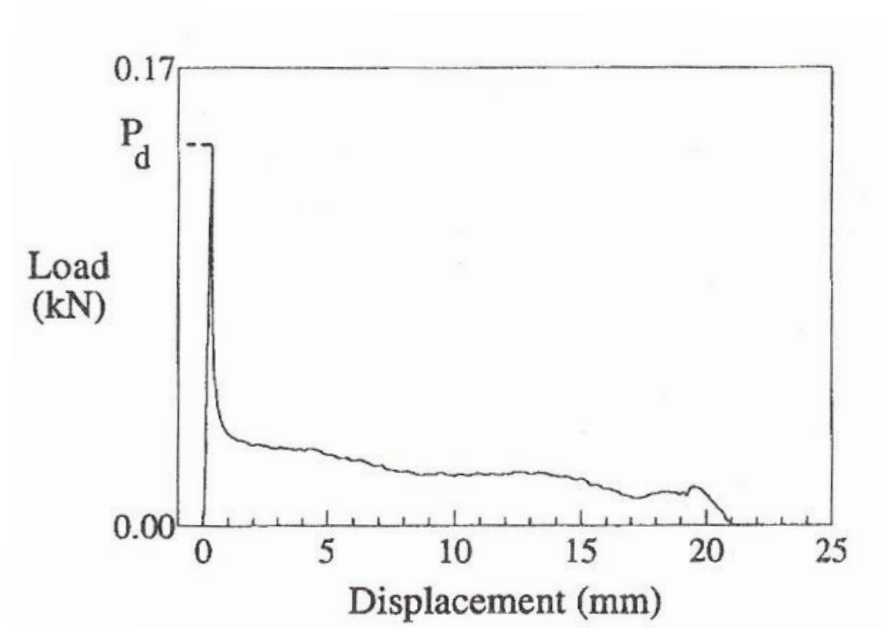
## 2.3 Acél szálakkal végzett szálkihúzó vizsgálat

### a) Egyenes szálak

Cement alapú anyagba ágyazott egyenes egyedi acélszálak esetén a szálkihúzóerőt két fő tényező befolyásolja, a szál és a mátrix közötti tapadás illetve ezen tapadás megszűnése után a súrlódás a szál és a mátrixban lévő lyuk oldalfala között.

A 10. ábrán egy egyenes acélszál, szálkihúzó-kísérletét során mért jellegzetes erő-elmozdulás diagramja látható. A diagramból is láthatjuk hogy az egyenes szál kihúzóerője a következőképpen alakul, ( a kihúzóerő folyamata a következő három szakaszra bontható):

- (1) lineáris (rugalmas) szakasz, melyet a tapadás megszűnése követ
- (2) súrlódás a lyuk és a szál felülete között
- (3) a szál kihúzóerője a mátrixból



10. ábra egyenes szál jellegzetes erő-elmozdulás diagrammja

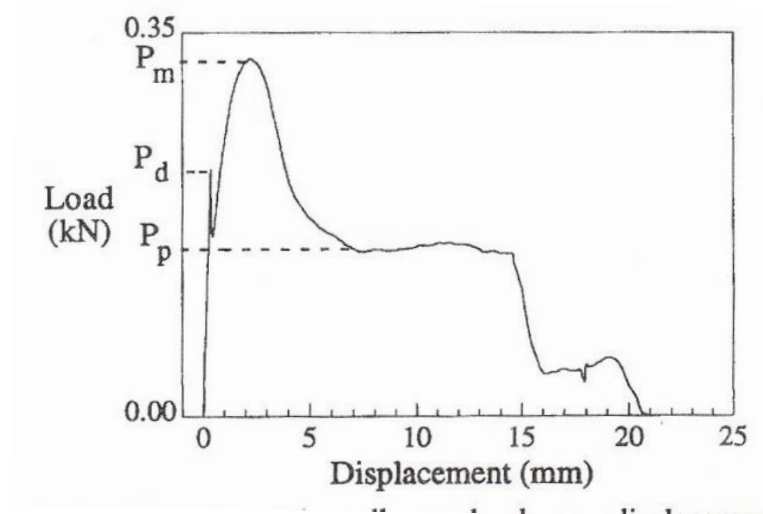
b) kampós végű szálak.

Kampós végű szálak esetén a kihúzódnak folyamata összetettebb. Az erő-elmozdulás görbét Pompo et al.[5] négy részre osztotta. Az első szakasz a szál és a mátrix közti tapadás megszűnéséig tart (eddig megegyezik az egyenes szálakkal). Ezt követően a szál megcsúszik. Ekkor a fő energia elnyelő mechanizmus a kampós vég képlékeny deformációja, miközben megpróbál kiegyenesedni, valamint a súrlódás az acélszál és a porózus felület között. Miután a szál képlékeny deformációja lejátszódott (a kampós vég kiegyenesedett) már csak a súrlódás maradt, mint egyetlen energia-emésztő folyamat, ami a nem tökéletesen egyenes szál és a lyuk felülete között alakul ki. Végül pedig az utolsó szakaszt az erő hirtelen nullára csökkenése jellemzi, amint a szál kihúzódik a mátrixból.

A 11.ábrán egy kampós végű acélszál jellemző erő-elmozdulás görbéje látható, ez alapján a kampósvégű acélszál kihúzódnak folyamat a következő négy szakaszokra bontható:

- (1) lineáris (rugalmas) szakasz melyet a tapadás megszűnése követ
- (2) a szál megcsúszása és a kampó kiegyenesedésének a folyamata
- (3) súrlódás a szál és a lyuk felülete között.

(4) a szál teljes kihúzódása a mátrixból.



11. ábra kampós végű szál jellegzetes erő-elmozdulás diagramja (

c) hullámos acélszálak

Hullámos acélszálakkal Chanvillard és Aitcin [7] kutatók kísérleteztek. 100\*200mm-es próba testekbe ágyaztak be szálakat és figyelték viselkedésüket. A különböző acélszálakat más-más beágyazással alkalmazták, valamint a víz-cement tényező is változó volt. A szálak a repedésekkel 90° és 45°-os szöget zártak be. A kutatók megvizsgálták a beágyazási hossz, a szálirány és a mátrix szilárdságának hatását a hullámos acélszálak kihúzódására. A kísérletek során két fő tönkremenetelt figyeltek meg:

- a szálak miután megszűnt a tapadás, súrlódva csúsztak ki a mátrixból, míg teljesen ki nem húzódtak (kihúzóási tönkremenetel) vagy,
- a tapadás megszűnését megelőzően elszakadtak (húzási tönkremenetel)

Azt, hogy melyik tönkremeneteli mód következik be döntően a beágyazási hossz befolyásolta. Rövidebb, egy-két hullámnyi beágyazás esetén a szálak szinte minden esetben kihúzóási tönkremenetelt szenvedtek függetlenül a beton minőségétől és a száliránytól. Hosszabb, három hullámnyi, beágyazás esetén azok a szálak amelyek merőlegesek voltak repedési felületre elszakadtak, 45°-os szög és

gyengébb beton mellett a többségük kihúzódott, míg erősebb mátrix esetén csak kb. 50%-uk húzódik ki. A kihúzódási tönkre menetel kétféle módon játszódott le:

- a szál megtartotta eredeti alakját és az azt körülvevő beton roncsolódott a kihúzódási folyamat során vagy,
- a beton nem roncsolódott, a szál viszont folyamatosan roncsolódott és a folyamat végén szinte teljesen elvesztette hullámos alakját.

A kutatók a száلكiegyenesedés tönkremeneteli folyamatát a következőképpen részletezték: kezdetben a szál még rugalmasan viselkedik, a szál és a mátrix alakváltozása megegyezik. A teher növelésével elsőként a repedés mindkét oldalán egy kis beton morzsolódik le. Ekkor még nem szűnik meg a tapadás a szál és a beton között, a szál csupán néhány mm hosszon „szabaddá” válik. Az erő további növelésével ez a szakasz kiegyenesedik. Ezzel egy időben a szál egész hossza mentén elveszti a tapadását, de amíg a lehorgonyzott rész meg nem mozdul, addig csupán néhány tizedmilliméteres elmozdulás tapasztalható a repedési felületek között. Végül a szál teljes tapadását elveszti és kicsúszik a mátrixból, miközben folyamatosan deformálódik, ahogy áthúzódik az eredeti alaknak megfelelő formájú alagútban. Ezen folyamatot, mely jelentős energia elnyelődés következik be a szál deformálódása miatt, a kutatók „mechanical anchorage” ≈ „mechanikai lehorgonyzás”-nak nevezték. Megjegyezték, hogy a maximális száلكihúzó erő nem minden esetben akkor keletkezik, amikor a szál és a mátrix között megszűnik a tapadás, hanem amikor a szál elkezd csúszni. Ekkor a mechanikai lehorgonyzás mellé súrlódási erő is társul, ami a szál és a mátrix között ébred.

Chanvillard és Aitein a következőket állapították meg a vizsgálatok eredményeinek statisztikai elemzésével:

- minnél alacsonyabb  $v/c$  tényező (minél nagyobb a beton szilárdsága) annál nagyobb a tönkremenetelt okozó erő, azonban

- a szál és a mátrix közötti viselkedést döntően a beágyazási hossz és a szálak irányai határozza meg, a v/c tényező ebben kis szerepet játszik.

### **3 A KÍSÉRLET**

#### **3.1 A kísérlet bemutatása**

A kísérlet során különböző alakú acélszalakat ágyasztunk be különböző hosszban falazóhabarcsból készült próbatestekbe. Összesen 41 db próbatest készült. A 2. táblázatban látható összefoglalva a próbatestek jellemzői.

A próbatesteket a következő jelölésekkel láttuk el: K-50/1,0-20-1, ahol a:

- K- a szál alakja (kampós végű)
- 50- a szál hossza [mm]
- 1,0- szál átmérő [mm]
- 20-beágyazási hossz [mm]
- 1-próbatest sorszáma

A sorszámra azért volt szükség, mert minden egyes azonos jellemzőjű próbatestből három készült, hiszen egy mérés nem mérés, legalább három érték kell a hiteles méréshez. A kihúzendó szálak különböző geometriai alakúak voltak. Alkalmaztunk hullámos (H), kampósvégű (K), gombostűfejű (GF), lapos végű (L), kampós lapos végű (KL) szálakat. A szálak hossza és átmérője változó volt. A felhasznált szálak adatait a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: A felhasznált szálak adatai

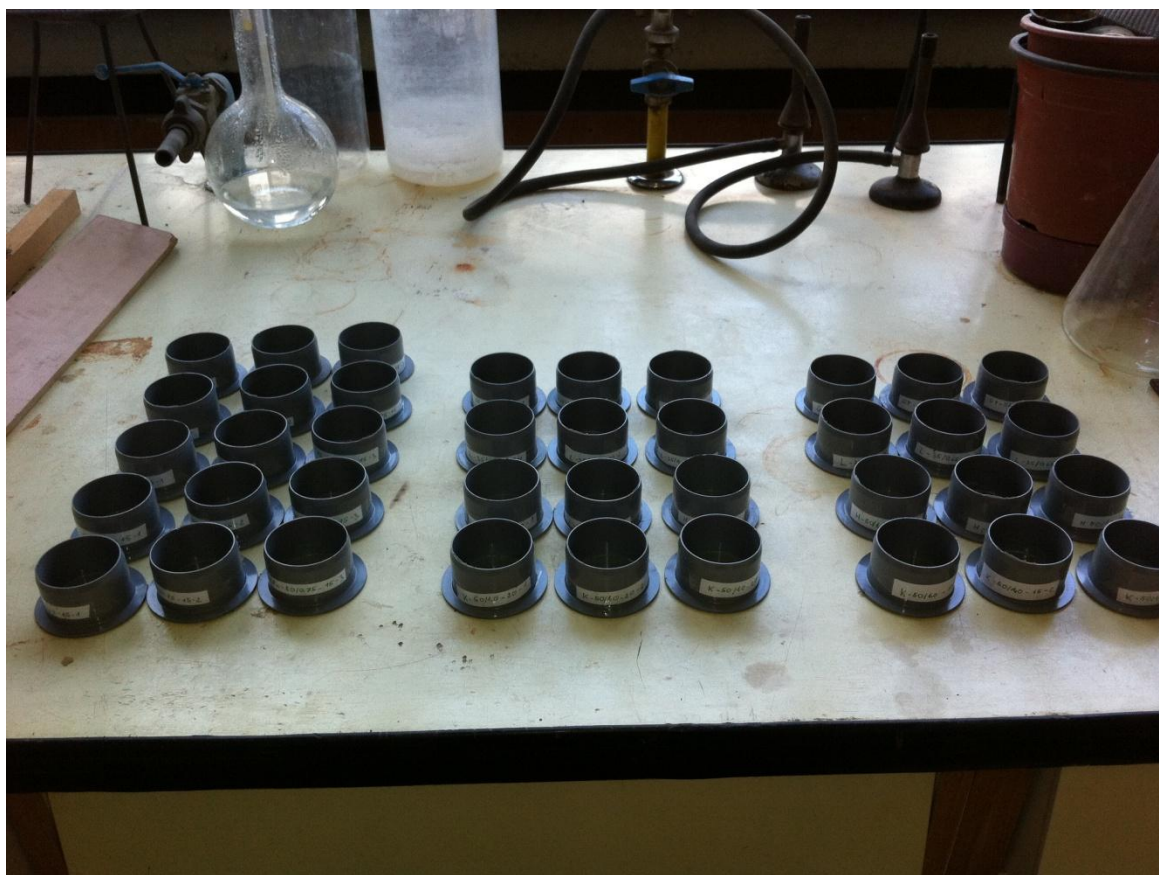
| geometriai kialakítás | próbatest jele   | hossz L (mm) | szál átmérő D(mm) | L/D   | beágyazási hossz L <sub>b</sub> (mm) |
|-----------------------|------------------|--------------|-------------------|-------|--------------------------------------|
| gombostű fejű         | GF-54/1,0-15-1   | 54           | 1                 | 54,00 | 15                                   |
| gombostű fejű         | GF-54/1,0-15-2   | 54           | 1                 | 54,00 | 15                                   |
| gombostű fejű         | GF-54/1,0-15-3   | 54           | 1                 | 54,00 | 15                                   |
| gombostű fejű         | GF-54/1,0-20-1   | 54           | 1                 | 54,00 | 20                                   |
| gombostű fejű         | GF-54/1,0-20-2   | 54           | 1                 | 54,00 | 20                                   |
| gombostű fejű         | GF-54/1,0-20-3   | 54           | 1                 | 54,00 | 20                                   |
| hullámos              | H+-60/1,0-30-1   | 60           | 1                 | 60,00 | 30                                   |
| hullámos              | H+-60/1,0-30-2   | 60           | 1                 | 60,00 | 30                                   |
| hullámos              | H+-60/1,0-30-3   | 60           | 1                 | 60,00 | 30                                   |
| hullámos              | H-50/1,0-15-1    | 50           | 1                 | 50,00 | 15                                   |
| hullámos              | H-50/1,0-15-2    | 50           | 1                 | 50,00 | 15                                   |
| hullámos              | H-50/1,0-20-1    | 50           | 1                 | 50,00 | 20                                   |
| hullámos              | H-50/1,0-20-2    | 50           | 1                 | 50,00 | 20                                   |
| hullámos              | H-50/1,0-20-3    | 50           | 1                 | 50,00 | 20                                   |
| kampós végű           | K++-50/0,75-15-1 | 50           | 0,75              | 66,67 | 15                                   |
| kampós végű           | K++-50/0,75-15-2 | 50           | 0,75              | 66,67 | 15                                   |
| kampós végű           | K++-50/0,75-15-3 | 50           | 0,75              | 66,67 | 15                                   |
| kampós végű           | K-50/0,75-15-1   | 50           | 0,75              | 66,67 | 15                                   |
| kampós végű           | K-50/0,75-15-2   | 50           | 0,75              | 66,67 | 15                                   |
| kampós végű           | K-50/0,75-15-3   | 50           | 0,75              | 66,67 | 15                                   |
| kampós végű           | K-50/1,0-15-2    | 50           | 1                 | 50,00 | 15                                   |
| kampós végű           | K-50/1,0-15-3    | 50           | 1                 | 50,00 | 15                                   |
| kampós végű           | K-50/1,0-20-1    | 50           | 1                 | 50,00 | 20                                   |
| kampós végű           | K-50/1,0-20-2    | 50           | 1                 | 50,00 | 20                                   |
| kampós végű           | K-50/1,0-20-3    | 50           | 1                 | 50,00 | 20                                   |
| kampós végű           | K-60/0,75-30-1   | 60           | 0,75              | 80,00 | 30                                   |
| kampós végű           | K-60/0,75-30-2   | 60           | 0,75              | 80,00 | 30                                   |
| kampós végű           | K-60/0,75-30-3   | 60           | 0,75              | 80,00 | 30                                   |
| kampós lapos végű     | KL-60/0,9-15-3   | 60           | 0,9               | 66,67 | 15                                   |
| kampós lapos végű     | KL-60/0,9-30-1   | 60           | 0,9               | 66,67 | 30                                   |
| kampós lapos végű     | KL-60/0,9-30-2   | 60           | 0,9               | 66,67 | 30                                   |
| kampós lapos végű     | KL-60/0,9-30-3   | 60           | 0,9               | 66,67 | 30                                   |
| kampós végű cinkkelt  | KZn-50/0,75-15-1 | 50           | 0,75              | 66,67 | 15                                   |
| kampós végű cinkkelt  | KZn-50/0,75-15-2 | 50           | 0,75              | 66,67 | 15                                   |
| kampós végű cinkkelt  | KZn-50/0,75-15-3 | 50           | 0,75              | 66,67 | 15                                   |
| lapos végű            | L-35/0,65-15-1   | 35           | 0,65              | 53,85 | 15                                   |

|            |                |    |      |       |    |
|------------|----------------|----|------|-------|----|
| lapos végű | L-35/0,65-15-2 | 35 | 0,65 | 53,85 | 15 |
| lapos végű | L-35/0,65-15-3 | 35 | 0,65 | 53,85 | 15 |
| lapos végű | L-35/0,65-20-1 | 35 | 0,65 | 53,85 | 20 |
| lapos végű | L-35/0,65-20-2 | 35 | 0,65 | 53,85 | 20 |
| lapos végű | L-35/0,65-20-3 | 35 | 0,65 | 53,85 | 20 |

A próbatestek PVC csővégzáró „zsaluzatban” készültek, melyek átmérője  $D=46$  mm magassága  $H=31$  mm, ezek láthatók a 12. ábrán. A próbatestek készítésének a folyamata a következő volt:

- falazóhabarcs és víz keverése, 13.ábrán látható keverőberendezésben
- habarcs bedolgozása a zsaluzatba, két rétegben, rétegenként tömörítéssel (ejtgetéssel 30-szor)
- szálak elhelyezése a habarcsban
- utókezelés: 7 napig letakarva, magas nedvesség tartalom mellett 21 napig kizsaluzva laborlevegőn

A falazó habarcsot egy keverőgépben kavartuk ki. Összesen három keverést hajtottunk végre. Ebből az első két keverés egy időpontban, egy napon, a harmadik keverés 28nappal később következett. Erre azért volt szükség, mert az első turnusban kevert próbatestekbe a szál nem kötött bele megfelelően, így azok pótlására kellett egy újabb, harmadik keverést készítenünk. A keverő gépre példát a 18. ábrán találhatunk. Minden keverésből készítettünk 3-3 db hasáb alakú próbatestet illetve a második keverés alkalmával csak egy próbahasáb készült. A próba hasábokra azért volt szükség, hogy azokat eltörjük és meghatározhassuk a hajlítószilárdságát. Valamint minden száltípushoz is készítettünk 3-3 db próbatestet, hogy a mérések pontosságát növelni tudjuk. Összesen 41db próbatest született a kísérlethez, amiket használni tudtunk.



12. ábra a „zsalluzatok”



13. ábra a habarcs megkeveréséhez használt keverőgép

Miután a habarcs belekerült a „zsaluzatba” a szálak elhelyezése következett. Erre a feladatra egy hungarocell állványt készítettünk. Az állványra példa a 19. ábra. Az állványok a beágyazási hossz függvényében születtek meg. Ez azt jelenti, hogy a megegyező beágyazási hosszal rendelkező szálak egy hungarocell gerendába kerültek.

A szálak elhelyezése után a próbatesteket szabvány szerint kizsaluzásig fólia alatt tároltuk, magas nedvesség tartalmú helyen, ez hét nap volt. Ezután 28 napos korukig a szabad levegőn helyeztük el a próbatesteket.

A próbatestek elkészülte után következett a vizsgálatok sora. A hasáb alakú próbatestekre hasító-húzó szilárdsági vizsgálat, a hengerekre pedig szálkihúzó vizsgálat várt. A hasábokat 19. ábrán látható géppel törtük el. Mértük a hasábok keresztmetszeti méreteit és a törőerő értékét leolvastuk a törőgép mérőskálájáról. A mérések adatait a 3. táblázat mutatja.

**3. táblázat A mérések adatai**

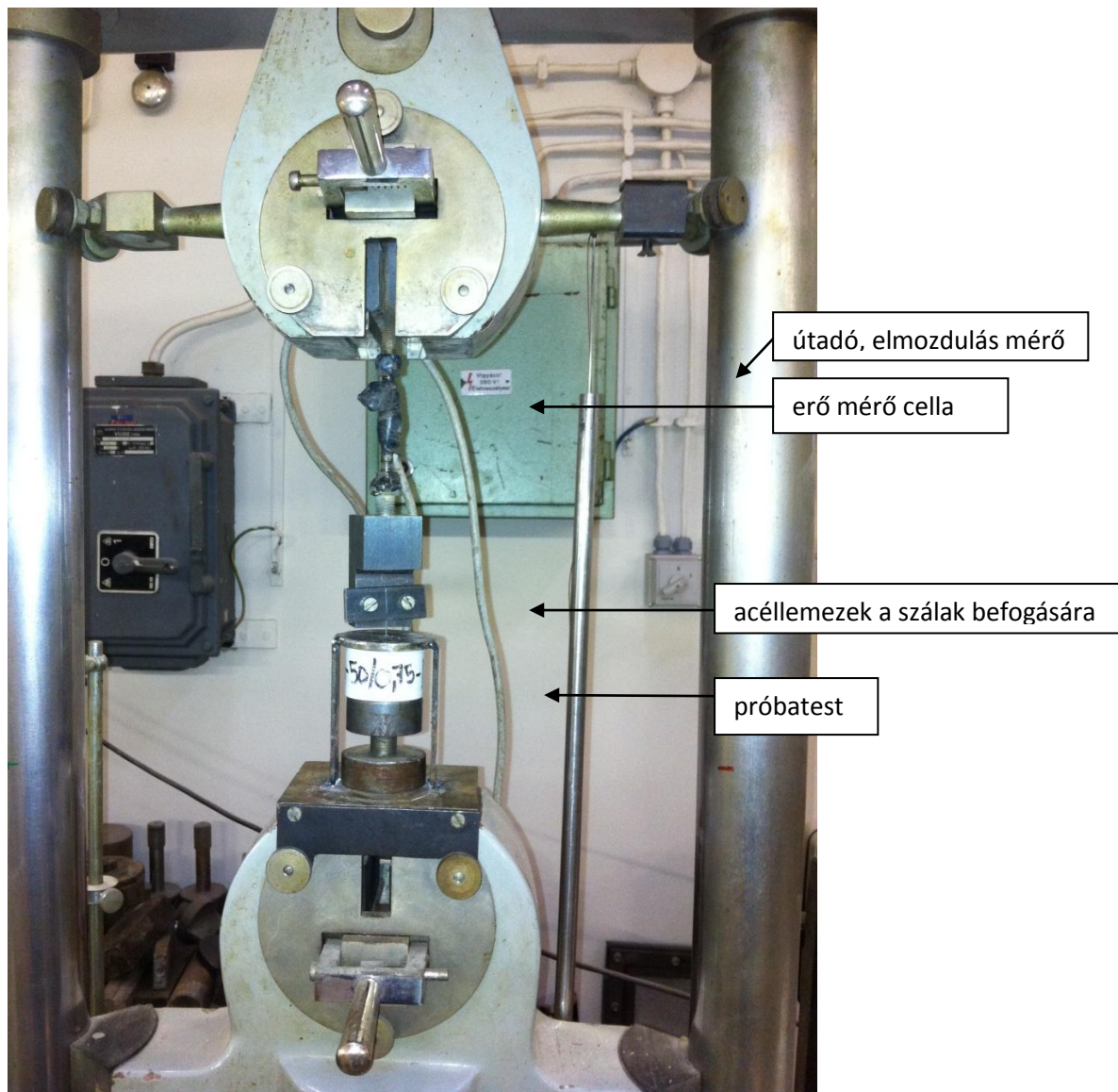
| <b>keverék</b>    | <b>keresztmetszeti adatok (mm)</b> | <b>törőerő (kp)</b> |
|-------------------|------------------------------------|---------------------|
| <b>1. keverék</b> | 39,5x39,7                          | értékelhetetlen     |
| <b>1. keverék</b> | 39,5x39,8                          | 48                  |
| <b>1. keverék</b> | 39,5x39,6                          | 42,4                |
| <b>2. keverék</b> | 39,7x39,3                          | 59,2                |
| <b>3. keverék</b> | 40,1x40                            | 50,2                |
| <b>3. keverék</b> | 39,8x39,8                          | 48,3                |
| <b>3. keverék</b> | 39,5x40,4                          | 48,2                |

Az első mérési adatunk értékelhetetlen lett, ugyanis a törőgép nem megfelelő beállítása miatt hirtelen eltört.



14. ábra A habarcs hasábok hasító-húzószilárdság vizsgálatához használt törőgép

A szálak kihúzását speciális szálkihúzó berendezéssel hajtottuk végre. A szálakat befogjuk két lemez közé, a szál habarcsos végét pedig elkezdjük lefelé húzni. A berendezés erő/elmozdulás értéket mért, másodpercenként öt értéket. A gép  $\approx 0,5\text{mm/s}$  sebességgel húzta a szálakat a habarcsból. A 15. ábra a szálkihúzó berendezést mutatja be.



15. ábra szálkihúzó berendezés

### 3.1 A mérési eredmények

A kísérlet előtt feltételeztük, hogy az egyes geometriai kialakítású szálak más-más értékeket fognak adni. A hullámos szálak jobban bele tudnak „kapaszkodni a betonba”, jobban ágyazódnak be, mint a kampósvégű vagy a gombostűfejű szálak. Ha az eredményeket maximális erőfelvétel szerint csökkenő sorrendbe helyezzük, akkor láthatjuk, hogy a gombostű fejű és hullámos szálak az élen járnak erőfelvétel szempontjából. A 4. táblázat összefoglalja a mérési eredményeket maximális erőfelvétel szerint. Eztán a kampós majd lapos végű szálak következnek. A maximális erő felvétel és a beágyazási felület birtokában kiszámolhatjuk  $\tau_f$  tapadó szilárdságot. Tapadó szilárdsági

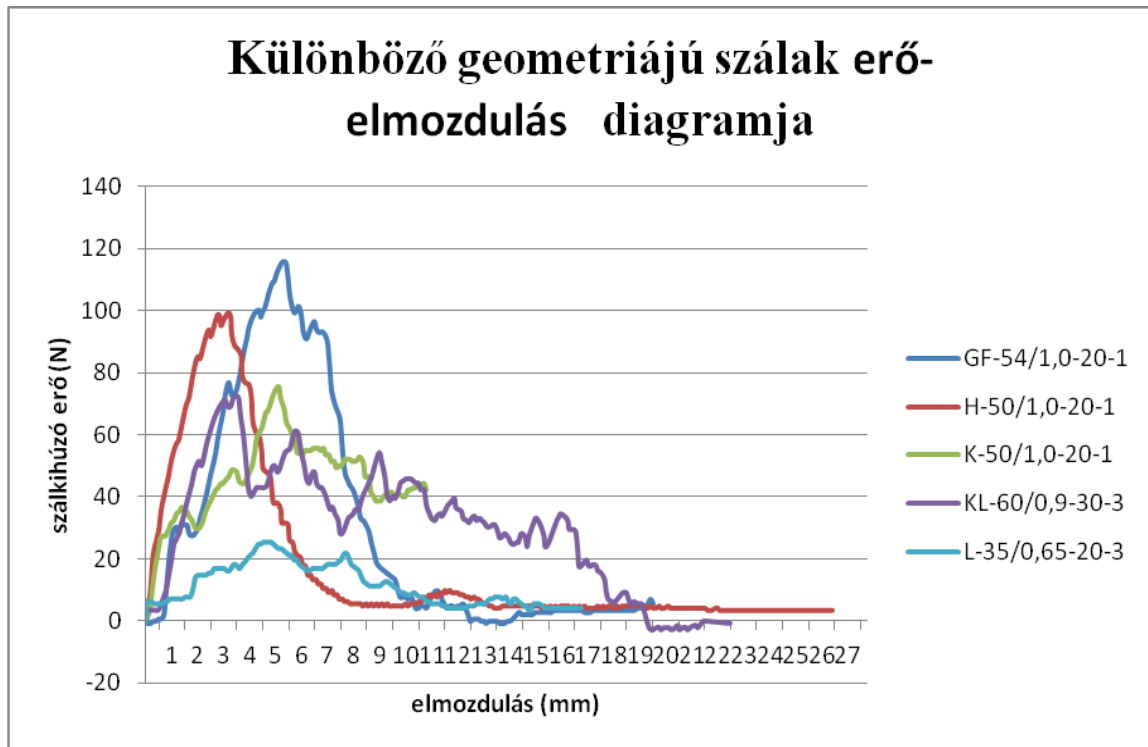
tulajdonságok vizsgálata szempontjából is hasonló eredményre jutunk, mint erő felvétel esetén. A hosszan beágyazott, egyenestől eltérő geometriájú szálak nagyobb erő felvétele esetén húzódnak ki a mátrixból, mint például a lapos végű, kis beágyazási hosszú szálak. Ennek természetesen az a feltétele, hogy a szálak úgy legyenek elhelyezve a mátrixban, hogy egyenletesen érje a szálak felületét habarcs.

**4. táblázat: a mérési eredmények maximális erőfelvétel alapján**

| <b>geometriai kialakítás</b> | <b>próbatest jele</b> | <b>L(mm)</b> | <b>D(mm)</b> | <b>L/D</b> | <b>beágyazási hossz <math>L_b</math> (mm)</b> | <b>F maximális erő (N)</b> |
|------------------------------|-----------------------|--------------|--------------|------------|-----------------------------------------------|----------------------------|
| gombostű fejű                | GF-54/1,0-15-3        | 54           | 1            | 54,00      | 15                                            | 146                        |
| gombostű fejű                | GF-54/1,0-20-1        | 54           | 1            | 54,00      | 20                                            | 115,6                      |
| gombostű fejű                | GF-54/1,0-20-2        | 54           | 1            | 54,00      | 20                                            | 115,6                      |
| hullámos                     | H-50/1,0-20-1         | 50           | 1            | 50,00      | 20                                            | 99,4                       |
| gombostű fejű                | GF-54/1,0-15-2        | 54           | 1            | 54,00      | 15                                            | 95,9                       |
| gombostű fejű                | GF-54/1,0-20-3        | 54           | 1            | 54,00      | 20                                            | 93,1                       |
| gombostű fejű                | GF-54/1,0-15-1        | 54           | 1            | 54,00      | 15                                            | 92,4                       |
| hullámos                     | H-50/1,0-15-2         | 50           | 1            | 50,00      | 15                                            | 89,6                       |
| hullámos                     | H+-60/1,0-30-1        | 60           | 1            | 60,00      | 30                                            | 88,1                       |
| hullámos                     | H+-60/1,0-30-3        | 60           | 1            | 60,00      | 30                                            | 79                         |
| kampós végű                  | K-50/1,0-20-1         | 50           | 1            | 50,00      | 20                                            | 75                         |
| kampós lapos végű            | KL-60/0,9-30-3        | 60           | 0,9          | 66,67      | 30                                            | 72,6                       |
| hullámos                     | H-50/1,0-20-3         | 50           | 1            | 50,00      | 20                                            | 67,7                       |
| hullámos                     | H-50/1,0-15-1         | 50           | 1            | 50,00      | 15                                            | 62,8                       |
| hullámos                     | H+-60/1,0-30-2        | 60           | 1            | 60,00      | 30                                            | 60,6                       |
| kampós végű                  | K-50/1,0-20-3         | 50           | 1            | 50,00      | 20                                            | 58,5                       |
| kampós lapos végű            | KL-60/0,9-30-2        | 60           | 0,9          | 66,67      | 30                                            | 54,3                       |
| kampós lapos végű            | KL-60/0,9-30-1        | 60           | 0,9          | 66,67      | 30                                            | 52,9                       |
| hullámos                     | H-50/1,0-20-2         | 50           | 1            | 50,00      | 20                                            | 52                         |

|                         |                      |    |      |       |    |       |
|-------------------------|----------------------|----|------|-------|----|-------|
| kampós végű<br>cinkkelt | KZn-50/0,75-<br>15-1 | 50 | 0,75 | 66,67 | 15 | 51,5  |
| kampós végű             | K+-50/0,75-<br>15-3  | 50 | 0,75 | 66,67 | 15 | 50,8  |
| kampós végű             | K-50/1,0-15-2        | 50 | 1    | 50,00 | 15 | 48    |
| kampós végű<br>cinkkelt | KZn-50/0,75-<br>15-3 | 50 | 0,75 | 66,67 | 15 | 43    |
| kampós végű             | K-50/1,0-20-2        | 50 | 1    | 50,00 | 20 | 37,4  |
| lapos végű              | L-35/0,65-20-3       | 35 | 0,65 | 53,85 | 20 | 25,4  |
| kampós végű             | K-50/0,75-15-3       | 50 | 0,75 | 66,67 | 15 | 24,7  |
| kampós végű             | K-50/1,0-15-3        | 50 | 1    | 50,00 | 15 | 24,7  |
| kampós végű             | K-60/0,75-30-1       | 60 | 0,75 | 80,00 | 30 | 24,7  |
| kampós lapos végű       | KL-60/0,9-15-3       | 60 | 0,9  | 66,67 | 15 | 23,3  |
| kampós végű             | K-50/0,75-15-2       | 50 | 0,75 | 66,67 | 15 | 21,2  |
| kampós végű             | K+-50/0,75-<br>15-2  | 50 | 0,75 | 66,67 | 15 | 21,19 |
| kampós végű             | K-60/0,75-30-2       | 60 | 0,75 | 80,00 | 30 | 19,7  |
| kampós végű             | K-60/0,75-30-3       | 60 | 0,75 | 80,00 | 30 | 19,7  |
| kampós végű             | K+-50/0,75-<br>15-1  | 50 | 0,75 | 66,67 | 15 | 19    |
| lapos végű              | L-35/0,65-15-1       | 35 | 0,65 | 53,85 | 15 | 17,6  |
| kampós végű<br>cinkkelt | KZn-50/0,75-<br>15-2 | 50 | 0,75 | 66,67 | 15 | 16,9  |
| lapos végű              | L-35/0,65-20-1       | 35 | 0,65 | 53,85 | 20 | 11,3  |
| lapos végű              | L-35/0,65-15-3       | 35 | 0,65 | 53,85 | 15 | 9,9   |
| lapos végű              | L-35/0,65-15-2       | 35 | 0,65 | 53,85 | 15 | 7,1   |
| lapos végű              | L-35/0,65-20-2       | 35 | 0,65 | 53,85 | 20 | 7,1   |
| kampós végű             | K-50/0,75-15-1       | 50 | 0,75 | 66,67 | 15 | 5,6   |

A feltételezésünket jól ábrázolja a 16.ábra, ahol különböző alakú, azonos beágyazási hosszú szálak erő-elmozdulás diagramját látjuk.



16. ábra különböző alakú szálak jellegzetes erő-elmozdulás diagramja

### 3.2 Következtetések és megállapítások

- hullámos és gombostűfejű szálak bizonyultak a legjobbnak, ezek esetén mértük a legnagyobb szálkihúzó erő értékeit
- a beágyazási hossz növekedésével nőtt a maximális szálkihúzó erő nagysága
- A szálak a kihúzódás következtében nem deformálódtak a terhelés hatására (a kihúzott szálak alakját megvizsgáltuk), így a következő kísérleteknél jobb minőségű habarcsot kell alkalmazni, valamint a beágyazás technikáját is fejleszteni kell a jobb eredmények elérése végett.

### IRODALOM JEGYZÉK

[5] A.Pompo, P. R. Stupak, L. Nicolais, B. Marchese: Analalysis of steel fibre pull-out from a cement matrix using video photography, Cement and Concrete Composites, Vol.18, 1996, pp. 3-8.

- [1] Balázs L. György [1999] Szálerősítésű betonok - a kutatástól az alkalmazásig -, Konferencia-kiadvány, 1999, pp. 2-56.
- [8] C.Y. Yue-H.C. Looi- M.Y. Quek: Assessment of fibere-matrix adhesion and interfacial properties using the pull-out test, International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 151, 1995, pp. 73-80.
- [3] D.H. Lim- B.H. Oh: Experimental and theoretical investigation on the shear of steel fiber reinforced concrete beams, Engineering Structures, Vol. 21, 1999, pp. 937-944.
- [6] F. Laranjeira- C. Molins- A. Aguadi: Predicting the pull-out response of inclined hooked steel fibers, Cement and Concrete Research, Vol. 40, 2010, pp. 1471-1487.
- [7] Gilles Chanvillard- Pierre-Claude Aitcin: Pull-out behavior of corrugated steel fibers, Advanced Cement Based Materials, Vol. 4, 1996, pp. 24-41.
- [2] R. Narayanan- I.Y.S. Darwish: Use of steel fibers as shear reinforcement, ACI Structural Journal, 1987 May-June, pp 216-227.

## **TÁBLÁZATJEGYZÉK**

1. táblázat: a különböző anyagú és mechanikai tulajdonságai
2. táblázat: A felhasznált szálak adatai
3. táblázat A mérések adatai
4. táblázat: a mérési eredmények maximális erőfelvétel alapján

## **ÁBRAJEGYZÉK**

1. ábra különböző alakú acél szálak
2. ábra műanyag szál
3. ábrakülönböző üvegszálak
4. ábra Az acélszálak alaki megjelenései forrás(Balázs L. György [1999] 54.old)

5. ábra szálnélküli és szálerősítés beton nyomási viselkedése kampós végű acélszálak alkalmazása esetén,  $\sigma$ - $\epsilon$  diagramm forrás (Balázs, [1999] 13.old)
6. ábra. Szálerősítésű betonelemek erő-elmozdulás ábrái acélszál alkalmazása esetén
8. ábra Narayanan és Darwish kísérleti gerendák forrás (R. Narayanan-I.Y.S Darwish [1987])
9. ábra D.H. Lim és B.H. Oh kísérleti gerendái
10. ábra egyenes szál jellegzetes erő-elmozdulás diagrammja
11. ábra kampós végű szál jellegzetes erő-elmozdulás diagramja (
12. ábra a „zsaluzatok”
13. ábra a habarcs megkeveréséhez használt keverőgép
15. ábra száلكihúzó berendezés
16. ábra különböző alakú szálak jellegzetes erő-elmozdulás diagramja