



ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

# TAPADÁSI JELLEMZŐK FELÜLETKÖZELI MEGERŐSÍTÉSEK ESETÉN

**Szabó K. Zsombor**

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék

Témavezető:

PhD, Dr. habil, Prof.

**Balázs L. György**

Budapest, 2013. december

## **1 KUTATÁSI ELŐZMÉNYEK**

Meglevő szerkezeteink utólagos megerősítésére kiválóan alkalmazhatóak a szénszál erősítésű polimerek. A vasbeton szerkezetek leromlását többek között a szerkezeti anyagok károsodása, építéskori hiányosságok, véletlenszerű túlterhelések (pl. földrengés vagy robbanás) okozhatják. A használat során felmerülő növekvő igénybevételek, illetve a statikai váz esetleges megváltoztatása további indokai lehetnek a megerősítések alkalmazásának.

A szálerősítésű polimerek nagy húzószilárdságát használjuk ki elsősorban a hajlított elemek teherbírásának fokozására a húzott övben végzett megerősítéssel, valamint nyomott oszlopok keresztirányú alakváltozásainak korlátozására. A szálerősítésű polimerek használatának fő előnyei az acélhoz képest: az önsúlyukhoz viszonyított nagy húzószilárdságuk és egyidejű korrózióállóságuk. Szálerősítésű polimereket alkalmazva a megerősítési feladat általában gyorsan és hatékonyan elvégezhető. A jelenleginél is szélesebb körű alkalmazásukat korlátozza a szálerősítésű polimerek magas hőmérsékletre való érzékenysége és relatíve magas áruk.

A gyakorlatban használt szálerősítésű polimerek nagy választékban állnak rendelkezésünkre szövet, illetve kikeményített (pultruded) betétek formájában. A kikeményített szálerősítésű polimerek esetében alapvetően két alkalmazási módot különböztetünk meg. Az egyik a felületre felragasztott megerősítés (Externally Bonded Reinforcement, EBR), mely esetében a polimereket a megerősíteni kívánt elem külső felületére ragasztjuk [1]. A másik módszer a felületközeli megerősítés (Near Surface Mounting, NSM). Felületközeli megerősítés során a betéteket a betontakarásba metszett hornyokba ragasztják. A ragasztáshoz általában nagy szilárdságú ragasztókat használunk. Felületközeli megerősítéseknek számos előnye van a felületre ragasztott megerősítéshez képest: rövid kivitelezési időtartam (a felületi egyenetlenségek kitöltése valamint a felület érdesítése nem szükséges), a rendelkezésre álló tapadási felület nagyobb (szalagok esetében több, mint kétszerese a felületre ragasztotthoz képest), az alkalmazható betétek és keresztmetszetek spektruma szélesebb.

Felületközeli megerősítést (NSM) először 1949-ben alkalmaztak Svédországban, ahol egy alulvasalt hídpályalemezt a húzott zónában kellett megerősíteni a felületbe mart hornyokban elhelyezett acélbetétek segítségével. A felületközeli megerősítési mód reneszánszát éli a 90-es évek vége óta, amikor Blaschko (Blaschko, 2001) megvédte doktori értekezését ebben a témában.

Szálerősítésű polimereknek számos előnye van az acéllal szemben. Elsőként említsem az önsúlyhoz viszonyított nagy húzószilárdságot, amely lehetővé teszi alkalmazásukat anélkül, hogy a szerkezetek önsúlya jelentősen megnövekedne. Továbbá kiemelkedően fontos a szálerősítésű polimerek korrózióállósága. Ezáltal a betonfedés mértéke nem okoz nehézséget korróziós szempontból.

## **2 A KUTATÁS JELENTŐSÉGE**

A hagyományos megerősítési módokhoz képest a felületközeli megerősítések alkalmazása néhány további szempont gondos figyelembe vételét igényli. A tapadást befolyásoló paraméterek vizsgálatához széleskörű kísérleti program végrehajtása szükséges. A szakirodalomban fellelhető adatok áttekintése, és feldolgozása is értelemszerűen szükséges. Szükséges továbbá a rendelkezésre álló adatok ellenőrzése, egységesítése, és átfogó rendszerbe foglalása. Esetenként előfordulnak egymásnak ellentmondó eredmények is. A kísérleti elrendezés hatása például nem volt kellő részletességgel vizsgálva a felületközeli

megerősítések esetében, annak ellenére, hogy hatása jelentős lehet a vizsgálati eredményekre.

Jelen kutatásom egyik célja volt, hogy kifejlesszek egy új próbatestet a felületközeli megerősítések tapadásának kísérleti vizsgálatára.

A tapadást befolyásoló alapvető tényezők a következők: az alapréteg és a ragasztó szilárdsága, a megerősítő anyag alakváltozó képessége, a ragasztó réteg vastagsága, elem szélétől mért távolság, a megerősítés keresztmetszete és felületi megmunkálása. A befolyásoló tényezőket anyagi és geometriai tényezők csoportjába soroltuk.

A kutatás célja volt továbbá, hogy a lehető legtöbb befolyásoló tényező hatását megismerjem a felületközeli megerősítések tapadási mechanizmusának a megértéséhez és jellemezéséhez. A tönkremeneteli módok ismeretét és csoportosítását is fontosnak tartottam.

Doktori kutatásom célkitűzései voltak így:

- 1. A felületközeli megerősítések tapadásának vizsgálatára alkalmazható kísérleti módszerek továbbfejlesztése;**
- 2. A felületközeli megerősítések jellemző tönkremeneteli módjainak részletes bemutatása és újszerű csoportosítása;**
- 3. A felületközeli megerősítések tapadását befolyásoló geometriai tényezők vizsgálata;**
- 4. A felületközeli megerősítések tapadását befolyásoló anyagi tényezők vizsgálata.**

### **3 A KUTATÁSI MÓDSZER**

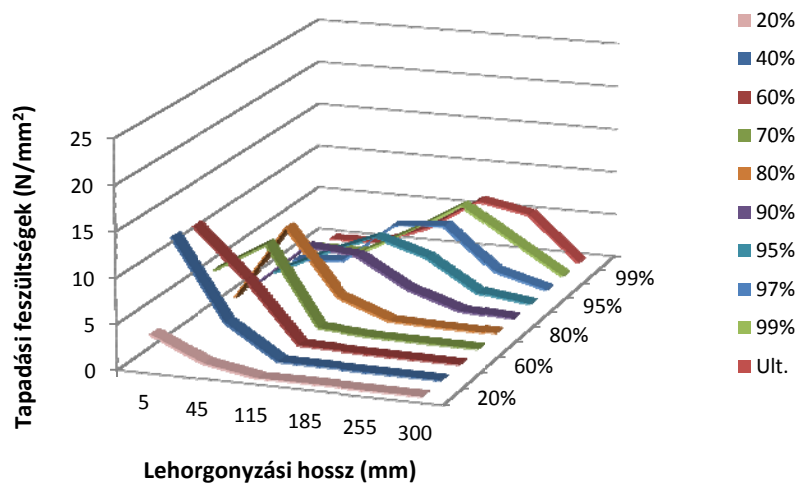
Széleskörű irodalomkutatásaimban kiemelten foglalkoztam a tapadás vizsgálatára alkalmazott kísérleti berendezésekkel és a tapadást befolyásoló tényezőkkel. Ezt követően egy újszerű kihúzó vizsgálati módszert dolgoztam ki. A kísérleti körülmények hatását a vizsgálati eredményekre nagyon fontosnak tartottam, ezért a vizsgálati módszert lépésről lépésre alakítottam ki. Az újonnan kifejlesztett vizsgálati módszer alkalmazhatóságát egy nemzetközileg elfogadott kísérleti elrendezés (dupla húzó-húzó) alkalmazásával ellenőriztem. A dupla húzó-húzó kísérleti elrendezést egy nemzetközi körvizsgálat (Round Robin Testing) keretein belül használtam. Kutatásaim jelentős részét egy európai 6. Keretprogramhoz kötődően végeztem (EN-CORE: European Network for Composite Reinforcement) (Contract No. MRTN-CT-2004-512397). Az általam kifejlesztett kihúzó kísérlet széleskörű alkalmazhatóságát paraméterek vizsgálatával ellenőriztem. A tapadást befolyásoló tényezőket két nagy csoportba soroltam.

Anyagi paraméterek: az alapréteg (megerősítendő anyag) tulajdonságai, a kötőanyagok tulajdonságai valamint a megerősítő anyag rugalmassági modulusa (alakváltozó képesség) és szilárdsága;

Geometriai paraméterek: a megerősítő agyag mérete, alakja és felületi kialakítása, illetve a megerősítő anyag távolsága a horony és az elem szélétől (perem távolság).

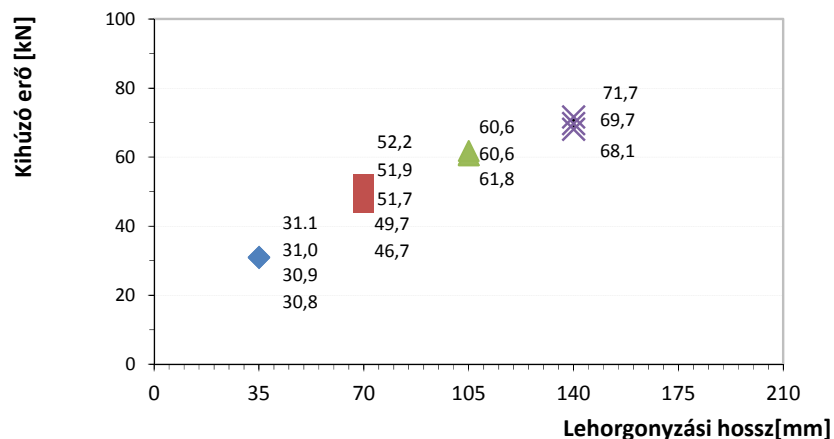
A fentemlített paraméterek jelentősen befolyásolják a feszültségek alakulását, az alakváltozásokat, a tönkremeneteli módot és a megerősítő rendszer teljes teherbíró képességét. Mindezek vizsgálatuk szükséges ahhoz, hogy a különféle megerősítési módok viselkedését megérthessük.

Kutatásaim során kísérletileg igazoltam, hogy a felületközeli megerősítések lehorgonyzó képessége nem csak az alkalmazott anyag jellemzőivel van összefüggésben, hanem a megerősítő anyag alakjával, felületi kialakításával, az alkalmazott ragasztóanyag típusával, és a vizsgálati módszerrel is.



1. ábra: Felületközeli megerősítésekre jellemző tapadási feszültségek és lehorgonyzási hossz diagram

Bebetonozott betétekhez hasonló erőátadódás figyelhető meg a felületközeli megerősítések esetében is. Kezdetben a kapcsolati feszültségek maximuma a terhelt oldalon van (1. ábra). Nagyobb terhekre a kapcsolat fokozatos tönkremenetele következik be és feszültségek maximuma a terheletlen oldal irányába tolódik el.



2. ábra: Kihúzó erő lehorgonyzási hossz diagram felületközeli szénzál erősítésű szalagszerű ( $h_f=20$  mm,  $t_f=1,4$  mm) betétek esetében

A hatékony lehorgonyzási hossz (*effective bond length*) általános meghatározás alapján olyan minimális lehorgonyzási hossz, amely maximális kapcsolati szilárdságot eredményez. Hatékony lehorgonyzási hossz létezését szénzál erősítés esetén igazolja, hogy a kihúzó erő lehorgonyzási hossz diagram első szakasza egy közel lineáris szakasz, ahol lehorgonyzási hossz növekményhez arányos kihúzóerő növekmény tartozik, majd a következő szakaszban a lehorgonyzási hossz növekedése nem eredményezi a kihúzóerő jelentős növekedését (2. ábra).

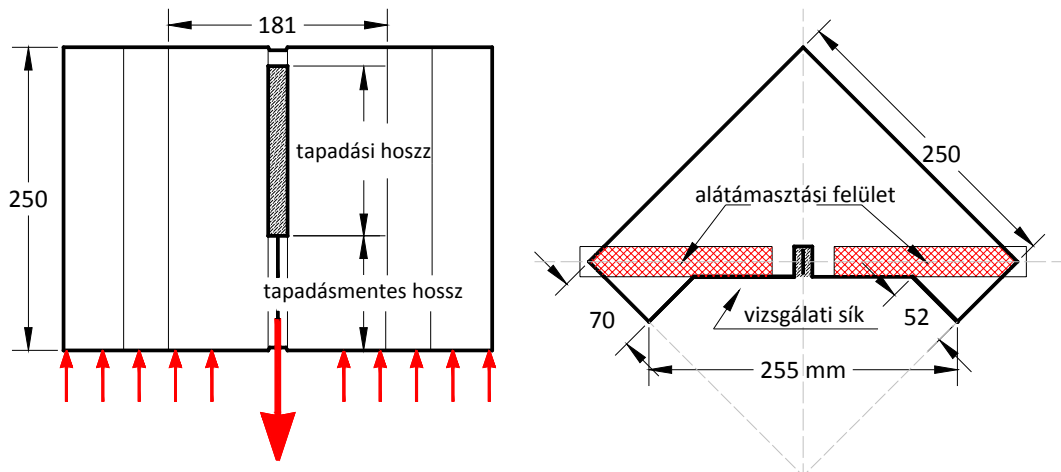
A megerősítő rendszer alkotóelemeinek egyenkénti vizsgálata fontos. Felületközei megerősítések elemei a következők: alaprétég (a mi esetünkben beton), ragasztó (kétkomponensű műgyanta vagy cement alapú ragasztók) és végül a megerősítő anyag (nagyreszt szénszál erősítésű polimer). Szénszál erősítésű szalagok húzószilárdságának vizsgálata elengedhetetlen a vizsgálati eredmények pontos kiértékelhetősége érdekében. A termékek jellemzőit a gyártók minden esetben megadják, de ezek az adatok pontossága nem megbízható. Az jelenleg érvényes szabványok (ASTM, 2000; CNR, 2006) tartalmaznak ajánlásokat, de nem adnak meg pontosan követhető eljárásokat, ezen anyagok vizsgálatára és jellemzésére. Ezek hiányában egy megbízható kísérleti eljárást dolgoztam ki szalagszerű szálerősítésű polimerek húzószilárdságának vizsgálatára [2]. A dolgozatban részletesen bemutatott kísérleti berendezések, illetve az elsajátított laboratóriumi tapasztalatok alkalmazhatóak a további kutatásokban.

A 4. fejezetben a kövér betűtípussal szedett részek az új tudományos eredményeket mutatja mutatják. A nem kövér betűtípussal szedett szövegrész magyarázatként szolgál az itt bemutatott új tudományos eredményekhez.

#### 4 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

##### 1. TÉZIS : ÚJ PRÓBATEST KIFEJLESZTÉSE FELÜLETKÖZELI MEGERŐSÍTÉS TAPADÁSÁNAK VIZSGÁLATÁRA [2][7][8][9][10][11][15][16]

Egy új próbatestet fejlesztettem ki a felületközei megerősítések erőátadódásának kísérleti vizsgálatára (3. ábra). A kifejlesztett próbatest előnye, hogy a vizsgált síkra merőlegesen nagy a próbatest merevsége, jól hozzáférhető a vizsgálati sík a kísérlet során, központos terhelés adódik a vizsgált betétre. A próbatest egyszerűsége lehetővé teszi széleskörű alkalmazhatóságát, és számos befolyásoló tényező vizsgálatát.



3. ábra: Felületközei megerősítések erőátadódásának vizsgálatára kifejlesztett új (L-alakú) próbatest

A vizsgálatban alkalmazott próbatestet egy 250 mm élhosszúságú kocka felhasználásával készítettük speciális kiszorító elem alkalmazásával, amit a kocka átlójával párhuzamosan helyeztünk el (lásd 3. ábra). Az így kialakított vizsgálati sík helyzetét annak megfelelően választottuk ki, hogy a különböző keresztmetszetű megerősítéseket központosan lehessen terhelni. A próbatest vastagsága a vizsgálati síkra merőlegesen maximális. Az ennek köszönhetően kialakuló merevség lehetővé teszi a megerősítés felületére merőleges kapcsolati feszültség komponens tovaterjedését a horonymetszés által gyengített síkban. A próbatest kilógó részei növelik a próbatest stabilitását, és elősegítik kezelhetőségét. A próbatest L-alakja láthatóvá és könnyen elérhetővé teszi a vizsgálati síkot, továbbá lehetővé teszi a keresztirányú alakváltozás mérését is.

A tézisben bemutatott próbatest előnyeit alátámasztják a szakirodalmi adatokkal végzett összehasonlítások eredményei (de Lorenzis 2002, Novidis 2007, Seracino 2007). Igazolódott, hogy a próbatestünk alkalmas volt nagyobb tapadási szilárdsági értékek mérésére, következésképpen a kapcsolatok korai tönkremenetele elkerülhető volt.

## **2. TÉZIS: FELÜLETKÖZELI MEGERŐSÍTÉSEK TÖNKREMETELI MÓDJAI** **[1][15][16][17]**

Széleskörű kísérleti eredményeim és a szakirodalomban található adatok feldolgozása alapján a felületközeli megerősítések tönkremeneteli módjainak a következő csoportosítását dolgoztam ki.

**A. ELSŐDLEGES TÖNKREMETELI MÓDOK.** A kapcsolat tönkremenetelét *elsődleges tönkremeneteli módnak* tekintem, ha a tönkremenetel a kihúzódasos tönkremenetel formájában valósul meg a betonfedés felhasadása nélkül. Elsődleges tönkremeneteli módok közvetlenül vezetnek a globális tönkremenetelhez vagy hozzájárulnak egy másodlagos tönkremeneteli forma kialakulásához. A különböző tönkremeneteli felületek alapján három féle *elsődleges tönkremeneteli módot* határoztam meg (4. ábra):

A.1 A szálerősítésű polimer tönkremenetele

A.2 A szálerősítésű polimer és a ragasztó közötti felületi tönkremenetel

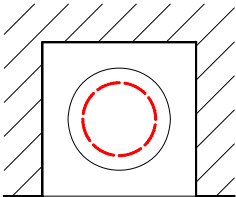


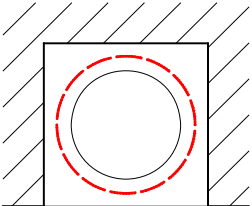


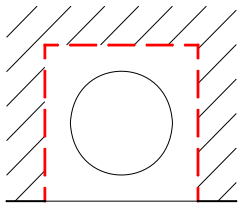
A.3 A ragasztó réteg és az alapszerkezet közötti felületi tönkremenetel.

**B. MÁSODLAGOS TÖNKREMETELI MÓDOK.** A beton berepedésével járó tönkremeneteleket *másodlagos tönkremeneteli módoknak* nevezem. A tönkremeneteli folyamat során kialakuló keresztirányú feszültségek végezetül a beton felhasadásához vezethetnek a betéttel párhuzamos, ferde síkok mentén. A következő másodlagos tönkremeneteli módokat különböztetem meg a repedés kiindulási pontjának függvényében (5. ábra):

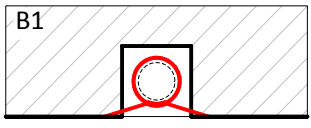

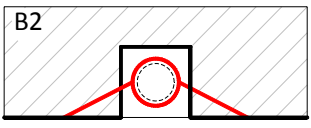

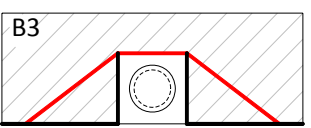

B.1 Felületi felhasadás (ragasztó berepedése)

B.2 Központi felhasadás (vegyes ragasztó és beton berepedése)

B.3 Mély felhasadás (beton berepedése).

<b>ELSŐDLEGES TÖNKREMETELI MÓDOK</b>	
<b>A1. Szálerősítésű polimer tönkremenetele</b>	
	<p><u>A1a) Interlamináris tönkremenetel</u></p>  <p>Interlamináris és a ragasztó elnyíróadási tönkremenetele sima felületű, szénzál erősítésű polimer szalag esetében</p>
	<p><u>A1b) A betétek felületi mintázatának a tönkremenetele</u></p>  <p>A homokszórás elnyíródása</p>
<b>A2. Szálerősítésű polimer és a ragasztó közti felület tönkremenetele</b>	
	<p><u>A2a) Adhéziós tönkremenetel szálerősítésű polimer és a ragasztó közti felületen</u></p> <p>Nem megfelelő ragasztóanyag választás vagy a szálerősítésű polimer tapadási felületének nem megfelelő előkészítése eredményezheti</p>
	<p><u>A2b) A ragasztó elnyíróadási tönkremenetele</u></p>  <p>A ragasztó elnyíródása a ragasztandó felület közvetlen közelében</p>  <p>A ragasztóréteg halszájka szerű berepedése</p>
<b>A3. Ragasztó és a beton közti felület tönkremenetele</b>	
	<p><u>A3a) Adhéziós tönkremenetel a ragasztó és beton közötti felületen</u></p> <p>Nem megfelelő ragasztóanyag választás vagy a beton tapadási felületének nem megfelelő előkészítése eredményezheti</p>
	<p><u>A3b) Beton elnyíródása</u></p> <p>A leválásos tönkremenetel a ragasztó és az alapszerkezet határfelületén. Erre a tönkremeneteli felületre jellemző hogy egy vékony betonréteg marad a szálerősítésű polimer felületén</p>

**4. ábra:** Elsődleges tönkremeneteli módok

MÁSODLAGOS TÖNKREMENTELI MÓDOK	
B1. Felületi felhasadás (ragasztó berepedése)	
	
B2. Központi felhasadás (vegyes ragasztó és beton berepedése)	
	
B3. Mély felhasadás (beton berepedése).	
	

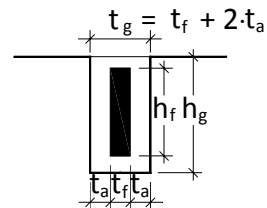
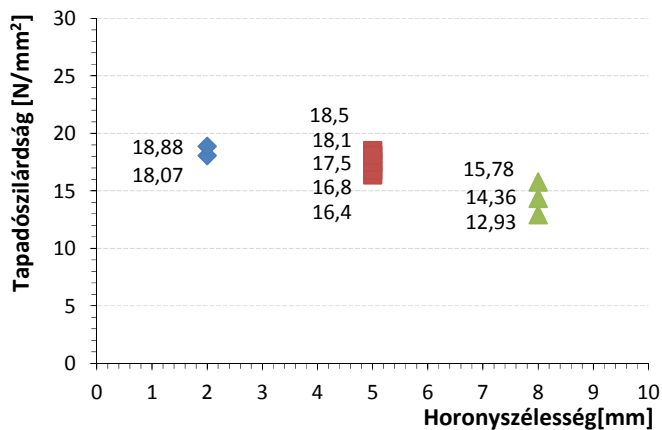
5. ábra: Másodlagos tönkremeneteli módok

### 3 TÉZIS: TAPADÁST BEFOLYÁSOLÓ GEOMETRIAI TÉNYEZŐK FELÜLETKÖZELI MEGERŐSÍTÉSEK ESETÉN

#### 3.1 HORONY SZÉLESSÉG – RAGASZTÓRÉTEG VASTAGSÁG ARÁNY HATÁSA [12]

Kísérletileg igazoltam, hogy a horonyszélesség túlzott mértéke hátrányosan befolyásolhatja a felületközeli megerősítések tapadószilárdságát (6. ábra). Kísérleti eredményeim alapján, szalagszerű megerősítések horony szélességének meghatározására a következő korlátok betartását javaslom:

$$2 \cdot t_f \leq t_g \leq 4 \cdot t_f$$



**Jelölések:**

- $t_a$  – a ragasztóréteg vastagsága
- $t_f$  – a szál erősítésű polimer vastagsága
- $t_g$  – a horony szélessége
- $h_g$  – a horony mélysége
- $h_f$  – a szalag magassága

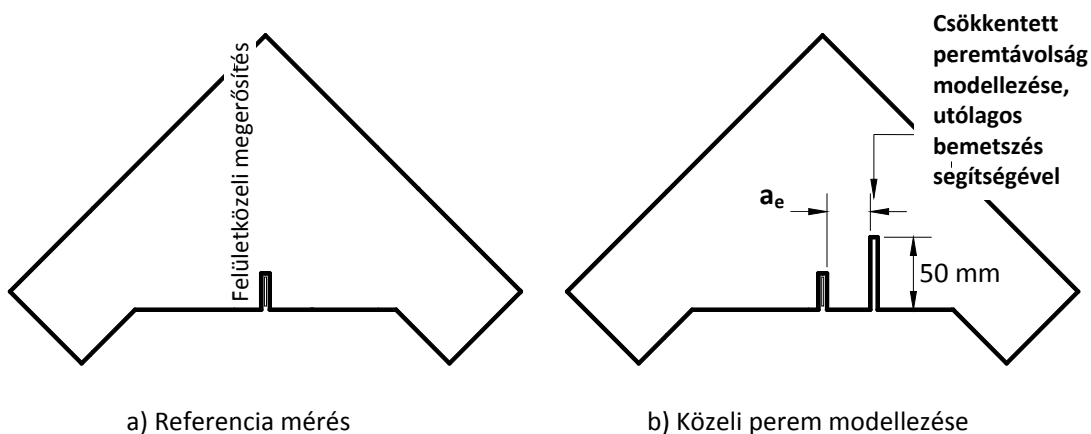
6. ábra: Felületközeli megerősítések tapadó szilárdsága horony szélesség függvényében ( $l_b=70$  mm)



A minimális horonyszélességet gyakorlati okokból javaslom, hogy legyen  $2t_f$  vagy minimum 3 mm.

### 3.2 A PEREMTÁVOLSÁG HATÁSA

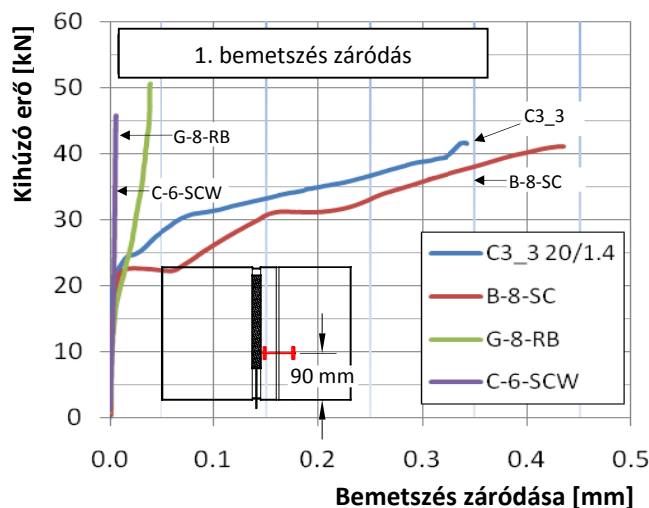
A perem közelségének hatása jól modellezhető az újonnan kifejlesztett L-alakú próbatest segítségével. Egy utólagos bemetszés készíthető a megerősítés tengelyével párhuzamosan (7. ábra). A perem minimális távolsága meghatározható a bemetszés záródásának mérésével a terhelés hatására.



7. ábra: NSM betéthez közeli perem hatásának kísérleti modellezése

Számos esetben szükséges lehet a megerősítő elemek elhelyezése az elem szélének közelében. A perem közelsége hátrányosan befolyásolhatja az erőtadódást, mivel a betonfedés lerepedése következhet be.

Kísérleteim során az első lépésben a referencia méréseket végeztem el. A következő lépésben egy utólagos bemetszés segítségével modelleztem  $a_e = 30$  mm közeli perem esetét.

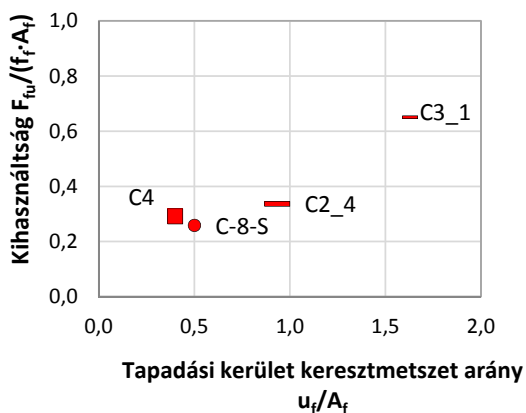


8. ábra: Kihúzó erő és az utólagos bemetszés záródása  $a_e = 30$  mm perem távolság esetén ( $l_b = 175$  mm)

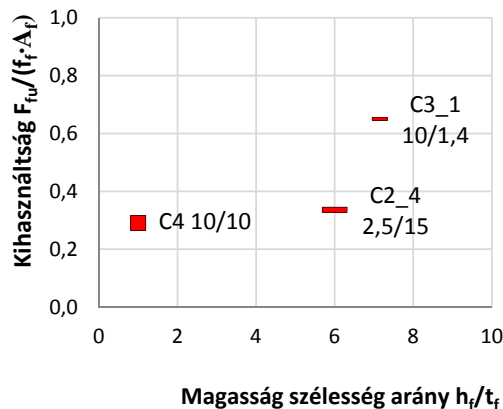
Az utólagos bemetszés záródásának mutatja a keresztirányú feszültségek terjedését, amelyek végezetül a betonfedés leválását eredményezhetik. A betétek alakjának és felületi kialakításának függvényében jelentős különbségek lehetnek a keresztirányú alakváltozásokban. Az utólagosan kialakított bemetszés záródását (a perem alakváltozásait) három különböző pontban mértem a tapadási hossz mentén. A 8. ábra a három mérési pont közül az egyik mérési pont eredményeit ábrázolja négy különböző típusú megerősítő anyagra. Viszonylag nagy keresztirányú alakváltozási értékeket mértünk a homokszórt, kör keresztmetszetű (B-8-SC) betét és a sima felületű szalag (C3\_3) esetén. Ezzel szemben a másik két kör keresztmetszetű betétre vonatkozó alakváltozási értékek jóval kisebbek voltak. Utóbbi betétek felületi megmunkálásukban különböztek az előbbiektől, az egyik bordázott (G-8-RB), a másik homokszórt és spirálisan körbevont volt (C-8-SCW).

### 3.3 A MEGERŐSÍTŐ BETÉT ALAKJÁNAK HATÁSA

Kísérleti eredményeim felhasználásával igazoltam, hogy a sima felületű szálerősítésű polimer megerősítések kihasználtsága  $[F_{fu}/(f_f \cdot A_f)]$  jobban jellemezhető a tapadási kerület és a betét keresztmetszetének a hányadosával, mint a magasság-szélesség hányadossal (9. ábra). Az utóbbi tényező négyzetű keresztmetszetű szalagok esetén volt jól alkalmazható, az előbbi tényező jól alkalmazható kör keresztmetszetű betétek estében is (9 és 10. ábra).



9. ábra: A betét kihasználtsága és tapadási kerület és keresztmetszet arány függvényében felületközeli megerősítések esetében ( $l_b = 300$  mm)



10. ábra: A betét kihasználtsága a keresztmetszet magasság és szélesség arány függvényében felületközeli megerősítések esetében ( $l_b = 300$  mm)

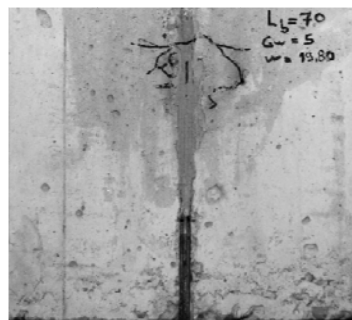
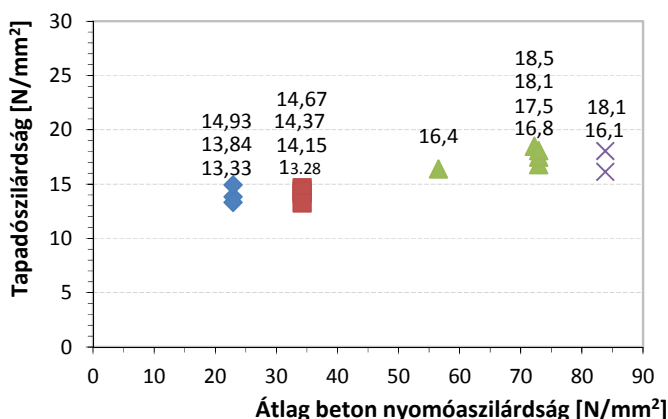
**Jelölések.** C4: szénszál-erősítésű polimer  $h_f/t_f=10/10$ ; C2\_4: szalagszerű szénszál erősítésű polimer  $h_f/t_f=2,5/15$ ; C3\_1: szalagszerű szénszál erősítésű polimer  $h_f/t_f=10/1,4$ ; C-8-S: kör keresztmetszetű (átmérő 8 mm) szénszál-erősítésű (minden pont három mérés átlagát jelöli)

## 4 TÉZIS: TAPADÁST BEFOLYÁSOLÓ ANYAGI TÉNYEZŐK FELÜLETKÖZELI MEGERŐSÍTÉSEK ESETÉBEN

### 4.1 A MEGERŐSÍTENDŐ ELEM ANYAGÁNAK SZILÁRDSÁGA

Különböző szilárdságú betonokkal végzett kísérleteim igazolták, hogy a felületközeli megerősítések tapadási szilárdságát a megerősítendő alapszerkezet anyagának szilárdsága csak kismértékben befolyásolja (11. ábra) szalagszerű megerősítések esetében. Külső

felületi megerősítésekhez képest relative nagy tapadó feszültségi értékek fejthetők ki viszonylag kis betonszilárdság esetén is.



11. ábra: A beton nyomószilárdság hatása a felületközeli szalagok tapadó szilárdságára ( $l_b = 70$  mm)

12. ábra: A legalacsonyabb szilárdságú beton ( $f_{cm} = 23$  N/mm<sup>2</sup>) tönkremenetele

Különböző (23 - 84 N/mm<sup>2</sup>) betonszilárdságok esetében vizsgáltam a tapadószilárdságot. A vizsgált tartományban a betonszilárdság növekedésével a tapadószilárdság enyhe növekedését figyeltem meg. Kísérleteink igazolták, hogy a horony alakváltozó képessége fontos, hiszen a horony aláváltozásgátló hatásának fontos szerepe van a megfelelő erőátadásban. A terhelt és terheletlen oldali kihúzódások csökkennek a betonszilárdság növekedésével mutatva a kapcsolat merevségének és az alakváltozást gátló hatásnak növekedését.

Korábbi kutatásokban Cruz és Barros (2002) gerenda kísérleteket végeztek szálerősítésű beton próbatesteken. Ők azt a következtetést vonták le, hogy a beton szilárdságának nincs hatása a felületközeli megerősítések tapadására.

Kísérleteim során a beton felrepedéses tönkremenetelét nem figyeltem meg még a legalacsonyabb szilárdságú ( $f_{cm} = 23$  N/mm<sup>2</sup>) beton esetében sem. A betonon megfigyelt repedések (12. ábra) követték a nyomófeszültségi trajektoriókat igazolva a megerősítés megfelelő együttműködését a betonnal.

#### 4.2 CEMENT ALAPÚ RAGASZTÓK [13][14]

A kétkomponensű műgyanta alapú ragasztók mellett cementalapú ragasztók alkalmazhatóságát is vizsgáltam. Cement alapú ragasztók használata előnyös tűzvédelmi és környezetvédelmi szempontból egyaránt. A műgyanta alapú ragasztók viszonylag drágák és károsak a környezetre valamint az emberekre.

Méréseim igazolták, hogy a cementalapú ragasztók esetében a kapcsolati szilárdság kisebb, mint a referencia műgyanta alapú ragasztók esetében. Ennek ellenére indokolt esetekben cement alapú ragasztók is alkalmazhatóak felületközeli megerősítések rögzítésére.

##### 4.2. a. CEMENT KÖTŐANYAGÚ RAGASZTÓK SZALAGSZERŰ BETÉTEKHEZ [13][14]

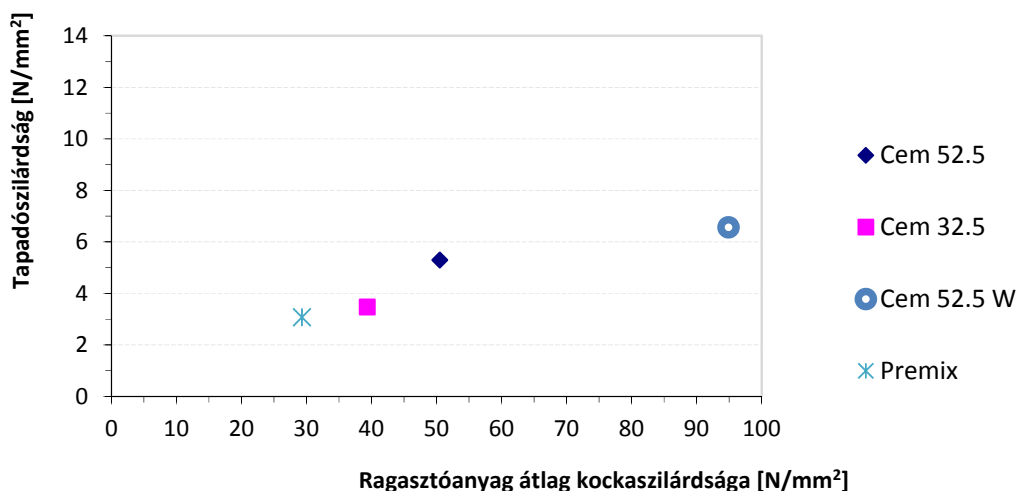
Kísérletileg igazoltam, hogy cement kötőanyagú ragasztók alkalmazhatóak szalagszerű felületközeli megerősítések rögzítéséhez. A tapadószilárdság a ragasztó szilárdságával

lineárisan nőtt (13. ábra). Az utókezelésnek fontos szerepe van. Megfelelő utókezelés esetén a húzási teherbírás 25%-os növekedését figyeltük azonos receptúrájú ragasztóanyag esetében.

A tapadószilárdság a ragasztóanyag átlag kockaszilárdságával egyenesen arányosan nőtt (13. ábra), kihúzóási tönkrementelek esetében. (A ragasztóanyag átlag kockaszilárdságát 30 mm-es él hosszúságú kockákon mértük.)

A megfelelő utókezelés esetében cement alapú ragasztók alkalmazhatóak felületközeli elhelyezésben szalagszerű betétek beragasztásához. Víz alatt tárolt próbatestek tapadószilárdsága 25% nőtt azonos receptúrájú referenciahabarcshoz képest.

A referenciának tekintett műgyanta ragasztó esetében mért szilárdsági érték közel 50%-át mértük megfelelő utókezelés alkalmazása esetén.



13. ábra: Cement kötőanyagú ragasztók átlagos nyomószilárdságának hatása a tapadószilárdságára szalagszerű betétek felületközeli alkalmazása esetén (W a víz alatt szilárdult habarcst jelöli,  $l_b = 140$  mm)

#### 4.2. b CEMENT KÖTŐANYAGÚ RAGASZTÓK KÖR-KERESZTMETSZETŰ BETÉTEK ESETÉBEN

Kísérletileg igazoltam, hogy cement kötőanyagú ragasztók alkalmazhatóak az érdes felületű, kör keresztmetszetű betétek felületközeli beragasztáshoz. A betétek felületi megmunkálása révén az erőátadódás főként a mechanikai kapcsolaton alapszik. Kísérletileg igazoltam, hogy cement alapú ragasztók 48 órás elért tapadószilárdsága megfelelő, igazolva ezzel a műgyanta ragasztókkal szembeni versenyképességüket.

A megfelelő erőátadás érdekében a szálerősítésű polimer tönkrementele kerülendő cement alapú ragasztók esetében is. Kör keresztmetszetű betétek esetében jellemző volt a beton felhasadásos tönkrementele ragasztóanyagtól függetlenül. A legintenzívebb tönkrementel a bordázott felületű próbatestek (14.d ábra) esetében volt megfigyelhető.

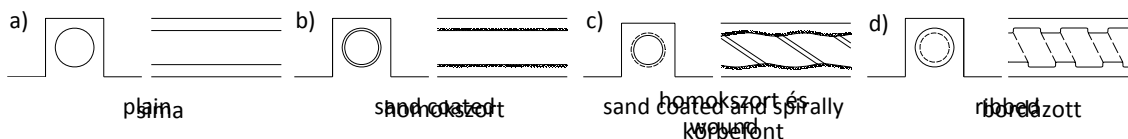
A homokszórt betétek (14.b) megfelelően rögzíthetők cementalapú ragasztók alkalmazásával a tapadószilárdság csökkenés csupán 26% volt (1. táblázat) a referencia értékhez viszonyítva (műgyanta ragasztó esetében mért értékek).

**1. táblázat:** Különböző felületi megmunkálású kör keresztmetszetű betétek felületközeli elhelyezésben mért tapadószilárdsága műgyanta és mikrofinomságú portland cement alapú ragasztók esetében.

Kör keresztmetszetű felületközeli betét típusa	B-8-SC	G-8-RB	C-6-SCW
Referencia érték. Tapadószilárdság műgyanta ragasztók esetében	8,7 N/mm <sup>2</sup>	11,5 N/mm <sup>2</sup>	14,9 N/mm <sup>2</sup>
Tapadószilárdság cement alapú ragasztók esetében. A ragasztástól mért két különböző időpontban	48 óra	5,9 N/mm <sup>2</sup>	4,2 N/mm <sup>2</sup>
	120 óra	6.5 N/mm <sup>2</sup>	4.8 N/mm <sup>2</sup>
		4.8 N/mm <sup>2</sup>	6.6 N/mm <sup>2</sup>

*Jelölések. B-8-SC: homokszórt bazaltszál erősítésű polimer, a kör keresztmetszet átmérője 8 mm; G-8-RB: barázdált üvegszál erősítésű polimer, a kör keresztmetszet átmérője 8 mm; C-6-SCW spirálisan körbefont és homokszórt felületű szénszál erősítésű, a kör keresztmetszet átmérője 6 mm*

A bordázott betétekre (14.d ábra) relatíve nagy tapadószilárdsági értékek voltak jellemzőek a lehorgonyzási hossz terhelt oldalán ezek a feszültségek fokozatosan közel lineárisan csökkentek a lehorgonyzási hossz mentén, cement alapú ragasztók esetében. Műgyanta anyagú ragasztók esetén, a tönkremenetel ridegebb volt, a lehorgonyzási hossz terhelt oldalán nagy feszültségekkel és viszonylag alacsony feszültségekkel a lehorgonyzási hossz mentén. Erre a rideg típusú tönkremenetelre jellemző volt a terhelt oldali bordák elnyíródása, mint elsődleges tönkremenetel (szálerősítésű polimer tönkremenetele) és központi beton felhasadása, mint másodlagos tönkremenetel. A bordák elnyíródása elkerülhető volt a cement kötőanyagú ragasztók esetében. A viszonylag kisebb tapadási szilárdsághoz egy kedvezőbb tönkremenetel párosult, kiemelve a cement kötőanyagú ragasztók használatának jelentőségét.



**14. ábra:** Felületközeli elhelyezésben alkalmazott betétek jellemző felületi megmunkálása

A cement kötőanyagú ragasztó halszálka szerű mikrorepedése (5. ábra A2b) mindegyik vizsgált betét esetében megfigyelhető volt, ez egy kedvező, progresszív tönkremenetelre utal, és a megfelelő erőátadódást igazolja cement kötőanyagú ragasztók esetében.

## **5 KUTATÁSI EREDMÉNYEIM JELENTŐSÉGE**

Jelen kutatás felületközeli megerősítések erőátadódásának vizsgálatára kidolgozott próbatestet és annak használatát mutatja be. A kapott eredmények segítik az erőátadódás általános megértését.

A kidolgozott kísérleti eljárás egy újszerű, L-alakú próbatest használatával teszi lehetővé a betétek kihúzó vizsgálata során a hosszirányú alakváltozások, illetve a próbatest keresztirányú alakváltozásainak mérését. Az értekezésben a kutatási módszert részletesen bemutattam. A próbatest alkalmazhatóságát az erőátadódást befolyásoló legkritikusabb paraméterekre igazoltam, ezért kijelenthetjük, hogy a kidolgozott kísérleti eljárás széleskörűen alkalmazható.

A jellemző tönkremeneteli módokat elsődleges és másodlagos tönkremeneteli módokra osztottam. A jellemző tönkremenetekkel kapcsolatban levont alapvető következtetések elősegítik a lejárásodó folyamatok megértését.

Az erőátadódást befolyásoló tényezőket megneveztem, és csoportosítottam. Kiemelten vizsgáltam a következő tényező: hatását

A horonyszélesség növelése a kapcsolati szilárdság csökkenését eredményezi ezért egy felső korlát bevezetését javasoltam. A betétnek a beton elemek perméhez közeli elhelyezése hátrányos lehet, a kifejlesztett próbatestet alkalmaztam a peremtávolság hatásának vizsgálatára. A perem keresztirányú alakváltozásainak mérése lehetővé teszi a minimális peremtávolság meghatározását. Javasoltam egy újszerű tényező bevezetését: a tapadási felület és keresztmetszet arányát, mely közvetlen módon jellemzi a sima felületű betétek kihasználtságát. Alkalmazása megkönnyíti a megfelelő megerősítő betét kiválasztását.

A geometriai tényezők mellett az anyagi tényezők erőátadódásra gyakorolt hatását is vizsgáltam. Igazoltam, hogy a megerősített elem anyagának a szilárdsága csak kismértékben befolyásolja a tapadószilárdságot. Cement alapú ragasztók használhatóságát is vizsgáltam. Kiemeltem az utókezelés jelentőségét szalag keresztmetszetű betétek esetében és a felületi megmunkálás jelentőségét kör keresztmetszetű betétek esetében. A cement alapú ragasztók indokolt esetben alkalmazhatóak felületközeli megerősítések beragasztásához.

## **6 TUDOMÁNYOS KI TEKINTÉS**

A részletesen bemutatott kutatásaim és az újonnan kifejlesztett, L-alakú próbatest lehetőséget nyújtanak felületközeli megerősítések kapcsolati szilárdságának részletes vizsgálatához. A bemutatott kutatási eredmények a felületközeli megerősítések általános viselkedésének megértéséhez is hozzájárulnak, és ez elősegítik a felületközeli megerősítések széleskörű alkalmazását az építőiparban.

A közölt tapasztalatok beépítése a készülő új szabványokba és műszaki előírásokba szükséges. Megjegyzem, hogy a jelenleg ismert szabványok és ajánlások csak érintőlegesen foglalkoznak felületközeli megerősítésekkel.

## 7 A TÉZISEKHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

### 7.1 FOLYÓIRAT CIKKEK

- [1] Szabó, K. Zs., Balázs, Gy. L. (2007), Near surface mounted FRP reinforcement for strengthening of concrete structures”, *Periodica Politechnica, Civil Engineering*, Vol. 51/1, pp. 33-38.
- [2] Balázs, Gy. L., Szabó Zs. K (2008), Experimental strength analysis of CFRP strips, *Concrete Structures, Annual Technical Journal of the Hungarian Group of fib*, Vol. 9, pp. 61-64.

### 7.2 KONFERENCIA KIADVÁNYBAN PUBLIKÁLT CIKKEK

- [3] Szabó, K. Zs. and Balázs, Gy. L. (2006), Comparison of bond capacities of externally bonded and near surface mounted fibres reinforced polymers, *Proceedings of the National Symposium Dedicated to the Day of Faculty of Civil Engineering of Iași* (szerk. Tarnu., et al.), május 19, pp. 173-179.
- [4] Szabó, K. Zs. (2006), Ecological aspects of fibre reinforced polymer strengthenings, *Proceedings 6<sup>th</sup> International Seminar on ECS*, (szerkesztők L. Végh, et al.), Prague, Czech Republic, pp. 73-79.
- [5] Szabó, K. Zs., Balázs, Gy. L. (2006), Felület közeli megerősítések elhelyezési lehetőségei, *X-ÉPKO* (szerk., Köllő), Csíksomlyó, Romania, június 14-16, pp 19-27.
- [6] Szabó, K. Zs., Balázs, Gy. L. (2006), Szálerősítésű polimerek külső illetve felülethez közeli elhelyezésben, *Doktori kutatások a BME Építőmérnöki karán* (szerk. Barna), Budapest, Magyarország, pp. 56-62.
- [7] Szabó, K. Zs., Balázs, Gy. L. (2007), Behaviour of near surface mounted fibre reinforced strengthenings, *3<sup>rd</sup> Central European Congress on Concrete Engineering, CCC2007* (szerkesztők Balázs, Nehme), szept. 16-17., Budapest, Magyarország, pp. 369-374.
- [8] Szabó, K. Zs., Balázs, Gy. L. (2007), Preliminary results of advanced pull-out test for near surface mounted fiber reinforced polymer strips, *Proceeding of the Int. Symp. on Composite Materials, Elements and Structures for Construction*, (Szerkesztők Bob, Stoiian), május 24-24, Temesvár, Románia, pp. 377-389.
- [9] Szabó, K. Zs. (2007), Felületközeli megerősítések lehetséges anyagai és módjai, *Doktori kutatások a BME Építőmérnöki karán* (szerk. Barna), Budapest, Magyarország, pp. 53-63.
- [10] Szabó, K. Zs., Balázs, Gy. L. (2008), Advanced pull-out test for near surface mounted CFRP strips, *Proceedings of Challenges for Civil Construction* (Szerk. Torres et al.), Porto, pp. 92-94, teljes cikk CD-n (8 oldal).
- [11] Szabó, K. Zs., Balázs, Gy. L. (2008), Experimental evaluation of bond strength for near surface mounted reinforcements, *Proceedings of 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Analytical models and new concepts in concrete and masonry structures*, AMCM2008 (szerkesztők. Kotynia és Garwin), június 9-11, Lodz, Lengyelország, pp. 305-306, teljes cikk CD-n (8 oldal).
- [12] Szabó, K. Zs. (2008), Pull-out test for near surface mounted FRP strips, *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International PhD Symposium in Civil Engineering* (szerk. Eligehausen és Gehlen), szept. 11-13, Stuttgart, Germany, pp. 173-175, teljes cikk CD-n (8 oldal).
- [13] Szabó, K. Zs., Fenyvesi, O., Balázs, Gy. L. (2008), Application of FRP strengthening using cement or epoxy based adhesives, *4<sup>th</sup> Central European Congress on Concrete Engineering, CCC2008* (eds. Radic and Bleiziffer), okt. 2-3, Opátia, Horvátország, pp. 543-548.
- [14] Szabó, K. Zs., Balázs, Gy. L., (2009), Influence of material properties on the efficiency of near surface mounted strengthenings, *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International fib Symposium on Concrete: Concrete 21<sup>th</sup> Century Superhero*, 22-24 June, London, England, teljes cikk CD-n (12 oldal).

- [15] Szabó, K. Zs., Balázs, Gy. L., (2009), Szálerősítésű polimerek tapadásának körvizsgálatai, *XIII.-ÉPKO*, (szerk. Köllő), Csíksomlyó, Románia, június 11-14, pp. 432-438.
- [16] Szabó, K. Zs., Balázs, Gy. L., (2010) Importance of boundary conditions on bond of NSM reinforcement, *3<sup>rd</sup> fib Congress and PCI Annual Convention*, máj. 29-jún. 2, Washington, USA, teljes cikk CD-n (12 oldal).
- [17] Szabó, K. Zs., Balázs, Gy. L., (2012) Primary and secondary failure modes in NSM strengthenings, *Proceedings of 9th International PhD Symposium in Civil Engineering*, (eds. Müller, Haist and Acosta), 22-25 July 2012, Karlsruhe, Germany, pp.697-703.

## 8 HIVATKOZÁSOK

- ASTM (2000), Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, D 3039/D 3039M.
- Asplund, S. O. (1949), Strengthening bridge slabs with grouted reinforcement. *ACI Structural Journal*, 1949, Vol. 45, Issue 1, pp. 397–406.
- Blaschko, M. A. (2001), Mechanical behaviour of concrete structures with CFRP strips glued into slits (Zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit Schlitze eingeklebten CFK-Lamellen), PhD Thesis, Technical University München, *Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau*, p. 147 (in German).
- CNR (2006), CNR-DT 200/2004: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. *National Research Council of Italy*, Rome, p. 143.
- Cruz, J. M. S. and Barros, J. A. O. (2002), Bond behavior of carbon laminates strips into concrete by pullout-bending tests. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Bond in Concrete—From Research to Standards* (eds. Balázs, Bartos, Cairns and Borosnyói), Budapest, pp. 614-622.
- de Lorenzis, L., Rizzo, A. and la Tegola, A. (2002), Modified pull-out test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete. *Composites: Part B: Engineering*, Vol. 33, pp. 589-603.
- Novidis, D., Pantazopoulou, S., Tenlouris, E. (2007), Experimental study of bond of NSM-FRP reinforcement. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 1760-1770.
- Seracino R, Jones M. N, Ali M. S. M., Page M. W., and Oehlers J. D. (2007), Bond strength of near-surface mounted FRP Strip-to-concrete joints. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 11, No. 4, pp. 401-409.

## 9 JELÖLÉSEK

- $a_e$  perem távolság  
 $A_f$  szálerősítésű polimer keresztmetszete  
 $f_{cm}$  átlagos beton nyomószilárdság  
 $f_f$  szálerősítésű polimer szakító szilárdsága  
 $F_{fu}$  kihúzóerő  
 $h_f$  szálerősítésű polimer szalag keresztmetszetének magassága  
 $h_g$  horony mélysége  
 $l_b$  tapadási hossz  
 $t_a$  ragasztóréteg vastagsága  
 $t_f$  szálerősítésű polimer keresztmetszet vastagsága  
 $t_g$  horony szélessége  
 $u_f$  tapadási kerület