



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM (BME)
É P Í T Ó M É R N Ő K I K A R
É P Í T Ó A N Y A G O K É S M É R N Ő K G E O L Ó G I A T A N S Z É K
1111 Budapest, XI., Műegyetem rkp. 3.

OTKA F61685

**SZÁLERŐSÍTÉSŰ POLIMER (FRP) BETÉTEK
TAPADÁSA BETONBAN**

Összefoglaló szakmai beszámoló

Témavezető:

Dr. Borosnyói Adorján
adjunktus

Tanszékvezető:

Dr. Balázs L. György
egyetemi tanár

2009. május 25.



Tartalomjegyzék

1. A KUTATÁS CÉLJA	2
2. ELÉRT EREDMÉNYEK	2
3. AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTHATÓSÁGA	12
4. A KUTATÁSI TÉMA TOVÁBBI LEHETSÉGES IRÁNYAI	12



1. A KUTATÁS CÉLJA

Vasbetonszerkezetek acélbetéteinek tapadása (együttlőgözása) meghatározó jelentőségű a szerkezeti elemek teherbírása és használhatósága szempontjából. Az acélbetéteknél tapasztalható korróziós károsodások miatt megjelentek a nem acél anyagú betétek, amelyeknél az elektrolitikus korrózió kizárt. Ezek szálerősítésű polimer (FRP) betétek, amelyeknek nem csak anyagi tulajdonságaik, hanem tapadásuk a betonban is eltér a hagyományos acélbetétektől.

Jelen kutatási program hiánypótló jelleggel olyan laboratóriumi vizsgálatokat végzett el, amelyek az FRP betétek betonnal való együttlőgözéséből származtathatók, így a szerkezettervezés számára elengedhetetlen alapadatokat szolgáltatnak. A kutatási program közvetlenül kapcsolódik a témavezető PhD kutatásaihoz is.

A kutatás célkitűzéseit voltak:

- 1) Jellegzetes felületi kialakítású FRP betétek tapadásának vizsgálata statikus rövid idejű terhelés alatt.
- 2) Minimális betonfedés vizsgálata beton próbatesteken erőtadódási szempontok alapján.
- 3) Magas hőmérséklet hatásának vizsgálata FRP betétek tapadására.

2. ELÉRT EREDMÉNYEK

A kutatási program megvalósítása során világossá vált, hogy a célkitűzésben megfogalmazott munkarészek akkor adnak igazán értékes, nemzetközi szinten is újszerű eredményeket, ha azokat felhasználva, kombinált vizsgálatokat is elvégzünk. Ezért került sor a kombinált vizsgálatok elvégzésére és a kísérleti paraméterek körének kibővítésére annak ellenére, hogy a munkatervben azok nem szerepeltek, és a laboratóriumi munka időtartamát jelentősen meg is növelték.

A laboratóriumi vizsgálatok 2008. év végére fejeződtek be, és az utolsó vizsgálati eredmények kiértékelése ekkor kezdődhetett.

Az elhúzódó laboratóriumi vizsgálatok következtében a publikációs tevékenység a kutatási program lezárása után, most indul, és az eredmények egyediségére való tekintettel számos nemzetközi folyóirathoz kéziratot fogunk benyújtani a közeli hónapokban.

2.1 Jellegzetes felületi kialakítású FRP betétek tapadásának vizsgálata statikus rövid idejű terhelés alatt

Kísérleteinkhez $\varnothing 5$ mm névleges átmérőjű, homokhintett felületű, szénszálal polimer feszítőhuzalokat használtunk fel (gyártó: NEDRI, Hollandia). Ez ugyanaz a termék, amelyet a témavezető a PhD kutatásai során már laboratóriumi vizsgálatokban tanulmányozott. A termék (Carbon-Stress[®]) anyagjellemzői a gyártó adatszolgáltatása szerint a következők:

Húzószilárdság: Carbon-Stress[®] AS: 2700 N/mm²

Szakítóerő: $\varnothing 5$ mm Carbon-Stress[®] AS: 55 kN

Rugalmassági modulus: $E = 155 \text{ kN/mm}^2 \dots 165 \text{ kN/mm}^2$ (száltartalomtól függően)

Szakadónyúlás: Carbon-Stress[®] AS: 1,7 %

Poisson tényező: $\nu = 0,3$ (statikus húzó kísérletek alapján)

Tartós szilárdság: a Carbon-Stress® több éves tartós terhelés mellett sem mutatott szilárdságvesztést

<i>Fáradás:</i> felső teherszint	$0,7f_{pu}$	$0,8f_{pu}$
feszültségamplitúdó	900 N/mm^2	600 N/mm^2
ismétlésszám	$>2 \times 10^6$	$>2 \times 10^6$

Relaxáció: 20°C -on, $0,7f_{pu}$ teherrel 1000 óra alatt a relaxáció 1%

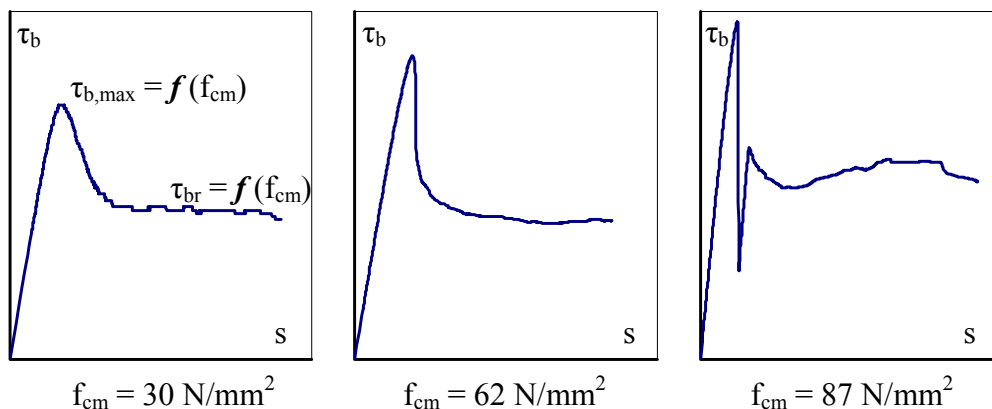
Kúszás: $0,8f_{pu}$ teherrel 3000 óra alatt a kúszás 0,01%

Erőátadódási hossz: homokszórt felületű $\varnothing 5 \text{ mm}$ betétek, $\ell_{bp} = 80 \dots 100 \text{ mm}$

<i>Hőtágulás:</i> tengelyirányú hőtágulási együttható	$+0,2 \times 10^{-6} \text{ m/m}^\circ\text{C}$
keresztirányú hőtágulási együttható	$+23 \times 10^{-6} \text{ m/m}^\circ\text{C}$

A felsorolt anyagjellemzőket a kísérleti program során nem mértük, vizsgálataink a tapadási jellemzőkre szorítkoztak.

A statikus kihúzó vizsgálatokhoz olyan próbatest-geometriát alkalmaztunk, amely mellett felhasadásos (elkerülendő) tönkremenetel nem jött létre, azaz a betonfedés nagy volt ($c_{\min} = 10\varnothing$). A vizsgálatokhoz azonos cementtel készített, $f_{cm} = 30 \dots 90 \text{ N/mm}^2$ átlagos nyomószilárdságú kvarckavics betonokat használtunk fel. A vizsgálatok igazolták azokat a szakirodalomban bemutatott, más kialakítású FRP betéteken tapasztalt jelenségeket, amelyek a tapadási jellemzőknek és a beton nyomószilárdságának az egyértelmű összefüggésére utalnak. E jellegzetességeket mutatja szematikusan az 1. ábra. Az ábrán kapcsolati feszültség (τ_b) – relatív elmozdulás (s) diagramok alakhelyes görbéit illusztráljuk, amelyek jelen kutatási program vizsgálati eredményei (az ábra magyarázó jellegénél fogva a diagramtengelyeken nincs skála).



1. ábra. Jellegzetes kapcsolati feszültség (τ_b) – relatív elmozdulás (s) diagramok

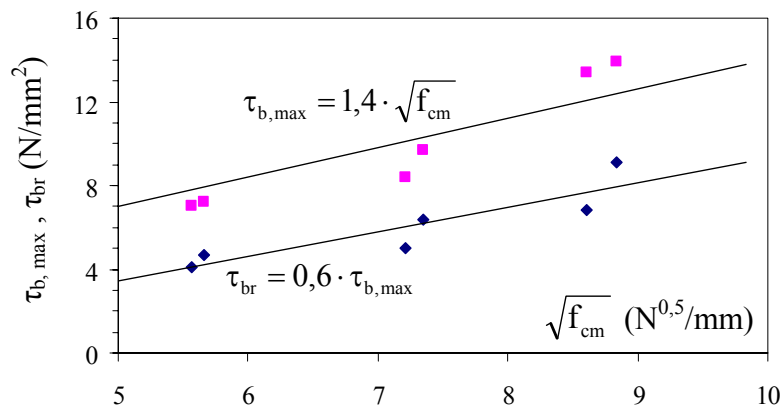
Szakirodalmi források általában a következő alakban adják meg a kapcsolati szilárdság ($\tau_{b,max}$) és a maradó kapcsolati szilárdság (τ_{br}) értékét:

- $\tau_{b,max} = k_1 \cdot \sqrt{f_{cm}}$ és
- $\tau_{br} = k_2 \cdot \tau_{b,max}$.

Jelen kutatási program eredményei szerint a megvizsgált, homokhintett felületű, szénszálalás polimer feszítőhuzalokra vonatkozóan, $f_{cm} = 30 \dots 90 \text{ N/mm}^2$ beton nyomószilárdsági tartományban a kapcsolati szilárdság ($\tau_{b,max}$) és a maradó kapcsolati szilárdság (τ_{br}) értéke felírható a következő alakban (20°C-on, statikus kihúzó vizsgálatra vonatkozóan):

- $\tau_{b,max} = 1,4 \cdot \sqrt{f_{cm}}$ és
- $\tau_{br} = 0,6 \cdot \tau_{b,max}$.

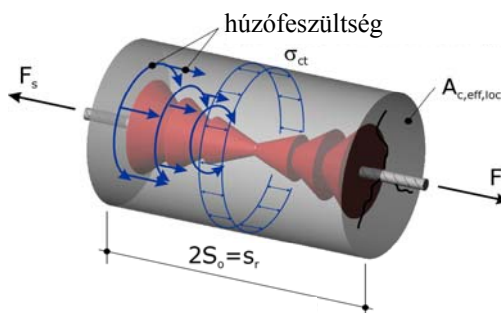
Az eredmények grafikus összefoglalását a 2. ábrán mutatjuk be. Megfigyelhető, hogy a $\tau_{b,max} = k \cdot (f_{cm})^{0,5}$ alakú függvénykapcsolat nem ideális.



2. ábra. Kapcsolati szilárdság, maradó kapcsolati szilárdság és betonszilárdság összefüggése
Megjegyzés: egy adatpont öt vizsgálati eredmény átlaga

2.2 Minimális betonfedés vizsgálata beton próbatesteken erőátadódási szempontok alapján

Vasbeton szerkezetekben a betétek és a beton erőátadódási mechanizmusa olyan igénybevételeket is ébreszt (a betétek körüli gyűrűirányú húzás formájában, 3. ábra), amelyek a vasbeton szerkezet felhasadásos tönkremenetelét, szétesését eredményezhetik. Ez ellen az egyik védekezési mód a megfelelő betonfedés alkalmazása.



3. ábra. Húzófeszültségek megoszlása húzott betét körüli betonban (Eckfeldt, 2008)

A betonfedés hatékonyságának egyik lehetséges laboratóriumi vizsgálati módja a betontestben külpontosan elhelyezett betétek kihúzó vizsgálata. Ekkor az egyik oldali betonfedés sokkal ki-

sebb, mint a próbatest többi oldalán alkalmazott betonfedés, így ezzel a felhasadással járó tönkremenetel irányítható, és a felhasadásos tönkremenetelt eredményező minimális betonfedés megkereshető.

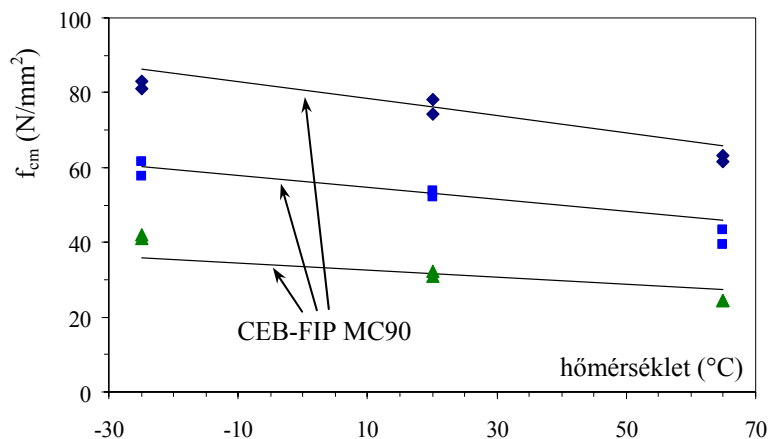
A felhasadásos tönkremenetel jellegzetesen a bordás betétek erőátadódási mechanizmusának a következménye, és a felhasadásos tönkremenetel bekövetkezésének kockázata a relatív bordafeület mértékének függvénye.

A jelen kutatási programban megvizsgált, homokhintett felületű, szénszálás polimer feszítőhuzalok nagy erőket képesek lehorgonyozni, kis erőátadódási hossz mellett, ami nagy átlagos kapcsolati feszültség kialakulását eredményezi. A felhasadás jelenségének tanulmányozása ezért indokolt. A témavezető korábbi vizsgálati tapasztalatai azt igazolták, hogy ezekkel a feszítőhuzalokkal, $c_{\min} = 2,5\varnothing$ betonfedés alkalmazása mellett (ahol \varnothing a CFRP huzalok névleges átmérője), $f_{cm} = 60 \text{ N/mm}^2$ nyomószilárdságú betonnal készíthetők előrefeszített gerendák, amelyeknél felhasadás sem a feszítőerő ráengedésekor, sem terhelés közben nem alakul ki.

Jelen kutatási program során $f_{cm} = 30 \dots 90 \text{ N/mm}^2$ beton nyomószilárdsági tartományban, a betonfedés mértékét $c_{\min} = 10\varnothing \dots 2\varnothing$ (azaz 50 mm ... 10 mm) értékek között változtatva végeztük el a kihúzó vizsgálatokat (ahol \varnothing a CFRP huzalok névleges átmérője). A vizsgálatok arra az eredményre vezettek, hogy a betonfedés mértéke nem befolyásolja a kapcsolati feszültség (τ_b) – relatív elmozdulás (s) diagramokat, és felhasadást a legkisebb betonfedések alkalmazása esetén sem sikerült elérni. Az eredmények a gyakorlat számára hasznos információt szolgáltatottak.

2.3 Hőmérséklet hatása az FRP betétek tapadására

A kísérleti programot úgy állítottuk össze (az eredeti munkatervet kibővítve), hogy a betonszerkezetek teljes használati hőmérséklet tartományára vonatkozóan kapjunk eredményeket, azért a statikus kihúzó vizsgálatokat elvégeztük -25°C és $+65^\circ\text{C}$ hőmérsékleteken is. A kihúzó vizsgálatok kiegészítéseként a beton nyomószilárdság vizsgálatát is elvégeztük ezeken a vizsgálati hőmérsékleteken. Úgy találtuk, hogy a betonszilárdság-hőmérséklet kapcsolatra közismert összefüggések megfelelő pontossággal leírják a jelenséget. Ennek szemléltetését (példaként a CEB-FIP Model Code 1990 javaslatára vonatkozóan) a 4. ábrán láthatjuk.

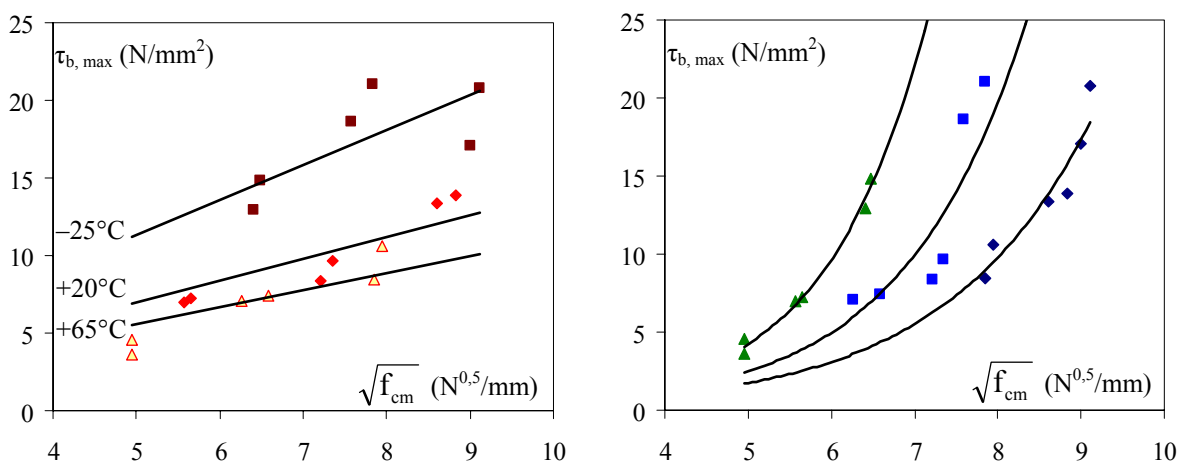


4. ábra. Vizsgálati hőmérséklet és beton nyomószilárdság összefüggése
Megjegyzés: egy adatpont öt vizsgálati eredmény átlaga

A jelen kutatási programban megvizsgált, homokhintett felületű, szénszálalás polimer feszítőhuzalok kapcsolati szilárdsága ($\tau_{b,max}$) és a vizsgálati hőmérséklet közötti összefüggést az 5. ábrán szemléltetjük. Feltételezve, hogy a jelenséget $\tau_{b,max} = k \cdot (f_{cm})^{0,5}$ alakú függvénykapcsolat írja le, azt találjuk, hogy:

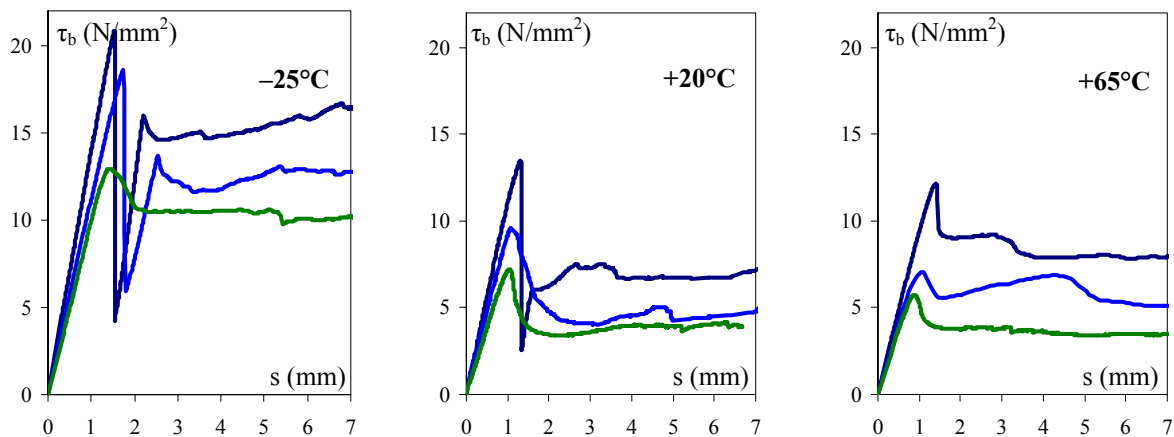
- $\tau_{b,max} = 2,3 \cdot \sqrt{f_{cm}}$ -25°C vizsgálati hőmérséklet esetén
- $\tau_{b,max} = 1,4 \cdot \sqrt{f_{cm}}$ $+20^\circ\text{C}$ vizsgálati hőmérséklet esetén (2. ábra)
- $\tau_{b,max} = 1,1 \cdot \sqrt{f_{cm}}$ $+65^\circ\text{C}$ vizsgálati hőmérséklet esetén

Az 5. ábrán is megfigyelhető, hogy a $\tau_{b,max} = k \cdot (f_{cm})^{0,5}$ alakú függvénykapcsolat nem ideális a jelenség leírására.



5. ábra. Vizsgálati hőmérséklet és kapcsolati szilárdság ($\tau_{b,max}$) összefüggése
Megjegyzés: egy adatpont három, ill. öt vizsgálati eredmény átlaga

A 6. ábrán jellegzetes kapcsolati feszültség (τ_b) – relatív elmozdulás (s) diagramokat mutatunk be a három betonszilárdságra vonatkozóan.



6. ábra. Vizsgálati hőmérséklet és kapcsolati feszültség (τ_b) – relatív elmozdulás (s) diagramok



2.4 Terhelési sebesség hatása az FRP betétek tapadására

Mivel a tartószerkezeteket az esetek többségében nem statikus terhelés éri, ezért szükségesnek éreztük, hogy a tapadási jellemzők és a terhelési sebesség összefüggésének tanulmányozásával is kiegészítsük az eredeti munkatervet. Megvizsgáltuk, hogy milyen terhelési sebesség tekinthető még normál használati tehernek, ugyanis a rendkívül nagy terhelési sebességeket, amelyek általában robbanás vagy becsapódás következtében alakulnak ki, nem szándékoztuk jelen kutatási program keretein belül tanulmányozni. Az 1. táblázatban Reinhardt (1987) nyomán összefoglaltuk a lökészerű terhek terhelési sebességeit.

Teher típusa	Terhelési sebesség, $\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)
Közlekedési terhek	10 ⁻⁶ – 10 ⁻⁴
Gázrobbanás	5 · 10 ⁻⁵ – 5 · 10 ⁻⁴
Földrengés	10 ⁻² – 10 ⁰
Cölöpverés	10 ⁻² – 10 ⁰
Repülőgép becsapódás	5 · 10 ⁻³ – 5 · 10 ⁻²
Kemény becsapódás	10 ⁰ – 10 ²
Nagy sebességű becsapódás	10 ² – 10 ⁵

1. táblázat. Lökészerű terhek terhelési sebességei (Reinhardt, 1987)

Vizsgálatainkban a terhelési sebességet (mind a kihúzó vizsgálatokhoz, mind pedig a kapcsolódó nyomószilárdság vizsgálatokhoz) a következő lépcsőkben alkalmaztuk:

- 4,63 × 10⁻⁵ s⁻¹
- 1,16 × 10⁻⁴ s⁻¹
- 4,63 × 10⁻⁴ s⁻¹
- 1,16 × 10⁻³ s⁻¹
- 2,31 × 10⁻³ s⁻¹
- 4,63 × 10⁻³ s⁻¹
- 4,63 × 10⁻² s⁻¹

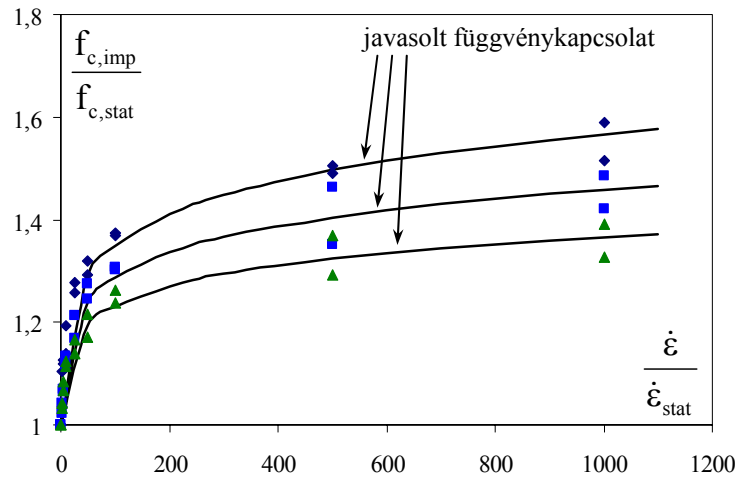
Az alkalmazott terhelési sebességek ezerszeres terhelési sebesség változás vizsgálatát tették lehetővé, és egyben lefedték a még normál használati tehernek tekinthető tartományt.

Vizsgálataink során olyan függvénykapcsolatot találtunk a beton nyomószilárdsága és a terhelési sebesség között, amely pontosabban írja le a jelenséget, mint a szakirodalomban található más javaslatok (pl. CEB-FIP Model Code 1990). A függvénykapcsolat alakja a következő:

$$\frac{f_{c,imp}}{f_{c,stat}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{stat}} \right)^n \quad \text{ahol: } n = \frac{1}{225} \left(7 + \frac{f_{c,stat}}{f_{c0}} \right) \quad (1)$$

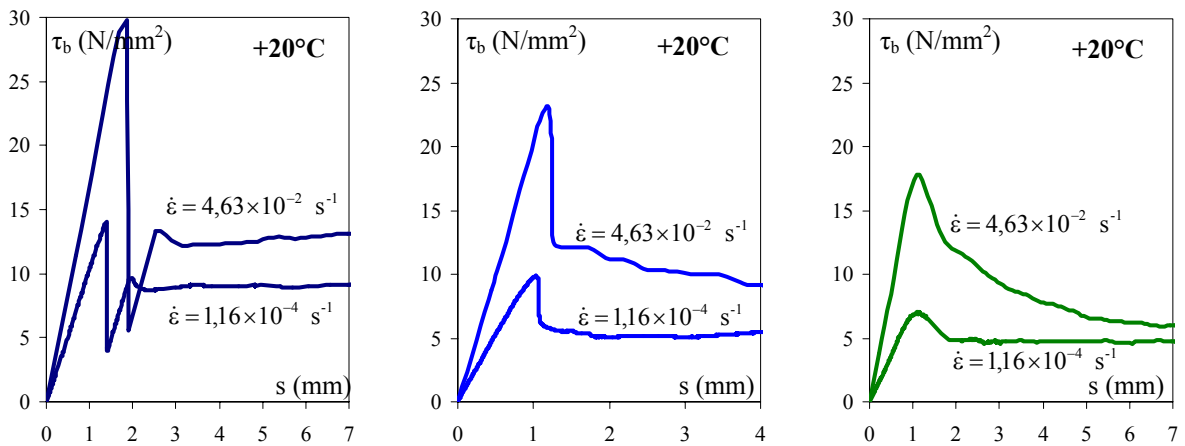
- $f_{c,imp}$ beton nyomószilárdsága lökészerű teher alatt (N/mm²)
 $f_{c,stat}$ beton nyomószilárdsága statikus teher alatt (N/mm²)
 $f_{c0} = 10$ N/mm²
 $\dot{\epsilon}$ lökészerű teher terhelési sebessége (s⁻¹)
 $\dot{\epsilon}_{stat}$ statikus teher terhelési sebessége (s⁻¹)

Az összefüggést a kísérleti program három betonösszetételére vonatkozóan a 7. ábrán szemléltetjük grafikus formában.



7. ábra. Beton nyomószilárdság és terhelési sebesség összefüggése
Megjegyzés: egy adatpont három, ill. öt vizsgálati eredmény átlaga

A 8. ábrán jellegzetes kapcsolati feszültség (τ_b) – relatív elmozdulás (s) diagramokat mutatunk be a három betonszilárdságra, illetve két-két terhelési sebességre vonatkozóan.

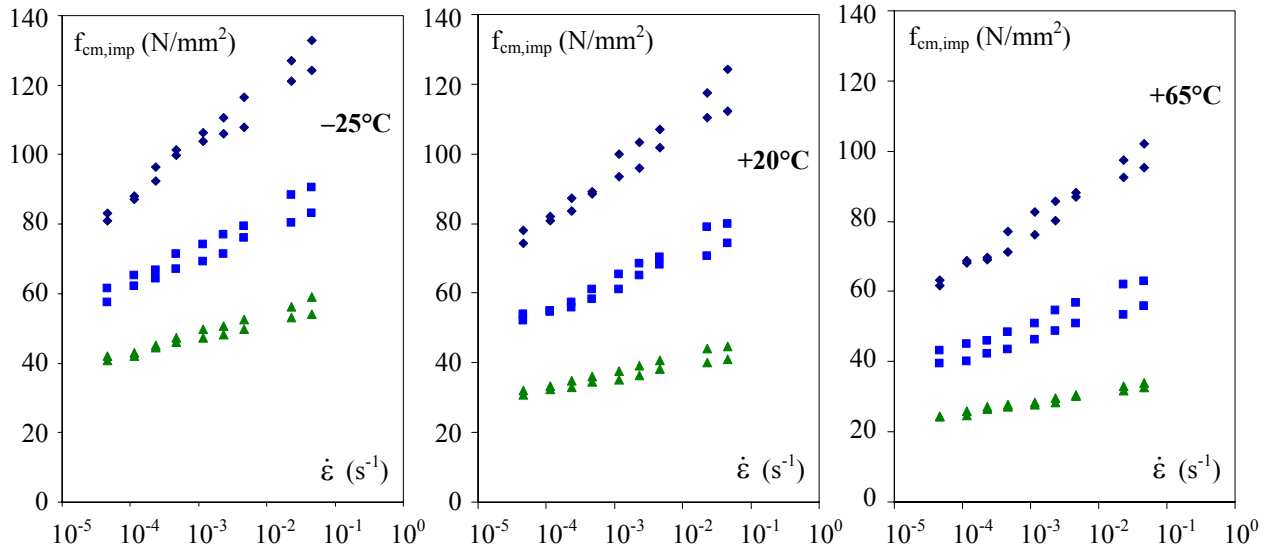


8. ábra. Terhelési sebesség és kapcsolati feszültség (τ_b) – relatív elmozdulás (s) diagramok

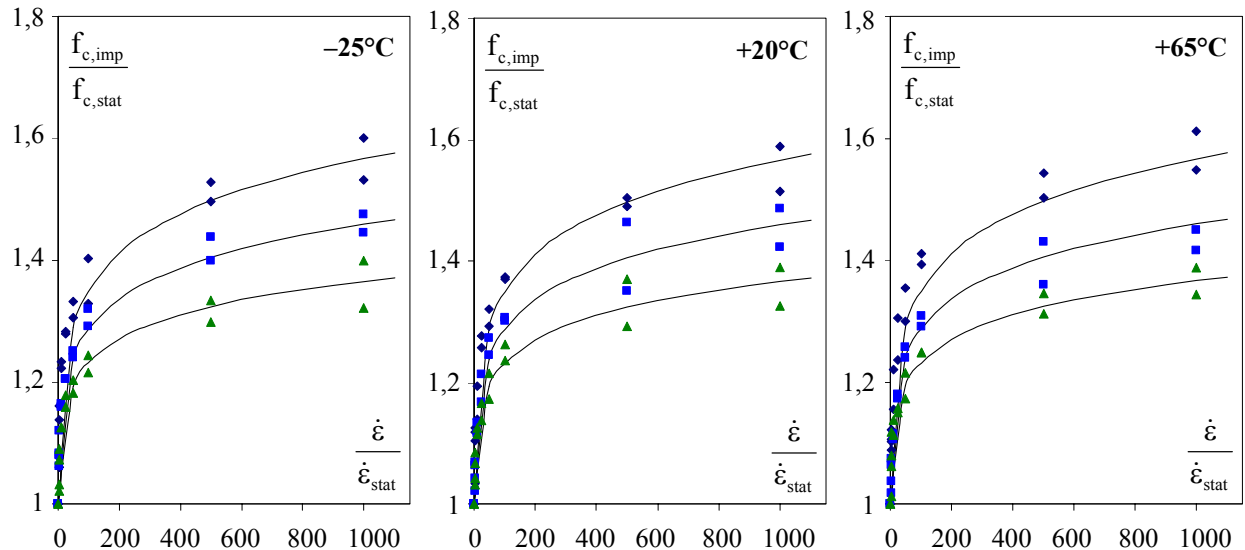
2.5 Kombinált vizsgálatok: a terhelési sebesség és a hőmérséklet együttes hatása az FRP betétek tapadására

Az elvégzett vizsgálatok rámutattak, hogy a vizsgálati hőmérséklet és a terhelési sebesség egyaránt szignifikáns hatást gyakorol a tapadási jellemzőkre, ezért a vizsgálatok további részében e két vizsgálati paraméter együttes hatását tanulmányoztuk.

A vizsgált betonok nyomószilárdságának változását a vizsgálati hőmérséklet és a terhelési sebesség függvényében a 9. ábrán adjuk meg.



9. ábra. Beton nyomószilárdság, vizsgálati hőmérséklet és terhelési sebesség összefüggése
Megjegyzés: egy adatpont három, ill. öt vizsgálati eredmény átlaga



10. ábra. Beton nyomószilárdság, vizsgálati hőmérséklet és terhelési sebesség összefüggése
Megjegyzés: egy adatpont három, ill. öt vizsgálati eredmény átlaga

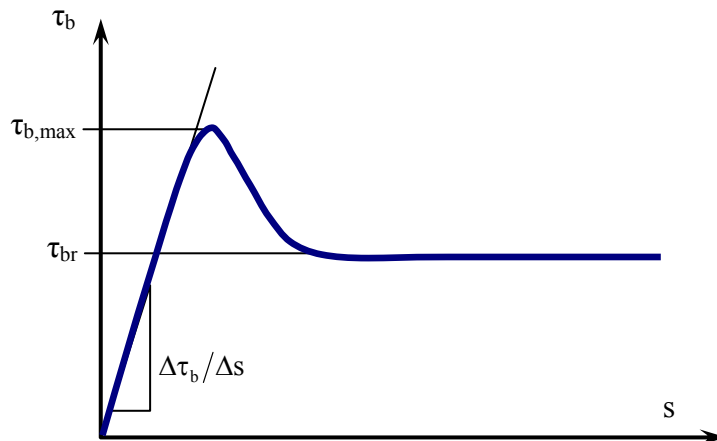
Vizsgálataink során úgy találtuk, hogy a korábban bemutatott függvénykapcsolat, amelyet a beton nyomószilárdsága és a terhelési sebesség között találtunk, alkalmas a jelenség leírására +20°C vizsgálati hőmérsékleten kívül is. Ennek illusztrálását a 10. ábrán láthatjuk. Megfigyelhető ebben az ábrázolási módban, hogy a megtalált függvénykapcsolat jól követi a mérési eredményeket. Az (1) jelű összefüggés tehát átírható a következő, általános alakra:

$$\frac{f_{c,imp}(T)}{f_{c,stat}(20^{\circ}C)} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{stat}} \right)^n \quad \text{ahol: } n = \frac{1}{225} \left(7 + \frac{f_{c,stat}(20^{\circ}C)}{f_{c0}} \right) \quad (2)$$

$f_{c,imp}(T)$	beton nyomószilárdsága lökészerű teher alatt, $T = -25^{\circ}C \dots +65^{\circ}C$ hőmérsékleten
$f_{c,stat}(20^{\circ}C)$	beton nyomószilárdsága statikus teher alatt, $T = +20^{\circ}C$ hőmérsékleten (N/mm^2)
f_{c0}	$= 10 N/mm^2$
$\dot{\epsilon}$	lökészerű teher terhelési sebessége (s^{-1})
$\dot{\epsilon}_{stat}$	statikus teher terhelési sebessége (s^{-1})

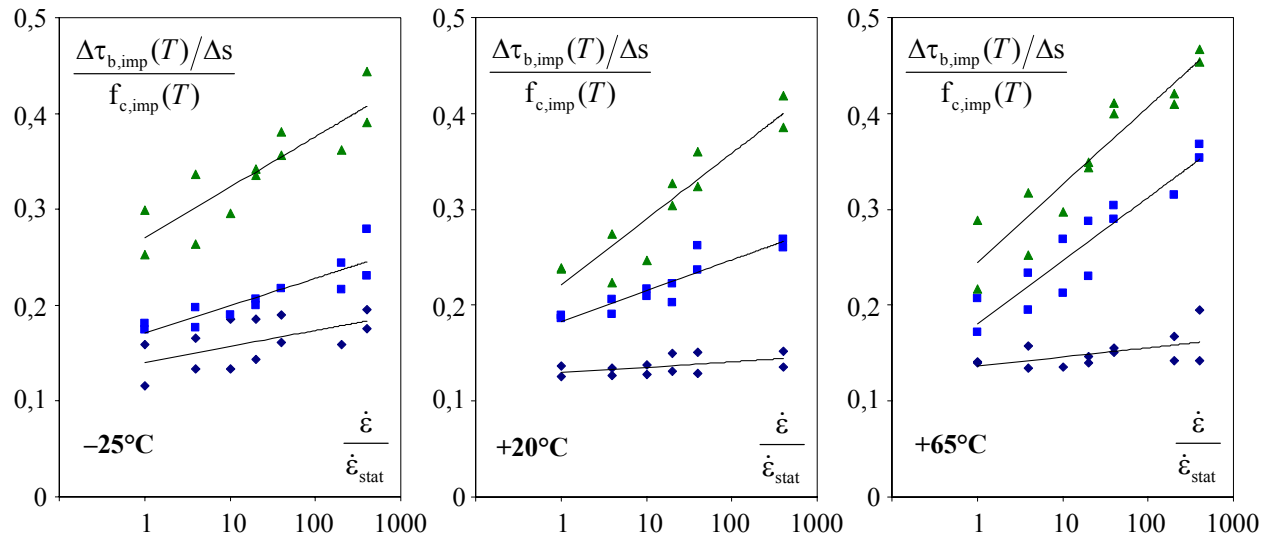
A kapcsolati feszültség (τ_b) – relatív elmozdulás (s) diagramoknak a vizsgálati hőmérséklet és a terhelési sebesség változtatására bekövetkező érzékenyen reakciójának megfigyelése érdekében célszerű, ha jellegzetes pontjaik változását ábrázoljuk a kísérleti paraméterek függvényében. A legegyszerűbben kijelölhető jellegzetes pontok a következők (11. ábra):

- a kapcsolati merevség ($\Delta\tau_b/\Delta s$),
- a kapcsolati szilárdság ($\tau_{b,max}$),
- a maradó kapcsolati szilárdság (τ_{br}).

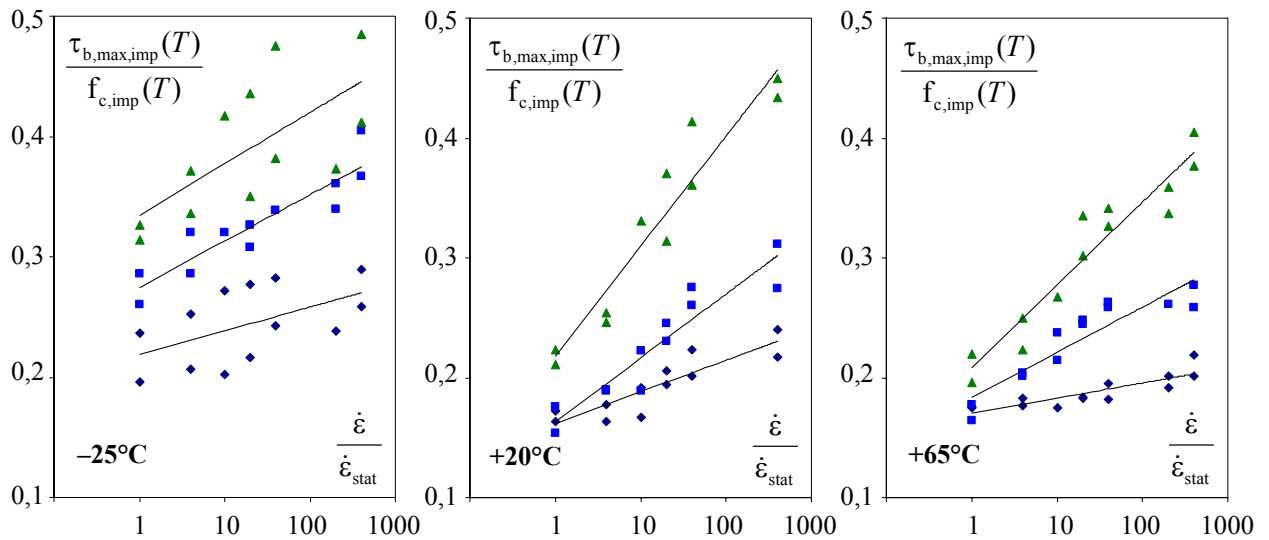


11. ábra. Kapcsolati feszültség (τ_b) – relatív elmozdulás (s) diagram jellegzetes pontjai

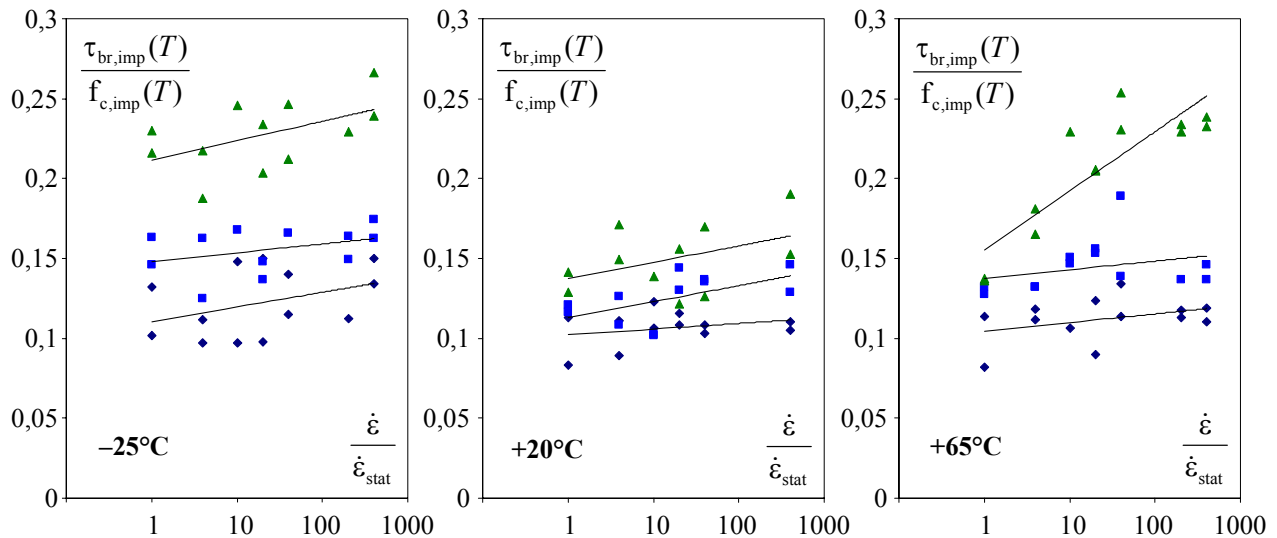
A 12-14. ábrán bemutatjuk a vizsgálati eredményeket. Megfigyelhető, hogy a tapadási jellemzők változását a betonban és a szén-szálal huzalban lejátszódó jelenségek egyaránt befolyásolják. A kapcsolati merevség ($\Delta\tau_b/\Delta s$) változása a legkevésbé érzékeny a terhelési sebességre a nagyszilárdságú betonkeverék esetén és leginkább érzékeny a terhelési sebességre a kis szilárdságú betonkeverék esetén, míg a vizsgálati hőmérséklettől csak a beton nyomószilárdság változásán keresztül függ (12. ábra). A kapcsolati szilárdság ($\tau_{b,max}$) esetén mindhárom betonkeveréknél azt figyelhetjük meg, hogy mindkét kísérleti paraméter hatása erős (13. ábra). Ebből az is következik, hogy a kapcsolati szilárdság érzékenyebben követi a hőmérsékletváltozást, mint a beton nyomószilárdsága önmagában. A maradó kapcsolati szilárdságok (τ_{br}) eredményei mutatják a legnagyobb szórást, de a megfigyelések itt is hasonlóak (14. ábra).



12. ábra. Kapcsolati merevség, vizsgálati hőmérséklet és terhelési sebesség összefüggése
Megjegyzés: egy adatpont három, ill. öt vizsgálati eredmény átlaga



13. ábra. Kapcsolati szilárdság, vizsgálati hőmérséklet és terhelési sebesség összefüggése
Megjegyzés: egy adatpont három, ill. öt vizsgálati eredmény átlaga



14. ábra. Maradó kapcsolati szilárdság, vizsgálati hőmérséklet és terhelési sebesség összefüggése
Megjegyzés: egy adatpont három, ill. öt vizsgálati eredmény átlaga

3. AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTHATÓSÁGA

Jelen kutatási program egyes eredményei közvetlenül hasznosíthatók a gyakorlatban, illetve elősegítik a tapadás jelenségének részletesebb megfigyelését és pontosabb modellezését. A kutatási eredmények segíthetik a szénszálas polimer feszítőbetétekkel készülő betonszerkezetek tervezési módszereinek pontosítását, a használati hőmérséklet és a terhelési sebességek figyelembe vételén keresztül. A tapadás jelenségének pontosabb megismerésével a kutatási eredmények elősegíthetik optimális felületi kialakítású szénszálas polimer feszítőbetétek fejlesztését.

4. A KUTATÁSI TÉMA TOVÁBBI LEHETSÉGES IRÁNYAI

Jelen kutatási program elvei további kutatásokban is célszerűen felhasználhatók, és más anyagú, illetve más felületi kialakítású szálerősítésű polimer (FRP) betétek tapadásának vizsgálatát, valamint azok optimális kialakításának fejlesztését segíthetik elő.

A tapadás kutatása betonban alapvető jelentőségű: a tapadás minősége és mechanizmusa közvetlen hatást gyakorol a szerkezeti elemek viselkedésére használati és tönkremeneteli határlapotban egyaránt. A jelen kutatási programban tanulmányozott vizsgálati paramétereken kívül célszerű és szükséges a szálerősítésű polimer (FRP) betétek tapadásának vizsgálata tartós terhelés alatt és fárasztó terhelés alatt is, lehetőség szerint kombinált vizsgálatokkal (hőmérsékleti hatások és a tartósságot, kémiai ellenállást befolyásoló hatások egyidejű jelenlétével).