

Betonszerkezetek korrózióállóságának biztosítása innovatív szálerősítésű polimer (FRP) anyagokkal

BOROSNYÓI Adorján ■ BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék
 ■ adorjan.borosnyoi@gmail.com

Érkezett: 2013. 04. 11. ■ Received: 11. 04. 2013. ■ <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.6>

Corrosion resistant concrete structures with innovative Fibre Reinforced Polymer (FRP) materials

Development and application of Fibre Reinforced Polymer (FRP) reinforcements in concrete structures have been accelerated in the last three decades. Durability of FRP reinforcements is expected to exceed that of conventional steel reinforcements as FRP reinforcements do not tend to corrode. Present paper intends to review experiences on characteristics of fiber reinforced polymers (FRP) for civil engineering applications and to discuss design considerations by applying FRP bars or tendons embedded in concrete as prestressed or non-prestressed reinforcement. Test results on FRP indicate high tensile strength, high fatigue strength as well as low relaxation and creep. Design recommendations are based on work carried out more than fifteen years ago on first generation reinforcing products. Design guidelines are necessary to enable the use of new materials, they should be made flexible enough to accommodate future developments and facilitate the quick adoption of innovative products. Present paper, therefore, introduces the most recent European research action (COST TU1207) that aims to develop a new generation of design guidelines for FRP materials based on European Standards.

Keywords: durability of concrete structures, Fibre Reinforced Polymers, FRP, COST TU1207

Kulcsszavak: vasbeton szerkezetek tartóssága, szálerősítésű polimerek, FRP, COST TU1207

1. Bevezetés

A szálerősítésű polimerek (FRP) építőmérnöki alkalmazása rendkívüli mértékben felgyorsult az elmúlt 15-20 évben. Ennek egyik oka, hogy a szálerősítésű polimerek (FRP) anyagai és előállításai költségei egyre alacsonyabbak évről-évre, illetve, hogy a szálerősítésű polimerek (FRP) számos nagyon kedvező tulajdonsággal rendelkeznek a hagyományos építőanyagokkal szemben. A leggyakrabban említett kedvező tulajdonságok, elsősorban az acéllal összehasonlítva a következők:

- teljes mértékű ellenállás az elektrokémiai korrózióval szemben,
- kedvezőbb szilárdság-önsúly arány,
- kiemelkedő tartósság a környezeti hatások legszélesebb skáláján,
- könnyű és gyors építhetőség, flexibilitás,
- nem mágnesezhetőség,
- kiemelkedő fáradási szilárdság, különösen a szénszálal anyagok esetén,
- kis hőtágulás és kis hővezető képesség,
- a mechanikai jellemzők változtatásának széles körű lehetősége különféle szálak és ágyazóanyagok kombinációjával.

Ezek az előnyök a szálerősítésű polimer (FRP) anyagok egyre szélesebb körű elterjedését eredményezik az építőiparban is, és a következő alapvető szerkezeti alkalmazások kifejlesztéséhez vezettek:

- szálerősítésű polimer (FRP) rudak bebetonozott betétként történő felhasználása nem-feszített vagy feszített betonszerkezetek építéséhez,

- szálerősítésű polimer (FRP) szalagok, lemezek, szövetek és betétek külsőleg, utólagosan elhelyezett felhasználása szerkezetek megerősítéséhez kő, beton, vasbeton, feszített vasbeton, acél, fa és falazott szerkezetekhez,
- szálerősítésű polimer (FRP) elemek és panelek felhasználása teljes egészében kompozit, vagy betonkompozit, acél-kompozit, fa-kompozit öszvér szerkezetekhez.

Azt is fontos felismerni, hogy az előnyös tulajdonságaik mellett a szálerősítésű polimer (FRP) anyagoknak kedvezőtlen tulajdonságai is vannak, amelyek az építőmérnöki alkalmazások erőteljes terjedésének az akadályát jelenthetik. Ezek között elsőként a magasabb anyagárakat szokták említeni, amely valóban többszöröse a szerkezeti acél árának. Azonban, ha egy szerkezet teljes élettartam költségeit vizsgáljuk meg, akkor a szálerősítésű polimer (FRP) anyagok kiemelkedő tartósságának köszönhetően gyakran ezekkel az anyagokkal valósítható meg a leggyorsabb építés lehetőségén keresztül, amely a kifejezetten idő-kritikus munkák esetén fontos tényező, elsősorban javításoknál és megerősítésekénél, ahol az üzemszünet vagy az ennek következtében létrejövő termelés kiesés költségei nagyon jelentősek is lehetnek. Hátrányként lehet még említeni, hogy a szálerősítésű polimer (FRP) anyagok hosszú távú tartósságáról viszonylag kevés vizsgálati adat áll rendelkezésre, hogy a szálerősítésű polimer (FRP) anyagok tűzállósága rendszerint gyenge, illetve, hogy az általános építőmérnöki gyakorlat számára a szálerősítésű polimer (FRP) anyagok viszonylag különlegesnek és kevésbé elfogadottnak számítanak. A tapasztalatok bővülésével azonban egyes, jelenleg még hátrányosnak ítélt tulajdonságok átértékelhetőek lesznek a jövőben.

BOROSNYÓI Adorján

Okl. építőmérnök, PhD, egyetemi docens a BME

Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékén.

Főbb kutatási területei: vasbetonszerkezetek használhatósági határállapotai, szálerősítésű

polimer (FRP) anyagok alkalmazása

betonszerkezetekhez, tapadás betonban,

roncsolásmentes anyagvizsgálatok.

Az építőanyag folyóirat felelős szerkesztője.

Az SZTE Beton Szakosztály elnöke. A fib TG4.1

„Serviceability Models” munkabizottság titkára.

2. A vasbeton tartóssága

A vasbeton szerkezeti anyag, illetve elődje a *ferrocement* (acélhuzal háló erősítésű cementkő), több mint 150 éves múlt-ra tekint vissza. 1849-ben Joseph *Monier* francia virágkertész acélhuzallal erősített cementkőből készített virágtartó edényeket. 1852-ben Francois *Coignet* francia iparos acélbetétekkel erősített betonnal kísérletezett, majd 1853-ban Párizsban megépített – a világon elsőként – egy vasbeton tartószerkezetű lakóházat. Módszerét egy évvel később szabadalmaztatta. Ugyancsak 1854-ben William Boutland *Wilkinson* Nagy-Britanniában jegyeztette be szabadalmát vasbeton szerkezetekre, és Newcastle környékén épített lakóházakat módszerével. Az 1855. évi párizsi *Exposition Universelle* világiállításon nyilvánosan is bemutatkozott az új építőanyag: *Coignet* szabadalma mellett Louis *Lambot* francia gazdálkodó is megmutatta ferrocement csónakját. *Monier* csak az 1867. évi világiállításon jelent meg különféle ferrocement tárgyakra vonatkozó szabadalmával. Bár e feltalálók némelyike nem is volt mérnök, megfigyeléseikkel és kiváló műszaki érzékükkel megalkottak egy új, összetett építőanyagot, amelyből napjainkra a legnagyobb tömegben használt szerkezeti anyag lett. *Monier* szabadalmában kiemelte, hogy a cement megvédi az acélt az oxidációtól és *korlátlan tartósságot* jósolt a ferrocement szerkezeteknek [1].

A vasbeton feltalálása után 100 évvel már ismert volt a mérnökök számára, hogy a *Monier* által feltételezett korlátlan tartósság csak addig biztosított, amíg a cementkő kémhatása nem csökken az acélbetétek környezetében pH 9 érték alá, azaz pl. a *karbonátosodás* (a cementkő kalcium-hidroxid tartalmának kalcium-karbonáttá alakulása a levegő szén-dioxid tartalmának hatására) nem éri el az acélbetétek mélységét.

A vasbeton rendkívül tartós is lehet, amennyiben a tervezés, a kivitelezés (bedolgozás, utókezelés) és a fenntartás megfelelő. A cementkő lúgos kémhatása mellett (a cement hidratációja során ugyanis nagy mennyiségű szabad $\text{Ca}(\text{OH})_2$ szabadul fel) a bebetonozott acélbetétek felületén korrózió ellenálló passzív réteg alakul ki. Ez a passzív réteg mindaddig védi az acélbetéteket, amíg a környező beton kémhatása $\text{pH} > 9$.

Tehát a korrózió kialakulásához betonban *négy tényezőnek együttesen* kell jelen lennie, amelyek a következők:

- 1) korrózióra alkalmas anyag (pl. gyengén ötvözött, melegen hengerelt betonacél),
- 2) oxigén,
- 3) víz (utóbbi kettő a kapilláris pórusokon keresztül képes a betonba hatolni),
- 4) a beton kémhatásának $\text{pH} < 9$ alá csökkenése (ez utóbbi a légkör CO_2 tartalmának hatására a cementkő karbonátosodása révén minden, levegővel érintkező beton-szerkezetenél létrejön bizonyos mélységig; minél kisebb a cementkő porozitása, annál kisebb a karbonátosodás mélysége).

További korróziós veszélyt jelentenek a betonba hatoló, a korróziós folyamatot katalizáló *klorid-ionok* (jégmentesítő sózásból vagy tengervízből).

A korrózió kialakulása elkerülhető, ha a fenti négy tényező bármelyikét kizárjuk a folyamatból. Így a korrózió elkerülésének ígéretes megoldását jelenti például a *korrózióálló, szálerősítésű*

polimer (FRP) betétek alkalmazása. Ily módon magát a korrodáló anyagot, az acélt vonjuk ki a korróziós folyamatból.

Már az 1950-es években megkezdődtek azok a kutatások, amelyek a beton és vasbeton szerkezetek tartósságának fokozását célozták. E kutatások egyik irányataként 1959-ben jelent meg az első publikáció, amely fölvetette az *acélbetétek helyettesítését* üvegszálalás polimer (GFRP) anyagú rudakkal [2]. Az úttörő jellegű javaslat azonban hosszú ideig nem talált folytatásra, mert a beton és a szálerősítésű polimer rudak között a *megfelelő tapadást* nem sikerült biztosítani.

3. Szálerősítésű polimerek az építőiparban

Az építőmérnöki gyakorlatban a betonszerkezetekhez felhasznált szálerősítésű polimer (FRP) betétek, szalagok és szövetek párhuzamosan futó (unidirectional), nagy szilárdságú szálakkal készülnek (szövetek esetében előfordul két irányban és négy irányban teherhordó szál-elrendezés is). Az FRP anyagok húzószilárdsága általában jelentősen meghaladja az acélbetétek húzószilárdságát, emellett azonban a szakadási nyúlásuk az acélé alatt marad. Ezek a különbségek a keresztmetszetek méretezésére jelentős hatást gyakorolnak.

Acélbetétek helyettesítése céljából mindig olyan szálerősítésű polimer rudakat használunk, amelyekben a teherviselő, nagy húzószilárdságú szálak azonos irányban, a rúd tengelyével párhuzamosan futnak. A szálerősítésű polimer betétek előállítására legáltalánosabb az ún. *pultrúziós eljárás*. A művelet első lépéseként a tekercselt, vagy egyéb módon szállított szálak irányítottóságát, párhuzamosságát állítják be, majd a szálköteget az ágyazóanyag fürdőbe mártást követően autoklávon húzzák keresztül, amelyben az ágyazóanyag bevonat előírt hőmérsékleten és nyomás alatt térhálósodik, megszilárdul. A betonszerkezetek használati hőmérséklet tartományában ($-25^\circ\text{C} \dots +65^\circ\text{C}$) az ágyazóanyagok üvegszerű állapotban vannak. A pultrúziós gyártással előállított, javarészt sima felületű rudak tapadása betonban nem megfelelő, ezért a méretre vágást megelőzően a betétek különféle felületkezelésben részesülnek. A jobb tapadás elérésének egyik lehetősége a sima felületű betétek homokhintéssel való ellátása, azaz nagy szilárdságú ragasztóval finom kvarchomok vagy alumínium-oxid szemcsék ráragasztása a felületre. Másik lehetőség a felületi egyenetlenségek vagy profilok kialakítása a betétek felületén. Ezek lehetnek spirális alakban feltekercselt és préseléssel felragasztott FRP kötegek, vagy speciális nagy szilárdságú kerámiából készített borda profilok, amelyek az acélbetétekhez hasonló külsőt kölcsönöznek az FRP betétnek. Az utólag elhelyezett rétegeknél fontos a megfelelő kémiai kötés biztosítása a külső és belső rétegek között, hogy lehetőleg ne alakuljon ki a bordák elnyíródásával vagy leszakadásával járó tönkremenetel. Bordás FRP betétek homokhintéssel is kerülnek forgalomba.

Az FRP betétek elektrolitikus *korrózióra nem hajlamosak*, így a hagyományos acélbetétek tartósságát messze meghaladó tartósságúak. Mivel az üvegszálak nem lúgállóak, a betonban alkalmazásuk fokozott figyelmet igényel, azonban az aramid és szénszálak esetén ilyen kérdés nem merül föl. Húzószilárdságuk és fáradási szilárdságuk általában meghaladja a nagyszilárdságú szerkezeti acélokét, emellett relaxációjuk és kúszásuk általában kisebb, mint az acéloké, így alkalmasak feszített be-

tonszerkezetek építésére is. FRP betétek mechanikai tulajdonságait a hazai szakirodalom is ismerteti [3].

Az építőmérnöki gyakorlatban az 1990-es évek óta vannak jelen az FRP betétek, és csak a hídépítés területén már több mint száz azon (híd)szerkezetek száma a világon, amelyekben FRP betéteket építettek be acélbetétek részleges vagy teljes körű helyettesítésére. Ezek egy része gyalogos- ill. kerékpárhíd, másik része közúti ill. autópálya híd, de találunk köztük elektromágneses lebegtetésű vasút hídgerendáit is. E hídszerkezetek kevés kivételtől eltekintve Japánban és Észak-Amerikában található, az európai alkalmazások száma tíz körüli [4-11]. Az elmúlt húsz év tapasztalatai rendkívül kedvezőek.

4. FRP betétek alapanyagai

Az FRP betétek nagy, általában 60–65V% száltartalommal rendelkező szálerősítésű polimerek. Szilárdsághordozó részeik a *szálak*, amelyeket polimer gyanta *ágyazóanyagba* ágyazunk. Az építőmérnöki alkalmazásokban megjelenő száltípusok a szén (grafit), az üveg és az aramid (aromás poliamid) szálak, illetve az utóbbi években a bazalt szálak. Ágyazóanyagként leggyakrabban epoxi, poliészter és vinilészter gyantákat alkalmaznak.

4.1 Ágyazóanyagok

Ágyazóanyagként hőre keményedő műanyagokat alkalmazunk az alacsonyabb ár és a megfelelőbb feldolgozhatóság miatt [12]. Legnagyobb mennyiségben epoxigyantákat használunk, amelyeknek előnye, hogy nagy szilárdságú, viszonylag jó hőállóságú szálerősített termékek állíthatók elő ezekkel, azonban az epoxigyanták a beton erősen lúgos kémhatásával szemben nem minden esetben ellenállóak. Telítetlen poliésztergyantákat, vinilészter, modifikált uretán és polietilén alapú műgyantákat is alkalmazhatunk, amelyek szintén kisebb hőmérsékleten, kis nyomáson kikeményíthetők, a szálakhoz jól tapadnak, azonban hőállóságuk csak 200°C-ig növelhető [13]. A beton lúgos kémhatásával szemben kiemelkedő ellenállása van a vinilészter gyantáknak.

Az ágyazóanyag szerepe nem csupán a szálak összetartása és a terhek elosztása a szálak között (különös tekintettel az esetlegesen elszakadt szálak terheinek továbbítására), hanem azok fizikai védelme is a keresztirányú hatásoktól (mivel a szálak keresztirányban sokkal kisebb szilárdságúak mint hosszirányban, a molekulák tengelyirányú orientációja miatt) [14].

Az FRP betétek ágyazóanyagainak dermedési/folyási hőmérséklete 120...140 °C feletti. *Rövid idejű terhelésre közel lineárisan rugalmasan, míg tartós terhelésre viskoelasztikusan viselkednek.* Két ágyazóanyag mechanikai jellemzőit az 1. táblázatban hasonlíthatjuk össze.

	Poliésztergyanta	Epoxigyanta
Szakítószilárdság (N/mm²)	450...800	600...800
Rug.modulus (kN/mm²)	20...30	30...40
Sűrűség (kN/m³)	12...14	12...13
Lin. hőtág. e. h. (10⁻⁶ 1°C)	110...140	60...95
Tartós hőállóság (°C)	100	110...130

1. táblázat Ágyazóanyagok tulajdonságai [13]
Table 1. Properties of resins [13]

4.2 Üvegszál

Az üvegszálak kifejlesztésétől, az elmúlt évszázad 30-as éveinek végétől kezdve az üvegszál-erősítésű polimer szerkezetek, tartószerkezetek fejlődése ugrásszerű volt, egészen a hetvenes évekig. A 70-es évek olajválsága a polimerek árát megnövelte, ezzel gátját képezve a tömeges alkalmazásnak, azonban a fejlesztések ma is tovább folynak. Nem szabad megfeledkeznünk arról, hogy az üvegszálakhoz leggyakrabban alkalmazott ún. E-üveg (boroszilikátüveg) *nem alkáliálló*, így a beton erősen lúgos kémhatásának (pH 12–13,5) külön védelem nélkül ellenállni nem képes. Lúgos környezetben az alkáliálló, ún. AR (Alkaline Resistant), nagy ZrO₂ tartalmú üvegszálak károsodása sem teljesen kizárt [15]. Emiatt az elmúlt évszázad 90-es éveiben némileg visszaesett az üvegszálak betétként történő alkalmazása, és felerősödött az alkáliálló szálak kutatása.

Az üvegszálakat 10 µm körüli átmérővel gyártják [16]. A különböző adalékokat tartalmazó üvegolvadékot platina lemezre folytatják, amelyen több száz darab, 1-2 mm átmérőjű furat van, majd az egész köteget megfogva azt olyan sebességgel húzzák, hogy a kívánt, 10 µm körüli szálátmérő kialakuljon. Ügyelni kell, hogy a szálak egymással ne érintkezzenek, mert az károsodásukhoz vezet. Ezt bevonószerekkel érik el. A kész szálakat feltekerceslik szállításhoz. Üvegszálak mechanikai jellemzőit a 2. táblázatban foglaltuk össze.

4.3 Aramidszál

Az üvegszálak polimer betétekkel szerzett első tapasztalatokkal egy időben kezdődött egyéb szintetikus szálak kifejlesztése a vegyiparban. Ezek egyike az *aramid*, amely krisztallitos szerves vegyületből, aromás poliamidból áll. Az aramid nagy húzószilárdságú és rugalmassági modulusú mesterséges szerves szál, így mérnöki alkalmazásra kiválóan alkalmas. Gyártási eljárására (PPD, illetve TDC monomerek polikondenzációja) jelen tanulmányunk keretein belül nem térünk ki [17,18].

Erős savak és lúgok idővel az aramid másodlagos kötéseit roncsolják, ami az anyag degradálódását (= polimerizációs fok csökkenése a mechanikai tulajdonságok romlása mellett) eredményezheti. Ezért úgy fogalmazhatunk, hogy az aramidszál-erősítésű polimer (AFRP) betétek a betonszerkezetek használati időtartama alatt tekinthetők alkáliállóknak.

Aramid szálak 10-12 µm körüli szálátmérővel és különböző rugalmassági modulusokkal készülnek. Rugalmassági modulusuk szerint megkülönböztethetünk normál rugalmasságú NM (E = 70-80 kN/mm²), közepes rugalmasságú IM (E = 90-100 kN/mm²) és nagy rugalmasságú HM (E = 120-180 kN/mm²) aramidokat. A különböző gyártók aramid termékeit eltérő márkánévvvel hozzák forgalomba (pl. Kevlar® - DuPont; Twaron® - AKZO; Technora® - Teijin, stb.). Aramidszálak mechanikai jellemzőit a 2. táblázatban láthatjuk.

4.4 Szénszál

A CFRP betétekben használatos szálakat nagy molekulájú polimerből: poli-akril-nitrilből (PAN), vagy kőszénkátrányból (coal tar pitch) állítják elő [14,19]. A PAN alapú szálak drágábbak és a grafitosítási eljárásuk is idő-, és energiaigényesebb, de jobb minőségű terméket eredményez. A kőszénkátrány alapú

szálak szilárdsági tulajdonságai általában mintegy 20%-kal maradnak alatta a PAN alapú szálakénak.

A szál maga szintén kompozit, ugyanis nem a teljes széntartalom van jelen grafitkristályok formájában. Minél nagyobb a grafitkristályok aránya, annál nagyobb a szál rugalmassági modulusa. A grafitkristályokat gyártás közben nyújtják, így a molekulalánc párhuzamos lesz a szál tengelyének irányával, majd ezt a helyzetet rögzítik vegyi folyamatokkal.

Bár a *szén és grafit* elnevezést egyaránt használhatjuk a szálak megnevezésére, van köztük különbség, mégpedig az anyag homogenitásában. Ugyanis, amíg a *szénszálak* 93...95% széntartalmúak, addig a *grafitszálak* széntartalma többnyire meghaladja a 99%-ot. Nagy szilárdságú szénszálak polimer szerkezeti elemek általában grafitszálak felhasználásával készülnek. A legnagyobb különbség a két termék hőkezelésében van, ugyanis ha a szálakat magasabb hőmérsékleten nyújtják, a rugalmassági modulus növelhető. A szénszálak grafitosítási eljárása 1300°C-on történik, a grafitszálaké pedig 2000...3000°C-on. A grafitszálak nagy szilárdságúak és rugalmassági modulusúak [16].

Kétféle típust különítenek el a szálak között: a kisebb rugalmassági modulusúval de nagy szilárdsággal rendelkező HT-típus (HT= high tension) és a nagyobb rugalmassági modulusú, de kisebb szilárdságú HM-típus (HM= high modulus). A szilárdság és a rugalmassági modulus egymással fordított arányban állnak. Szénszálak mechanikai jellemzőit a 2. táblázatban láthatjuk.

	üvegszál	aramidszál	szénszál
Húzószilárdság (N/mm²)	2300-4500	3000-3600	2300-7000
Rug. modulus (kN/mm²)	72-87	63-180	150-800
Szakadónyúlás (%)	2,6-5,7	2,0-4,1	0,3-1,8
Poisson tényező (-)	0,22	0,33-0,38	0,35
Lineáris hőt. Hosszir.	5-15	-6,0 ... -2,0	-0,9 ... +0,7
e.h. (1/°C) Keresztir.	5-15	55-60	8-18
Térf. súly (kN/m³)	24-25	13,9-17,8	17-19

2. táblázat Szálak mechanikai tulajdonságai
Table 2. Mechanical properties of fibres

5. FRP betétek mechanikai tulajdonságai

Az FRP betétek – többek között inhomogenitásuk következtében – az acélbetétektől eltérően viselkednek. Az inhomogenitás nem csupán abból adódik, hogy az anyag szálerősítésű, hanem abból is, hogy a gyártás során a betétek külső rétegét általában ágyazóanyagban sokkal gazdagabbá teszik a különböző felületkezelési eljárások (homokhintés, bordák elhelyezése, stb.) miatt, vagy egyszerűen csak a szálak védelme érdekében. Így kialakul a betétekben egy belső, nagyobb száltartalommal rendelkező, tengelyirányban teherhordó mag.

A betétek hosszirányú tulajdonságait alapvetően a szálak határozzák meg, míg a keresztirányú viselkedést az ágyazóanyag is jelentősen befolyásolja. Az FRP betétek hossz- és keresztirányú jellemzői ezért lényegesen eltérnek egymástól.

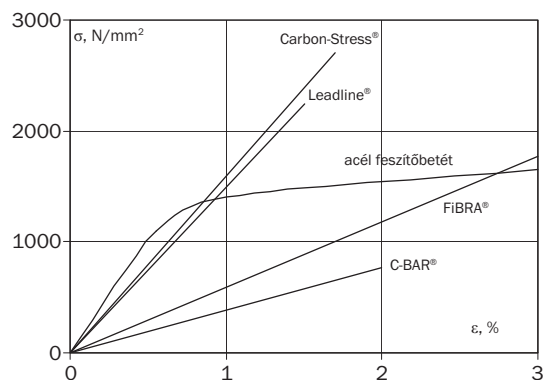
Az FRP betétek húzószilárdsága és rugalmassági modulusa a szálak típusától, a szálak hosszteneggel bezárt szögétől, a száltartalomtól, a keresztmetszet alakjától és az ágyazóanyag

típusától függenek. A húzószilárdságot ezen kívül még a betétek átmérője is befolyásolja (acélbetéteknél ilyen hatás nincs), mert a keresztmetszet közepén lévő szálak kevésbé vesznek részt a teherviselésben, mint a keresztmetszet széleihez közelebb esők. A betétek felületén, a betonról átadódó nyíróerő hatására az egyes elemi szálakban eltérő alakváltozás (feszültség) ébred az ágyazóanyag alakváltozóképesége miatt. Így nagyobb átmérőjű betétek fajlagos húzószilárdsága kisebb (vagyis a szilárdság növekedése csökkenő tendenciájú az átmérő növelésével).

Az FRP betétek lényeges tulajdonsága, hogy statikus terhelés hatására lineárisan rugalmasan viselkednek egészen a tönkremenetelig, majd ridegen szakadnak. Folyási jelenséget nem mutatnak.

FRP betétek húzószilárdsága 700-3500 N/mm², rugalmassági modulusa 38000-300000 N/mm², szakadónyúlása 0,8-4,0% tartományban lehet. Az 1. ábrán különböző FRP betétek és egy acél feszítőpászma jellegzetes $\sigma - \epsilon$ diagramjait láthatjuk (Leadline® és Carbon-Stress® szénszálak betétek, FiBRA® aramidszálak betét, C-BAR® üvegszálak betét) [3].

Szálerősítésű polimeren minden anyagjellemző (szilárdság, rugalmassági modulus, Poisson-tényező, stb.) irányfüggő, azaz a vizsgált irány és a szálak tengelye által bezárt szög függvénye. Az anyagjellemzők általában szélső értékeket vesznek fel a szálak tengelyével párhuzamosan ($\phi = 0^\circ$), illetve a szálak tengelyére merőlegesen ($\phi = 90^\circ$) vizsgálva.



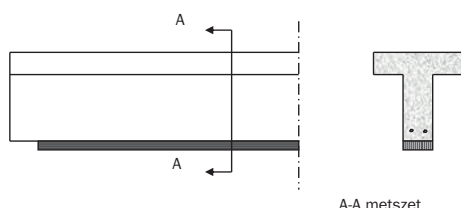
1. ábra FRP betétek $\sigma - \epsilon$ ábrái [3]
Fig. 1. $\sigma - \epsilon$ diagrams of FRP reinforcements [3]

6. További alkalmazási lehetőségek

Az 1990-es évektől kezdve egyre nagyobb mennyiségben használunk föl az építőmérnöki gyakorlatban szálerősítésű polimer (FRP) anyagokat szerkezetek javítása és megerősítése során is. A szálerősítésű polimer (FRP) anyagokat kő, falazott szerkezetek, beton, vasbeton, feszített vasbeton, acél, alumínium és fa anyagú szerkezetek javítása és megerősítése során alkalmazták sikerrel. A szálerősítésű polimer (FRP) anyagok az acélbetétek, feszítőbetétek helyettesítésén túlmenően felhasználhatók a megépült vasbeton szerkezetek hajlítási-, nyírási- és nyomási teherbírásának a növelésére is. A megerősítés során többnyire a szálerősítésű polimer (FRP) szalagokat vagy szövetet a betonfelületre ragasztjuk (EBR = Externally Bonded Reinforcement), vagy utólagosan kialakított horonyba ragasztva (NSMR = Near Surface Mounted Reinforcement) helyezük el.

6.1 Hajlítási megerősítés

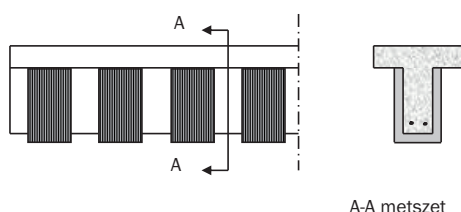
A szálerősítésű polimer (FbRP) anyagok gerendák alsó oldalsó felületeire, illetve lemezek alsó felületére rögzíthetők ragasztóanyaggal. A szálerősítésű polimer (FRP) anyag a szerkezet húzási vasalásának kapacitását kiegészítve növeli a hajlítási teherbírást. A szálerősítésű polimer (FRP) anyagokat úgy helyezük el, hogy a szálak a gerenda tengelyével párhuzamosan, illetve a lemez megerősíteni kívánt teherhordási irányával párhuzamosan helyezkedjenek el. Egy gerenda megerősítés sémáját mutatja a 2. ábra.



2. ábra Vasbeton gerenda hajlítási megerősítésének sémája szálerősítésű polimer (FRP) szalag alkalmazása esetén
 Fig. 2. Schematic representation of a reinforced concrete beam strengthened in flexure by FRP strips

6.2 Nyírási megerősítés

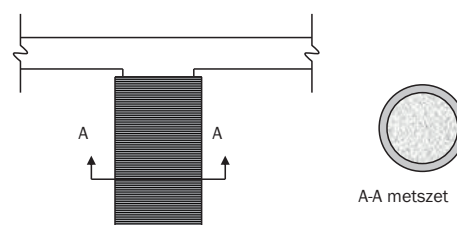
A szálerősítésű polimer (FRP) anyagokat gerendák oldalsó felületein (esetenként az alsó és oldalsó felületeket is érintve, U-alakban) helyezük el, illetve pillérek esetén a kengyelek vonalát követve, vagy a teljes felületet befedően alkalmazzuk. A szálerősítésű polimer (FRP) anyag a szerkezet nyírási vasalásának, kengyeleinek kapacitását kiegészítve növeli a nyírási teherbírást. Egy gerenda megerősítés sémáját mutatja a 3. ábra.



3. ábra Vasbeton gerenda nyírási megerősítésének sémája szálerősítésű polimer (FRP) szövet alkalmazása esetén
 Fig. 3. Schematic representation of a reinforced concrete beam strengthened in shear by FRP sheets

6.3 Oszlopok megerősítése

Vasbeton oszlopok megerősítése során abroncsszerűen helyezük el a szálerősítésű polimer (FRP) szalagokat vagy szövetet a betonfelületen. Terhelés közben a nyomott szerkezetek keresztirányban méretnövekedést szenvednek el, amelyet az elhelyezett szálerősítésű polimer (FRP) anyagok gátolnak. A gátolt alakváltozás miatt a betonban háromtengelyű (triaxiális) feszültségállapot alakul ki. A teherbírás növekedése ezzel valósul meg, ugyanis a beton háromtengelyű feszültségállapotban számottevően nagyobb nyomószilárdsággal és nagyságrendekkel nagyobb törési összenyomódással bír, mint egytengelyű feszültségállapot esetén. Oszlopok megerősítése során a szálak iránya az esetek többségében merőleges a szerkezeti elem tengelyének irányára. Egy oszlop megerősítés sémáját mutatja a 4. ábra.



4. ábra Vasbeton oszlop megerősítésének sémája szálerősítésű polimer (FRP) szövet alkalmazása esetén
 Fig. 4. Schematic representation of a reinforced concrete column strengthened by FRP sheets

6.4 Módszerek

A szerkezetek megerősítésére használt szálerősítésű polimer (FRP) anyagok beépítésének a módszereit alapvetően két csoportba, a nedves eljárások (*wet lay-up*) és a száraz eljárások (*dry lay-up*) közé szokás sorolni. A nedves eljárás során, jellegzetesen szálerősítésű polimer (FRP) szövet felhasználása történik, amikor a szálanyagot a beépítés helyszínén vonják be epoxigyantával, és a gyantával átítatott „nedves” állapotban történik a beépítés. A felhordott epoxigyanta szolgál egyben a szálerősítésű polimer (FRP) ágyazóanyagául, illetve a megerősítési rendszer ragasztóanyagául. A száraz eljárás során a kikeményített, szálerősítésű polimer (FRP) szalagokat, vagy a „száraz”, előimpregnált szövetet epoxigyanta ragasztóanyaggal ragasztják a megerősítendő szerkezet felületére. Ez utóbbi eljárás hasonlít leginkább az évtizedekkel korábban kifejlesztett, felragasztott acél szalagos megerősítésre, és részben hordozza is annak azt a hibáját, hogy sokkal kevésbé flexibilisen működő megerősítési módszer, mint a szálerősítésű polimer (FRP) szövetek felhordása nedves eljárással.

Ki kell hangsúlyozni, hogy a szálerősítésű polimer (FRP) anyagokkal történő megerősítés jellegzetesen tapadás-érzékeny alkalmazás, ami azt jelenti, hogy a megerősítendő szerkezet felületének fogadóképesnek kell lennie a szálerősítésű polimer (FRP) anyagok epoxigyantával történő rögzítéséhez.

A terület szakirodalmi gazdag. Az érdeklődő olvasó további részleteket talál pl. [20,21] irodalomban.

7. Szabványosítási törekvések

A szálerősítésű polimer (FRP) anyagok építőmérnöki alkalmazási lehetőségeinek vizsgálatára 1987-ben a Japán Építőmérnökök Szövetsége (JSCE, Japan Society of Civil Engineers) és a Kanadai Építőmérnökök Szövetsége (CSCE, Canadian Society of Civil Engineers) egy-egy munkabizottságot alakított, amelyek 1991-ben és 1992-ben jelentették meg első tanulmányaikat. Az Amerikai Betonszövetség (ACI, American Concrete Institute) 1992-ben, a Nemzetközi Betonszövetség (*fib*, *fédération internationale du béton*) 1996-ban alapította meg hasonló bizottságait. Kanadában 1995-ben létrehozták az ISIS Canada Research Network kutatóhálózatot, amelynek elsődleges célja a szálerősítésű polimer (FRP) anyagok építőmérnöki alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata volt. Az első alkalmazási, méretezési javaslat sorozatot 1996-ban adták ki Japánban, majd ezt további országokban újabbak követték: 1999 Egyesült Királyság, 1999 Svédország, 2001 Kanada, 2001 Egyesült Államok, 2002 Hollandia, 2004 Olaszország,

2008 Ausztrália. A Nemzetközi Betonszövetség (*fib*) 2000-ben, 2001-ben és 2007-ben adott ki olyan Bulletin-eket, amelyek a szálerősítésű polimer (FRP) anyagok betonszerkezetekhez történő alkalmazási lehetőségeit tárgyalta. A Nemzetközi Betonszövetség (*fib*) legújabb mintaszabványát, a *fib* Model Code 2010 végleges verzióját 2013-ban adták ki, amely már tartalmaz FRP anyagokra vonatkozó szakaszokat. A jelenleg érvényben lévő Eurocode szabványokból azonban egyelőre hiányoznak az FRP anyagok alkalmazására vonatkozó fejezetek.

A bemutatott tudományos bizottsági munka mellett sok ezer konferencia cikk és folyóirat cikk is napvilágot látott az elmúlt évtizedekben, amely a téma iránti jelentős érdeklődés mellett azt is bizonyítja, hogy a területen folyamatos a kutatás és a fejlesztés nemzetközi szinten.

A nemzetközi szabványosítás jelentőségét felismerve, több európai uniós előzményt követően 2013-ban elindult a COST Action TU1207 „Next Generation Design Guidelines for Composites in Construction” kooperáció, amelynek egyik kifejezett célja, hogy európai koordinációval nemzetközi kommunikációs platformot létesítsen a terület kutatói számára abból a célból, hogy a tevékenységük összehangolásával rövid időn belül lehetséges legyen az Eurocode szabványok kibővítése az FRP anyagok alkalmazására vonatkozó fejezetekkel. A kooperációban részt vesz a *fib* és RILEM munkabizottságok képviselőin túlmenően a CEN érintett bizottságának képviselője, illetve szabadon csatlakozhat bármely COST régióba tartozó ország. Jelen cikk megjelenésének pillanatában a résztvevő országok száma 22, amely azonban tovább növekedhet még. A COST Action TU1207 kooperáció eredményei folyamatosan nyomon követhetők a program weboldalán [22].

8. Összefoglalás

A korróziós károsodás következtében a vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek valamint hidak állapota romlik, fenntartási költségeik nőnek (pl. a több mint 5000 magyarországi közúti vasbeton hídon mintegy 1 millió négyzetméternyi felület van kitéve a sózás okozta korróziós veszélynek).

Napjainkban sem várható a tartóssági problémák számának csökkenése, hiszen igen sok olyan szerkezetünk van, amely a tartóssági problémák jelentkezése előtti időszakban épült és ezért tartóssági szempontból most éri el élettartama határát.

A korróziós károsodás megelőzésének és a korróziós károsodások kijavításának igen ígéretes megoldását nyújthatja a nem korrodáló (vagyis elektrolitikus korrózióknak teljesen ellenálló) szálerősítésű polimer (FRP) anyagok alkalmazása.

Az 1990-es évektől kezdve egyre nagyobb mennyiségben használunk föl az építőmérnöki gyakorlatban szálerősítésű polimer (FRP) anyagokat az acélbetétek, feszítőbetétek helyettesítésén túlmenően a már megépült szerkezetek javítása és megerősítése során is. A szálerősítésű polimer (FRP) anyagokat kő, falazott szerkezetek, beton, vasbeton, feszített vasbeton, acél, alumínium és fa anyagú szerkezetek javítása és megerősítése során alkalmazták sikerrel.

Napjaink legfontosabb törekvése, hogy a szálerősítésű polimer (FRP) anyagok a nemzetközi méretezési szabványokba, illetve az Eurocode szabványokba is bekerüljenek. Ennek érdekében 2013-ban elindult a COST Action TU1207 „Next Generation

Design Guidelines for Composites in Construction” kooperáció, amelynek egyik kifejezett célja, hogy rövid időn belül lehetséges legyen az Eurocode szabványok kibővítése az FRP anyagok alkalmazására vonatkozó fejezetekkel.

Felhasznált irodalom

- [1] Balázs Gy.: *Beton és vasbeton I.* Akadémiai Kiadó, 1994, 446 p.
- [2] Rubinsky, A. – Rubinsky, I. A.: *A Preliminary Investigation of the Use of Fiber Glass for Prestressed Concrete.* Magazine of Concrete Research, Sept. 1959. pp. 71-78.
- [3] Borosnyói A. – Balázs L. Gy.: *Tartósság biztosítása nem acél anyagú betétek alkalmazásával.* Betonszerkezetek tartóssága, Szerk. Balázs Gy. és Balázs L. Gy., 2008. június 23., pp. 293-314.
- [4] Tokyo Rope: *Technical Data on CFCC®.* Tokyo Rope Mfg. Co., Ltd. Manual, Tokyo, October 1993.
- [5] Taerwe, L., ed.: *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures.* Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-2), Ghent 1995, E & FN Spon, London.
- [6] El-Badry, M. M., (editor): *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures.* Proceedings, 2nd International Conference. Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec 1996.
- [7] Japan Concrete Institute (JCI): *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures.* Proceedings of the Third International RILEM Symposium (FRPRCS-3), October 1997, Sapporo, Japan.
- [8] Crivelli Visconti, I., (editor): *ECCM-8 European Conference on Composite Materials – Science, Technologies and Applications.* Proceedings, Naples, Italy, June 1998.
- [9] Japan Prestressed Concrete Engineering Association (JPCEA): *Prestressed Concrete in Japan.* XIII. FIP Congress, National Report, Amsterdam, Holland, 1998
- [10] Uomoto, T.: *Durability considerations for FRP reinforcements.* Proceedings of the Fifth International Symposium (FRPRCS-5), Thomas Telford, London, 2001, pp. 17-32.
- [11] *fib: Bulletin 40: FRP Reinforcement in RC Structures.* Technical Report prepared by a working party of Task Group 9.3, September 2007.
- [12] Cosenza, E. – Manfredi, G. – Realfonzo, R.: *Bond of FRP Rebars to Concrete: Experimental Behaviour and Analytical Models.* Studi e Ricerche, Vol.17, 1996. pp. 253-282.
- [13] Palotás L. – Balázs Gy.: *Mérnöki szerkezetek anyagtana 3.* Beton-habarcserámia-műanyag. Akadémiai Kiadó, 1980.
- [14] Tepfers, R., Editor: *CEB, TG 2/5 „Bond Models”.* State-of-the-Art-Report. Draft. Chapter 8. Bond of non-metallic reinforcement. Version 6, June 23, 1998.
- [15] Tannous, F. E. – Saadatmanesh, H.: *Environmental Effects on the Mechanical Properties of E-Glass FRP Rebars.* ACI Materials Journal, V.95, No. 2, March-April 1998, pp. 87-100.
- [16] Piggott, M. R.: *Load Bearing Fibre Composites.* Pergamon Press Ltd., Oxford, England, ISBN 008 024 230 8, 1980.
- [17] AKZO: *Aragrid®: Non Corrosive Mesh Reinforcement for Brickwork and Concrete.* Technical Data, 1992.
- [18] Gerritse, A.: *Aramid-based prestressing tendons.* Alternative Materials for the Reinforcement and Prestressing of Concrete, Ed. Clarke, Chapman & Hall, London, 1993, pp. 172-199.
- [19] Rostásy, E.: *State-of-the-Art Report on FRP Materials.* FIP Report, Draft, 1996. Unpublished.
- [20] *fib: Bulletin 10: Bond of Reinforcement in Concrete.* State-of-Art Report prepared by Task Group Bond Models, August 2000.
- [21] *fib: Bulletin 14: Externally bonded FRP Reinforcement for RC Structures.* Technical Report prepared by a working party of Task Group 9.3, October 2001.
- [22] http://www.cost.eu/domains_actions/tud/Actions/TU1207

Ref.:

Borosnyói Adorján: *Betonszerkezetek korrózióállóságának biztosítása innovatív, szálerősítésű polimer (FRP) anyagokkal.* Építőanyag, 65. évf. 1. szám (2013), 26–31. p.
<http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.6>