

GFRP betétekkel vasalt gerendák tervezése nyírásra

Design of GFRP reinforced beams against shear

SZINVAI Szabolcs doktorandusz¹, Dr. KOVÁCS Tamás egyetemi docens²

^{1,2}BME, Hidak és Szerkezetek Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., ¹szinvaishab@edu.bme.hu, <https://epito.bme.hu/szinvai-szabolcs>, ²+36 1 463 1743, kovacs.tamas@emk.bme.hu, <https://epito.bme.hu/kovacs-tamas>

Abstract

Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) bars are suitable for applications where durability is a primary concern, due to their non-corrosive property. GFRP bars however are brittle and have low stiffness. This causes larger crack widths and deformations, which changes the shear mechanisms. To maintain similar behavior to steel reinforced beams, in GFRP design, the strain in the stirrups is usually limited, thus preserving the resistance from aggregate interlock.

Keywords: GFRP bars, shear design, bent strength, flexural failure, long-term effects

Kivonat

Üvegszál erősítésű polimer (GFRP) betétek korrózióállóságuknak köszönhetően ideálisan alkalmazhatóak olyan esetekben, amikor a tartósság kiemelten fontos. A GFRP betétek kis merevséggel rendelkeznek és ridegen viselkednek. Emiatt nagyobb repedéstágasságok és deformációk várhatóak, ami megváltoztatja a nyírási mechanizmusokat. Az acélbetéteknél megszokott nyírási viselkedés megőrzésének érdekében a GFRP kengyelek nyúlása általában korlátozva van, ami megőrzi a szemcsehatásból származó ellenállást.

Kulcsszavak: GFRP betétek, nyírás, hajlított szilárdság, hajlítási tönkremenetel, hosszú-idejű hatások

1. BEVEZETÉS

Az üvegszál erősítésű polimer (GFRP) betétek alkalmazása egyre szélesebb körű, elsősorban a korrózióállóságuknak köszönhetően. A gyakorló mérnök számára azonban ezek a betétek nehezen alkalmazhatóak, amíg nincsenek jól átlátható kódok, szabványok a tervezésre vonatkozóan. Ezen a téren az utóbbi években nagy előrelépések történtek.

FRP betétekre vonatkozó szabványok terén Észak-Amerika jár az élen. Az Egyesült Államok ACI 440.1R-15 [1] jelű, Kanada CSA S806-12 [2], valamint CSA S6-19 [3] jelű szabványai foglalkoznak specifikusan FRP méretezéssel. Ázsiában a japán JSCE [4] kód foglalkozik FRP betétekkel, Európában pedig az új Eurocode 1992-1-1:2023 [5] R jelű melléklete. A nemzetközi betonszövetség (fib) Model Code 2020 [6] is tartalmaz már előírásokat FRP-vel vasalt betonszerkezetek esetére. Ez a cikk GFRP betétekkel vasalt hajlított vasbeton gerendák nyírási méretezését foglalja össze a felsorolt szabványok újdonságaira koncentrálna.

1.1. Hajlított GFRP betétek tulajdonságai

A GFRP betétek lineárisan rugalmasan és ridegen viselkednek. Nincs képlékeny alakváltozás, a tönkremenetel hirtelen, a szálak szakadásával következik be. Mechanikai tulajdonságaikat leginkább a szálterfogat arány határozza meg, ami a magas teljesítményű GFRP betétek esetén eléri, vagy akár meg is haladja a 75%-t. Így egyenes betétek esetén a rugalmassági modulus általában 60 GPa körül van, húzószilárdságuk karakterisztikus értéke pedig meghaladja az 1000 MPa-t [7]. Hajlított betétek esetén viszont mivel a szálak képtelenek maradni alakváltozást elszenvedni, hajlításkor a belső ívnél elhelyezkedő szálaknak kell rövidülniük, ami úgynevezett mikro-kihajlások formájában valósul meg, ezt szemlélteti az 1. ábra. Továbbá annak érdekében, hogy a szálak párhuzamosak maradjanak, rendszerint a hajlított GFRP termékek kisebb szálterfogat arányt alkalmaznak (azaz több mátrixot), így a késztermék rugalmassági modulusa csak 50 GPa körül van.

Ezen okokból kifolyólag, valamint a hajlított betétet érő keresztirányú feszültségek miatt egy tipikus nagy teljesítményű hajlított GFRP termék karakterisztikus húzószilárdsága 450-600 MPa körül van, abban az esetben, ha a hajlítási sugár legalább az átmérő 7-szerese [7]. Mivel hőre keményedő polimer a mátrix, leggyakrabban vinylester, alakítás csak gyártás közben lehetséges. Ez már önmagában komplikálja a GFRP betétek kengyelként történő alkalmazását.



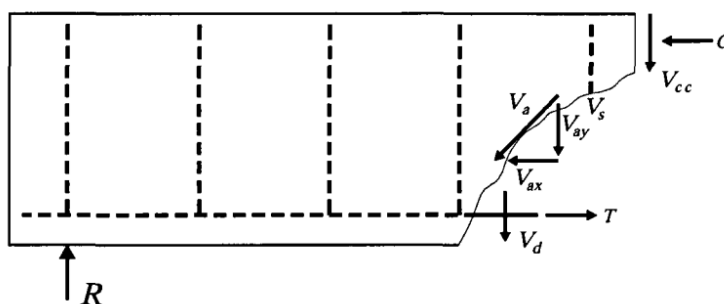
1. ábra. Hajlított betét hosszmeteszete [8]

2. GFRP-VEL VASALT GERENDÁK NYÍRÁSA

A nyírási tönkremenetel hirtelen következik be, ezért hagyományos vasbeton gerendák esetén a hajlítási tönkremenetel a preferált. A hajlítási tönkremenetel azonban GFRP-vel vasalt gerendák esetén lényegesen ridegebb, a képlékenyedés hiánya miatt. A hajlítási tönkremenetel a megelőző nagy alakváltozások (a betétek kis merevsége miatt) következtében viszont még így is duktilisabbnak tekinthető, mint a nyírási tönkremenetel, ezért nyírásra továbbra is ajánlott túltervezni a gerendát.

2.1 Nyírási mechanizmusok

Az alapvető nyírási mechanizmusok nem mások GFRP-vel vasalt gerendák esetén, mint acéllal vasaltaknál, viszont az egyes mechanizmusok mértéke eltér. A beton nyírási ellenállása alapvetően három jelenségből tevődik össze: (1) a nyomott betonzóna nyírási ellenállása (V_{cc}); (2) a repedés érdes felületének nyírási ellenállása (szemcsehatás V_a); (3) a hosszirányú vasalás nyírási ellenállása (csaphatás V_d). A mechanizmusokat a 2. ábra foglalja össze. Tisztán GFRP-vel vasalt gerendák esetén ezek közül lényegében mindegyik csökkentett hatékonysággal tud csak dolgozni.



2. ábra. Nyírási mechanizmusok [9]

A hosszirányú vasalás kis merevségének következtében a semleges tengely feljebb tolódik, a nyomott betonzóna magassága jellemzően kisebb, így a belőle származó nyírási ellenállás is csökkenni fog. Hasonlóan, a kis merevség nagyobb repedéstágasságot fog eredményezni, aminek következtében a szemcsehatás hatékonysága lecsökken. Minél nagyobb a repedés, annál nagyobb adalékanyag szemcsenagyságra van szükség, hogy a szemcsehatás kialakulhasson. Másik lehetőség, hogy a repedéstágasságot korlátozzuk, ami a kengyelezésben kialakuló megnyúlás mértékének korlátozását fogja jelenteni.

A GFRP betétek kompozit jellege miatt a csaphatás is lecsökken, GFRP betétek keresztirányú merevsége és szilárdsága egy nagyságrenddel kisebb, mint tengelyirányban. A beton nyírási ellenállását az 1.

egyenlet foglalja össze. Az ívhatás normál gerendák esetén nem jelentős. Továbbá a mérethatás a nagyobb deformációik miatt jelentősebb lesz, mint acéllal vasalt gerendák esetén, így a gerenda magassága kiemelten fontos a számításokkor [10].

$$V_c = V_{cc} + V_a + V_d \quad (1)$$

A GFRP kengyelek nyírási ellenállása a nyírási repedést áthidaló kengyelekben ébredő feszültségek eredőjének összegzésével lehet megkapni. Ahogy az a 2. ábrán is látszik, a repedés különböző pontokon fogja keresztezni a kengyeleket. Bizonyos kengyelek esetén egészen közel a hajlításhoz (kisebb ellenállás), máshol közelebb az egyenes szakasz közepéhez (nagyobb ellenállás). Természetesen itt is megjelenik a GFRP betétek rideg viselkedésének hátránya, amint egy kengyel eléri a húzási szilárdságát a szálak elszakadnak, majd progresszív tönkremenetel fog bekövetkezni. A 3. ábra mutatja be a GFRP betétek rideg tönkremenetelét egyenes betétek esetén. Ennek következtében nem igaz, hogy mindegyik kengyel egy időben el tudja érni maximális ellenállását, ami képlékeny alakváltozások esetén megvalósulhatna. A felsorolt hatások együtt csökkent nyírási teljesítményhez vezetnek GFRP-vel vasalt gerendák esetén, amivel a tervezőnek számolnia kell.



3. ábra. GFRP betét szakadása

2.3 Tervezési előírások

A tervezői előírások kisebb nyírási kihasználtságot írnak elő, mint hajlítást, elkerülve ezzel a rideg nyírási tönkremenetelt. Az előző fejezetben taglalt okok miatt GFRP-vel vasalt gerendák betonhoz tartozó nyírási ellenállása igen komplex kérdéskör, és sok kutatás kapcsolódik hozzá. Nem meglepő tehát az sem, hogy a szabványok között nagy eltérés van az erre vonatkozó összefüggésekben. A közös ezekben, hogy a beton nyomószilárdsága, a hasznos magasság és a gerenda szélessége a legfontosabb paraméterek, amik valamilyen formában megjelennek a kifejezésekben.

Ehhez képest a kengyelek nyírási ellenállása sokkal egyszerűbben kifejezhető, ezt a 2. egyenlet mutatja be, ahol A_{fw} a kengyelszárak keresztmetszeti területe, f_{fWRd} a figyelembevehető feszültség értéke a kengyelekben, d_f a hasznos magasság, s_w a kengyelek osztásköze, θ pedig a nyírási szög.

$$V_f = \frac{A_{fw} f_{fWRd} d_f}{s_w} \cot \theta \quad (2)$$

A figyelembe vehető feszültség a kengyelekben a kengyelekben megengedhető alakváltozás mértékének és a kengyelek rugalmassági modulusának a szorzata. Az 1. táblázat foglalja össze a kengyelekben megengedett alakváltozást, illetve a nyírási szög felvételét a különböző szabványok szerint. A legtipikusabb érték 0.004 megengedett alakváltozásra, így 50 GPa rugalmassági modulus esetén 200 MPa-nál nagyobb feszültséget lényegében nem szabad figyelembe venni az adott GFRP kengyelben. Ez lényegesen alulmarad a hajlított szakasz húzási szilárdságától, így ez lesz a mértékadó kritérium. Ezt Ahmed és Benmokrane [11] hat darab hajlított gerenda kísérlete is megerősítette. A hajlított szilárdsághoz tartozó megnyúlás érték hozzávetőlegesen 0.006 és 0.008 között van, ami lényegesen nagyobb, mint a 0.004 határérték.

Nyírási szög esetén a szabványok lényegében 30° és 60° közötti értékeket engednek meg. Az ACI 440.1R-15 egyszerűsítésképpen 45°-t feltételez, az Eurocode pedig a ~51°-t ($\cot \theta = 0.8$). A többi szabvány esetében a nyírási szög függ még a betét alakváltozásától, illetve a CSA S6-19 szabvány esetén még S_{ze} tényezőtől, ami az adalékanyag méretét veszi figyelembe.

Egyes kutatások, például Said és társai [12] bemutatták, hogy a kísérletek során az egy repedést áthidaló GFRP betéteken mérhető alakváltozás 0.0043 és 0.0095 között van, mielőtt bekövetkezne a tönkremenetel.

Ezért ők javasolták a 0.004-es érték lazítását, legalább 0.005-re. Más kutatók [13] ezt ellenzik, azzal érvelve, hogy 0.004-nél nagyobb érték már túlságosan lecsökkentené a szemcsehatásból származó ellenállást.

GFRP kengyelek nyírási ellenállása különböző szabványok szerint

1. táblázat

Szabvány	Megengedett alakváltozás	Nyírási szög
ACI 440.1R-15 (2015)	0.004	45°
CSA S806-12 (2021)	0.005	$30^\circ + 7000\varepsilon_f \leq 60^\circ$
CSA S6-19 (2019)	0.004	$(29 + 7000\varepsilon_f) \left(0.88 + \frac{S_{ze}}{2500} \right)$
Eurocode 1992-1-1:2023	$0.0023 + \frac{E_f A_f}{15} (0.8d_f)^2 10^{-15} \leq 0.007$	~51°
Fib Model Code 2020 (2023)	0.004	$29 + 7000\varepsilon_f$

3. ÖSSZEFOGLALÁS

GFRP betéteket egyre gyakrabban alkalmaznak újonnan épülő vasbeton szerkezetekben kiváló tartóssági tulajdonságaik miatt. Elterjedésüket gátolja az elérhető tervezési előírások hiánya. Ezen a téren az utóbbi években nagy előrelépések történtek, amerikai, kanadai, japán és európai szabványokat is kiadtak, valamint a nemzetközi betonszövetség (fib) Model Code 2020 is tartalmaz már előírásokat FRP-vel történő tervezésre. A cikk tisztán GFRP betétekkel vasalt, hajlított vasbeton gerendák nyírási tervezését foglalta össze a legújabb szabványok bemutatásával.

A GFRP betétek kis merevsége és rideg viselkedése nagyobb repedéstágasságot és deformációkat eredményez, aminek következtében a beton nyírási ellenállása lecsökken. A beton nyírási ellenállására vonatkozóan nincs egységesen elfogadott álláspont a komplex viselkedés miatt, valamint a jelenséget erősen befolyásolja a mérhetőség is.

Annak érdekében, hogy a beton nyírási ellenállásához szükséges mechanizmusok, elsősorban a szemcsehatás, mértéke megmaradjon, valamint, hogy a betétek rideg viselkedését figyelembe vegyék, a szabványok korlátokat fogalmaznak meg a kengyelként alkalmazott GFRP betét alakváltozására vonatkozóan. A leggyakrabban előforduló érték 0.004, ami egy 50 GPa rugalmassági modulusú betét esetén 200 MPa-t jelent. Így ez a kritérium sűrű kengyelkiosztást fog eredményezni. A tervezéskor alkalmazandó nyírási szöget 30° és 60° közé veszik fel a szabványok.

További kutatásokra van szükség GFRP betétekkel vasalt gerendák nyírási viselkedésének jobb megértéséhez, és a szabványok fejlesztéséhez. A kengyelek alakváltozásának korlátozása már egyezményesen elfogadott megközelítés, míg a beton nyírási ellenállásának számítása, és a mérhetőség még nyitott kérdések.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A Doktoranduszi Kiválósági Ösztöndíj Program (DKÖP) által támogatott projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatallal kötött támogatási szerződés alapján valósult meg.

„A BME-380 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, az EKÖP-24-3 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] ACI Committee 440, ACI 440.1R-15. *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*. 2015
- [2] CSA, S806-12. *Design and Construction of Building Component with Fiber-Reinforced Polymers*. 2021
- [3] CSA, S6-19. *Canadian Highway Bridge Design Code*. 2019
- [4] Machida A. *Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials*. Tokyo: Japan society of civil engineers (JSCE) 1997
- [5] E.C. for Standardization, EN 1992-1-1. *Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*. 2023
- [6] fib, Fib Model Code for Concrete Structures 2020, 2023
- [7] Schöck: *Tenchnical Information Schöck Combar*. <https://www.schoeck.com/en/combar#downloads> (Utolsó letöltés: 2025.04.16.).
- [8] Weber. A. *Hochfeste gebogene Glasfaser-Bewehrungsstäbe*. Bauingenieur. 2013, 88 (45), 45-48
- [9] Ahmed E.A.M. *Shear behaviour of concrete beams reinforced with fibre-reinforced polymer (FRP) stirrups*. PhD disszertáció, Sherbrooke Egyetem, Québec, Kanada. 2009
- [10] Liang X., Peng J. Ren R. *A State-of-the-art review: Shear performance of the concrete beams reinforced with FRP bars*. Construction and Building Materials. 2023, 364, 129996
- [11] Ahmed E., Benmokrane B. *How will the design limits for the FRP stirrups in the CAN/CSA S6 Affect the shear strength?*. Proceeding of 8th International Conference on Short and Medium Span Bridges, Niagara. 2010.
- [12] Said M., Adam A. A., Shanour A. S. *Experimental and analytical shear evaluation of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymer bars*. Construction and Building Materials. 2016, 102, 574-591