



*Приета: 18.03.2016 г.
Преработена: 11.04.2016 г.
Одобрена: 22.04.2016 г.*

УСИЛВАНЕ С FRP НА СТОМАНОБЕТОННА ГРЕДА, ПОДЛОЖЕНА НА АГРЕСИВНО ВЛИЯНИЕ

Св. Спасов¹, Е. Абдулахад²

Ключови думи: усилване с FRP, греди, стоманобетон, агресивно влияние, въглеродни нишки

РЕЗЮМЕ

Много конструкции са изложени на агресивно влияние, което може да доведе до загуба на експлоатационна пригодност или достигане на разрушение много преди предвидения експлоатационен период.

Външно залепени влакнесто армирани полимери (FRP) може да се използват за възстановяване и усилване на стоманобетонни конструкции. Основен недостатък на този метод за усилване е възможността за разлепване на усилващата система.

Целта на този доклад е да се сравни ефективността на усилване с FRP на стоманобетонна греда, подложена на агресивно влияние, като са използвани различни схеми за усилване, с цел предотвратяване на разлепването на усилващата система, като за целта са изпитани четири стоманобетонни образца.

1. Въведение

Корозията на стоманената армировка в стоманобетонните елементи е един често срещан проблем при гражданското и инфраструктурно строителство. Корозията на вложената стоманена армировка в стоманобетонните гредови елементи може да намали драстично носещата способност и експлоатационната пригодност на елемента и на конс-

¹ Светослав Спасов, инж., кат. „Масивни конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: eng.spasov@abv.bg

² Емад Абдулахад, доц. д-р инж., кат. „Масивни конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: georgosing@gmail.com

трукцията като цяло. Корозията на стоманената армировка представлява проблем за стоманобетонните конструкции по две причини: първо, намалява се напречното сечение на вложената армировка; второ, продуктите от корозия заемат по-голям обем от първоначалния на стоманата, което оказва опън върху бетона в зоната на армировъчния прът и поради това се получат пукнатини и откъсване на цели парчета бетон.

Корозията на армировката също така намалява сцеплението на армировката с бетона, което може да предизвика разрушение при големи експлоатационни товари. Основното предимство на усилването с FRP в сравнение с класическите методи със стоманен или стоманобетонен кожух е това, че при него практически не се променя теглото на конструкцията, има голяма опънна якост и притежава висока устойчивост на киселини и основи, което го прави практически некорозиращ материал.

Проведени са голям брой експерименти и аналитични изследвания от различни учени относно поведението при огъване на усилени с въглеродни нишки стоманобетонни греди. Формите на разрушение при тези елементи може да се разделят на две основни групи:

- А) Когато е налице пълна съвместна работа между бетона и FRP материала, може да възникне някоя от следните форми на разрушение [7]:
 - Провлачване на армировката с последвало разрушение на бетона.
 - Провлачване на армировката с последвало разкъсване на усилващата система от въглеродни нишки.
 - Разрушаване на натисковата зона на бетона.
- Б) Когато няма пълна съвместна работа между бетон и FRP възниква разлепяне и преждевременна форма на разрушение, която може да е причинена от:
 - Отлепване в закотвяща зона [7].
 - Отлепване, причинено от нормални пукнатини в области далеч от закотвянето [6].
 - Отлепване от пукнатини, образувани от срязване [4], [5].
 - Отлепване, причинено от неравността на бетонната повърхност [6].

Въпреки големия международен опит в областта на усилването на стоманобетонни греди с FRP все още няма яснота относно ефективността при усилване на стоманобетонни греди, подложени на агресивно влияние, както и възможности за допълнителното закотвяне на усилващата FRP система с ивици от FRP под формата на стремена или анкери от FRP, за предотвратяване разлепването на усилващата система.

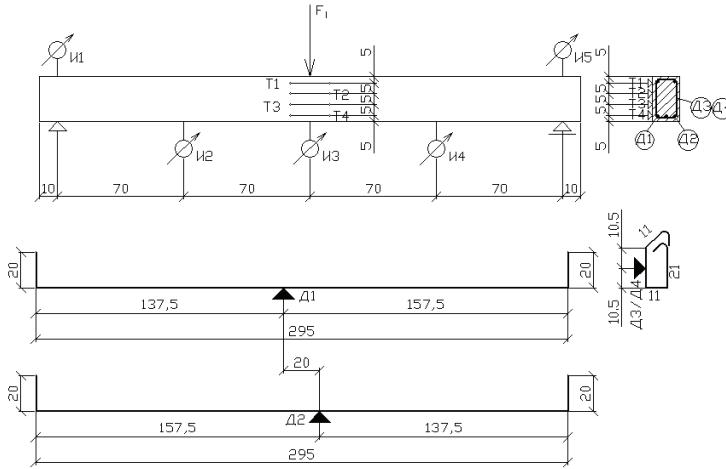
Тази статия изследва поведението на три стоманобетонни греди, подложени на агресивно влияние на разтвор на морска сол и вода за период от шест месеца. Гредите са усилени с плат от въглеродни нишки. За една от гредите са използвани допълнително ивици от FRP под формата на стремена с цел увеличаване на носещата способност на срязване и допълнително закотвяне на усилващата система. За друга греда се използват анкери от FRP с които се цели закотвяне на усилващата система и предпазване от преждевременно разлепване на усилващата система. Резултатите от изпитването на трите стоманобетонни греди са сравнени с получени резултати от изпитване на контролна греда, която не е подложена на агресивната среда. Статията има за цел да даде оценка за възможността за усилване на стоманобетонни греди, подложени на агресивно влияние и да определи най-ефективната схема на усилване.

2. Подготовка на образци

Изработени са четири броя стоманобетонни греди. Използваните материали са бетон клас C25/30 и стомана B420.

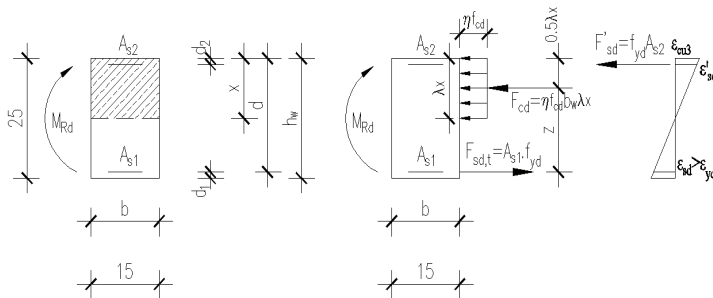
3. Измерителни уреди

Следенето на общите деформации се осъществява посредством механични часовникови индикатори с точност 0.01 mm. Относителните деформации се следят посредством индуктивни датчици с точност 0.001 mm при база 200 mm в средното сечение на гредата. Относителните деформации в долната опънна армировка се следят посредством електросъпротивителни деформоприемници на 20 cm от средата на отвора. Разположени са и електросъпротивителни датчици на третото стреме в двата края на гредата.



Фиг. 4. Разположение на измерителните уреди

4. Определяне на изчислителната носимоспособност на гредата преди усилване [8]



Фиг. 5. Определяне на носещата способност за огъващ момент на правоъгълно напречно сечение

$$x = \frac{f_{yd} A_s}{\eta f_{cd} b_w \lambda} = \frac{36.5 \times 3.4}{1 \times 1.67 \times 15 \times 0.8} = 6.19 \text{ cm} < x_{lim} = 0.45d = 0.45 \times 21.75 = 9.78 \text{ cm}; \quad (1)$$

$$z = d - \frac{\lambda}{2} x = 21.75 - \frac{0.8}{2} 6.19 = 19.27 \text{ cm}; \quad (2)$$

$$M_{Rd} = f_{yd} A_s z = 36.5 \times 3.4 \times 19.27 = 2391 \text{ kNcm} = 23.91 \text{ kNm} \Rightarrow F = 34.16 \text{ kN}; \quad (3)$$

$$V_{Rd} = 0.9 d f_{yd} \text{ctg}\theta \frac{n A_{sw}}{s} = 0.9 \times 217.5 \times 217 \text{ctg}22^\circ \frac{2 \times 33.18}{190} = 36720 \text{ N} = 36.72 \text{ kN}. \quad (4)$$

5. Определяне на изчислителната носимоспособност на гредата след усилване

Усилването се осъществява чрез прилагането на външно залепена влакнесто армирана тъкан. Използвани са карбонови влакна под формата на еднопосочно армирана тъкан и двукомпонентна епоксидна смола със следните характеристики:

Карбонови влакна	
Якост на опън – f_{fib}	3800 MPa
Елатичност – E_{fib}	235 GPa
Деформация при скъсване – ϵ_{fib}	1.5%
Епоксидна смола	
Модул на еластичност при натиск	2600 N/mm ²
Якост на опън	44.6 MPa
Удължение до разрушаване	1.7%
Якост на натиск	90 MPa
Якост на огъване	70 MPa
Модул на еластичност	2500 MPa
Адхезия (към бетон)	> 4 N/mm ²

Преди усилването повърхността се заглажда и изчиства. Ръбовете на гредите се заоблят. Повърхностите, по които се предвижда да се залепят карбоновите нишки се шпакловат с епоксидна шпакловка със следните характеристики:

Двукомпонентна епоксидна шпакловка	
Якост на натиск	$\geq 70.0 \text{ N/mm}^2$
Модул на еластичност	11700 N/mm ²

Изчисленията са проведени според методиката, предложена в [2]. В изчисленията не е отчетена първоначалната деформация на нивото на усилващата система, защото по време на усилването гредите не са натоварени.

ε_{fud} – изчислителната стойност на ефективната деформация на FRP;

ε_{fu} – гранична деформация на FRP на опън, която зависи от вида на материала;

γ_f – частен коефициент на сигурност;

ψ – преводния коефициент за натисковата зона на бетона.

Носещата способност на огъване след усиляването с FRP се увеличава с 47 процента.

- Определяне приноса на FRP стремена за повишаване на носещата способност на срязване

$$\Gamma_{fk} = 0.03k_b \sqrt{f_{ck} f_{ctm}} = 0.03 \times 1 \sqrt{25 \times 2.6} = 0.242 \text{ MPa}; \quad (15)$$

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d} \sqrt{\gamma_c}} \sqrt{\frac{2E_f \Gamma_{fk}}{t_f}} = \quad (16)$$

$$\frac{1}{1.2 \sqrt{1.6}} \sqrt{\frac{2 \times 0.9 \times 235000 \times 0.242}{0.11}} = 635.5 \text{ MPa};$$

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2 f_{ctm}}} = \sqrt{\frac{235000 \times 0.11}{2 \times 2.6}} = 70.5 \text{ mm}; \quad (17)$$

$$f_{fed} = f_{fdd} \left[1 - \frac{1}{3} \frac{l_e \sin \alpha}{\min\{0.9d; h_w\}} \right] = \quad (18)$$

$$635.5 \left[1 - \frac{1}{3} \frac{70.5 \times \sin 90}{\min\{0.9 \times 217.5; 250\}} \right] = 559.2 \text{ MPa};$$

$$\begin{aligned} V_{fd} &= \frac{1}{\gamma_{Rd}} \min\{0.9d, h_w\} f_{fed} 2t_f \frac{w_f}{b_f} (\cot \theta + \cot \alpha) = \\ &= \frac{1}{1.2} \min\{0.9 \times 217.5, 250\} 559.2 \times 2 \times 0.11 \frac{\sin 90}{\sin 45} \frac{50}{265} = \\ &= 5355 \text{ N} = 5.35 \text{ kN}. \end{aligned} \quad (19)$$

Носещата способност на срязване след усиляването с FRP се увеличава с 14%.

- Отлепване, причинено от наклонени пукнатини [1]

$$V_d \leq \tau_{rp} b_c d = 2.10 \times 150 \times 217.5 = 68.62 \text{ kN}; \quad (20)$$

$$\tau_{rp} = 0.38 + 151 \rho_{eq} = 0.38 + 151 \times 0.011 = 2.10 \text{ MPa}; \quad (21)$$

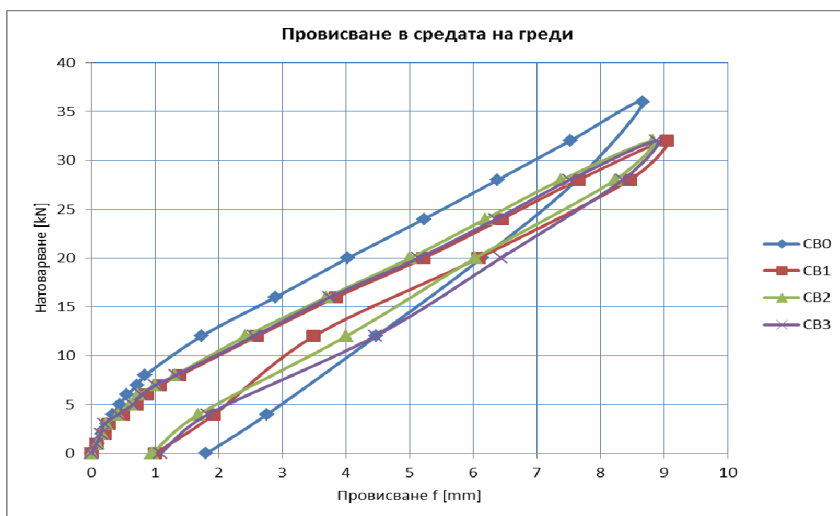
$$\rho_{eq} = \frac{A_s + A_f \frac{E_f}{E_s}}{b_c d} = \frac{3.4 + 0.275 \frac{23500}{20000}}{15 \times 21.75} = 0.011. \quad (22)$$

6. Резултати от проведеното изпитване

6.1. Резултати от изпитването на неусилените греди

Греда СВ0 е натоварена до характеристичен товар от 36 kN концентрирана сила в средата. При така реализираното натоварване се получават провисвания в образеца, по-малко от допустимото (11.2 cm) и широчината на нормалната пукнатина е по-малка от допустимата (0.3 mm).

Образци СВ1, СВ2 и СВ3 се подлагат на агресивно влияние, симулирано чрез разтвор на морска сол и вода. След престой от 6 месеца в разтвора гредите се натоварват до достигане на широчина на пукнатината и провисване, равно или по-голямо в сравнение с това, получено от опитното изпитване на греда СВ0. По този начин може да се определи с колко е намалена носещата способност на гредите, поради агресивното влияние на разтвора от морска сол и вода.



Фиг. 7. Провисване в средата на отвора

За греда СВ0 е отчетеното максимално провисване в средата на отвора от 8.67 mm, при концентрирана сила в средата от 36 kN. За образци СВ1, СВ2 и СВ3 са отчетени провисвания в средата на отвора съответно 9.04 mm, 8.83 mm и 8.88 mm при концентрирана сила в средата от 32 kN.

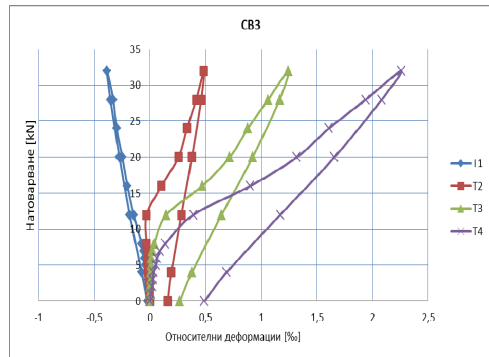
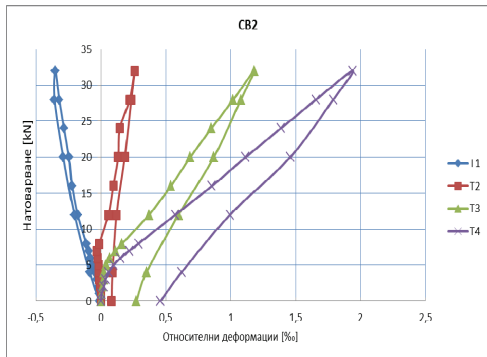
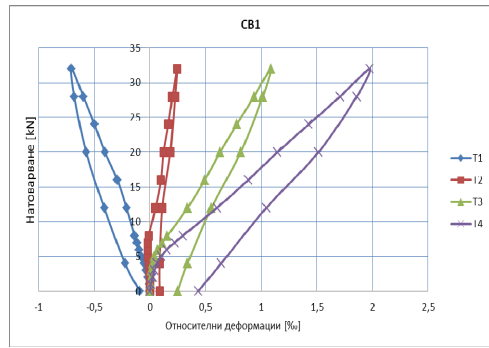
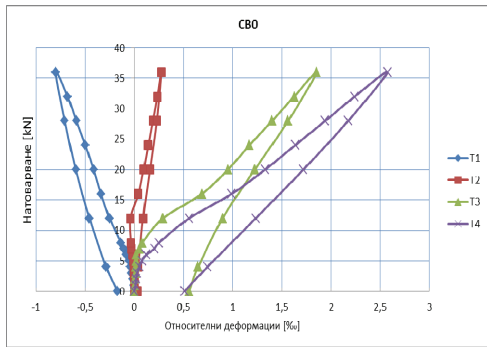
На графиките с относителните деформации в бетона се вижда сходно поведение в развитието на деформациите в бетона.

При развитието на относителните деформации в армировката за греда СВ0 се забелязва нелинейно развитие на деформациите, като при максималната сила от 36 kN армировката все още не е провлачена.

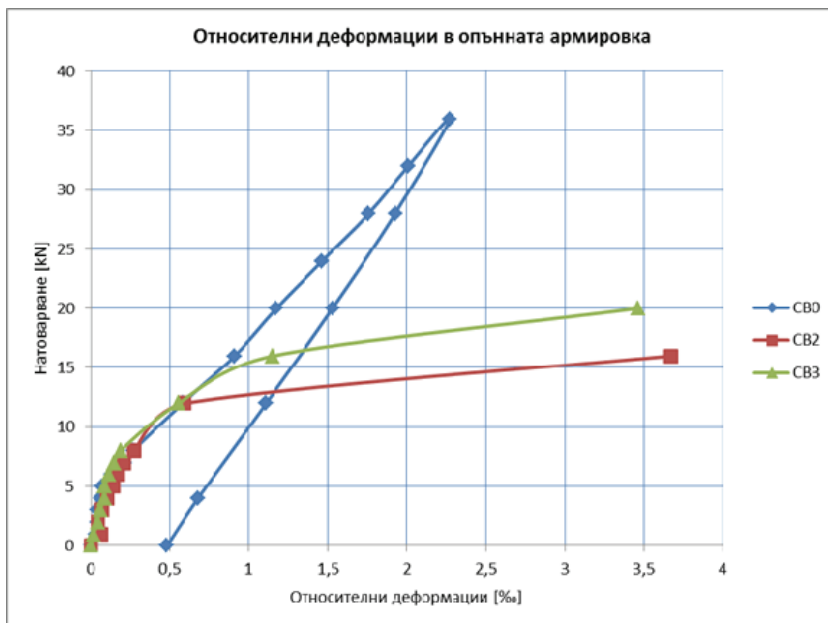
В греда СВ1 електросъпротивителните деформоприемници не функционират.

При образци СВ2 и СВ3 също се забелязва нелинейно поведение в развитие на деформациите, като при сила от около 15 kN започва и провлачване на опънната армировка в образците.

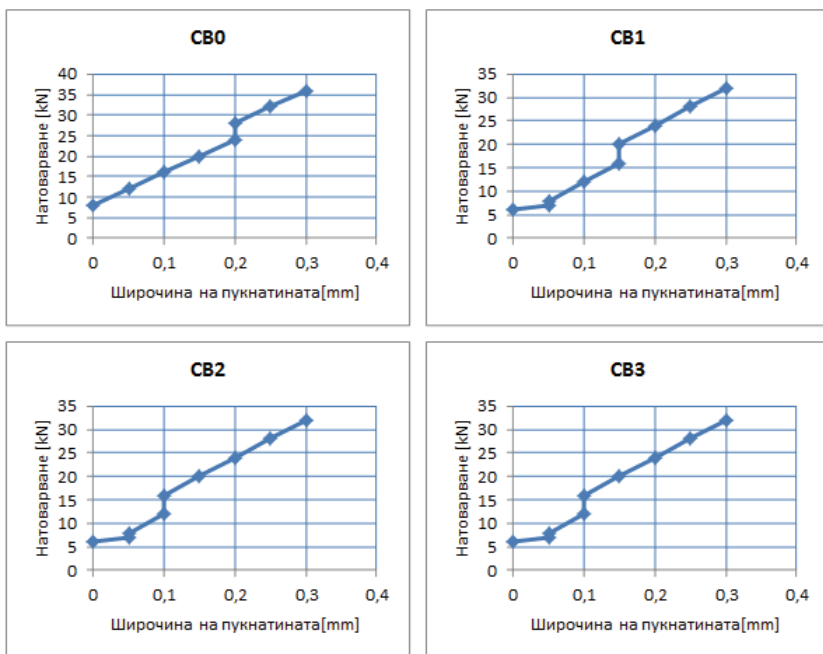
Във всички опитни образци на нелинейното развитие на деформациите в опънната армировка се дължи на появата и развитие на пукнатини в гредите.



Фиг. 8. Относителни деформации в бетона



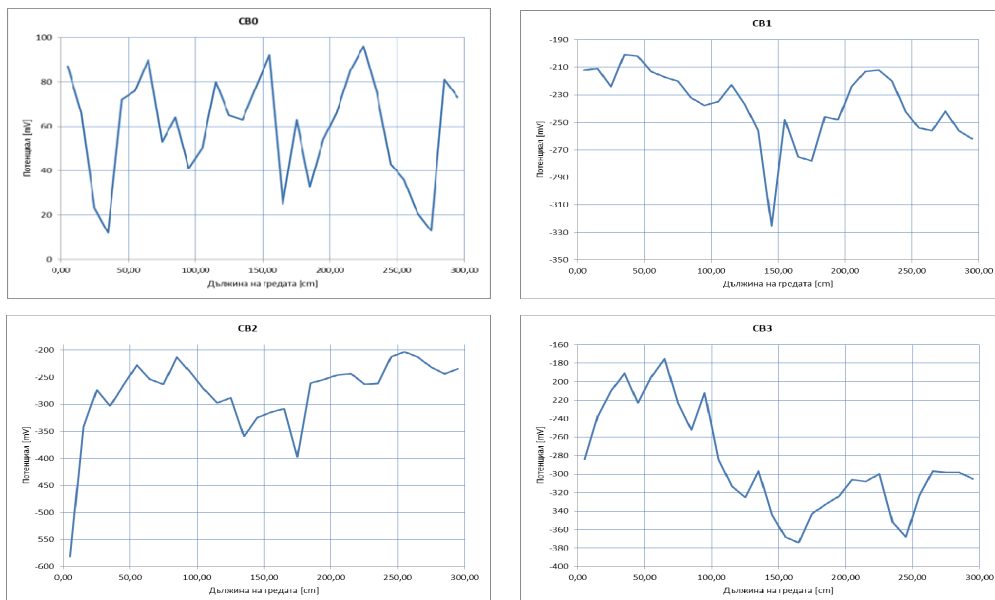
Фиг. 9. Относителни деформации в армивката



Фиг. 10. Широчина на нормалните пукнатини

Първата пукнатина в греда CB0 е отчетена при сила от 8 kN, като при максималния товар от 36 kN отчетената широчина на пукнатината е 0.3 mm.

За образците, подложени на агресивно действие CB1, CB2 и CB3 първата пукнатина се появява при товар от около 6 kN, а при товар от 32 kN е измерена широчина на пукнатината от 0.3 mm.



Фиг. 11. Измерване на потенциала на бетона с Proceq Canin+

Средно измереният потенциал за гредата СВ0, която не е подложена на агресивно влияние, е 59.2 mV.

Средно измереният потенциал за греди СВ1, СВ2 и СВ3 е -268 mV, като агресивната среда може да се окаже като влажна и има наличие на хлориди в бетона. Вероятността за корозия в този случай се определя като по-малка от 50%. Външните признаци за ръждиви петна с тъмнокафеникав цвят се потвърждават, като дълбочината на корозия би следвало да е по-малко от 0.05 mm [3], [11].

От така направените изпитвания и сравнения на резултатите между трите греди, подложени на агресивно влияние СВ1, СВ2 и СВ3 и контролната гредата СВ0, може да се определи, че носещата способност на трите греди, подложени на агресивно влияние, е с около 12% по-малка в сравнение с контролната гредата.

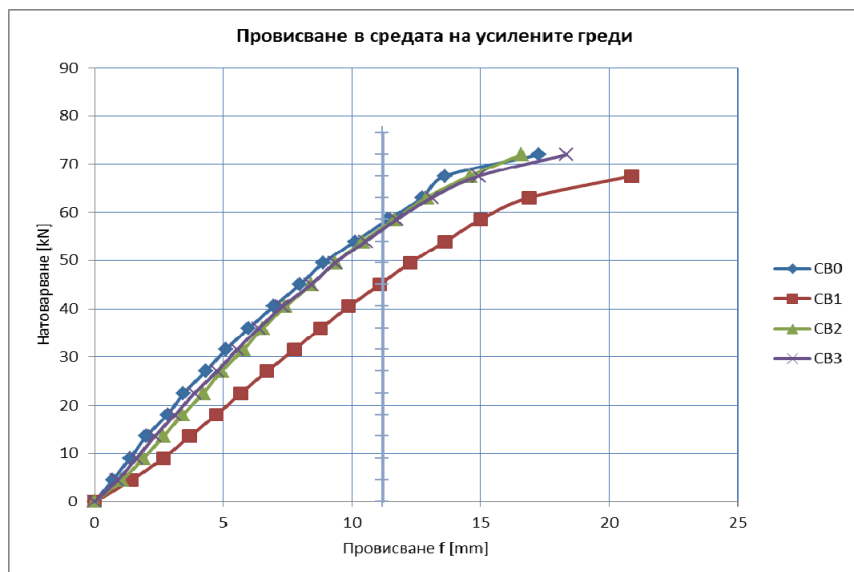
6.2. Резултати от изпитването на усилените греди

След отчитане на намаленото сечение на вложената опънна армировка се получава стойност на носещата способност на огъване на усиленото сечение $M_{Rd} = 33.61 \text{ kN} \Rightarrow F = 48.01 \text{ kN}$, намалението на носещата способност е с 5%.

Усилените елементи се характеризират с линейно поведение.

Началото на разрушаване в греди СВ0, СВ2 и СВ3 настъпва при сила от 58.5 kN (провисването става по-голямо от граничното и започва провлачване на армировката).

Началото на разрушаване в гредата СВ1 настъпва при сила 49.5 kN (провисването става по-голямо от граничното).



Фиг. 12. Провисвания в средата на отвора

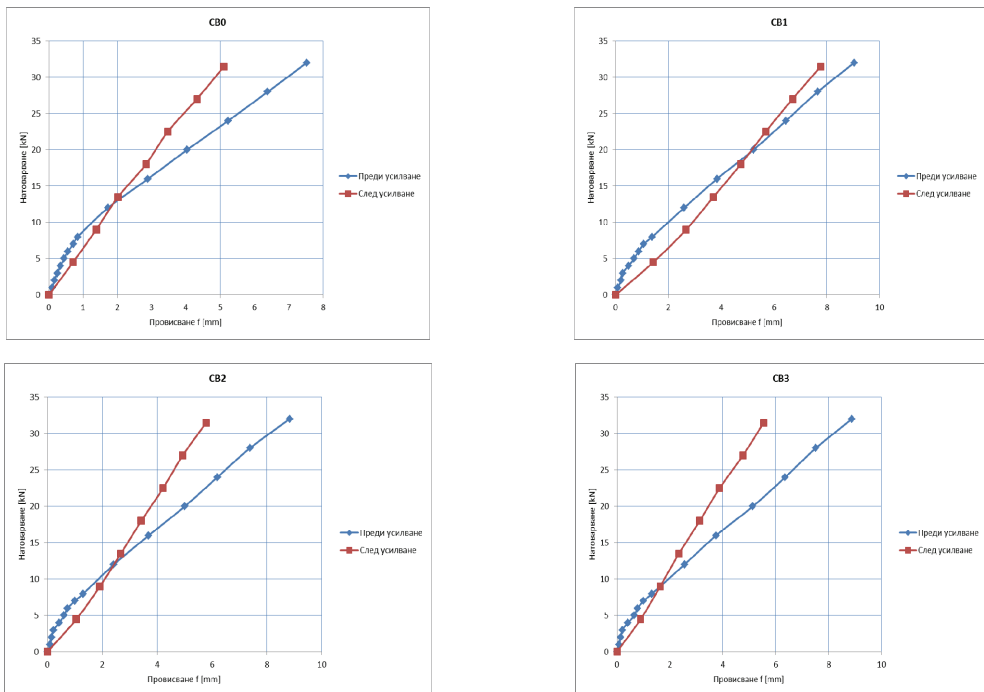
Пълното разрушение на опитните образци настъпва при следните товари:

- За СВ0 при сила от 86 kN, като платът от въглеродни нишки се разкъсва в зоната на концентрираната сила. Може да се приеме, че разрушението е предшествано от разлепване на усилващата система поради развитието на нормални пукнатини.

- За СВ1 при сила от 76.5 kN, като разрушението е подобно на това на образец СВ0.
- За СВ2 при сила от 89 kN, като се разлепва ивицата под формата на стреме, разположена в зоната на концентрираната сила. Не се наблюдава разлепване на други места на усилящата система. Развитието на нормални и наклонени пукнатини в случая е ограничено.
- За СВ3 при сила от 84.5 kN, като бетонът в натисквата зона частично се разрушава и усилящата система се разкъсва в зоната на концентрираната сила, изтръгвайки анкера. Може да се приеме, че усилящата система се разлепва поради развитието на нормални и наклонени пукнатини.

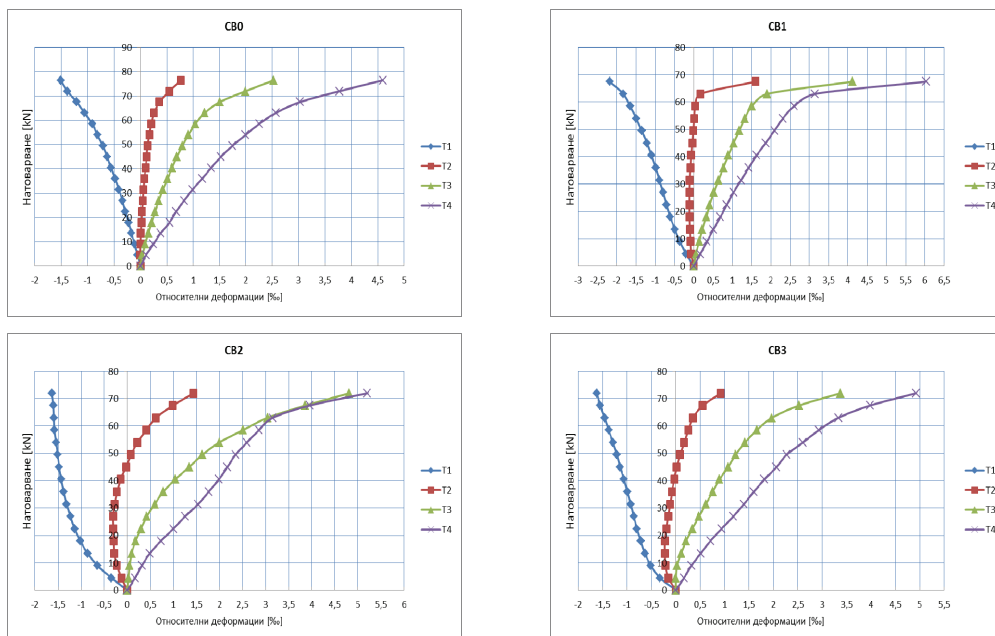
Теоретично определеното разрушение, причинено от развитието на наклонени пукнатини за четирите образца, би настъпило при сила от 68.62 kN, за греди СВ0 и СВ1, които са усилены само с плат от FRP и се получава съответно коефициент на разрушение 1.25 и 1.11 (без да се отчита евентуалната корозия на вложените стоманени стремната в гредата).

От графиката се вижда линейно поведение в развитие на провисването на четирите опитни образца. Като греда СВ1 се характеризира с по-малка коравина в сравнение с останалите два образца, подложени на корозия СВ2, СВ3 и контролната греда СВ0.



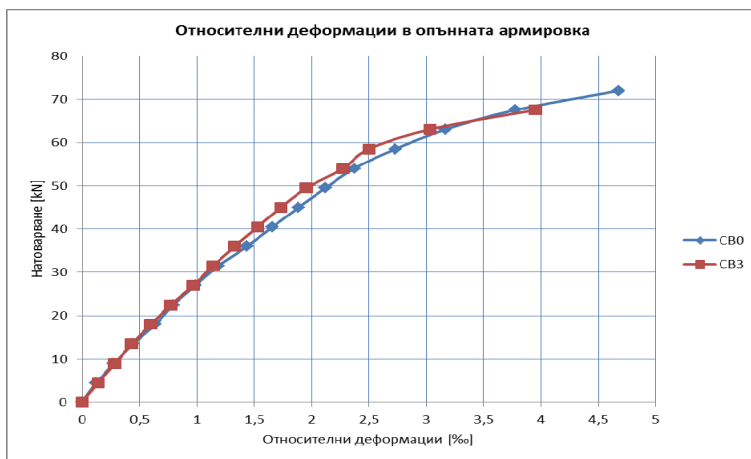
Фиг. 13. Сравнение на провисването в средата на гредите преди и след усиляване

При сравняване на провисването преди и след усиляване в средата на отвора се забелязва следната зависимост – трябва да се реализира определен товар, за да заработи ефективно усилящата система и провисването в усилените греди да стане по-малко в сравнение с това преди усиляването.



Фиг. 14. Относителни деформации в бетона

Усилените опитни образци имат сходно поведение при развитие на деформациите в бетона, без значение схемата на усилване.



Фиг. 15. Относителни деформации в опънната армировка в средата на отвора

При развитието на относителните деформации в армировката за греда CB0 и CB3 се забелязва линейно развитие на деформациите, като при сила от около 60 kN започва и провлачване на опънната армировка, без значение дали тя е била подложена на корозия или не.

В греда CB1 и CB2 електросъпротивителните деформоприемници не функционират.

7. Изводи

- Агресивната среда от разтвор на морска сол и вода не намалява якостните характеристики на бетона за разглеждания случай, но намалява сцеплението на армировката с бетона.
- За по-дълъг период на излагане на агресивната среда би следвало да има значително по-голяма корозия на армировката, също така и значителни повреди по бетонната повърхност (обрушвания, разрушаване на бетонното покритие и др.).
- Усилващата FRP система успява да увеличи първоначалната носеща способност на стоманобетонната греда, неподложена на агресивно влияние с 60%.
- Усилващата FRP система успява да възстанови и да увеличи носеща способност на стоманобетона и гредата, подложени на агресивно влияние с 45%.
- Използването на ивици от FRP под формата на стремена или анкери от FRP увеличава силата на разрушение с около 15%, в сравнението със случаите на усилена греда само с плат от FRP.
- Използването на стремена под формата на FRP увеличават не само носещата способност на срязване, но и предотвратяват разлепването на усилващата система поради развитието на нормални и наклонени пукнатини.
- Въпреки че анкери от FRP не увеличават носещата способност на срязване, те имат почти същият принос като стремената от FRP, в предотвратяване на разлепването на усилващата система поради развитието на нормални и наклонени пукнатини, тъй като намаляват деформациите в усилващата система.

Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор БН-64/2014 е подкрепена финансово от Център за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. CEB FIB bulletin 14 – Externally bonded FRP reinforcement for RC structures.
2. National research council – Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for strengthening Existing Structures – CNR-DT200/2004.
3. Proceq, Canin+ operating instructions. Corrosion analyzing instrument.
4. *Smith, S. T. and Teng, J. G.* FRP-strengthened RC beams-I: Review of debonding strength models. *Engineering Structures*, 24(4), 385 – 395 (2002a).
5. *Smith, S. T. and Teng, J. G.* FRP-strengthened RC structures. II: Assessment of debonding strength models. *Engineering Structures*, 24(4), 397 – 417 (2002b).
6. *Teng, J. G., Lam, L. and Chen, J. F.* Shear strengthening of RC beams using FRP composites. *Progress in Structural Engineering and Materials* (2004).

7. *Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T. and Lam, L. FRP-Strengthened RC Structures.* John Wiley and Sons (2002).

8. БДС EN 1991-1-1 – Проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции. Общи правила и правила за сгради.

9. *Абдулахад, Е., Христов, П., Паничков, Д.* Напрегнато и деформирано състояние на дефектирала стоманобетонна греда с плочогредово сечение, усилена с карбонови нишки. 2009.

10. *Паничков, Д.* Обследване и изпитване на строителните конструкции и съоръжения. 2001.

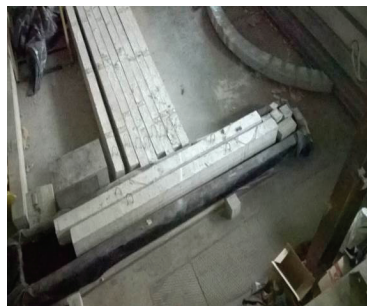
11. Строителство и недвижимост. Технически надзор за строителством и ремонт на мостовых железобетонных конструкций.

Приложение

Снимков материал



Симулиране на агресивна среда



Греди в агресивна среда на разтвор на морска сол и вода



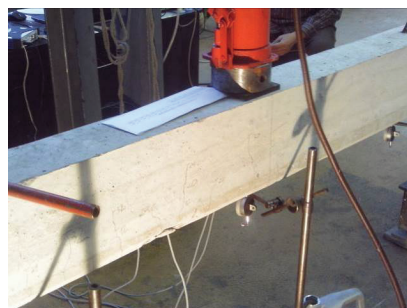
Изпитвателна схема на гредите преди усилване



Пукнатини в греда СВ0



Измерване на потенциала на греда СВ0



Пукнатини в греда СВ1



Измерване на потенциала на греда СВ1



Пукнатини в греда СВ2



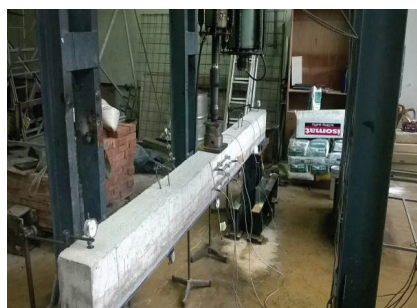
Измерване на потенциала на греда СВ2



Пукнатини в греда СВ3



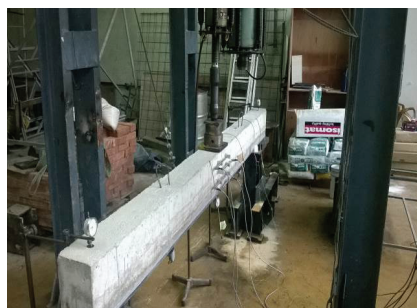
Измерване на потенциала на греда СВ3



Изпитвателна схема на гредите след усилване



Разрушение на греда СВ0



Разрушение на греда СВ0



Разрушение на греда СВ1



Разрушение на греда СВ1



Разрушение на греда СВ2



Разрушение на греда СВ2



Разрушение на греда СВ3



Разрушение на греда СВ3

STRENGTHENING WITH FRP OF REINFORCED CONCRETE BEAM EXPOSED TO AGGRESSIVE INFLUENCE

Sv. Spasov¹, E. Abdulahad²

Keywords: strengthening with FRP, beams, reinforced concrete, aggressive influence, carbon fibers

ABSTRACT

Many structures are exposed to aggressive influence, from which can be occur loss of serviceability or reach of destruction before the intended lifetime of the structure.

Externally bonded fiber reinforced polymers (FRP) can be used for retrofitting and strengthening of reinforced concrete structures. The main disadvantage of this method for strengthening is the possibility of debonding of the strengthening system.

The aim of this paper is to compare the efficiency of strengthening with FRP of reinforced concrete beam exposed to aggressive influence, using different schemes for strengthening in order to prevent debonding of the strengthening system for this purpose are conducted four test of reinforced concrete specimens.

¹ Svetoslav Spasov, Eng., Dept. "Reinforced Concrete Structures", UACEG, 1 Hristo Smirnenski Blvd, Sofia 1046, e-mail: eng.spasov@abv.bg

² Emad Abdulahad, Assoc. Prof. Dr Eng., Dept. "Reinforced Concrete Structures", UACEG, 1 Hristo Smirnenski Blvd, Sofia 1046, e-mail: georgosing@gmail.com