

ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ – СОФИЯ

Първа научно-приложна конференция с международно участие  
„СТОМАНОБЕТОННИ И ЗИДАНИ КОНСТРУКЦИИ – ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА“

22 – 23 октомври 2015

22 – 23 October 2015

First Scientific-Applied Conference with International Participation

“REINFORCED CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES – THEORY AND PRACTICE”

ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY – SOFIA

48 <sup>ТОМ</sup>  
vol.

2015

св. 12 – III  
fasc.

## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВРЪЗКАТА МЕЖДУ БЕТОН И УСИЛВАЩА FRP СИСТЕМА, АНКЕРИРАНА С FRP АНКЕРИ

Е. Абдулахад<sup>1</sup>, Св. Спасов<sup>2</sup>

*Ключови думи:* усилване с FRP, FRP анкери, разлепване, анкериране, въглеродни нишки

*Научна област:* усилване на стоманобетонни конструкции

### РЕЗЮМЕ

Механичното анкериране на външно залепените влакнесто армирани полимери (FRP) може да увеличи големината на реализираните усилия в тях, при усилване на различни стоманобетонни елементи. Анкери, направени от FRP, могат да бъдат приложени в различни случаи на усилен стоманобетонни греди и плочи с FRP материали. Ограниченият брой изследвания свързани с използването на FRP анкери, възпрепятства тяхното приложение в практиката.

Целта на това изследване е да даде оценка за ефективността на използването на FRP анкери, да се определят етапите на работа на усилващата система при развитието на деформациите и механизма на разрушение със и без използването на FRP анкери, като за целта са проведени редица експерименти.

### 1. Въведение

Влакнесто армираните полимери (FRP) все повече се използват за усилването на стоманобетонни елементи, чрез залепване по тяхната повърхност. Основен недостатък на този метод на усилване е възможността за преждевременно разлепване на усилва-

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

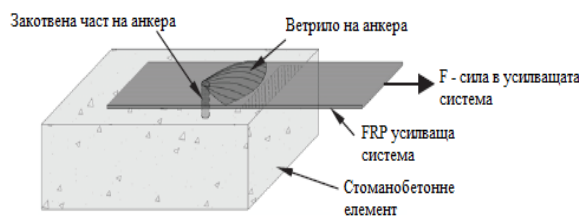
<sup>2</sup> Светослав Спасов, инж., кат. „Масивни конструкции“, УАСГ, бул. „Христо Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: e-mail: eng.spasov@abv.bg

щата FRP система. Добавянето на анкериращи устройства позволяват увеличаването на носимоспособността на връзката между бетона и композитния материал. Използването на анкери, направени от FRP материали (FRP анкери), е един ефективен начин за подобряване на тази връзка, въпреки че изследванията, свързани с приложението на този вид анкериране, са все още ограничени.

Съществуват два вида FRP анкери. Първите се изготвят на място, като се извива плат от въглеродни нишки в конусовидна форма и се образува фуния (фиг. 1). Анкерът се завързва в долния край, за да не се разтваря и след това се поставя в предварително пробити в бетона отвори, като горната част на анкера (ветрилото) се обръща върху залепения плат от въглеродни нишки (фиг. 2).



Фиг. 1. FRP анкери тип 1



Фиг. 2. Основни елементи на FRP анкер тип 1

Целта на ветрилото на анкера е да осигури химическа връзка между анкера и плата от въглеродни нишки, както и да намали концентрацията на напреженията около отвора в плата.

Вторият тип анкери се изготвят предварително, като около метален или силиконов прът се обвива и залепва плат от въглеродни нишки. След втвърдяване на смолата, прътът със залепения плат по него се поставя в предварително пробити отвори в бетона и се изрязва на нивото на бетонната повърхност. Този тип FRP анкери почти не се използват.



Фиг. 3. FRP анкери тип 2

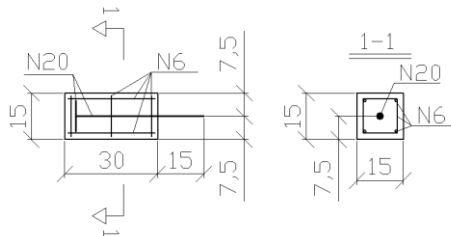
Все още в световен мащаб не е посочен универсален изчислителен метод за определяне на носещата способност на анкерирана усилваща FRP система поради

големия брой параметри, от които зависи носимоспособността: брой, разположение, ориентация на анкера, широчина на усилващата система и др. Тази статия има за цел да направи качествено и количествено сравнение между връзката на FRP усилваща система и бетона със и без използването на FRP анкери. Да направи сравнение в поведението и начина на работа в двата случая със и без анкери. Да направи сравнение между експериментално получените резултати и теоретично определени такива от наличната световна литература. За целта са изготвени и изпитани 6 опитни образеца.

## 2. Подготовка на образци

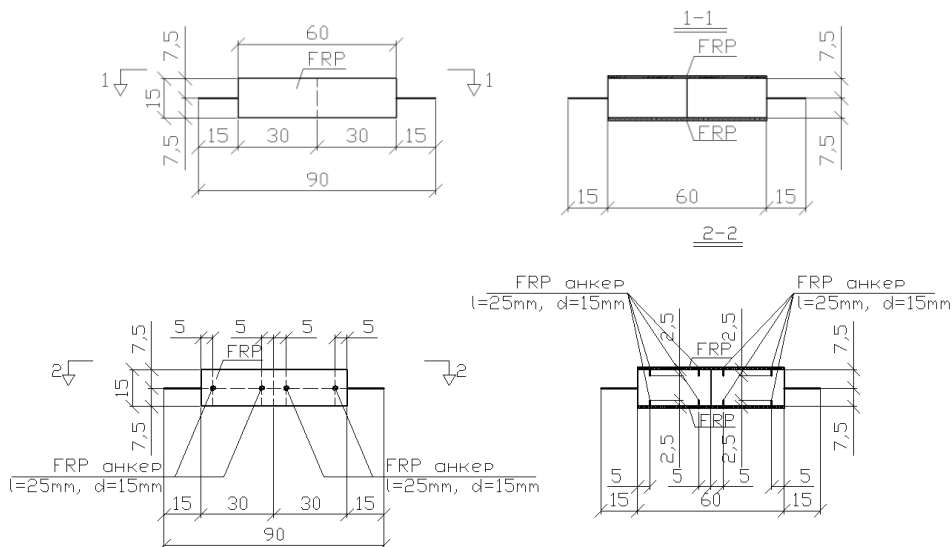
Изработени са дванадесет броя стоманобетонни призми. Използваните материали са бетон клас C16/20 и стомана B420. Отчетената средна стойност за якостта на бетона на натиск е 24.24 МПа. За стоманата е отчетена граница на провлачване при 440 МПа и скъсване при 530 МПа.

Образците са еднакви и са изготвени съгласно кофражния и армировъчния план на фиг. 4.



Фиг. 4. Кофражен и армировъчен план

Призмите се свързват две по две с плат от въглеродни нишки според схемите посочени на фиг. 5. По посочените схеми се получават по три опитни образеца със и без анкери.



Фиг. 5. Схема на свързване на призмите с FRP

Използваните карбонови влакна са под формата на еднопосочно армирана тъкан с дебелина от 0.11 mm и двукомпонентна епоксидна смола със следните характеристики:

**Таблица 1. Свойства на въглеродните нишки**

Параметър	Стойност
Якост на опън $f_{fib}$	3800 MPa
Модул на еластичност $E_{fib}$	235 GPa
Деформация при скъсване $\epsilon_{fib}$ :	1.5 %

**Таблица 2. Свойства на епоксидната смола**

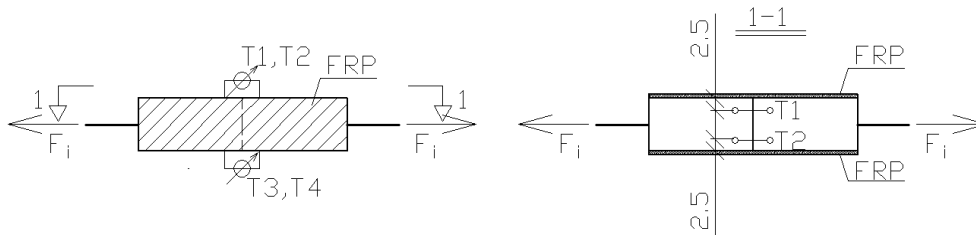
Параметър	Стойност
Модул на еластичност при натиск	2600 N/mm <sup>2</sup>
Якост на опън	44.6 MPa
Удължение до разрушаване	1.7%
Якост на натиск	90 MPa
Якост на огъване	70 MPa
Модул на еластичност	2500 MPa
Адхезия (към бетон)	> 4 N/mm <sup>2</sup>



**Фиг. 6. Приготвяне на опитните образци**

### 3. Измерителни уреди и изпитвателна схема

Следенето на удължението на усилващата система от FRP става посредством индуктивни датчици, разположени по два от двете страни на стоманобетонните призми фиг. 7. Датчиците са с точност 0.001 mm и база от 160 mm.



Фиг. 7. Схема с разпределение на измервателните уреди



Фиг. 8. Изпитвателна постановка

### 4. Теоретични изчисления

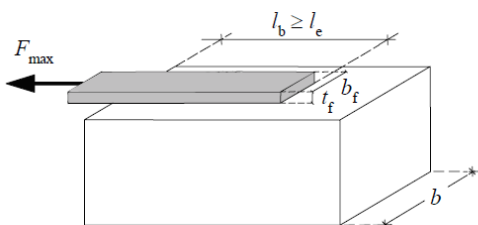
#### 4.1. Закотвяща дължина

Закотвящата дължина се определя според [3], като от значение са видът на бетона и свойствата на FRP материала.

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2f_{ctm}}} = \sqrt{\frac{235000 \times 0.11}{2 \times 1.9}} = 82.47 \text{ mm.} \quad (1)$$

Дължината на залепване на усилващата система от 300 mm е по-голяма от теоретично получената дължина на закотвяне.

#### 4.2. Сила, при която ще настъпи разрушение на образците без анкери [3]



Фиг. 9. Максимална сила, която може да се реализира в FRP системата

Силата на опън, при която ще настъпи разрушение, може да се определи по посочените зависимости. Като първо е необходимо да се определи напрежението, което може да се реализира между бетона и усилващата система. То пряко зависи от механичните свойства на бетона и геометрията на усилващата система.

$$\Gamma_F = k_G k_b \sqrt{f_{ck} f_{ctm}} = 0.03 \times 1 \sqrt{20 \times 1.9} = 0.185 \text{ N/mm}^2; \quad (2)$$

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1.0 \quad k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{150}{150}}{1 + \frac{150}{400}}} = 0.85 \Rightarrow k_b = 1.0. \quad (3)$$

Коефициентът  $k_G$  трябва да бъде определен експериментално, в [3] е посочена препоръчителна стойност от 0.03.

Силата на разрушение може да се получи от уравнение 4

$$F_{\max} = b_f \sqrt{2 E_f t_f \Gamma_F} = 150 \sqrt{2 \times 235000 \times 0.11 \times 0.185} = 14670 \text{ N} = 14.67 \text{ kN}. \quad (4)$$

#### 4.3. Сила, при която ще настъпи разрушение на образците без анкери [1]

В този случай напрежението, което може да се реализира между бетона и усилващата система, се получава от уравнението

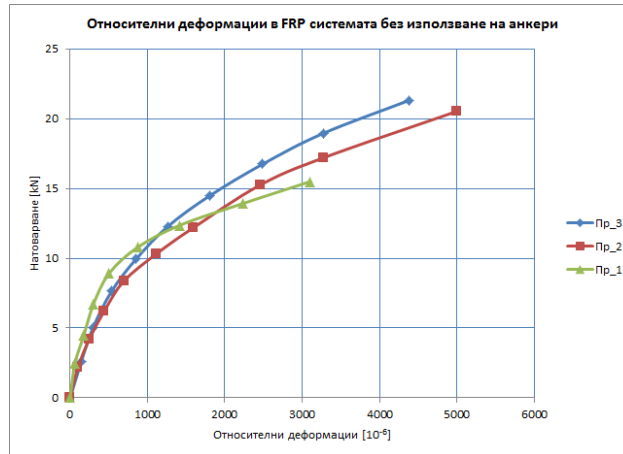
$$\Gamma_F = 0.045 f_{ck}^{2/3} = 0.045 \times 20^{2/3} = 0.332 \text{ N/mm}^2. \quad (5)$$

Силата на разрушение може да се получи от уравнение 6

$$F_{\max} = b_f \sqrt{\frac{2 \Gamma_F E_f t_f}{1 + \frac{E_f A_f}{E_c A_c}}} = 150 \sqrt{\frac{2 \times 0.332 \times 235000 \times 0.11}{1 + \frac{235000 \times 0.11 \times 150}{28600 \times 150 \times 150}}} = 19593 \text{ N} = 19.59 \text{ kN}. \quad (6)$$

## 5. Експериментални резултати

### 5.1. Опитни образци без анкери



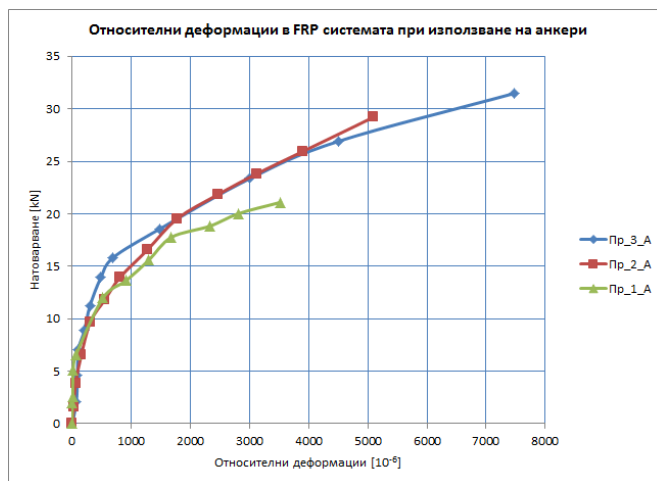
Фиг. 10. Относителни деформации в FRP системата без използване на анкери

Забелязва се, че и трите опитни образца имат сходно поведение и деформациите в усилващата система са в едни и същи граници. Вижда се линейно развитие на деформациите в опитните образци до сила от около 5 kN (1/4 от силата на разрушение). След това започва нелинейно развитие на деформациите, заради което се получава извиването на диаграмата. И трите образца се разрушават по един и същи начин, с отваряне на наклонена пукнатина в зоната на контакт между двете призми и рязко нарастване на деформациите. Увеличаването на натоварването предизвиква срязване на бетона в зоната на пукнатината и отлепване на цялата усилваща система. Средната сила, при която настъпва разрушението, е 19.11 kN. Дължината на „откъснатия“ бетон е между 7 и 8 cm, което е близко до дължината на закотвяне на усилващата система. Сравнявайки теоретично изчислените сили на разрушение и опитно получените, виждаме, че при определяне на силата по [3] се получава коефициент на разрушението от 1.3, а силата, определена по [1], е много близка, но и по-голяма от експериментално получената.



Фиг. 11. Разрушаване на опитните образци

## 5.2. Опитни образци с анкери



Фиг. 12. Относителни деформации в FRP системата при използване на анкери

Забелязва се, че и трите опитни образца имат сходно поведение и деформациите в усилящата система са в едни и същи граници. Вижда се линейно развитие на деформациите в опитните образци до сила от около 10 kN (1/3 от силата на разрушаване). След това започва нелинейно развитие на деформациите и разрушаване, подобно на образците без анкери. Средната сила, при която настъпва разрушаването, е 27.26 kN.

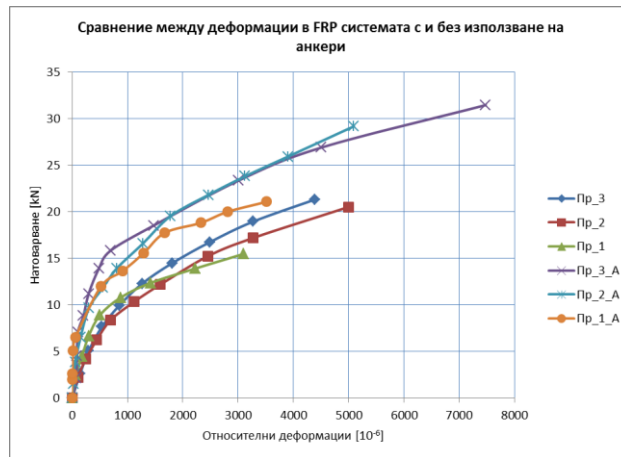


Фиг. 13. Разрушаване на опитните образци и изтръгване на анкера в края

## 5.3. Сравнение между всички опитни образци

Ясно се вижда, че използването на анкери забавя развитието на деформациите в усилящата система, като силата, до която има линейно развитие на деформациите, се увеличава почти двойно. Нелинейното развитие на деформациите и в двата случая започва след достигане на относително удължаване в FRP материала от около 0.2%. Си-

лата на разрушение при образците с анкери е с около 40% по-голяма от тази на образците без анкери.



Фиг. 14. Сравнение между деформациите в FRP системата със и без използване на анкери

## 6. Определяне приноса на анкерирането при изчисляване на усилващата система

От получената средна сила на разрушение на анкерираните опитни образци и като се използват зависимостите от [3], може по обратен път да се получи стойността на коефициента  $k_G$  (който трябва да се определя опитно и за случай на неанкерирана усилваща система се препоръчва стойност от 0.03). Получената експериментално разрушителна сила се намалява с коефициент на разрушение от 1.3.

$$F_{\max} / 1.3 = b_f \sqrt{2E_f t_f \Gamma_F} \quad (7)$$

$$27260 / 1.3 = 150 \sqrt{2 \times 235000 \times 0.11 \times \Gamma_F} \Rightarrow \Gamma_F = 0.378 \text{ N/mm}^2;$$

$$\Gamma_F = k_G k_b \sqrt{f_{ck} f_{ctm}} \quad (8)$$

$$0.378 = k_G \times 1 \sqrt{20 \times 1.9} \Rightarrow k_G \approx 0.06 .$$

В [6] е предложен аналитичен модел, отчитащ вида, броя и разположението на анкери и приноса им в увеличаване на носимоспособността на усилващата система.

Първо се определя коефициентът  $k_L$ , който държи сметка за разположението на анкери по дължина на елемента. В него участва разстоянието от края на елемента до анкера  $l_{end}$ , разделено на закотвящата дължина  $l_e$

$$l_{end,1} = 250 \text{ mm}; \quad l_{end,2} = 50 \text{ mm}; \quad (9)$$

$$k_{L,1} = 2.23 k_{L,2} = 0.7 \left( l_{end,2} / l_e \right) + 1 = 0.7 (50 / 82.47) + 1 = 1.42.$$

Определя се коефициентът  $k_\beta$ , който държи сметка за ъгъла между оста на прилагане на товара и закотвянето на самия анкер. В случая този ъгъл е равен на  $90^\circ$  ( $0.5\pi$ )

$$k_\beta = 2.34 (\beta_{anc} / \pi) + 0.67 = 2.34 (0.5\pi / \pi) + 0.67 = 1.84. \quad (10)$$

Определя се и коефициентът  $k_b$ , който зависи от широчината на анкериранията усилваща FRP система

$$k_b = 1.02 (b_f / 200)^{-0.39} = 1.02 (150 / 200)^{-0.39} = 1.14. \quad (11)$$

Отчитането на приноса на всеки един от анкерите става по формула 12, като се използват вече определените за всеки един анкер коефициенти:

$$\begin{aligned} k_{s,1} &= 1.59 (k_{L,1} - 1) (k_\beta - 1) (k_b - 1) + 1 = \\ &= 1.59 (2.23 - 1) (1.84 - 1) (1.14 - 1) + 1 = 1.23; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} k_{s,2} &= 1.59 (k_{L,2} - 1) (k_\beta - 1) (k_b - 1) + 1 = \\ &= 1.59 (1.42 - 1) (1.84 - 1) (1.14 - 1) + 1 = 1.08. \end{aligned}$$

Окончателният принос на редицата анкери става посредством уравнение 13

$$k_m = \sum_1^n (k_{s,i} - 1) + 1 = 1.31. \quad (13)$$

Силата, при която ще се получи разрушение на анкериранияте образци, се получава както следва:

$$F_{\max,anc} = k_m F_{\max} = 1.31 \times 14.67 = 19.22 \text{ kN}. \quad (14)$$

Сравнявайки теоретично определената сила на разрушаване на анкерирания FRP система с два анкера и експериментално получените резултати, можем да определим коефициент на разрушение от 1.42.

## 7. Заключение

От така направените изпитвания и сравнения може да се посочат следните изводи:

- Въпреки че формулата за определяне на силата на разрушаване на неанкерирания усилваща система в [3] има емпиричен вид, тя дава по-добри теоретични резултати в сравнение с тази, посочена от [1].

- Усилващата FRP система, подложена на опън, работи в два стадия: линейно развитие на деформациите, последвано от нелинейно развитие на деформациите. Граничното състояние се получава при поява на наклонена пукнатина в бетона в зоната на закотвяне на FRP системата.
- По-голямата дължина на закотвяне на FRP системата не увеличава силата на разрушение и може да се приеме, че не е икономически целесъобразно.
- Използването на FRP анкери забавя линейното развитие на деформациите в усилящата система, поради което може да се приложи по-голяма опънна сила в нея.
- Използването на FRP анкери увеличава силата на разрушение с около 40% в сравнение със случаи без анкери.
- Предложените зависимости в [6] за получаване на носимоспособността на анкерирана FRP система дава стойности с достатъчна точност и сигурност.
- Предложената изпитвателна схема е подходяща за определяне на връзката между бетон и FRP усиляща система в случаи със и без анкери.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Holzenkämpfer, P.* Ingenieurmodelle des Verbunds Geklebter Bewehrung für Betonbauteile. 1994.
2. *Mieres, J.* Evaluation of the anchorage behavior of the FRP wet lay-up laminates applied to concrete substrates. 2007.
3. *National research council.* Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for strengthening Existing Structures – CNR-DT200/2004.
4. *Pacheco, Cl.* – Experimental study on bond between carbon fiber composite and concrete. 2007.
5. *Zhang, H.* FRP-to-concrete joint assemblages anchored with multiple FRP anchors. 2011.
6. *Zhang, H.* Fiber-reinforced polymer (FRP)-to-concrete joints anchored with FRP anchors: tests and experimental trends. 2013.

# INVESTIGATION OF THE BOND BETWEEN CONCRETE AND FRP STRENGTHENING SYSTEM ANCHORED WITH FRP ANCHORS

E. Abdulahad<sup>1</sup>, Sv. Spasov<sup>2</sup>

**Keywords:** *strengthening with FRP, FRP anchors, debonding, anchoring, carbon fibers*

**Research area:** *strengthening of reinforced concrete structures*

## ABSTRACT

Mechanical anchorage can enhance the capacity of externally bonded fiber-reinforced polymer (FRP) composite which is used for the strengthening of concrete members. Anchors made from FRP can be used for different types of strengthening of reinforced concrete beams and slabs with FRP materials. Limited researches about the use of FRP anchors hinder their application in practice.

The aim of this paper is to assess the effectiveness of the use of FRP anchors, to define the work stages of the strengthening system in the development of the strains and the rupture mechanism with and without the use of FRP anchors. For this purpose several experiments are conducted.

---

<sup>1</sup> Emad Abdulahad, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Reinforced Concrete Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd, Sofia 1046, e-mail: georgosing@gmail.com

<sup>2</sup> Svetoslav Spasov, Eng., Dept. "Reinforced Concrete Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd, Sofia 1046, e-mail: eng.spasov@abv.bg