



*Получена: 10.02.2017 г.*

*Приета: 25.05.2017 г.*

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА СТОМАНОБЕТОННИ ГРЕДОВИ ЕЛЕМЕНТИ, УСИЛЕНИ С ВЪНШНА НАПРЕГНАТА АРМИРОВКА

С. Брозиг<sup>1</sup>

*Ключови думи: греди, бетон, обследване, усилване*

### РЕЗЮМЕ

Възстановяването и усилването на носещите стоманобетонни конструкции и техните елементи е проблем, чиято актуалност в днешно време нараства.

В проекта са проведени експериментални изследвания на възможностите за възстановяване и усилване на носещи стоманобетонни конструкции с помощта на външно предварително напъгане. В изследването са съпоставени усилващи системи, като за различните елементи се променя положението на обтегача спрямо нулевата линия на елемента. Следи се за промяната на показателите на елемента преди и след усилването, както и разликата между различните усилващи схеми.

### 1. Въведение

Изготвени са осем стоманобетонни греди с дължина 3,5 m. Статическата схема, по която гредите се изпитват, е проста греда на две опори, разположени на разстояние 0,25 m от двата ѝ края. По този начин светлият отвор остава 3 m.

Гредите са изпълнени от стоманобетон, като широчината на един елемент е 12,5 cm, а височината му 30 cm. Долната армировка се състои от два пръта N14, изпълнени от стомана АIII (B420). Горната армировка е 2Ø8 от стомана АI (B235). Стремената са Ø8/15 от стомана АI (B235). Класът на бетона е B25, вж. [1]. Измерена е консистенцията, отговаряща на клас S3 (13 cm).

---

<sup>1</sup> Силвия Брозиг, докторант, кат. „Масивни конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: sbrozig@gmail.com

В първия етап гредите са подложени на един и същи тип натоварване. То е избрано според представителното за подобен род елементи характеристично натоварване.

Опитните образци са подложени на вибрационно натоварване. По този начин се моделира по отношение на пукнатини и деформации дълготрайното поведение на подобни елементи в рамките на 15 – 20 години експлоатационен период.

Образувалите се наклонени пукнатини в елементите са с големина и местоположение съгласно предварително предвидените. При повторното натоварване системата от пукнатини се запазва без поява на нови пукнатини, което показва, че процесът на пукнатинообразуване е стабилизиран аналогично на елементи, експлоатирани в дълъг период от време.

За да се ограничи размерът на пукнатините и да се увеличи носимоспособността на гредата като цяло, елементите ще бъдат усилены по четири различни схеми. Целта е огъващият момент, който гредата може да понесе, да бъде увеличен поне два пъти. До момента са изпитани четири образца по три от избраните схеми на усиляването. Но те не са достатъчни, за да може от тях да се достигне до глобални изводи за поведението на елементите, усилены по този начин.



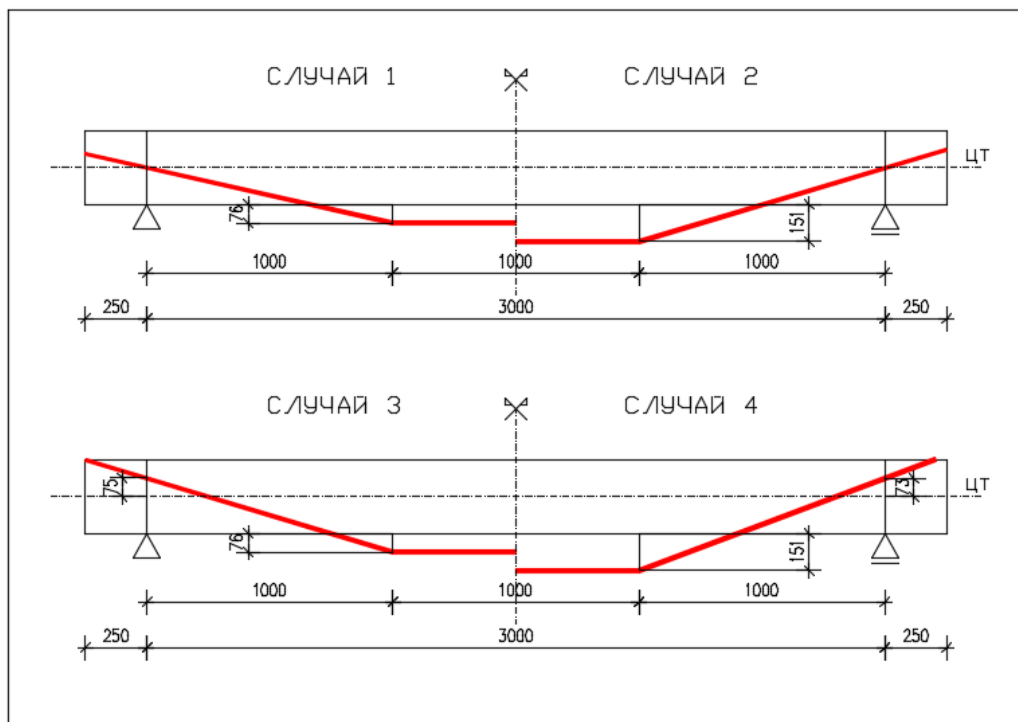
Фиг. 1. Пукнатини в експерименталния образец вследствие на дълготрайна експлоатация

## 2. Усилваща система

Системата, която се използва за усиляването, е тип шпренгелна. Състои се от полигонален обтегач, закрепващи и напрягащи детайли. Обтегачът се захваща за съществуващата греда с помощта на разработени авторски стоманени детайли за закрепващи устройства. Напрягащата армировка е с диаметър  $\Phi 14$  и е изработена от стомана B500.

В долната част се предвиждат две отклоняващи устройства. Обтегачите (по един от двете страни на съществуващата греда) се включват в работа чрез предварително напрягане. Това се постига чрез навиване на гайките спрямо закотвящите приспособления, при което армировката се удължава и напряга.

За усиляването на гредите са избрани четири разновидности на шпренгелната система. Във всяка една от тях има различен параметър, който се променя.



Фиг. 2. Схеми на захващане на обтегача към усиления елемент

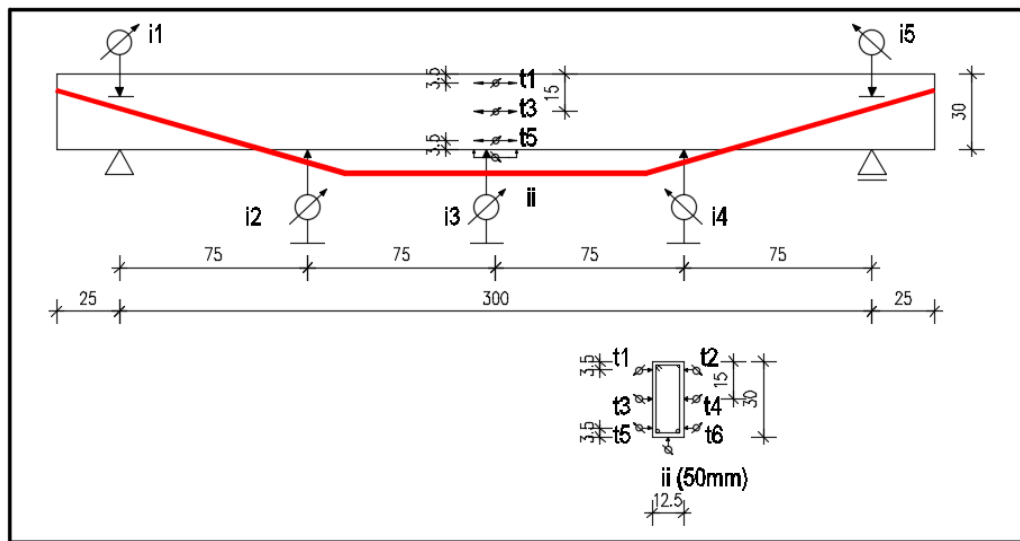
По всяка една от четирите схеми са усилены по две греди. При всички греди отклоняващите приспособления се поставят на един метър от опорите, което е и зоната, в която се прилага вертикалното натоварване. При първите два варианта закрепващите устройства в краищата на гредата са така избрани, че обтегачът да минава през центъра на тежестта на гредата в сечението на опорите. При вторите два варианта закрепващите устройства са повдигнати нагоре, като целта е обтегачът да минава на 75 mm от центъра на тежестта на гредата в сечението при опорите.

Другият параметър, който варира, е ексцентрицитетът между напрегащата армировка и центъра на тежестта на гредата в средното ѝ сечение. За целта са изготвени различни по височина отклоняващи приспособления. В първия и третия случай отклоняващите приспособления са с височина 68 mm, с което се получава ексцентрицитет от 226 mm. Във втория и четвъртия случай девиаторите са с по-голяма височина – 143 mm, с което се получава разстояние до центъра на тежестта на гредата 301 mm.

При поставяне на обтегача на разстояние от нулевата линия на гредата създаваме в нея огъващ момент, обратен по посока на този от външния товар. Колкото по-голямо е разстоянието, толкова по-голям е този момент. По този начин има възможност да бъде приложен много по-голям товар върху елемента. Също така, колкото по-голям е ексцентрицитетът, толкова по-голяма става полезната височина, което подпомага цялостната работа на усиления елемент.

По дължина на гредата, за следене на деформациите, са разположени индуктивни датчици. Те са с различен обхват в зависимост от измерваната величина. За измерване на относителните деформации в шест точки от напречното сечение на гредата в средата на отвора са използвани датчици с обхват 10 mm. За измерване на провисванията е използван индуктивен датчик с обхват 50 mm. Местоположението на различните видове датчици е показано на фигура 3.

Използвани са също и пет броя часовникови индикатори. Два от тях следят евентуалното преместване или завъртане при опорите. Други два са поставени в четвъртините и един в средата на сечението. С тях се следят провисванията на гредата.

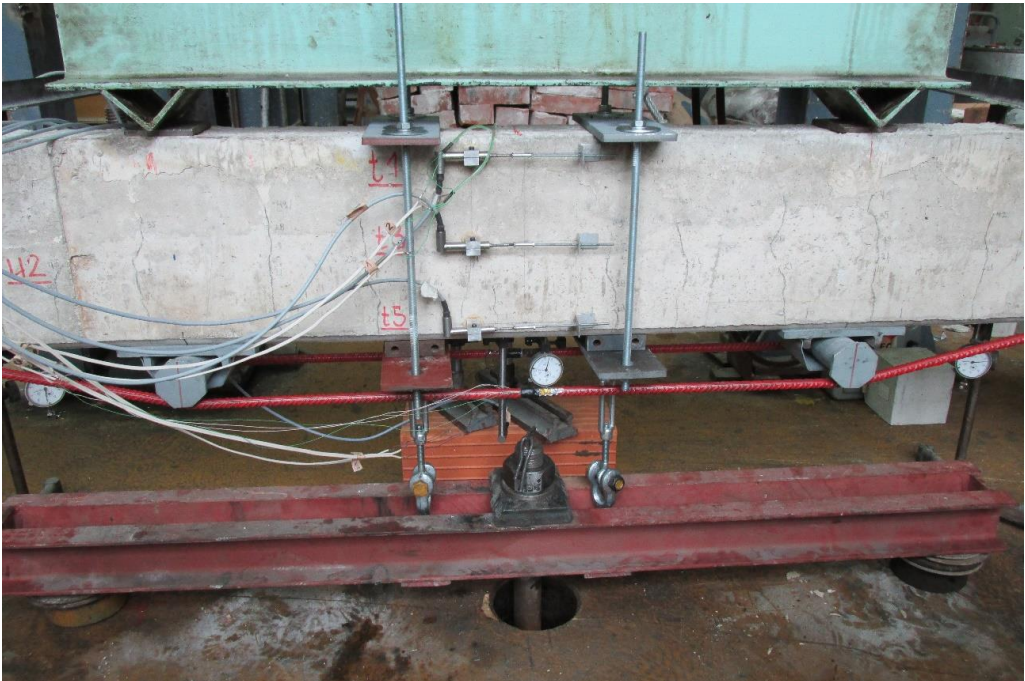


Фиг. 3. Схема на уредите, отчитащи деформациите в елемента

На всеки един от обтегачите са поставени по два електросъпротивителни деформоприемника, за да може да се следят силите в прътите при налягането им. На базата на получената информация за деформациите в армировката може пряко да се следи размерът на налягащата сила.

При реализиране на усиление на съществуваща конструкция се предполага, че има действащи постоянни товари, като например теглото на плочата. В общия случай други такива, като например архитектурните настилки, са отстранени. За да може постановката да бъде най-близка до реалността, се симулира това натоварване, като върху елемента е приложена сила, предизвикваща момент  $M = 7 \text{ kNm}$ . При такова натоварване гредата е фиксирана към силовия под посредством хомут и допълнителна стоманена греда, показана на фигура 4.

Двата края на налягащата армировка са резбовани. Посредством муфа, показана на фигура 5, към тях са прикрепени резбовани шпилки за осъществяване на налягането. Шпилките се захващат към гредата с помощта на закрепващи приспособления и гайки. Самото налягане на елементите става като гайката се притяга спрямо закотвящите приспособления с помощта на гаечен ключ до достигане на желаната налягаща сила.



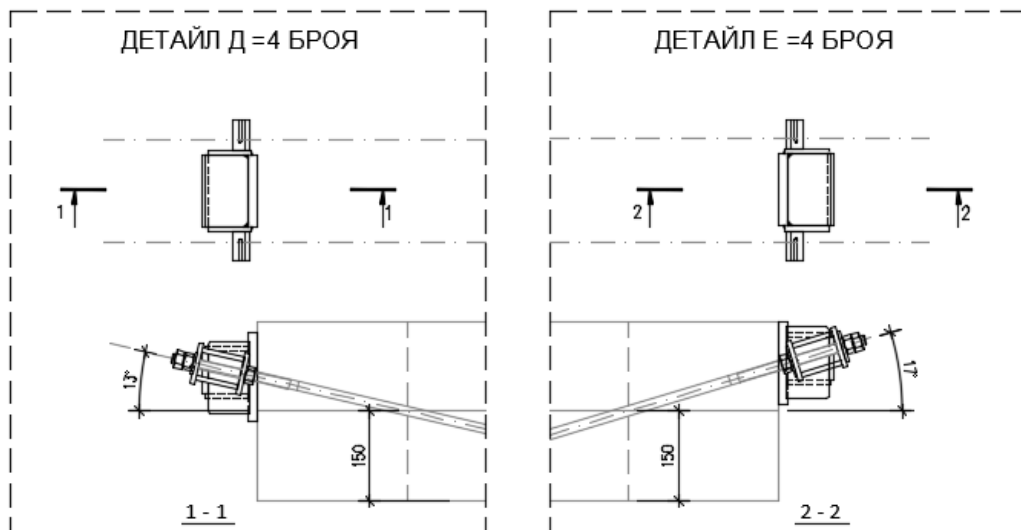
**Фиг. 4.** Симулиране на постоянни въздействия чрез фиксиране на гредата към силовия под



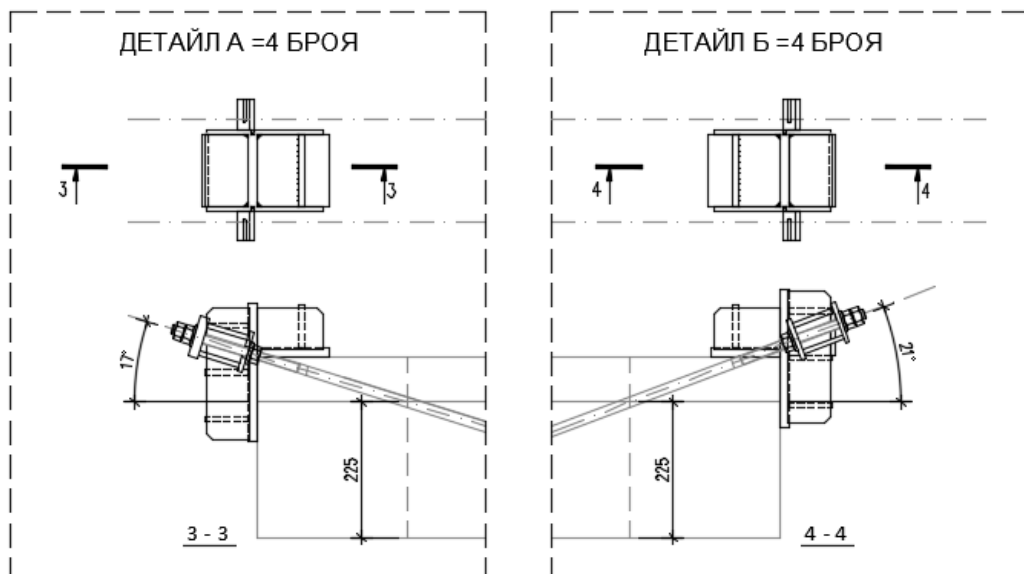
**Фиг. 5.** Муфа, свързваща напрегащата армировка и шпилките

### 3. Детайл за прикрепване на обтегача към елемента

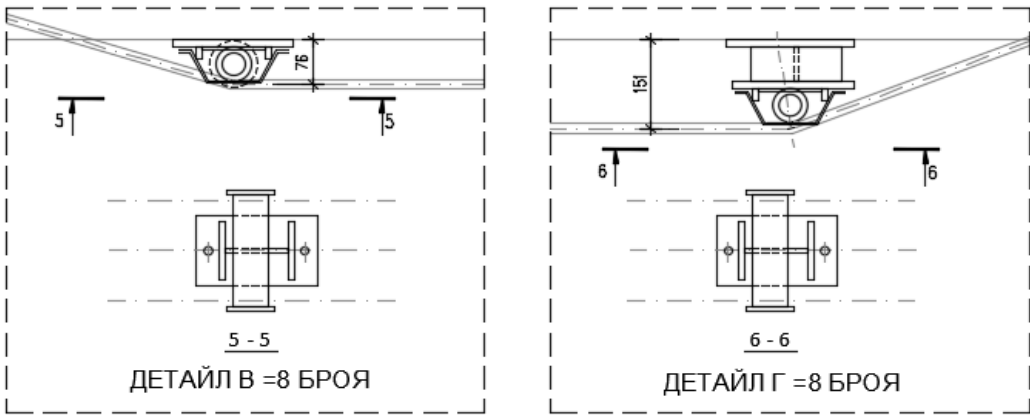
Изготвените стоманени детайли са съобразени с посочените схеми на захващане на обтегача към усилвания елемент. Проектирани са така, че да могат да издържат хоризонталните и вертикалните сили, които те трябва да предадат на усилвания елемент. И закрепващите и налягащите детайли се прикрепват към гредата с помощта на болтове и дюбели, чието място освен със схемата на усилване се съобразява и с напречната и надлъжна армировка във вътрешността на гредата. Показани са на фигури 6, 7 и 8.



Фиг. 6. Закрепващо устройство в Случай 3 и 4 на захващане на обтегача към елемента



Фиг. 7. Закрепващо устройство в Случай 1 и 2 на захващане на обтегача към елемента

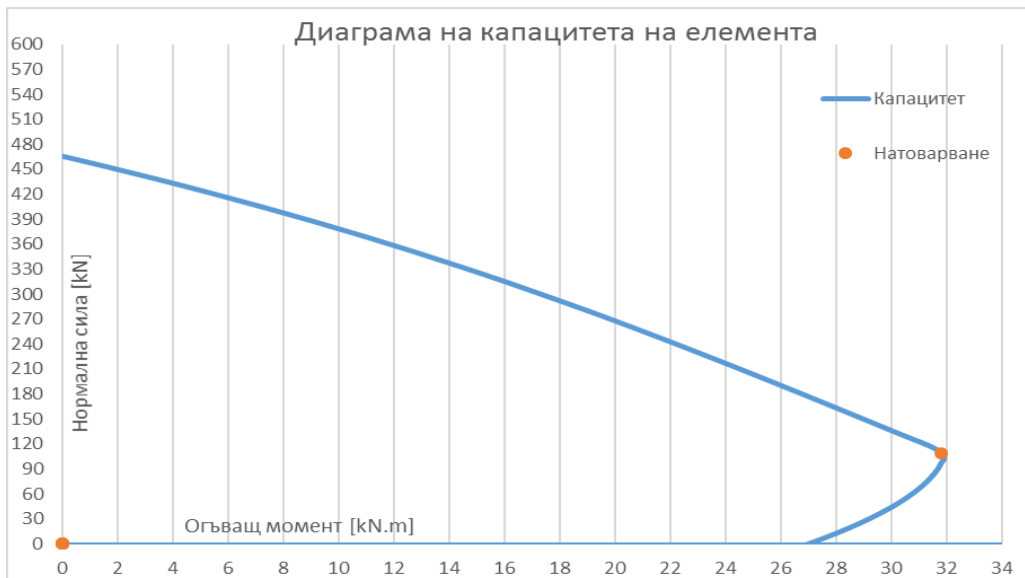


Фиг. 8. Девиатори в случай на малък или голям ексцентрицитет на обтегача

#### 4. Статическо изчисление на усиления елемент

При поставяне на напрегащата армировка статическата схема на елемента се запазва, но гредата вече не работи на чисто огъване. Благодарение на обтегача, в гредата има приложена натискава сила, с ексцентрицитет спрямо нулевата линия на елемента, като ексцентрицитетът се променя в зависимост от схемата на усиляването.

На фиг. 9 е показана интеракционна диаграма на капацитета на усиления елемент на нецентричен натиск. Това е носимоспособността на несиметрично армирания експериментален образец за комбинирано натоварване от знакопроменливо огъване с нормална сила (опънна или натискава). Изборът на големина на напрегащата сила е продиктуван именно от тази диаграма.



Фиг. 9. Диаграма на капацитета на елемента

Капацитетът на огъване на елемента е разликата от момента, породен от външното натоварване и обратния на него огъващ момент, който се получава от напрегнатата армировка.

$$P \times e_m = M_P, \quad (1)$$

$$M_{induced} = M_{capacity} + M_P, \quad (2)$$

където  $M_{induced}$  е огъващият момент от външен товар, kNm;

$M_{capacity}$  – носещата способност на гредата, kNm;

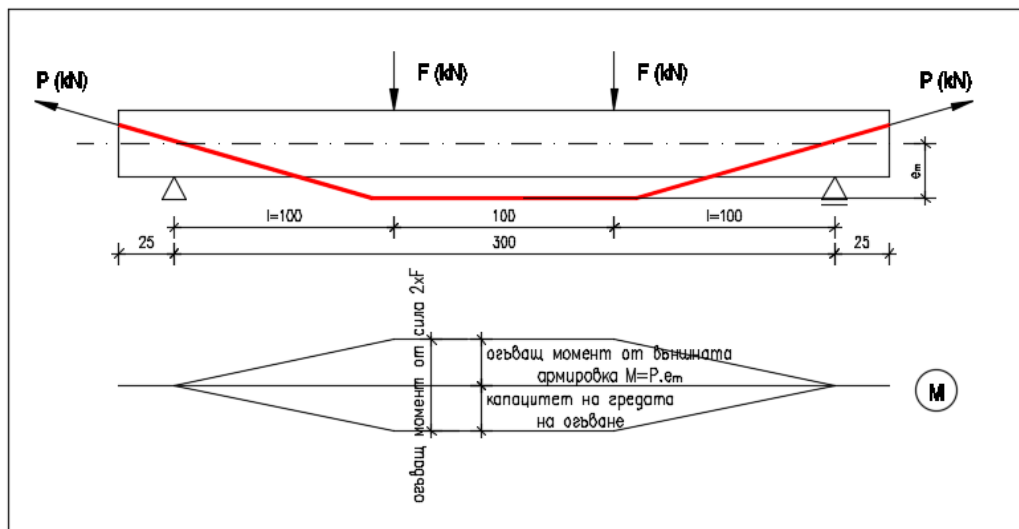
$M_P$  – огъващият момент от обтегача, kNm.

Това уравнение е изобразено графично на фиг. 10.

Първоначално е избрана сила  $P_0$ , с която да бъде напрегната армировката. За да се изчисли крайният огъващ момент в гредата, породен от обтегача, трябва да се вземат предвид загубите на силата от поддаване на опорите, триене в отклонителните приспособления и др. Приети са загуби в напрегащата сила около 10%.

$$P = P_0 / 1,1 = 70 / 1,1 = 63,6 \text{ kN}, \quad \text{по формула (2)}$$

където  $P$  е напрегащата сила в елемента след протичане на загубите, kN.



Фиг. 10. Диаграма на огъващите моменти в елемента вследствие на външното натоварване и шпренгелната система

Усилието в обтегача в крайно гранично състояние в общия случай е сума от две компоненти: усилието от началното напрежение в напрегнатата без сцепление с бетона армировка, и прираста  $\Delta P$ , предизвикан от удължението  $\dot{\epsilon}$ , вследствие на външното натоварване.

$$P_{Rd} = \Delta P + P. \quad (3)$$

За да се определи крайната сила, която се получава в напрегащата армировка, трябва да се изчисли увеличението на напрежението в кабела отвъд ефективното. Има много начини за определяне на тази величина. Като всяко едно от изследванията дава различни стойности, вж. [2, 3, 4].

Приблизителното определяне на увеличението на тази сила може да стане по формулата, вж. [5]:

$$\Delta P = \frac{2Pe_m}{l}, \quad (4)$$

където  $e_m$  е ексцентрицитетът между напрегащата армировка и центъра на тежестта на гредата в средното сечение, mm;

$l$  – хоризонталното разстояние от опората на елемента до точката на отклонителното приспособление, mm.

След изчисление се получава:

- за по-малкия ексцентрицитет  $e_{m_1} = 226$  mm

$$\Delta P = \frac{2 \times 70 \times 226}{1000} = 31,6 \text{ kN}; \quad \text{по формула (4)}$$

- при  $e_{m_2} = 301$  mm

$$\Delta P = \frac{2 \times 70 \times 301}{1000} = 42,1 \text{ kN}. \quad \text{по формула (4)}$$

Следователно крайната сила, която се очаква да се получи в армировката след протичане на загубите и след увеличение на напрежението над ефективното е както следва:

- при  $e_{m_1} = 226$  mm

$$P_{Rd_1} = \Delta P_1 + P = 63,6 + 31,6 = 95,2 \text{ kN}, \quad \text{по формула (3)}$$

$$M_{P_1} = P_{Rd_1} \times e_{m_1} = 95,2 \times 0,226 = 21 \text{ kNm}; \quad \text{по формула (1)}$$

- при  $e_{m_2} = 301$  mm

$$P_{Rd_2} = \Delta P_2 + P = 63,6 + 42,1 = 105,7 \text{ kN}, \quad \text{по формула (3)}$$

$$M_{P_2} = P_{Rd_2} \times e_{m_2} = 105,7 \times 0,301 = 31,8 \text{ kNm}. \quad \text{по формула (1)}$$

От капацитивната диаграма разбираме, че максималният момент, който може да понесе гредата при максималната натискова сила  $N = 105$  kN е  $M = 31$  kNm. Следователно за максималния момент от външната сила се получава:

- при  $e_{m_1} = 226$  mm

$$M_{induced,1} = M_{capacity} + M_{P_1} = 31 + 21 = 52 \text{ kNm}; \quad \text{по формула (2)}$$

- при  $e_{m_2} = 301 \text{ mm}$

$$M_{induced,2} = M_{capacity} + M_{P_2} = 31 + 31,8 = 62,8 \text{ kNm.} \quad \text{по формула (2)}$$

От така направените изчисления са получени изводи за изчислителната носимоспособност на елемента и съответно е избрана и схема на натоварването.

## 5. Схема на натоварването

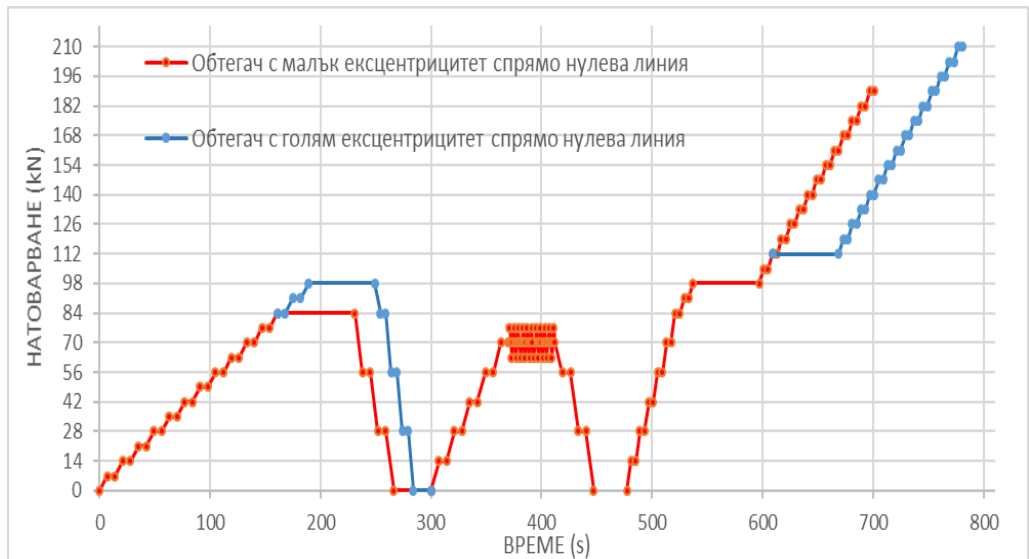
Натоварването на елементите се изпълнява на степени по 7 kN. Приемат се близки до получените в предишната точка изчислителни огъващи моменти, кратни на 7 kN. За гредите от първа и трета схема на усилването е приет  $M_{induced} = 49 \text{ kNm}$ , а за гредите от втора и четвърта схема –  $M_{induced} = 56 \text{ kNm}$ .

При първия етап на натоварването се достига до характеристикната якост на гредата на степени по 7 kN. Характеристично натоварване се получава, като изчислителният огъващ момент се занижи с коефициент 1.15. По този начин се получава, за първия тип греди, характеристична стойност на огъващия момент 42 kNm, а за втория – 49 kNm.

При втория етап се достига до натоварване от 77 kN, като след това гредата се поставя под циклично натоварване, с амплитуда 7 kN. Целта на този вид натоварване е да се проявят загубите на силата в напрягащата армировка.

При третия етап на натоварването се достига до изчислителната носимоспособност на сечението, като силата се задържа известно време на това ниво. По изчисление моментът в първия тип греди е 49 kNm, като той се получава при натоварване на гредата с две сили, сумата от които е 98 kN. При другия тип елементи моментът е 56 kNm и се получава от натоварване с две сили, сумата от които е 112 kN.

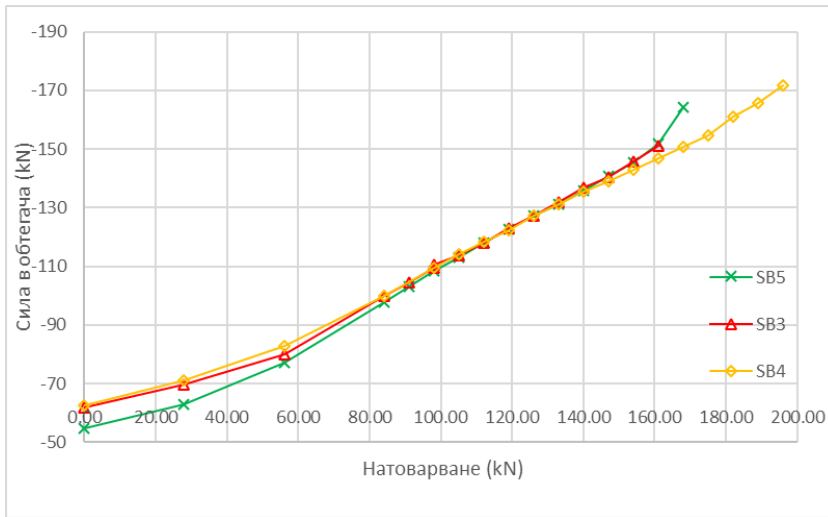
След като силата е задържана достатъчно дълго на тази стойност, се продължава с повишаването ѝ на степени по 7 kN, до достигане на момента на разрушението.



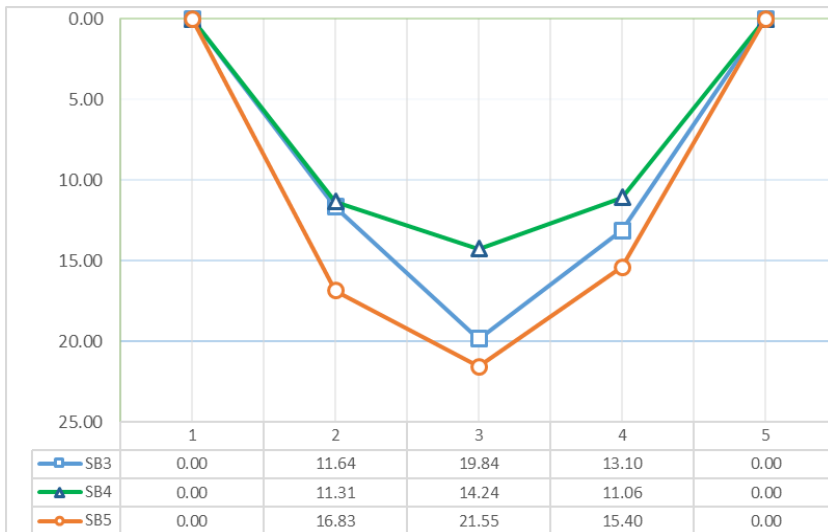
Фиг. 11. Схема на натоварване на усилените елементи

## 6. Резултати от изпитаните образци

По време на изследването на усилените елементи в тях са следени множество показатели: относителните деформации в стоманобетонния елемент в средното му сечение, максималните провисвания в средата на гредата, премествания в други характерни точки. Също така са получени и деформациите в опънната армировка във вътрешността на гредата, както и деформациите в обтегачите. Изчислена е сумарната сила, възникваща от налягането на армировката, което е показано на фиг. 10. В зависимост от схемата на усиляването гранично състояние се достига при различна сила в елементите.



Фиг. 12. Диаграма на силата в налягащата армировка в зависимост от външния товар



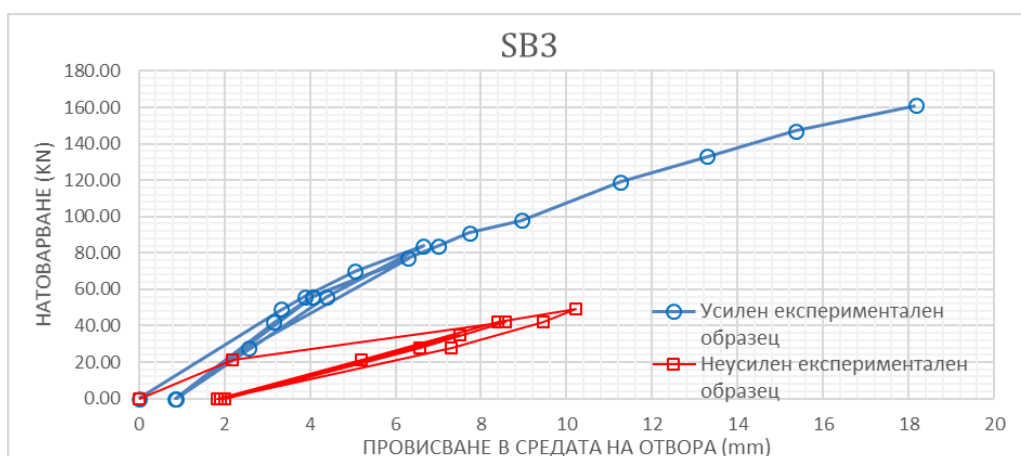
Фиг. 13. Провисване при натоварване на усилените образци със сила  $F = 154$  kN

## 6.1. Изпитване на първия образец СБЗ

Първият изпитан образец е усилен с първата от четирите възможни схеми. Девиаторите са с малък ексцентрицитет спрямо нулевата линия на елемента. Закотвящите устройства са така поставени, че обтегачът да минава през центъра на тежестта на сечението при опората.



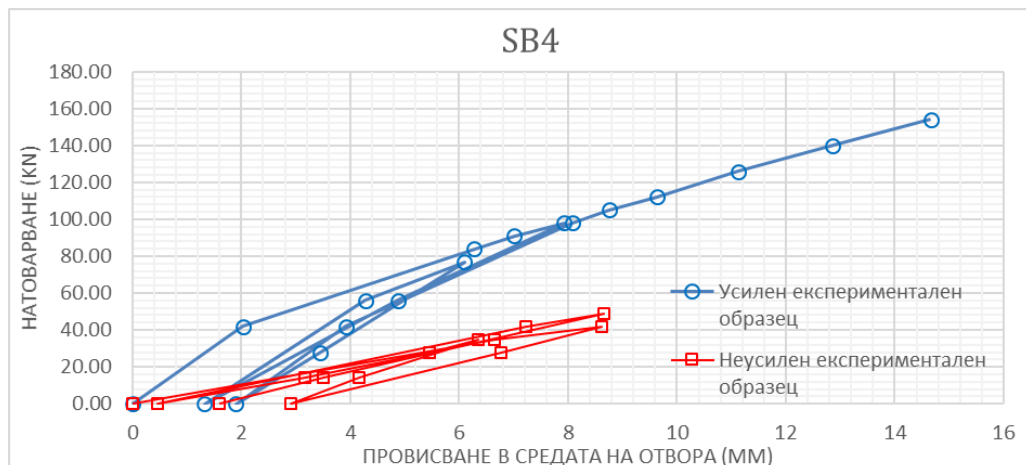
Фиг. 14. Схема на усиление на елементите



Фиг. 15. Сравнение между провисванията на образците преди и след усиляването им

## 6.2. Изпитване на втория образец СБ4

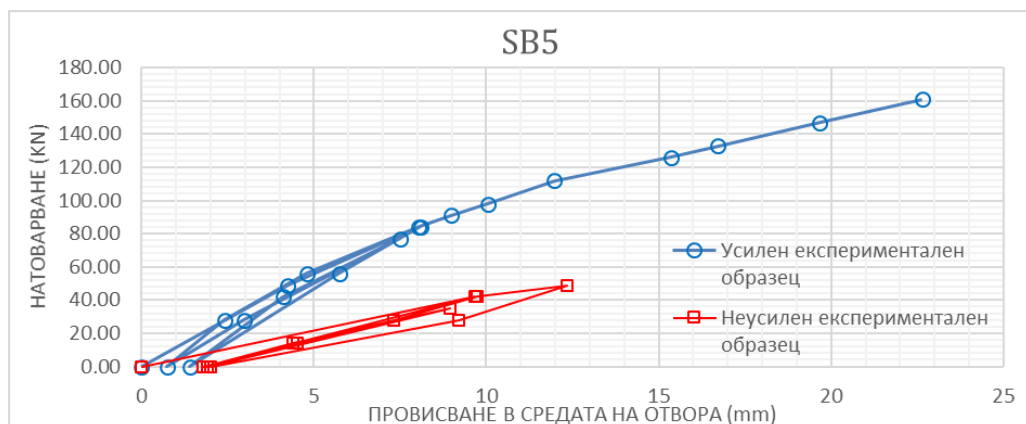
Вторият образец е усилен по втората от четирите възможни схеми. Девиаторите са с голям ексцентрицитет спрямо нулевата линия на елемента. Закотвящите устройства са така поставени, че обтегачът да минава през центъра на тежестта на сечението при опората.



Фиг. 16. Сравнение между провисванията на образците преди и след усилянето им

## 6.3. Изпитване на третия образец СБ5

Третият образец е усилен по третата от четирите възможни схеми. Девиаторите са с малък ексцентрицитет спрямо нулевата линия на елемента. Закотвящите устройства са така поставени, че обтегачът да минава на 75 mm от центъра на тежестта на сечението при опората.



Фиг. 17. Сравнение между провисванията на образците преди и след усилянето им

## 7. Разрушение

На фиг. 18 до фиг. 21 са показани дефектите в елемента, съпътстващи неговото разрушение.



Фиг. 18. Пукнатина в бетона вследствие провлачване на опънната армировка



Фиг. 19. Диагонални пукнатини в близост до опорите, причинени от срязване



Фиг. 20. Смачкване на натисковата зона



Фиг. 21. Разрушение на зоната при опора вследствие на скъсване на обтегача

В таблица 1 е направено сравнение между характеристичните и изчислителните сили и разрушителните такива в елементите, с цел да се направи по-точна оценка на усиляването [6].

Таблица 1. Коефициенти на сигурност и разрушение

Сравнение на изчислителни сили и разрушителни в образците					
Елемент	$F_k$ (kN)	$F_d$ (kN)	$F_u$ (kN)	$K_s$	$K_{rup}$
SB3	98	133	189	1,93	1,42
SB4	112	154	210	1,88	1,36
SB5	98	133	164	1,67	1,23
SB6	112	154	184	1,64	1,19

## 8. Изводи

- Усиляването с външна напрегната армировка е един много ефективен метод, който би могъл да се постигне със сравнително малко средства, без съществени технически затруднения.

- Увеличаването на ексцентрицитета води до известно увеличение на носещата способност.
- В значително по-висока степен увеличаването на ексцентрицитета се отразява на провисванията. Колкото по-отдалечен е обтегачът от центъра на тежестта на гредата, толкова по-голяма е коравината на усиления елемент и следователно по-малки провисванията му.
- От сравнението на коефициентите на сигурност и разрушение за неусилените и усилените образци, се стига до извода, че този вид усиление има благоприятно въздействие на конструкцията.
- В неусиления елемент се появяват пукнатини с размер 0,3 mm при достигане на характеристичната му носимоспособност. В образците с шпренгелна система при тази степен на натоварване пукнатини не се отварят.
- Проявилите се загуби в напрягащата сила в елементите, с високо разположено закотвящо приспособление, са двойно по-големи от тези, където шпренгелът минава през центъра на тежестта на сечението при опората.
- Повишаването на носимоспособността на усилените елементи е значително по-голямо при ниско разположени закотвящи приспособления.
- Граничното състояние настъпва при провлачване на опънната армировка. Напречното сечение на шпренгелната система и силата в нея трябва да бъдат така подбрани, че да не се получи крехко разрушение в бетона и да не се допусне шпренгелът да провлачи преди провлачването на армировката.

## Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор Д-72/2015 г. е подкрепена финансово от Център за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. БДС EN 1992 Еврокод 2. Проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции. Част 1-1: Общи правила и правила за сгради. Български Институт по Стандартизация, 2007.

2. *Manisekar, R., Sivakumar, P., Lakshmikandhan, K. N.* Experimental investigations of strengthening of RC beams by external prestressing. // Asian journal of civil engineering (BHRC), Vol. 15, No. 30-363, 2014.

3. *Naaman, A. E., Alkhairi, F. M.* Stress at Ultimate in Unbonded Post-Tensioning Tendons: Part 1 – Evaluation of the State-of-the-Art. // ACI STRUCTURAL JOURNAL, September-October 1991.

4. *Naaman, A. E., Alkhairi, F. M.* Stress at Ultimate in Unbonded Post-Tensioning Tendons: Part 2 – Proposed Methodology // ACI STRUCTURAL JOURNAL, November-December 1991.

5. Lin, T. Y. Load-Balancing Method for Design and Analysis of Prestressed Concrete Structures. // Journal of the American Concrete Institute, Vol. 60, No. 6, Jun., pp. 719-741, 1963.

6. Димов, Д. Обследване и изпитване на строителни конструкции и мостове, УАСГ, 2010.

## **EXPERIMENTAL STUDY OF REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH EXTERNALLY PRESTRESSED TENDONS**

**S. Brozig<sup>1</sup>**

*Keywords: beams, concrete, investigation, strengthening*

### **ABSTRACT**

Strengthening and retrofitting of reinforced concrete structures is a problem of high importance nowadays.

The project includes experimental work on the possibilities of retrofitting of reinforced concrete structures with externally prestressed tendons. The research opposes different systems, with various eccentricities in regards to the centroid of the element. The deflections of the beam and the rise in strain in the tendons are observed in order to obtain information about the different strengthening systems.

---

<sup>1</sup> Silvia Brozig, Eng. PhD student, Dept. "Reinforced Concrete Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: sbrozig@gmail.com