ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ СОФИЯ

Том Volume 52 2019 Брой Issue 3

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

Получена: 29.06.2019 г.
Приета: 15.08.2019 г.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОВЕДЕНИЕТО НА СТОМАНОБЕТОННИ ПЛОЧИ, УСИЛЕНИ С ВЪНШНО НАПРЕГНАТА АРМИРОВКА

Г. Иванов[1]

Ключови думи: *експериментално изследване, монолитни стоманобетонни плочи, усилване, външно предварително напрягане*

РЕЗЮМЕ

В настоящата разработка е представено експерименталното изследване на поведението на монолитни стоманобетонни плочи, усилени чрез външно напрегнати стоманени въжета. Съпоставено е влиянието на вариациите на усилващата система върху напрегнатото и деформирано състояние на плочите. Целта на изследването е да се покаже ефектът от усилването за предложената напрягаща система.

1. Въведение

Проблемът за усилване на стоманобетонни конструкции е актуален, а външното предварително напрягане е един от най-разпространените методи за увеличаване на носимоспособността на стоманобетонните плочи. Методът е бърз, ефективен и икономически изгоден в сравнение с други техники за усилване. В световната практика има реализирани редица проекти за усилване на стоманобетонни плочи, като са извършени и няколко експеримента за изучаване на тяхното поведение при усилване с външно предварително напрягане. Приложението на такъв вид усилване се нуждае от повече изследвания. Необходимо е пълното изясняване на поведението на усилената конструкция, поради сложността, произтичаща от преразпределението на усилията, както и значителните деформации в плочите, влияещи на напреженията в напрягащата армировка. Недос-

[1] Георги Иванов, докторант, кат. „Технология и механизация на строителството”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: givanov_fce@uacg.bg

татъчната информация за практическото прилагане на този метод в България за усилване на конструктивни елементи от сгради, бе мотивът за провеждане на експеримента, целящ да се изследва поведението на монолитни стоманобетонни плочи, усилени с външно напрегнати стоманени въжета. От поставената цел произтичат и следните по-важни задачи:

– да се установи ефектът от предложената усилваща система;

– да се изследва влиянието на усилващата система в зависимост от профила на напрягащите въжета – с разполагане по праволинейна и полигонална траектория;

– да се изследва влиянието на девиаторното устройство върху напрегнатото и деформирано състояние на стоманобетонните плочи;

– да се отчете влиянието на ексцентрицитета за повишаване на коравината и носимоспособността на усилените елементи.

За постигане на поставената цел и произтичащите от нея задачи са изпитани три броя опитни образци на фрагменти от монолитни стоманобетонни плочи с размери 12/100/390 cm. Експерименталната постановка е представена детайлно в [1].

а) Неусилен Обр. 1

б) Усилен Обр. 2

в) Усилен Обр. 3

Фиг. 1. Общ изглед на опитните образци

Непосредствено преди изпитването на опитните образци са определени якостта на натиск на бетона $\left(f_{c,cube}=30,2\,\text{MPa};\ f_c=25,4\,\text{MPa}\right)$ и стабилизирания модул на еластичност на бетона при натиск $\left(E_{c,s}=28,7\,\text{GPa}\right)$.

Вложената армировка е горещовалцувана, гладка, изработена от стомана клас A-I $\left(f_y=235\,\text{MPa}\right)$.

Геометрията, материалите и натоварванията са представителни за подобен вид конструктивни елементи и са в съответствие с нормативните документи от българската проектантска практика.

Изпитването се разделя на два етапа. В първия етап са изпитани и трите образеца до достигане на теоретичната им гранична носимоспособност. Целта е да се пресъздаде работата на елементите при действителни експлоатационни условия и да се сравни поведението им. За да може да се определи действителната разрушителна сила, един от образците е разрушен (Обр. 1). Във втория етап, останалите два дефектирали образеца (Обр. 2 и Обр. 3) са усилени с предложената напрягаща система (фиг. 1). Приложено е подобен род натоварване, както в първия етап, като се достига до разрушение на елементите.

2. Усилваща система и схеми на натоварване

Усилващата система е разположена от долната страна на плочата за поемане на положителни огъващи моменти. Тя се състои от две строителни въжета, закотвени с единични котви на общи анкерни устройства. При втората вариация на системата се използва и отклоняващо устройство (девиатор). Въжетата са 7-струнни, изработени от високоякостна армировъчна стомана клас Y1860S7 $\left(f_p=1860\,\text{MPa}\right)$ и номинален диаметър на единично въже – 15,7 mm. Анкерните и девиаторното устройство са произведени от конструкционна стомана клас S275JR, като техните детайли са съобразени със схемите на усилване и максималната напрягаща сила. Тези приспособления се анкерират към плочата с помощта на болтове M18×180 клас 8.8, преминаващи през цялата дебелина на плочата в предварително пробити отвори. Болтовете са напрегнати с динамометричен ключ и въртящ (натягащ) момент от 120 N.m срещу евентуално приплъзване на анкерните устройства.

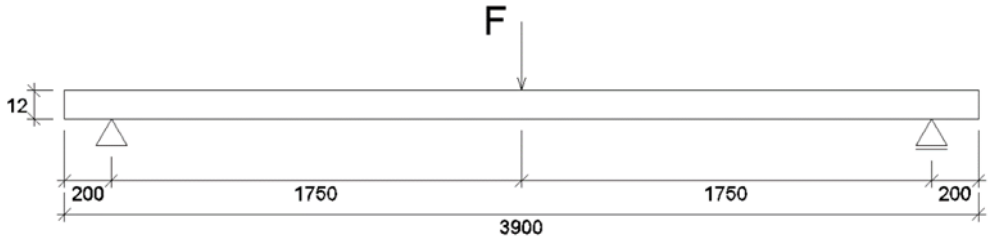
а) Напрегателна инсталация *б) Реализиране на напрягането*

Фиг. 2. Напрягане на опитните образци

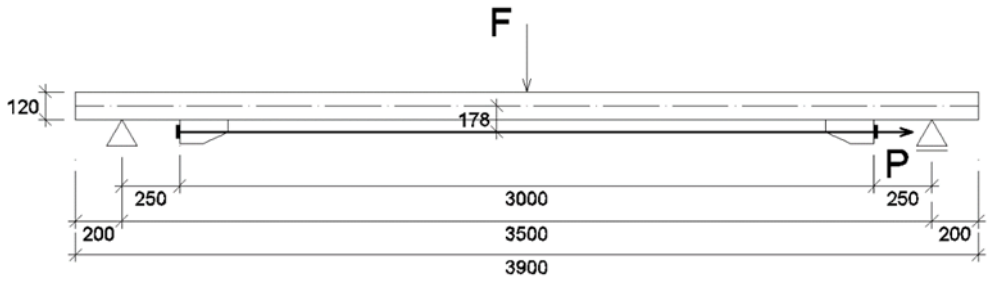
Началната напрягаща сила във всяко въже е 21 kN, като нейната стойност е ограничена от изчислителния пукнатинообразуващ момент, за да не се появят пукнатини в натисковата зона на елемента. Напрягането се реализира с ръчна хидравлична преса с прихващащо действие за напрягане на единични въжета (фиг. 2).

Схемата на усилване на опитните образци е следната: първият образец („Обр. 1“) е контролен и няма да се усилва; вторият образец („Обр. 2“) е усилен, като въжетата са разположени по праволинейна траектория; третият образец („Обр. 3“) е усилен със системата при наличие на девиатор, при което въжетата са разположени по полигонална траектория (фиг. 3).

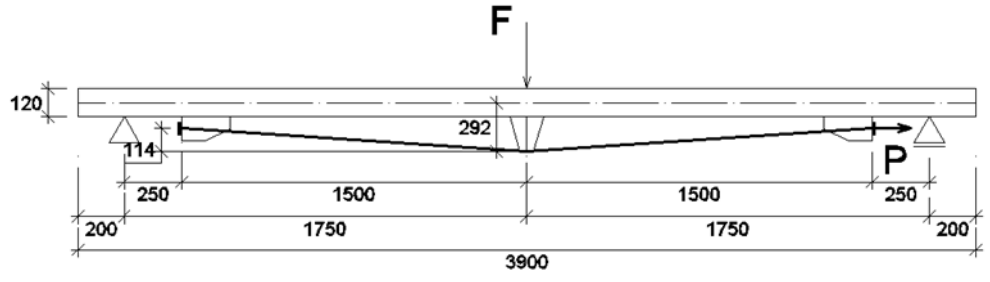
Опитните образци са натоварени статично с една сила в средата на светлия отвор (фиг. 3), с помощта на хидравличен крик и товароразпределителна греда. Силата е приложена по този начин, за да има съответствие между диаграмата на натоварване и тази от предварителното напрягане с девиаторната сила.



а) Неусилени образци



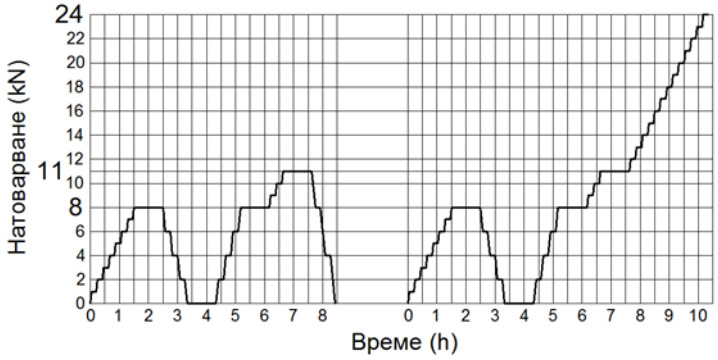
б) Усилен Обр. 2



в) Усилен Обр. 3

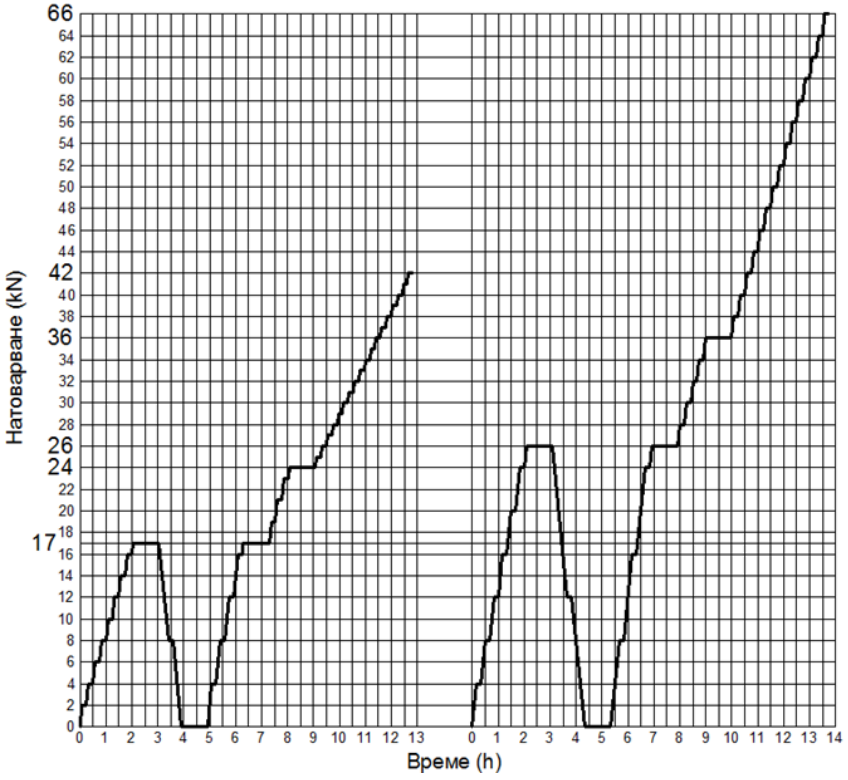
Фиг. 3. Схеми за усилване и натоварване на опитните образци

При определяне на изчислителната носимоспособност на усилените елементи се отчитат краткотрайните загуби на напрягаща сила, дължащи се на: еластичното скъсяване на бетона, деформации и поддавания на анкерните устройства и котвите, триене на въжетата в девиатора и неедновременно напрягане на въжетата. Но напрягащата сила се и увеличава, тъй като се получава допълнително удължение на въжетата вследствие на деформацията на плочата в резултат от външното натоварване.



а) до изчислителен товар *б) до разрушение*

Фиг. 4. Схеми на натоварване на неусилените образци



а) Обр. 2 *б) Обр. 3*

Фиг. 5. Схеми на натоварване на усилените образци

Благодарение на напрягащата армировка, в плочата има приложена натискова сила, с ексцентрицитет спрямо нулевата линия на елемента. За изчисляване на елемента се използва интеракционна диаграма, даваща граничната носимоспособност на несиметрично армираната плоча за комбинирано натоварване от знакопроменливо огъване с нормална натискова сила.

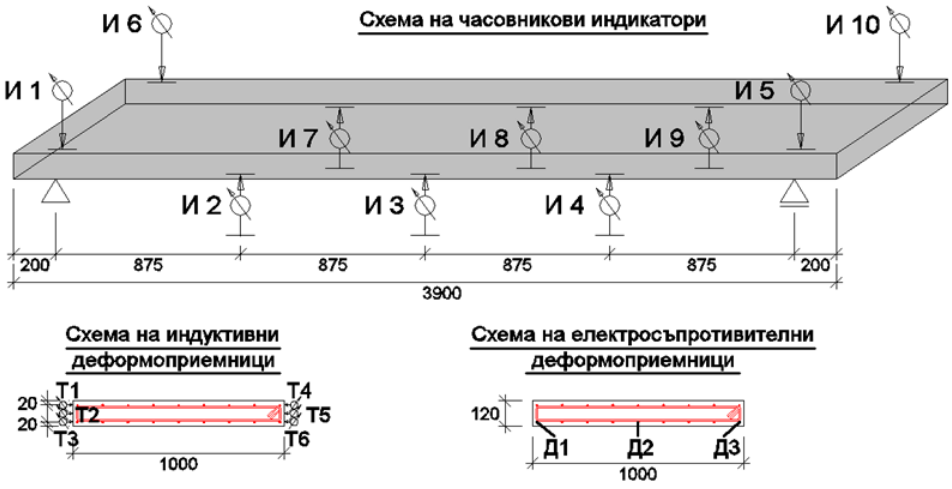
Всички образци са подложени на натоварване и разтоварване на степени за съответните етапи, указани на фиг. 4 и фиг. 5. На всяка степен натоварването се задържа достатъчно дълго време, така че деформациите да бъдат постоянни. След всеки етап на разтоварване се измерват остатъчните деформации.

Накрая и трите образеца се натоварват до разрушение, за да може характеристичните и изчислителните величини да бъдат сравнени с тези, получени при разрушението, и да се изчислят коефициентите на сигурност и разрушение.

3. Измервани величини

За задачите, които са поставени в експерименталното изследване, се измерват следните величини:

- Големина на напрягащата сила. Контролът ѝ се осъществява посредством манометър на хидравличната помпа към напрегателната инсталация.
- Големина на натоварващата сила. За нейното точно измерване се използва силомер за натиск, монтиран между опорната рамка и крика за натоварване.
- Относителни деформации в бетона (фиг. 6). За тяхното измерване в 6 точки от напречното сечение на елемента, в средата на отвора, са използвани индуктивни датчици с обхват 10 mm и база 200 mm.
- Общи деформации на елемента (фиг. 6). Използват се 10 броя часовникови индикатори. Четири от тях следят евентуалното преместване или завъртане при опорите и имат обхват 10 mm. Другите шест са монтирани по двойки от двете страни на елемента, в четвъртините и в средата между опорите, като обхватът им е 30 mm. С тяхна помощ се следят провисванията на елемента.



Фиг. 6. Схема за разполагане на уредите, отчитащи деформациите на елемента

– Относителни деформации в носещата армировка на елемента (фиг. 6). Измерват се посредством електросъпротивителни датчици с база 10 mm и електрическо съпротивление на веригата от 120 Ω, монтирани и защитени срещу влага, в средното сечение на елемента, на двата крайни и средния армировъчен прът.

Относителните деформации във възжетата не могат да бъдат измерени точно, защото отделните струни в структурата на възжето се деформират по различен начин. Напреженията във възжетата може да се изчислят с достатъчна точност за практиката, тъй като усилващата система превръща плочата в статически неопределима система, което от своя страна позволява приблизително решение.

4. Изпитване на опитните образци и сравнителен анализ на получените резултати

При изпитването на опитните образци (фиг. 7), освен отчитането на абсолютните и относителните деформации в бетона и армировката, е проследено пукнатинообразуването и неговата зона на разпространение.

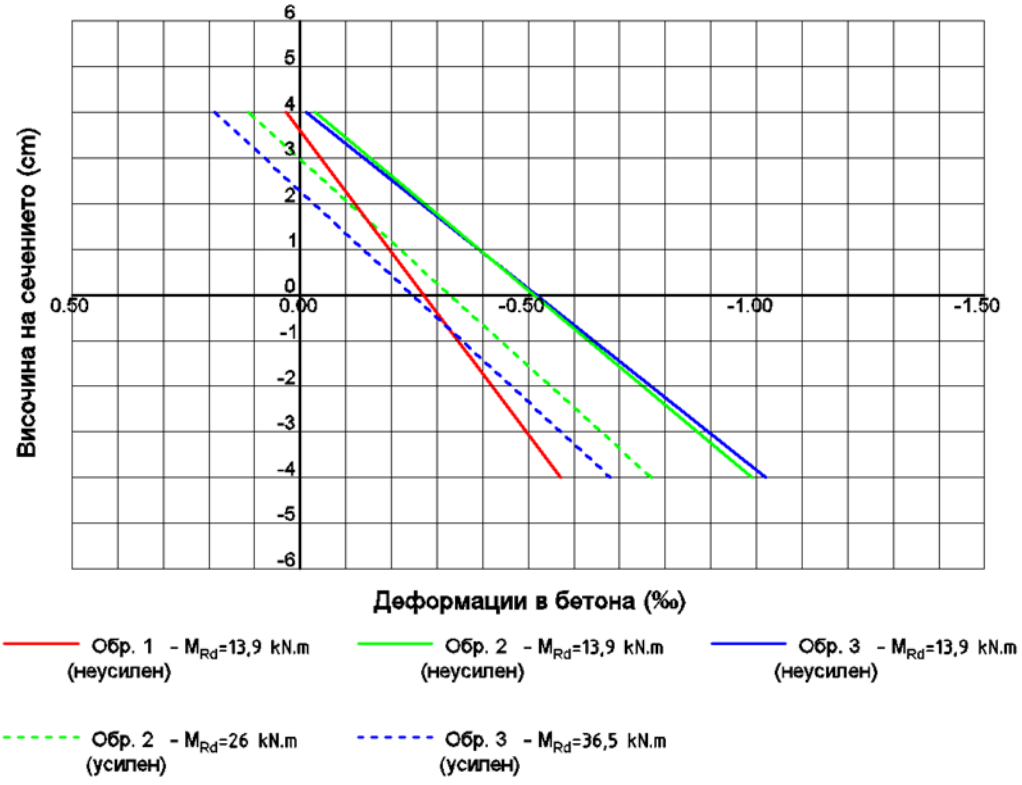
Фиг. 7. Изпитване на опитен образец

След приключване на измерването е извършена обработка на получените резултати [2, 3, 4]. Извършен е и качествен анализ чрез представяне в графичен вид на измерваните величини във функция от приложеното натоварване, времето, мястото им на отчитане в елемента и др.

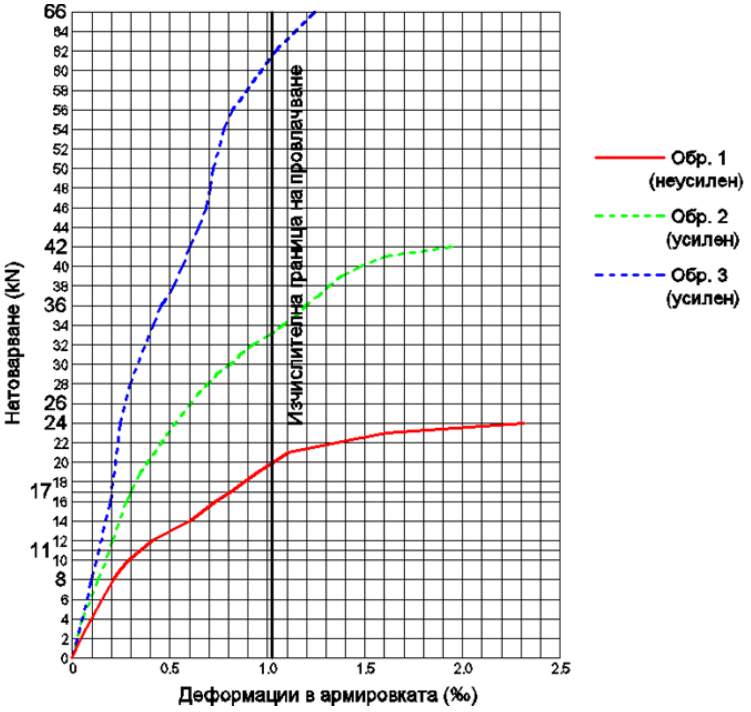
Деформациите в бетона по височина на средното сечение са представени на фиг. 8. Тези стойности са осреднени от деформациите за двете страни на сечението, като са получени при съответната изчислителна стойност на натоварването за всеки образец. Графиките са линейни, от където може да се приеме, че е в сила хипотезата на Бернули за равнинност на сеченията.

На фиг. 9 са представени деформациите в носещата армировка на плочите до разрушение на образците. Забелязва се, че с увеличаване на носимоспособността на елементите при усилването, обикновената армировка проявява по-малко пластични деформации.

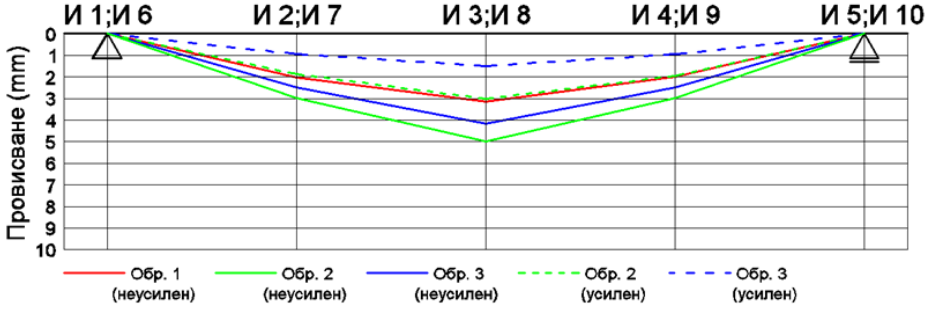
Получени са провисванията в характерни точки от плочата, като вертикалните премествания се редуцират с припадащата им се част от поддаванията на опорите. На фиг. 10 е показано сравнение между провисванията между усилените и неусилените елементи при характеристичната стойност на натоварването за неусилените образци. Провисването в неусилените плочи е сходно, като отклоненията са малки, което е очаквано, предвид характера на работа на стоманобетона. А провисванията при усилените образци са почти двойно по-малки, като деформациите при Обр. 3 са значително по-малки в сравнение с тези при Обр. 2. Това се дължи на по-голямата коравина, която се получава при усилването с девиатор. На фиг. 11 са представени деформациите по дължина на плочите при съответен характеристичен товар за всеки елемент. Разликите между стойностите на максималните провисвания при неусилените и усилени образци не са големи, предвид техния порядък, което показва, че предложената усилваща система е удачна.



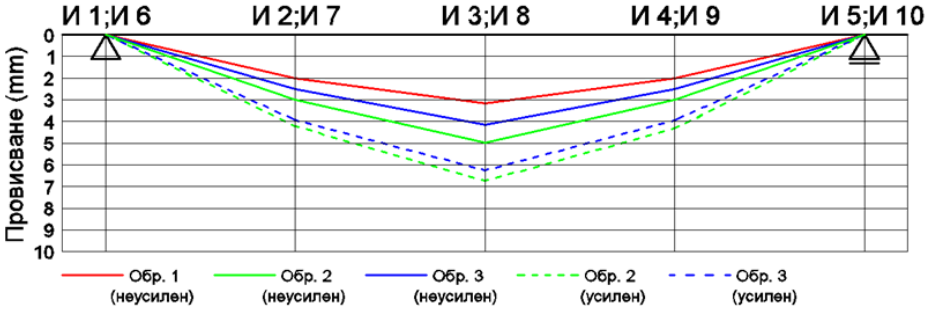
Фиг. 8. Деформации в бетона по височина на средното сечение при съответен изчислителен товар



Фиг. 9. Деформации в обикновената армировка

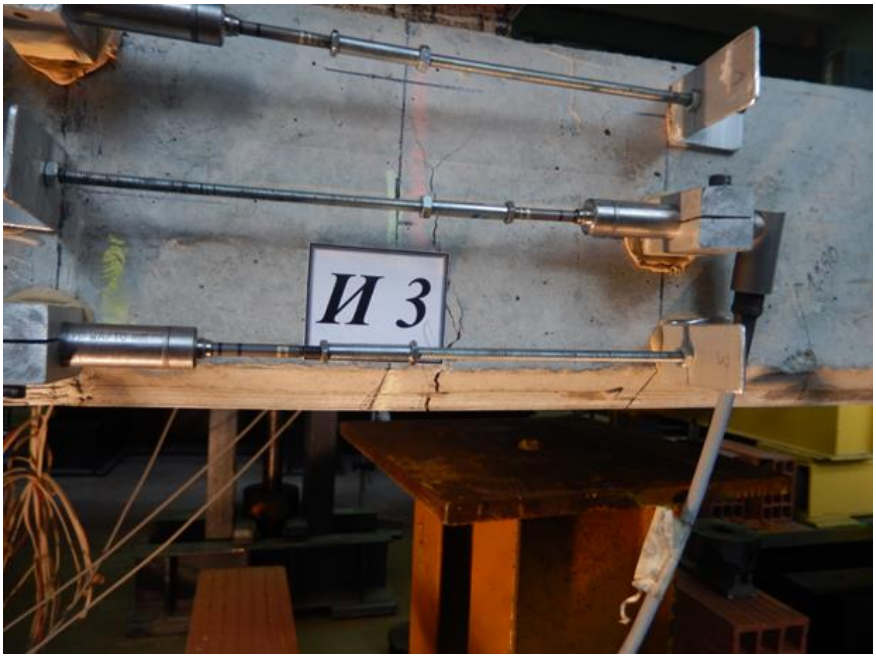


Фиг. 10. Провисване в плочите при характеристична стойност на натоварването за неусилените образци



Фиг. 11. Провисване в плочите при съответен характеристичен товар за всеки образец

Разрушението на всички опитни образци (неусилени и усилени) настъпва след изчерпване на носимоспособността на опънната зона вследствие на провлачване на носещата армировка в елементите. Критерият за разрушение е отваряне на пукнатина с широчина над 1 mm (фиг. 12).



Фиг. 12. Разрушение на опитен образец с отваряне на значителна пукнатина

По-точна оценка на усилването може да се направи чрез количествените показатели – коефициент на сигурност k_s и коефициент на разрушение k_{rup} (табл. 1).

Всички неусилени образци до голяма степен показват еднакви резултати, като може да се приеме, че разрушителната сила ще бъде приблизително еднаква за всички.

Таблица 1. Коефициенти на сигурност и разрушение

Елемент	F_k, [kN]	F_d, [kN]	F_u, [kN]	k_s	k_{rup}
Обр. 1	8	11	24	3,00	2,18
Обр. 2	17	24	42	2,47	1,75
Обр. 3	26	36	66	2,54	1,83

В горната табл. 1, F_k, F_d и F_u са съответно характеристичното, изчислителното и разрушителното натоварване в съответния елемент.

Стойностите на коефициентите k_s и k_{rup} показват добра осигуреност по отношение на носимоспособността при всички опитни образци, независимо от степента на натоварване и начина на усилване.

5. Заключение

Проведеното експериментално изследване дава възможност да се формулират някои важни заключения и препоръки относно предлаганата система за усилване, а именно:

- Напрягащата система е ефективна и е практически приложима за усилване на всякакъв вид монолитни стоманобетонни плочи.
- С тази система за усилване значително се увеличават носещата способност и коравината на конструктивните елементи.
- Увеличаването на ексцентрицитета на напрягащите въжета спрямо средната повърхнина на плочата съществено увеличава коравината и следователно намалява провисванията.
- Потенциалът на усиления елемент и възможността му да работи при завишени натоварвания в условията на експлоатация се потвърждават от получените коефициенти на сигурност и разрушение.
- При усилване на конструкции с по-голям капацитет, напречното сечение на въжетата и напрягащата сила трябва да бъдат така подбрани, че да не се получи крехко разрушение.

Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор Д-112/2018 е подкрепена финансово от Център за Научни Изследвани и Проектиране при УАСГ – гр. София.

Изпитването на опитните образци е реализирано с изключителното съдействие на ръководителя и инженерите от учебна и научноизследователска лаборатория „Масивни конструкции“ при УАСГ – гр. София.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иванов, Г., Трайкова, М.* Експериментална постановка за изследване на поведението на стоманобетонни плочи, усилени с външно напрегната армировка. // Сборник с доклади от X Юбилейна международна научна конференция „Проектиране и строителство на сгради и съоръжения“, Варна, 20-22 септември 2018.

2. *Абдулахад, Е., Паничков, Д. и др.* Курсови протоколи по „Обследване и изпитване на строителни конструкции“. София, УАСГ, 2019.

3. *Паничков, Д.* Ръководство по изпитване на строителни конструкции и съоръжения. София, Техника, 1988.

4. *Димов, Д.* Обследване и изпитване на строителни конструкции и мостове. Трето преработено и допълнено издание. София, DL & M, 2016.

EXPERIMENTAL STUDY ON THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE SLABS STRENGTHENED WITH EXTERNALLY PRESTRESSED TENDONS

G. Ivanov[1]

Keywords: *experimental study, monolithic reinforced concrete slabs, strengthening, external prestressing*

ABSTRACT

The paper presents an experimental study on the behavior of monolithic reinforced concrete slabs strengthened by externally prestressed steel strands. The influence of variations of the strengthening system on the stressed and deformed state of the slabs is compared. The purpose of the study is to show the effect of strengthening on the proposed strengthening system.

[1] Georgi Ivanov, PhD student, Dept. "Construction Technology and Mechanisation", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: givanov_fce@uacg.bg