

инж. Веселин Славчев Славчев

УСИЛВАНЕ НА СТОМАНОБЕТОННИ КОНСТРУКЦИИ

(Възстановяване на стоманобетонни елементи с дефекти и/или повреди в натисквата зона. Усилване на нецентрично натиснати стоманобетонни елементи с правоъгълно напречно сечение с фиброармирани композитни материали)

Научна специалност
02.15.04 „Строителни конструкции”

АВТОРЕФЕРАТ

на

ДИСЕРТАЦИЯ

за получаване на образователна и научна степен „Доктор”

Научен ръководител
проф. д-р инж. Тотю Бориславов Даалов

София, 2012

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита от разширен катедрен съвет към катедра „Строителни конструкции“ на Строителния факултет към ВСУ „Любен Каравелов“ – София. Докторантът работи като главен асистент към същата катедра.

Експерименталните изследвания по дисертацията са извършени в НИСИ и в лаборатория ЛИНОМИ към ВСУ „Л. Каравелов“ – София.

Изказвам своята благодарност на научния ми ръководител за насоките и помощта в разработването на настоящата дисертация, към колегите от ВСУ „Л. Каравелов“ и НИСИ за подкрепата и помощта в осъществяване на експерименталната работа, проведена по темата на дисертацията. Благодаря на фирма „Айла България“ ЕАД за предоставения епоксиден двукомпонентен състав “Quickmast 108” за връзката между „стар” и „нов” бетон, на фирма „Сика България” ЕООД за предоставените материали за усилване с кожух от карбонов фиброармиран композитен материал (CFRP) на колоните от серия „В”, както и на фирма „Арес Инженеринг” ООД за реализирането на усилването на колоните от серия „В”. Изказвам своята специална благодарност на н. с. I^{ba} ст. инж. Цветко Костадинов Киров за помощта при подготовката и изпитването на експерименталните образци, също така и на пробните тела за определяне на якостните и деформационните характеристики на материалите.

На баща ми.

Автор: инж. Веселин Славчев Славчев

Усилване на стоманобетонни конструкции

(Възстановяване на стоманобетонни елементи с дефекти и/или повреди в натисквата зона.
Усилване на нецентрично натиснати стоманобетонни елементи с правоъгълно напречно сечение с фиброармирани композитни материали)

Увод

Въпросите, свързани с усилването на строителните конструкции винаги са били и ще бъдат актуални. От една страна усъвършенстването на методите за изчисление на строителните конструкции и актуализирането на нормативната база (например въвеждането на [47], [48] и [124]), от друга страна поради понижаване на първоначалните си качества (носеща способност или експлоатационна пригодност), поради дълготрайна или неправилна експлоатация, поради дефекти при производството, в следствие повреди, поради смяна на предназначението на конструкцията и др., налагат възстановяване или усилване на елементите на строителните конструкции.

Следва да се има предвид, че на ново съоръжение, което не е било в експлоатация се извършва поправка; на експлоатирано вече старо съоръжение – възстановяване; на ново или старо съоръжение, към което изискванията на експлоатация са по-строги – усилване.

Дисертационната работа обхваща:

Увод

Основни буквени означения

Глава I – Съвременно състояние и критичен анализ на въпросите относно възстановяването и усилването на елементите на стоманобетонните конструкции – литературен обзор.

Глава II – Изследване на деформираното и напрегнато състояние на нецентрично натиснати стоманобетонни елементи.

Глава III – Експериментална част.

Претенции за научно-приложни приноси и насоки за бъдеща работа.

Дисертационният труд се състои от 159 страници, 16 таблици, 140 фигури, списък с публикациите по темата на дисертацията и списък на използваната литература от 172 заглавия.

В глава I на настоящата работа е направен литературен обзор и критичен анализ на съвременното състояние на въпросите, свързани с възстановяването и усилването на елементите на стоманобетонните конструкции.

Описани са основните методи за възстановяване на стоманобетонни елементи с дефекти и/или повреди. Най-често срещаните причини за получаване на дефекти са: неправилно армиране на възлите (невъзможност за добро уплътняване на бетонната смес), недостатъчно уплътняване на бетонната

смес, бетониране с бетонна смес с неподходяща консистенция, недобро почистване на кофражната форма преди бетонирането (наличие на различни строителни и др. отпадъци в кофража), необмазване с кофражно масло на кофража (причина за обрушване при декофрирането), недостатъчно бетоново покритие на армировката, неправилно декофриране и т.н. Други причини за получаване на дефекти са в следствие на извършване на неправилна строителна дейност или в следствие на неблагоприятния или аварии при производството.

Наличието на дефекти в конструктивните носещи елементи води до понижаване на проектната им носеща способност. Трябва да се има предвид обаче, че обикновено при изграждането на конструкцията, преди пускането ѝ в експлоатация, конструктивните елементи не са натоварени с пълното натоварване (обикновено не са изпълнени настилки, мазилки, тухлени зидарии, инсталации и не е налице проектното временно натоварване). В повечето случаи, дори повредени при производството, конструктивните носещи елементи могат да понесат натоварването в момента без да се компрометира работата на конструкцията като цяло. В някои случаи, поправката на повредите не е необходимо да бъде извършена моментално, а би могло да се изчака извършването на определен вид работи, например изпълнение на обратните насипи, с цел получаване на достъп до местата с повредите.

Повреди в конструктивните елементи могат да настъпят в следствие на интензивни претоварвания и въздействия, каквито са сеизмичните например. В следствие работа при неправилна експлоатация или в агресивна среда може да настъпи корозия на бетона, влошаване качествата на бетоновото покритие и корозия на армировката [2], [100], [140], [150] и [151].

Наличието на дефекти и/или повреди в напречните сечения обаче, води до изменение на напрегнатото им състояние. При тежко натоварени елементи, преразпределението на напреженията в следствие на дефекти и/или повреди, независимо от последващата им поправка, води до снижаване на носещата им способност. Това може да доведе до необходимост от усилване на елемента.

Въпросите, свързани с възстановяването или поправката на стоманобетонните елементи са тясно свързани със задачата за съединяване на бетони на различна възраст. В работата е акцентирано на предимствата и недостатъците на различните методи за осъществяването ѝ.

След направеният анализ на въпросите, свързани с възстановяването на повредени стоманобетонни елементи бяха направени следните изводи:

1. При възстановяване на стоманобетонните елементи трябва да се осигури надеждна връзка между „стария“ и „новия“ бетон. Факторите, от които зависи това са много и трудно може да се удовлетворят изцяло.

2. Мокрите процеси при изпълнението на възстановителните работи трябва да се сведат до минимум.

3. Надеждна връзката между „стар“ и „нов“ бетон може да се постигне с използване на съвременни епоксидни полимерни състави.

4. Необходимо е опитно изследване на връзката, осъществена с помощта на епоксидните полимерни състави с цел доказване нейната ефективност.

Във втората част на глава I са описани методите за усилване на стоманобетонните конструкции, техните предимства и недостатъци, както и възможностите за удачното им прилагане в различните случаи на строителната практика.

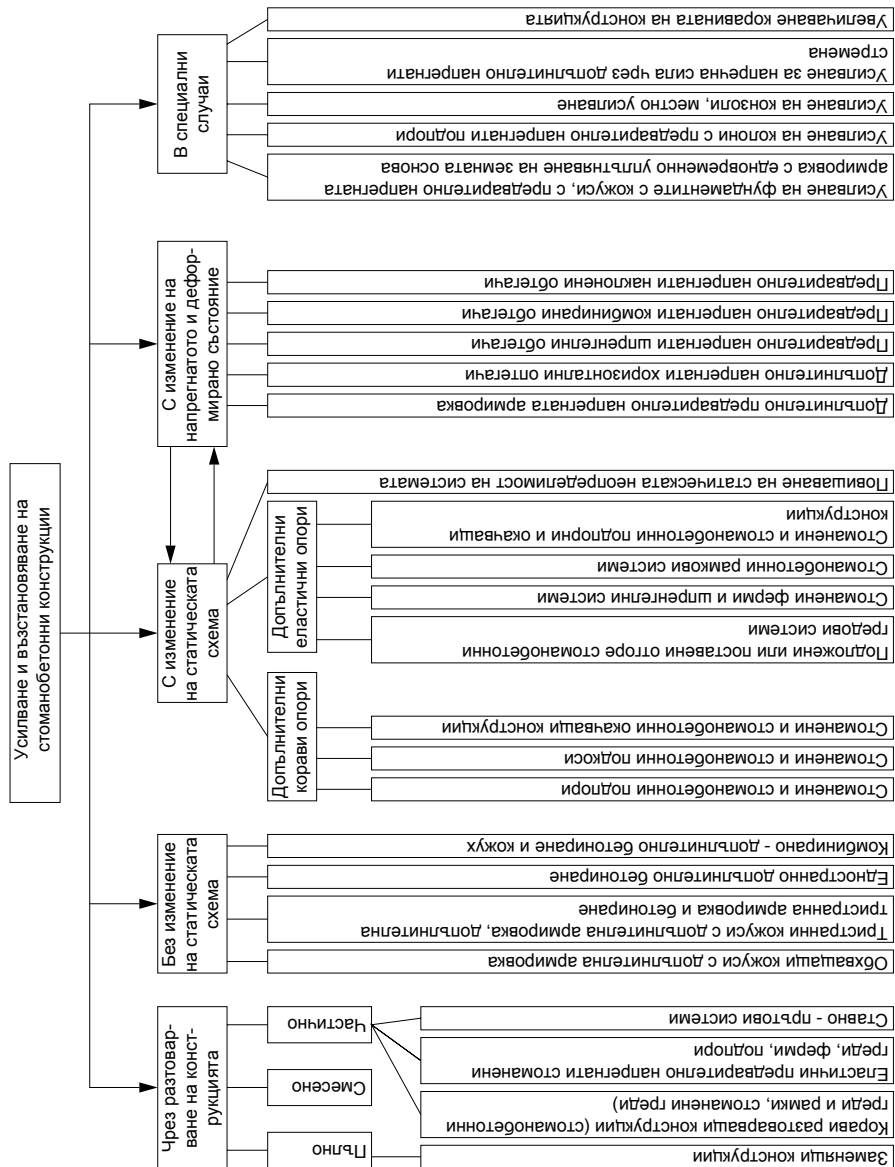
Усилването на конструктивните елементи се състои в съществено повишаване на носещата им способност, като по този начин се повишава и цялостната сигурност на конструкцията.

Усилването на строителните конструкции е много скъп , трудоемък и труден за осъществяване процес, свързан с редица проблеми и в повечето случаи със спиране на експлоатацията на съоръжението през време на изпълнението на усилването. Към усилване на конструкциите трябва да се пристъпва само след като бъдат изчерпани всички възможности за надеждната им експлоатация без да се налага усилване.

Мерки, които могат да се предприемат, с цел избягване на усилване на конструкцията са [55]:

- Отстраняване на излишно тежки маси от конструкцията и ограничаване на технологичните натоварвания;
- Ограничаване сближаването на крановете при промишлените сгради. При многоетажни промишлени сгради, изключване на едновременното натоварване с временни товари на големи площи от етажните конструкции;
- Въвеждане на временни разтоварващи елементи при монтажа (демонтажа) на технологичното оборудване;
- Намаляване нивото на вибрациите, посредством използване на ефективна виброизолация на машините с динамични натоварвания.

Когато усилването на конструкциите е наложително, то се извършва основно по някои от следните методи, показани на фигура 1.8.



Фиг.1.8 – Методи за усилване на строителните конструкции

Също така са разгледани и съвременните методи за усилване на строителните конструкции с помощта на фиброармираните композитни материали. Разгледани са подробно техните предимства и недостатъци и областите за най-удачното им приложение. Посочени са литературните източници, подробно описващи въпросите, относно изчислението на усилването на елементите на стоманобетонните конструкции, експериментално изследване на стоманобетонни елементи и численото им моделиране.

След направеният анализ на въпросите, свързани с усилването на стоманобетонни елементи бяха направени следните изводи:

1. Необходимо е изследване на напрегнатото и деформирано състояние на елементи, получили дефекти и/или повреди. Много често тези дефекти и повреди се явяват във вертикално бетониран елементи, които работят на нецентричен натиск.

2. Усилването на елементите на стоманобетонните конструкции е било и е предмет на теоретични и експериментални изследвания още от създаването на стоманобетона като материал. Най-сигурния начин за доказване работата на усилени елементи е експериментът, отчитащ конкретните фактори, включително технологията на изпълнение.

3. Съвременните материали за усилване (каквито се явяват фиброармираните композитни материали), освен големите предимства, които предлагат, поставят въпроси, някои, от които не са намерили еднозначни отговори. Всяко изследване в тази област ще е от полза за изясняване работата им като материали, използвани за усилване на строителни конструкции.

В края на глава I са дефинирани целите на докторантурата, които са следствие от направените изводи, а именно:

1. Да се изследва влиянието на дефекти и/или повреди в натисковата зона върху напрегнатото състояние и носещата способност на стоманобетонни елементи, работещи на нецентричен натиск.

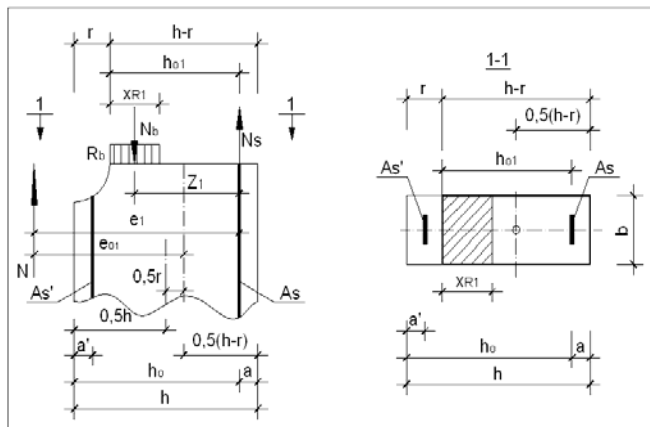
2. Да се изследва деформираното и напрегнато състояние на нецентрично натиснатите стоманобетонни елементи при известни реалните работни диаграми на материалите (връзката между относителните деформации и напреженията).

3. Да се изследва деформираното и напрегнато състояние на нецентрично натиснатите стоманобетонни елементи с правоъгълно напречно сечение, усилени с кожух от фиброармиран композитен материали.

Глава II е посветена на изследване на деформираното и напрегнато състояние на нецентрично натисканите стоманобетонни елементи. Разгледано е влиянието на дефектите и/или повредите в натисковата зона на елементите на стоманобетонните конструкции, работещи на нецентричен натиск. Изведени са формули за разграничаване на случаите на нецентричен натиск при наличие на отслабване на натисковата зона съгласно с предпоставките, приети в [57] и [124].

1. Гранични стойности на отслабването на натисковата зона, съгласно предпоставките, приети в нормите за проектиране [57].

1.1. Граница между I и II случай на нецентричен натиск – означенията на фиг. II.2 са приети както в [57].



Фиг. II.2 – Граница между I и II случай на нецентричен натиск

Големината на отслабването на напречното сечение в натисковата зона, при която се преминава от случай I – голям ексцентрицитет в случай II – малък ексцентрицитет е:

$$r_{(I-II)} = \frac{d - \sqrt{d^2 - 4.c.f}}{2.c} \quad (II.5)$$

където:

$$c = R_b \cdot b \cdot \xi_R \left(1 - \frac{\xi_R}{2} \right), \quad d = 2.c.h_0 + \frac{N}{2}(\eta - 1), \quad f = c.h_0^2 - N.e.$$

За да бъде удовлетворено равновесното условие $\sum V = 0$, количеството на опънната армировка трябва да е:

$$A_{s(I-II)} = \frac{R_b \cdot b \cdot \xi_R (h_0 - r_{(I-II)}) - N}{R_s} \quad (II.7)$$

При положение, че ни е известно количеството на вложената надлъжна армировка, граничната стойност на $r(I-II)$, при която се преминава от I във II случай на нецентричен натиск може да се определи направо от равновесното условие $\Sigma V = 0$:

$$r_{(I-II)} = \frac{R_b \cdot b \cdot \xi_R \cdot h_o - N - R_s \cdot A_s}{R_b \cdot b \cdot \xi_R} \quad (II.9)$$

1.2. Граница между IIa и IIб случай на нецентричен натиск.

Разликата между случаите на нецентричен натиск с малък ексцентрицитет – IIa и много малък ексцентрицитет IIб случай е, че в случай IIб се преминава, когато относителната височина на натисковата зона достигне или надмине стойност от: $\xi = \frac{x}{h_o} \geq 0,9$.

Големината на граничната големина на отслабването на напречното сечение в натисковата зона е:

$$r_{(IIa-IIб)} = \frac{m - \sqrt{m^2 - 4 \cdot g \cdot n}}{2 \cdot g} \quad (II.13)$$

където:

$$g = 0,495 \cdot R_b \cdot b, \quad m = 2 \cdot g \cdot h_o + \frac{N}{2}(\eta - 1), \quad n = g \cdot h_o^2 - N \cdot e.$$

Тази стойност е при количество на надлъжната армировка:

$$A_{s(IIa-IIб)} = \frac{0,9 \cdot R_b \cdot b (h_o - r_{(IIa-IIб)}) - N}{\sigma_s} \quad (II.15)$$

При известно количество на по-слабо натиснатата надлъжна армировка за $r_{(IIa-IIб)}$ се получава:

$$r_{(IIa-IIб)} = \frac{0,9 \cdot R_b \cdot b \cdot h_o + 1,8 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot N - \alpha \cdot \beta (1 + \xi_R)}{0,9 \cdot R_b \cdot b} \quad (II.18)$$

където:

$$\alpha = R_s \cdot A_s, \quad \beta = \frac{1}{1 - \xi_R}.$$

2. Гранични стойности на отслабването на натисковата зона, съгласно приетите предпоставки в EC2 [124].

Граничната стойност на ексцентрицитета на надлъжната сила, при която се преминава от голям към малък ексцентрицитет е:

$$e_o = 0,5.h - k_o.x = 0,5.h - k_o.\xi.d. \quad (II.19)$$

където: $k_o = \frac{a}{x}$. С a е означено разстоянието от най-натиснатия ръб на сечението до резултантата на натисковата сила в бетона.

След разграничаването на случаите на нецентричен натиск за елементи с отслабване на натисковата зона са изведени формули за големината на допустимото отслабване на натисковата зона, съгласно с предпоставките, приети в нормите за проектиране [57].

2.1. Случай I – голям ексцентрицитет.

Големината на допустимото отслабване е:

$$r \leq \frac{h_o (R_s.A_s + N) - \frac{(R_s.A_s + N)^2}{2.R_b.b} - N\left(\frac{h}{2} - a + e_o\right)}{R_s.A_s + N\left(\frac{1+\eta}{2}\right)}. \quad (II.27)$$

2.2. Случай II – малък ексцентрицитет.

Големината на допустимото отслабване е:

$$r \leq \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} - \frac{d}{3.c}. \quad (II.38)$$

където:

$$p = -\frac{d^2}{3.c^2} + \frac{m}{c} \quad \text{и} \quad q = \frac{2.d^3}{27.c^3} - \frac{d.m}{3.c^2} + \frac{n}{c},$$

$$c = \gamma^2 \frac{N}{2} (\eta - 1) + \gamma^2 [N + \alpha.\beta(1 + \xi_R)],$$

$$d = \gamma^2 . N \left(\frac{h}{2} - a + e_o \right) - N(\eta - 1)(2.\alpha.\beta.\gamma + \gamma^2 . h_o) - \gamma [N + \alpha.\beta(1 + \xi_R)] (3.\gamma . h_o + 2.\alpha.\beta) + \frac{\gamma}{2} [N + \alpha.\beta(1 + \xi_R)]^2,$$

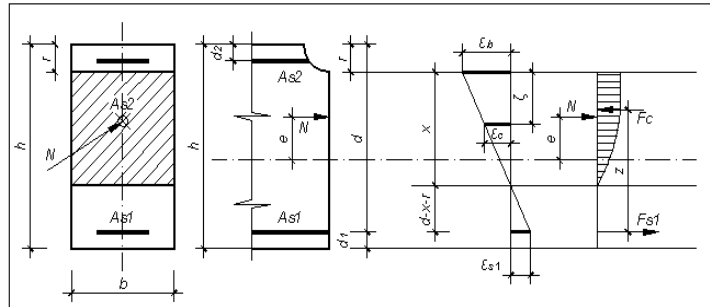
$$m = N(\eta - 1) \left(\frac{\gamma^2 . h_o^2}{2} + 2.\alpha.\beta.\gamma . h_o + 2.\alpha^2 . \beta^2 \right) - N \left(\frac{h}{2} - a + e_o \right) (2.\gamma^2 . h_o + 4.\alpha.\beta.\gamma) + \gamma . h_o [N + \alpha.\beta(1 + \xi_R)] (3.\gamma . h_o + 4.\alpha.\beta) - \gamma . h_o [N + \alpha.\beta(1 + \xi_R)]^2,$$

$$n = N \left(\frac{h}{2} - a + e_o \right) \left(\gamma^2 \cdot h_o^2 + 4 \cdot \alpha^2 \cdot \beta^2 + 4 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot h_o \right) -$$

$$- \gamma \cdot h_o^2 \left[N + \alpha \cdot \beta (1 + \xi_R) \right] \left(\gamma \cdot h_o + 2 \cdot \alpha \cdot \beta \right) + \frac{\gamma \cdot h_o^2}{2} \left[N + \alpha \cdot \beta (1 + \xi_R) \right]^2.$$

За случаите на нецентричен натиск при $\xi = \frac{x}{h_o} \geq 0,9$, отслабване на сечението е недопустимо.

На фигура II.9 са показани означенията, съгласно с [124].



Фиг. II.9 – Деформации и напрежения

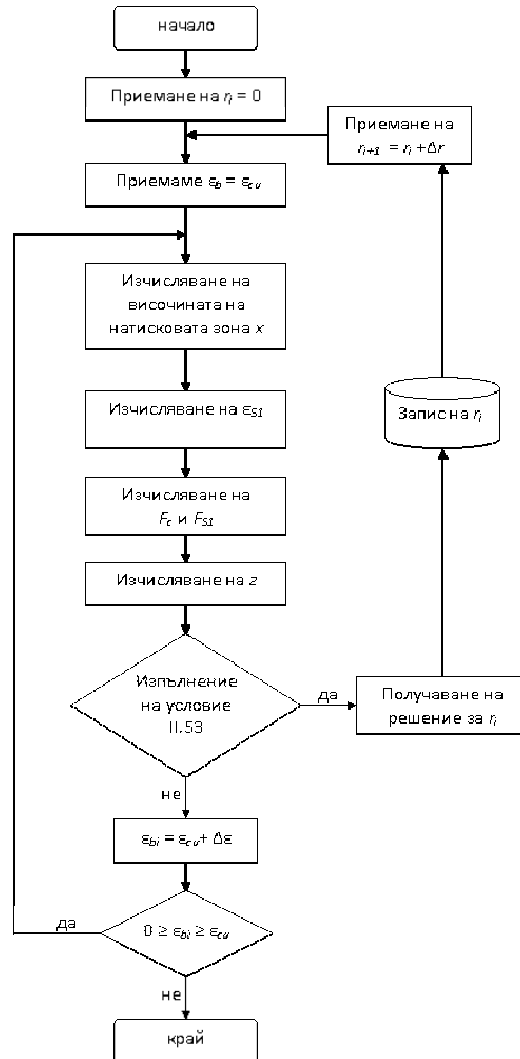
На фигура II.11 е представен алгоритъма на разработената програма в “Matlab” за изчисление на допустимото отслабване на натисквата зона, съгласно с приетите предпоставки в еврокод 2 [124].

В тази глава са разгледани и въпросите за определяне на деформираното и напрегнато състояние на нецентрично натиснатите сечения на елементите на стоманобетонните конструкции, включително и в случаите на елементи с възстановяване и/или усилване на натисквата зона с бетон с различни якостни и деформационни характеристики от основния.

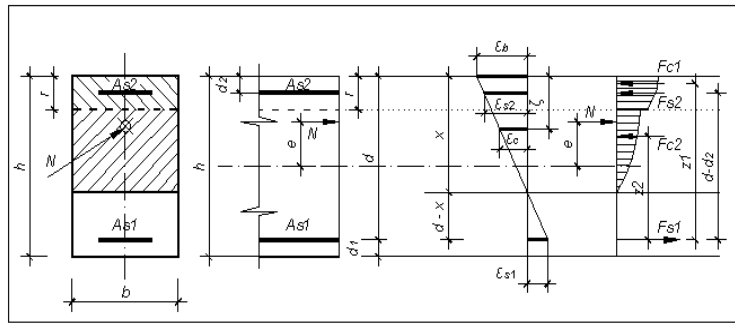
Приети предпоставки:

- напрегнатото състояние се определя за стоманобетонни елементи с правоъгълно напречно сечение с двойна армировка;
- известни са геометричните параметри на сечението:
 - геометричните размери на бетонното сечение;
 - местоположението и количеството на носещата надлъжна армировка;
- разрезните усилия в напречното сечение – надлъжната сила и огъващия момент също са известни;

- опитно са определени работните диаграми на материалите (бетон и стомана) – връзката между деформации и напрежения;
- валидна е хипотезата на Бернули за равнинност на напречните сечения.



Фиг. II.11 – Блок схема на програмата в Matlab за допустимо отслабване



Фиг. II.18 – Усилено или възстановено сечение в натисквата зона

Работни диаграми на материалите:

1. За бетона, зависимостта напрежение – деформации, получена по експериментален път се задава чрез свързване на отделните точки от графиката с гладки криви (кубични параболи – т.н. *spline*). За работна диаграма на бетона може да се използва и приетата параболично – праволинейна диаграма, според [124], фиг. II.7 или произволно зададена функция.

2. За армировката може да се използва идеализираната характеристична диаграма напрежения-деформации дадена в [124]. При необходимост за работна диаграма на армировката може да се задава произволна функция на напреженията, различна за натиск и опън.

Относителните деформации по височина на напречното сечение се изразяват с деформацията на най-силно натиснатото влакно на бетона ϵ_b , фиг. II.18. Напреженията в бетона и армировките са във функция на съответната им относителна деформация по приетите работни диаграми на материалите. Силите в бетона и армировките са по следните формули:

$$F_c(\epsilon_b, x) = F_{c1}(\epsilon_b, x) + F_{c2}(\epsilon_b, x), \quad (II.61)$$

където: $F_{c1}(\epsilon_b, x) = b \int_0^r \sigma_{c1}(\epsilon_c(\epsilon_b, x, \zeta)) d\zeta$, $F_{c2}(\epsilon_b, x) = b \int_r^x \sigma_{c2}(\epsilon_c(\epsilon_b, x, \zeta)) d\zeta$, при $x \leq h$ и

$$F_{c2}(\epsilon_b, x) = b \int_r^h \sigma_{c2}(\epsilon_c(\epsilon_b, x, \zeta)) d\zeta, \text{ при } x > h.$$

$$F_{s1}(\epsilon_b, x) = \sigma_{s1}(\epsilon_{s1}(\epsilon_b, x)) \cdot A_{s1}. \quad (II.49)$$

$$F_{s2}(\epsilon_b, x) = \sigma_{s2}(\epsilon_{s2}(\epsilon_b, x)) \cdot A_{s2}. \quad (II.58)$$

Височината на натисковата зона x се определя от равновесното условие $\sum V = 0$ по формула (II.59):

$$F_c(\epsilon_b, x) + F_{s1}(\epsilon_b, x) + F_{s2}(\epsilon_b, x) + N = 0. \quad (II.59)$$

Определянето на приложната точка на резултантната сила на напреженията в бетона става по формулите:

$$z_1(\epsilon_b, x) = d - \frac{\int_0^r \xi \sigma_{c1}(\epsilon_c(\epsilon_b, x, \zeta)) d\zeta}{\int_0^r \sigma_{c1}(\epsilon_c(\epsilon_b, x, \zeta)) d\zeta}. \quad (II.62)$$

$$z_2(\epsilon_b, x) = d - r - \frac{\int_r^x \xi \sigma_{c2}(\epsilon_c(\epsilon_b, x, \zeta)) d\zeta}{\int_r^x \sigma_{c2}(\epsilon_c(\epsilon_b, x, \zeta)) d\zeta}, \text{ при } x \leq h \text{ и} \quad (II.63)$$

$$z_2(\epsilon_b, x) = d - r - \frac{\int_r^h \xi \sigma_{c2}(\epsilon_c(\epsilon_b, x, \zeta)) d\zeta}{\int_r^h \sigma_{c2}(\epsilon_c(\epsilon_b, x, \zeta)) d\zeta}, \text{ при } x > h. \quad (II.64)$$

Напречното сечение е в равновесие, ако е изпълнено условието $\sum M = 0$.

$$F_{c1}(\epsilon_b, x) \cdot z_1(\epsilon_b, x) + F_{c2}(\epsilon_b, x) \cdot z_2(\epsilon_b, x) + F_{s2}(\epsilon_b, x) \cdot (d - d_2) + N \cdot \left(e + \frac{h}{2} - d_1 \right) = 0. \quad (II.60)$$

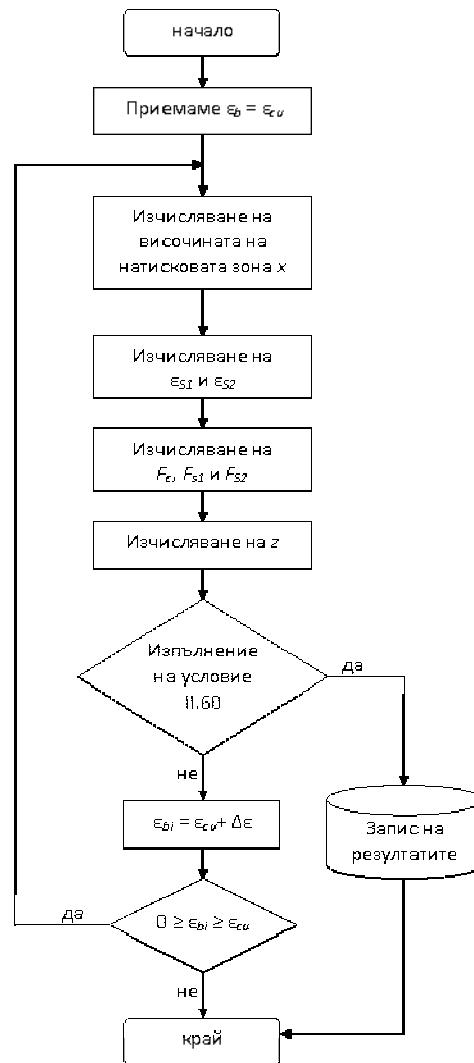
На фигура II.17 е показана блок схемата на съставената програма в Matlab.

Разгледано е напрегнатото състояние на контактната фуга между „стар“ и „нов“ бетон, като са дадени препоръки за реализирането ѝ с помощта на съвременните епоксидни състави. Направени са следните изводи:

1. В някои от случаите, напреженията, възникващи по тангентата в контактната повърхност надхвърлят максималната стойност на сцеплението между „стар“ и „нов“ бетон.

2. За да има съвместна работа на основния бетон и възстановителния състав, сечението трябва да работи като монолитно без да се допуска разрушение на връзката и да се разчита на силата на триене между двата бетона.

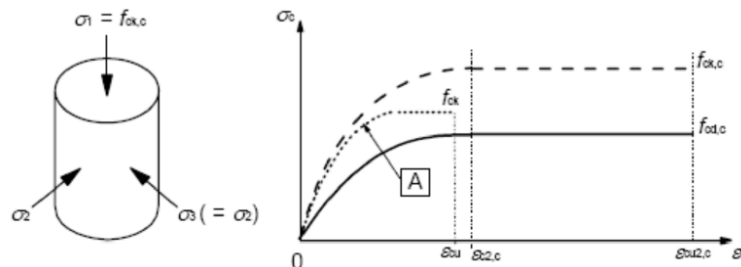
3. Сцеплението между двата бетона не е достатъчно и е необходимо да се осигури допълнителна надеждна връзка, която да поеме възникващите хлъзгащи напрежения.



Фиг. II.17 – Блок схема на програмата в Matlab за определяне на деформираното и напрегнато състояние

Представен е метод за моделиране на „ограничен“ бетон при елементи с правоъгълно напречно сечение, описан в глава II, представен на един от големите форуми, посветен на изследванията в областта на композитните материали и приложението им за усилване на строителни конструкции (Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, 2007).

За описване работата на „ограничения“ бетон (зависимостта относителни деформации-напрежение) в литературата [18], [59], [90], [93], [113], [124], [125], [129], [142], [145], [148], [151], [167], [169], [171] и др. са дадени формули, описващи работната диаграма на бетона. Ефектът на ограничаването е във функция на ефективното натисково напрежение в напречно направление, дължащо се на ограничаване на напречните деформации на бетона. Най-ефективно е ограничаването на бетона при кръглите (донякъде и квадратните) напречни сечения, като най-ефективното приложение на метода е за елементи, работещи на натиск. При елементи с правоъгълно напречно сечение, ефектът на ограничаване на бетона намалява. В еврокод 2 [124] не са дадени формули за правоъгълно напречно сечение. Също така липсват данни за изчисление на ефективното натисково напрежение в напречно направление, както и на относителните деформации, фиксиращи областите от работната диаграма (квадратна парабола и линеен участък) и максималната относителна деформация при натиск, фиг. II.22.

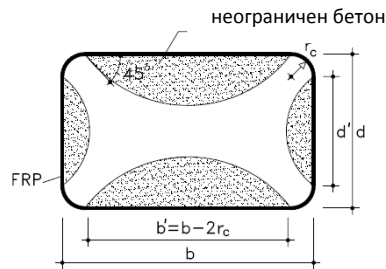


Фиг. II.22 – Работни диаграми на обикновен и „ограничен бетон“ по [124]

В повечето източници, цитирани горе, площта на ограничания бетон за правоъгълно напречно сечение се получава от пресичането на четири параболи под ъгъл 45° , фиг. II.23.

Този модел е невалиден за правоъгълни сечения с големи отношения на размерите h/b , а също така, ефектът на ограничаването силно се влияе от радиуса на закръгление на краищата на напречното сечение. За по-точното

описване на работната диаграма на „ограничения бетон“ се работи усилено, за което свидетелстват многобройните публикации по темата.



Фиг. II.23 – Ефективна площ на правоъгълно напречно сечение

Поради факта, че разрушението на ФАКМ при ограничен бетон настъпва преди да се изчерпа носещата способност на влакната, в [149] за ограничаващото напрежение се дава формулата:

$$f_l = \frac{2 \cdot E_{frp} \cdot \varepsilon_{frp, sup} \cdot t_{frp}}{D} \quad (II.71)$$

Диаметърът на еквивалентния цилиндър е:

$$D = \sqrt{[b - (2 - \sqrt{2})r]^2 + [h - (2 - \sqrt{2})r]^2} \quad (II.75)$$

Вземайки предвид коефициента, отчитащ формата на напречното сечение, ефективните стойности на ограничаващото напрежение и на ограничаващия модул са както следва:

$$f'_l = k_s \cdot f_l = k_s \cdot \frac{2 \cdot E_{frp} \cdot \varepsilon_{frp, sup} \cdot t_{frp}}{D} \quad (II.79)$$

$$E'_l = k_s \cdot E_l = k_s \cdot \frac{2 \cdot E_{frp} \cdot t_{frp}}{D} \quad (II.80)$$

$k_s = \frac{A_e}{A_c}$ е коефициент, отчитащ формата на напречното сечение, където:

A_e – ефективно ограничена площ;

A_c – площ, ограничена от ФАКМ.

$$A_e = A_c - \frac{\frac{b}{h} \cdot (h - 2r)^2 + \frac{h}{b} \cdot (b - 2r)^2}{3} \quad (II.77)$$

$$A_c = b \cdot h - (4 - \pi) \cdot r^2 \quad (II.78)$$

Различават се два вида ограничаване на бетона: силно (strong confinement) и слабо (weak confinement). Те са свързани главно с ефективния коефициент на коравина – η' , докато максималната относителна деформация на ограничения бетон е свързана с ефективния коефициент на ограничение – β' .

При силното ограничаване, граничното напрежение е по-голямо от преходното, докато при слабото ограничаване, граничното напрежение е по-малко. На база на обработка на данни от многобройни експерименти, в [149] е предложен критерий за разграничаване на двата случая – силно и слабо ограничаване на бетона, а именно:

- силно ограничаване – при $\eta' = \frac{E'_l}{f'_{co}} = k_s \cdot \eta \geq 12,5$;
- слабо ограничаване – при $\eta' = \frac{E'_l}{f'_{co}} = k_s \cdot \eta < 12,5$.

Преходно ограничаващо напрежение – f'_{cp} :

$$\frac{f'_{cp}}{f'_{co}} = \alpha_{p1} + k_{p1} \cdot \eta', \quad \alpha_{p1} = 1,0, \quad k_{p1} = 0,0111. \quad (II.83)$$

Относителна деформация при преходното ограничаващо напрежение – ε'_{cp} :

$$\frac{\varepsilon_{cp}}{\varepsilon_{co}} = \alpha_{p2} + k_{p2} \cdot \eta', \quad \alpha_{p2} = 1,0, \quad k_{p2} = 0,0399. \quad (II.84)$$

Гранично напрежение и гранична относителна деформация.

Граничните стойности са свързани главно с ефективния коефициент на ограничение – β' :

1. При силно ограничаване на бетона.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \alpha_1 + k_1 \cdot \beta', \quad \alpha_1 = 1,0, \quad k_1 = 3,8. \quad (II.85)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = \alpha_2 + k_2 \cdot \beta', \quad \alpha_2 = 1,0, \quad k_2 = 28,1. \quad (II.86)$$

2. При слабо ограничаване на бетона.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \alpha_3 + k_3 \cdot \beta', \quad \alpha_3 = 0,6, \quad k_3 = 3,1. \quad (II.87)$$

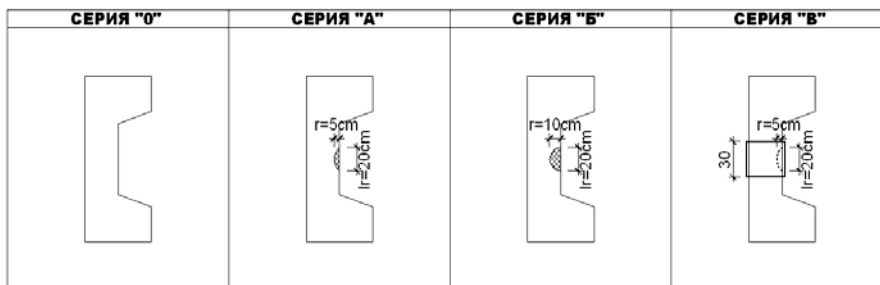
$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = \alpha_4 + k_4 \cdot \beta', \quad \alpha_4 = 3,0, \quad k_4 = 22,0. \quad (II.88)$$

В представения модел [149], работната диаграма е разделена на два участъка. Първият участък е до достигане на преходното ограничаващо

напрежение (f'_{cp}) при относителна деформация (ϵ'_{cp}), като квадратна парабола и линеен участък след това до достигане на граничните стойности на напрежението (f'_{cc}) и относителната деформация (ϵ_{cc}) по следните зависимости:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_c = f'_{cp} \cdot \left[2 \cdot \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cp}} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cp}} \right)^2 \right], \text{ при } 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cp} \\ \sigma_c = f'_{cp} + \frac{(f'_{cc} - f'_{cp}) \cdot (\epsilon_c - \epsilon_{cp})}{\epsilon_{cc} - \epsilon_{cp}}, \text{ при } \epsilon_{cp} < \epsilon_c \leq \epsilon_{cc} \end{array} \right. \quad (II.89)$$

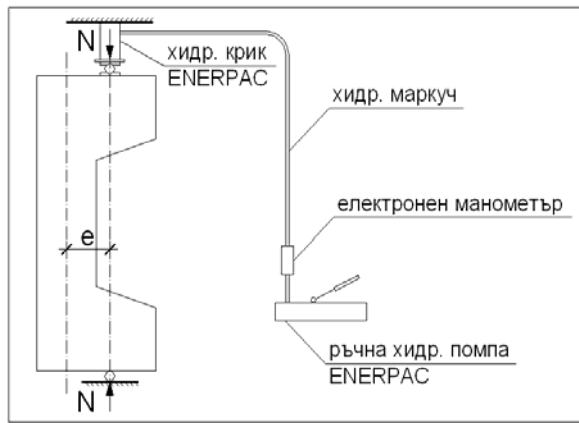
В глава III подробно е описана експерименталната част на докторантурата. Показани са резултатите от изпитването на дванадесет броя колони (четири серии от по три опитни образци) фигура III.1.



Фиг. III.1 – Опитни образци

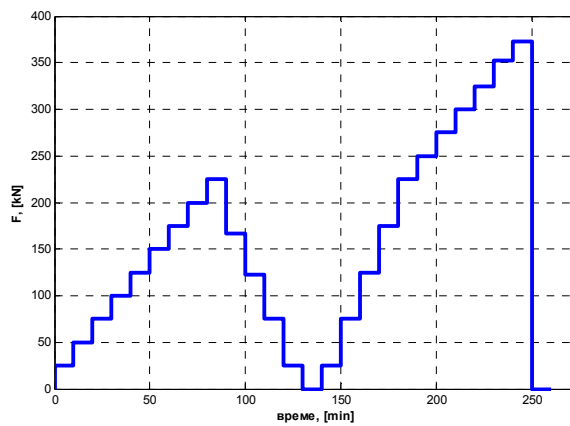
За да се гарантира ексцентричното натоварване на нормалната натискава сила и постоянния ексцентрицитет, колоните бяха подпрени ставно в двата края, съгласно изискванията на [5]. Положението на образците при изпитването бе вертикално. За да се осигури стабилността и статическата схема на елементите по време на изпитването, в долния край колоните бяха подпрени с цилиндрична, а в горния край със сферична става, фигура III.4.

В настоящето изследване, експерименталните образци бяха изпитани до разрушаване, като натоварването бе осъществено на два етапа. Първия етап на натоварване бе до достигане на натисквата сила до 60% от стойността на теоретично изчислената разрушаваща сила. След достигане на първия етап, следва разтоварване на степени. Втория етап на натоварване, отново на степени бе до разрушение на елементите.



Фиг. III.4 – Схема на натоварване на колоните

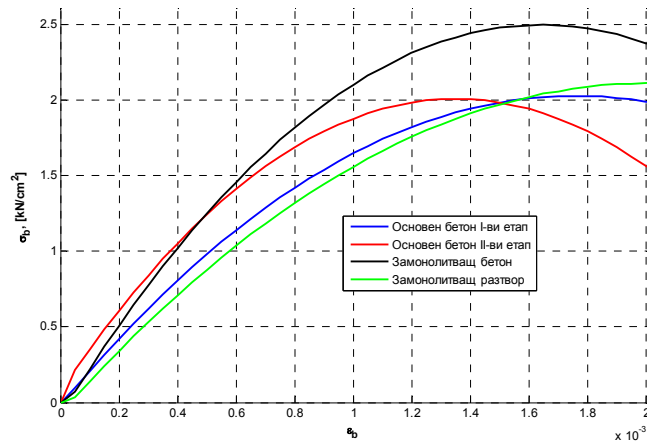
На фиг. III.50 са показани етапите и степени на натоварване за колоните от серия „0” и серия „В”. Първият етап на натоварване е на степени по 25 kN , до достигане на натискава сила от 225 kN . Втория етап, до достигане на силата от 225 kN , степените са през 50 kN , след това отново по 25 kN до разрушение на елементите. По подобен начин бяха натоварвани и образците от серии „А” и „Б”.



Фиг. III.50 – Етапи и степени на натоварване

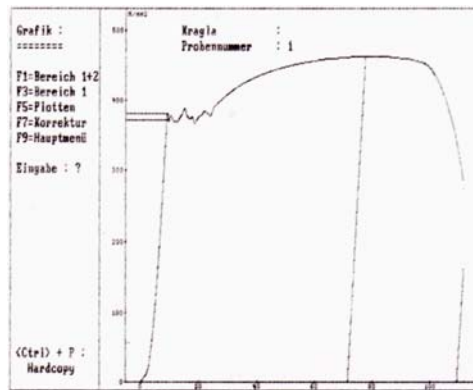
Едновременно с бетонирането на експерименталните образци бяха излети бетонови кубчета с размери 15/15/15 cm и бетонови призми с размери 10/10/40 cm [6], уплътнени по същия начин както колоните. Част от пробните кубчета бяха поставени под вода, съгласно изискванията на [6] за установяване на класа по

якост на натиск на използваните бетони. Останалите пробни тела отлежаваха при същите условия както колоните за да бъдат получени реалните якостни и деформационни характеристики на използваните бетони [25], [136]. На фигура III.40 са дадени апроксимиращите зависимости за функциите „относителни деформации – напрежение“ в бетона, използвани при теоретичните изчисления.



Фиг. III.40 – Работни диаграми на бетона приети в изчисленията

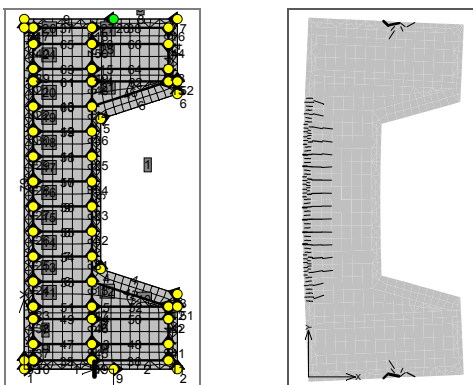
Работната диаграма на използваната армировъчна стомана, получена експериментално, съгласно [123] е дадена на фиг. III.41.



Фиг. III.41 – Работна диаграма на армировъчната стомана

За измерване на относителните деформации в армировъчните пръти и по повърхността на бетона бяха използвани електрически тензометри.

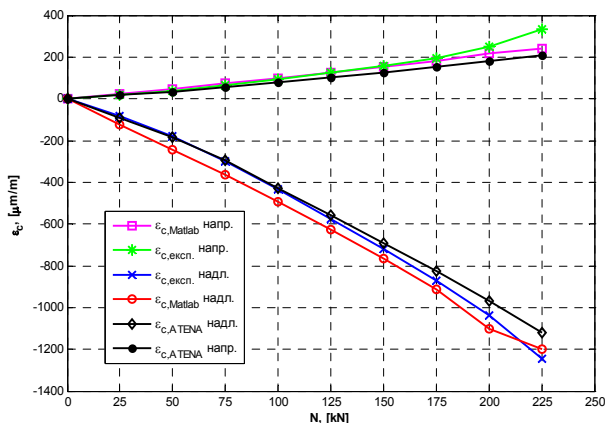
Направено е числено моделиране на експерименталните образци с помощта на метода на крайните елементи със софтуерният продукт "АТЕНА" като е отчетена физическата и геометричната нелинейност в моделите фигура III.51. На втората фигура е показана деформираната схема и разкритието на пукнатините.



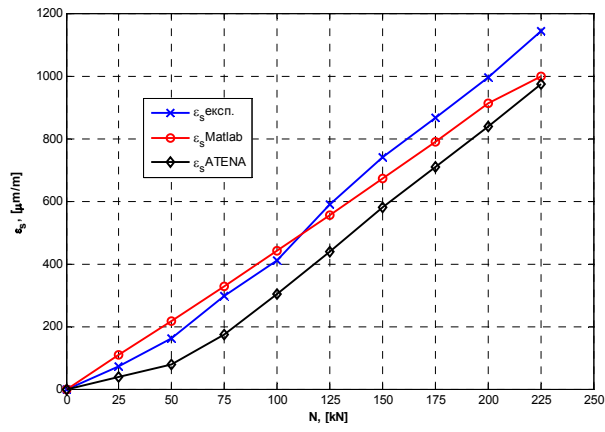
Фиг. III.51 – Числен модел на експерименталните образци – общ изглед

С помощта на съставената в глава II програма за определяне на деформираното и напрегнато състояние на нецентрично натиснати стоманобетонни елементи са направени изчисления за всички дванадесет колони, които бяха изпитани до разрушаване.

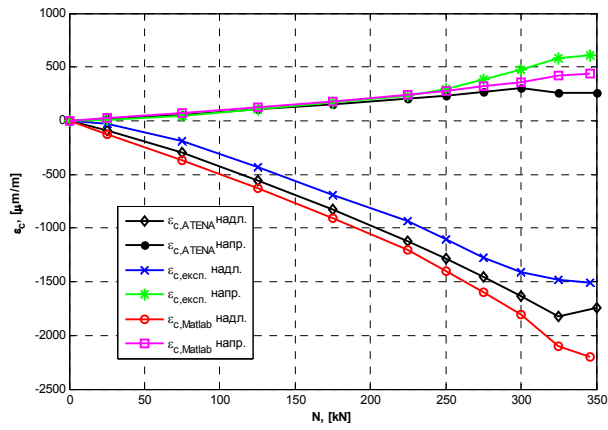
Експериментално получените резултати за колона „0 1” са сравнени с теоретичните изчисления и с тези от численото моделиране и са показани на фигури III.67 до III.70. Подобни са резултатите и на останалите опитни образци.



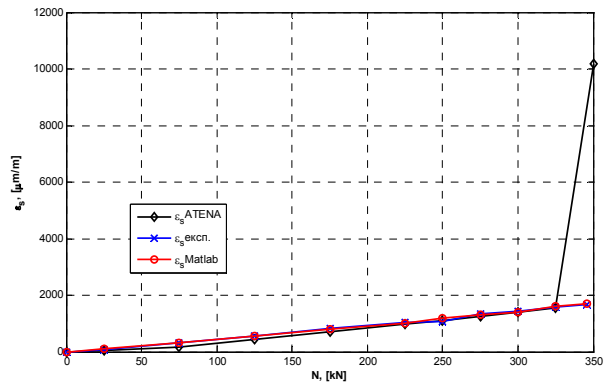
Фиг. III.67 – Относителни деформации в бетона – първи етап



Фиг. III.68 – Относителни деформации в армировката – първи етап



Фиг. III.69 – Относителни деформации в бетона – втори етап



Фиг. III.70 – Относителни деформации в армировката – втори етап

Всички опитни образци от серия „0” се разрушиха при сила, малко по-голяма, но много близка до теоретично изчислената максимално стойност.

Табл. III.14 – Разрушаваща сила за серия „0” – сравнение

№	Опитен образец	Носимоспособност					
		по [8]		ATENA		експеримент	
		N, [kN]	M, [kN.m]	N, [kN]	M, [kN.m]	N, [kN]	M, [kN.m]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Колона "0 1"	351,300	70,265	350,000	70,000	357,000	71,400
2	Колона "0 2"	366,600	73,310	350,000	70,000	377,000	75,400
3	Колона "0 3"	352,900	70,585	350,000	70,000	366,000	73,200

Изводи:

1. По методиката, изложена в т. II.3, използвайки създадената програма със софтуерния продукт Matlab, много точно може да се определи напрегнатото състояние на стоманобетонните сечения. За целта е необходимо да се познаят работните диаграми на материалите.

2. В съставената програма могат да се използват произволни функции за работни диаграми на материалите, което е предимство пред други подобни софтуерни продукти.

3. Численото моделиране по метода на крайните елементи и в частност с програма ATENA, дава възможност за получаване на много точна картина на напрегнатото и деформирано състояние на стоманобетонните елементи.

4. Има много добро съвпадение на опитните резултати от изпитването на колоните от серия „0” с изчислените по методиката в т. II.3 и с тези от численото моделиране. Това е видно от графиките на фигури III.67 до III.70. Трите линии, отразяващи теоретично получените резултатите и експериментално получените данни на места почти се сливат в едно.

5. На фиг. III.69, моментът на разрушение на опитния образец при числения модел с ATENA е свързан с рязко увеличение на деформациите, респективно напреженията в опънната армировка, достигащи границата на провлачане. Напреженията в натисквата армировка също са близки до границата на провлачане. Напречното сечение не е равнинно и напреженията в напречната армировка (стремената), достигат границата на провлачане. Тази картина се доближава много до начина на разрушение, получен експериментално.

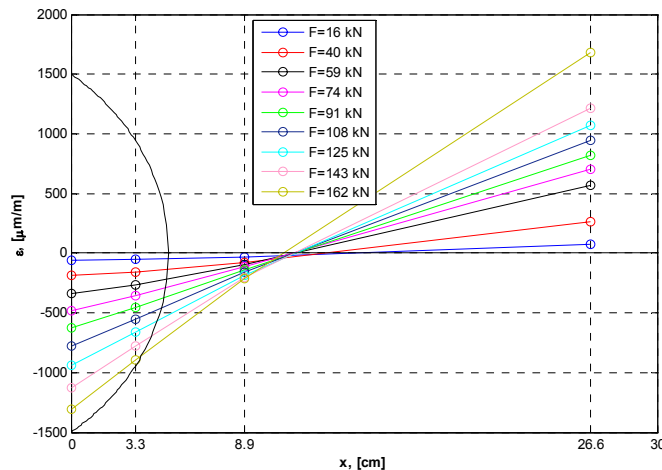
6. Експериментално получените стойности на максималните относителни деформации, измерени от тензометрите се доближават много близко до граничната относителна деформация при централен натиск. При разрушение, за

колони от серия „0”, стойността на деформациите в натисквата зона не достигат до максималните, които се дават в литературата за нецентрично натиснати елементи.

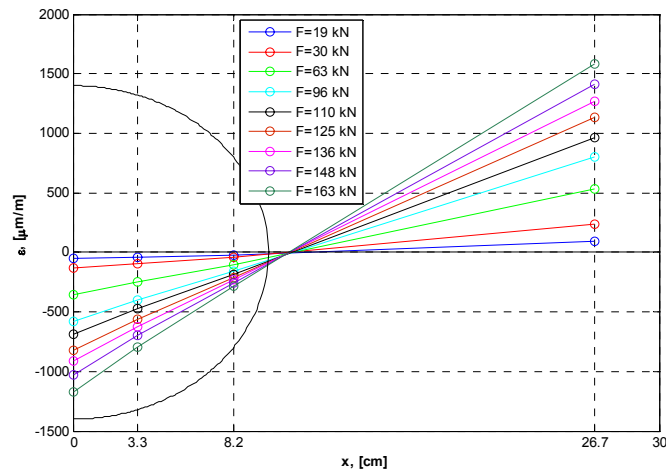
7. Както е видно от табл. III.14, при точно познаване на якостните характеристики на материалите, теоретичната носеща способност на сечението почти съвпада с тази, получена експериментално. Най-голямата разлика (4%) е за колона „0 3”.

Експерименталното изследване на нецентрично натиснатите възстановени стоманобетонни колони с дефекти и/или повреди в натисквата зона, потвърди надеждността на приложения метод за възстановяване. Всички изпитани образци от серия „А” (с дълбочина на дефекта 5 cm) и серия „Б” (с дълбочина на дефекта 10 cm) се разрушиха извън дефектите в натисквата зона. Възстановените участъци до момента на разрушаване на всички изпитани елементи работиха съвместно със „стария” бетон. Не бе открито изкълчване на натисквата армировка. Не бяха установени разрушения (напукване) на възстановените участъци, както и в и до епоксидния лепилен слой, свидетелстващи за постигнатото надеждно възстановяване на повредения участък от натисквата зона на елементите.

За съвместната работа между „нов” и „стар” бетон е видно от построените графики на деформираното напречно сечение от резултатите на тензометрите в натисквата зона и по опънната армировка, фиг. III.79 и фиг. III.80.



Фиг. III.79 – Относителни деформации – експерименталните образци серия „А”

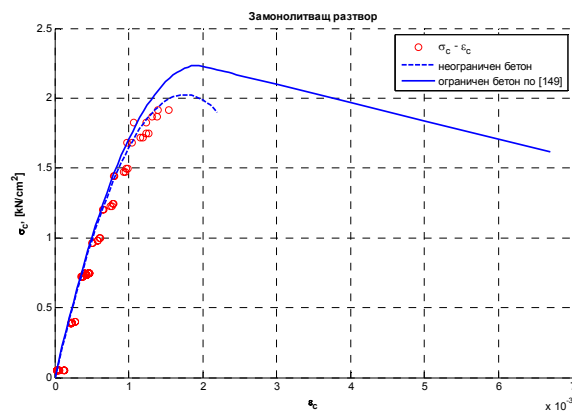


Фиг. III.80 – Относителни деформации – експерименталните образци серия „Б”

Експериментално изследване на нецентрично натиснати възстановени и усилен с кожух от CFRP стоманобетонни колони – серия „В”.

Колоните от серия „В” бяха изпитани при същите условия както базовите – серия „0”. Резултатите от измерените относителни деформации в бетона и опънатата армировка за дадени на фигурите по-долу.

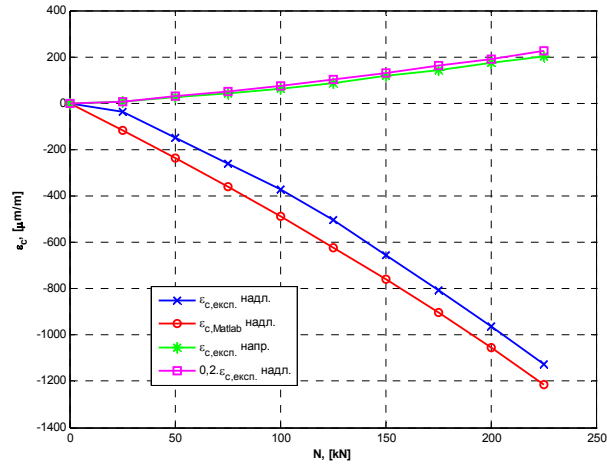
Теоретичните резултати на същите фигури са получени с помощта на съставената програма, описана в т. II.3. За коректното числено моделиране са използвани възможностите на програмата да се задават произволни работни диаграми на материалите (в случая на „ограничени” бетон и замонолитващ разтвор).



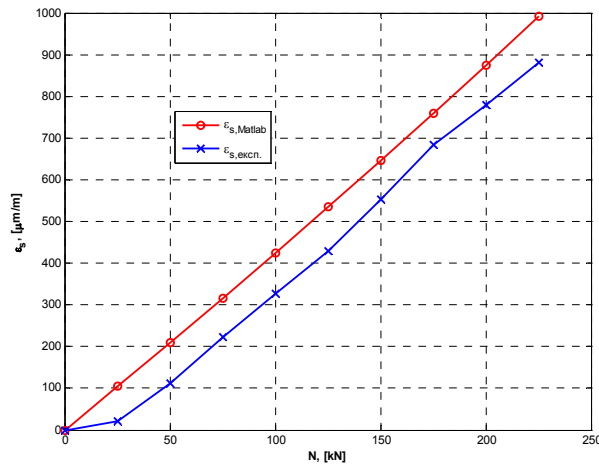
Фиг. III.94 – Работна диаграма на ограничения замонолитващ разтвор по [149]

Методиката, описваща работната диаграма на ограничен бетон за колони с правоъгълно напречно сечение е описана в т. II.5.

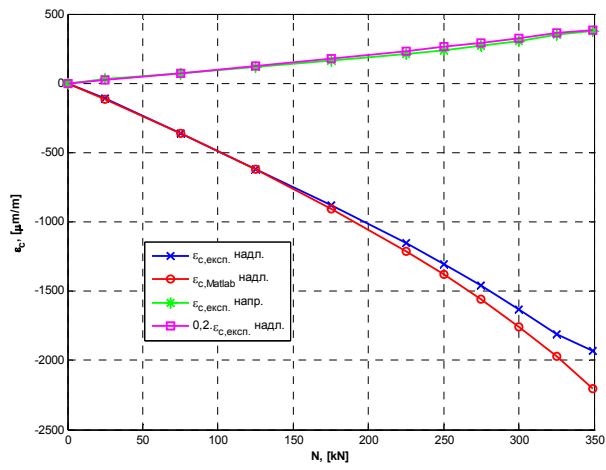
На фиг. III.95 и фиг. II.97 са показани относителните надлъжни и напречни деформации в бетона, а на фиг. III.96 и фиг. II.98 са показани относителните деформации в опънната армировка във функция на ексцентрично приложената натискава сила N за образец „В 1“. Ексцентрицитетът е: $e = 20 \text{ cm}$.



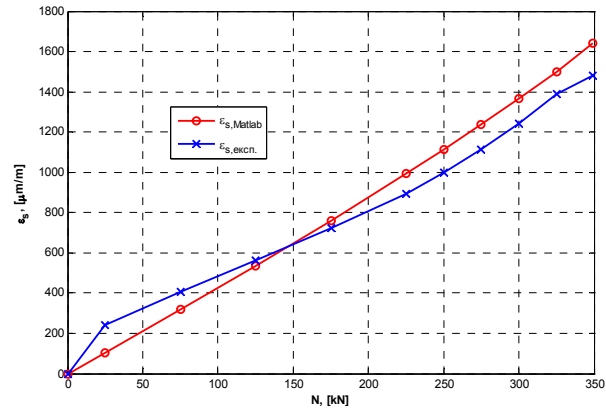
Фиг. III.95 – Относителни деформации в бетона – първи етап



Фиг. III.96 – Относителни деформации в армировката – първи етап



Фиг. III.97 – Относителни деформации в бетона – втори етап

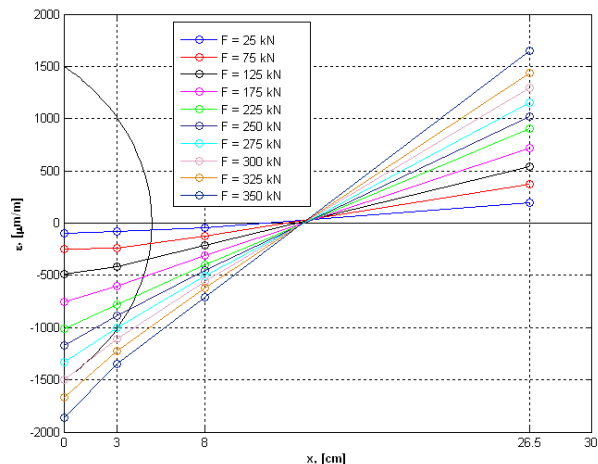


Фиг. III.98 – Относителни деформации в армивката – втори етап



Фиг. III.107 – Начин на разрушение на усилените елементи от серия „B”

Всички елементи от серия „В” се разрушиха извън зоната на усилващия кожух фиг.107. Не се наблюдава разрушение на бетона в зоната на усилващия кожух от CFRP.



Фиг. III.108 – Разпределение на деформациите в елементите от серия „В”

Изводи:

1. Има много добро съвпадение на експерименталните резултати с тези от теоретичните изчисления.
2. При кратковременно натоварване до момента на разрушение е валидна хипотезата на Бернули за равнинност на напречните сечения след деформирането им, което е видно от фиг. II.108.
3. Има много добро съвпадение на измерените напречни деформации в бетона и изчислените с коефициент на Поасон $\nu = 0,2$. Това се дължи на факта, че тензометрите, измерващи напречните деформации са разположени в зоната (фиг. III.22), където няма ефективно ограничаване на бетона (фиг. II.23).
4. Усилването на възстановени колони с дефекти и/или повреди в натисковата зона с помощта на кожух от CFRP гарантира по-висока носимоспособност на сеченията и сигурна работа на възстановителните състави.
5. Носимоспособността на частично усилени колони с постоянно по височина напрегнато състояние практически не се променя, тъй като разрушението настъпва в съседните сечения, видно от фиг. 107.
6. Въпреки, че експериментално е установената работата на ограничения бетон (в следствие на усилващия кожух от CFRP), за да се гарантира включването в работата на усилващия кожух е необходимо възможно най-голямо

разтоварване на усилваната конструкция преди изпълнение на усилването. С това ефектът от възстановителните и/или усилващи процедури ще е по-голям.

Претенции за научно-приложни приноси:

1. Изведени са изчислителни критерии (формули) за разграничаване на случаите на нецентричен натиск и за големината на допустимото отслабване на натисковата зона на стоманобетонни елементи с дефекти и/или повреди в нея, работещи на нецентричен натиск, съгласно с приетите предпоставки на нормите за проектиране [57].

2. Съставени са алгоритми и програми с използване на софтуерния продукт "Matlab" за определяне на допустимото отслабване на натисковата зона на стоманобетонни елементи, работещи на нецентричен натиск, съгласно с приетите предпоставки в БДС EN 1992-1-1 [124] и моделиране на деформираното и напрегнатото им състояние.

3. Експериментално е потвърдено надеждната работа на връзката „нов“ – „стар“ бетон при възстановени стоманобетонни елементи с дефекти и/или повреди в натисковата зона при използването на лепилен състав от епоксидни смоли.

4. Направено е изчислително и експериментално изследване на възстановени и/или усилен с кожух от CFRP композитен материал стоманобетонни елементи с дефекти и/или повреди в натисковата зона с приетите изчислителни модели и е доказано доброто им съвпадение.

Насоки за бъдеща работа:

1. Изследване на деформираното и напрегнато състояние на възстановени и усилен с фиброармирани композитни материали стоманобетонни елементи с дефекти и/или повреди в натисквата зона с отчитане на ефектите от дълготрайното действие на натоварването и процесите на стареене.

2. Създаване на алгоритми за определяне на деформациите на стоманобетонни елементи, работещи при двумерно напрегнато състояние с отчитане на физическата нелинейност на стоманобетона след усилването им.

Публикации по темата на докторантурата:

1. *В. Славчев*, Разграничаване случаите на нецентричен натиск за стоманобетонни елементи с дефекти и повреди в натисквата зона, Научна конференция с международно участие ВСУ' 2004, стр. 144-149.

2. *В. Славчев*, Определяне на допустимото отслабване на натисквата зона в стоманобетонни елементи, подложени на нецентричен натиск, сп. Строителство, 4/2004, 2004, стр. 29-32.

3. *В. Славчев, В. Кънчев*, Определяне на напрегнатото състояние на стоманобетонни сечения при реални работни диаграми на материалите, Международна научна конференция "Проектиране и строителство на сгради и съоръжения", Варна, 2006, стр. 182-188.

4. *В. Славчев*, Опитна постановка на научноизследователски проект "Възстановяване и усилване на стоманобетонни елементи с дефекти и повреди или с недостатъчна носимоспособност". Научна конференция с международно участие ВСУ' 2006.

5. *V. Slavchev*, Theoretical and experimental determination of stress-strain state of reinforced concrete sections, subjected to compression axial force and bending moment. Česko – Slovenská konference Experiment '07.

6. *В. Славчев, В. Кънчев*, Допустимо отслабване на стоманобетонни сечения, подложени на нецентричен натиск, съгласно приетите предпоставки в ЕС2. IX Международна научна конференция ВСУ' 2009.