



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

МЕХАНИЗЪМ НА РАЗРУШЕНИЕ НА ЗИДАНИ КОЛОНИ, УСИЛЕНИ С CFRP СИСТЕМА. ПРЕДЛОЖЕНИЕ ЗА ИЗЧИСЛЕНИЕ НА НОСИМОСПОСОБНОСТ ПРИ ИЗПОЛЗВАНЕТО НА НАДЛЪЖНА АРМИРОВКА

Т. Тодоров¹, Ф. Рангелова², П. Христов³

Ключови думи: зидани, колони, усилване, CFRP, изчисляване, надлъжна, армировка

РЕЗЮМЕ

Докладът представя резултатите от усилването на шест броя зидани колони от плътни глинени тухли с размери 25/25/160 ÷ 170 cm в лабораторията на УАСГ. Усилващите системи за четири от тях са комбинация от надлъжни стоманени и напречни CFRP влакна, а при останалите две е използван стандартен метод за усилване с надлъжна и напречна стоманена армировка.

1. Опитна постановка

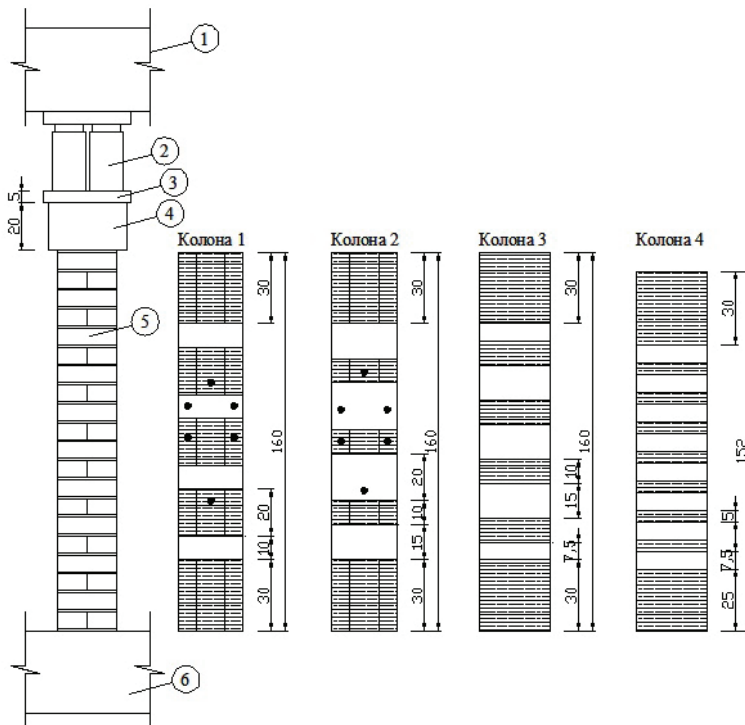
На първи етап, неусилените опитни образци бяха натоварени центрично посредством хидравлични крикове, до втори стадий на разрушение – образуване на свързани пукнатини. С оглед на малката стойност напречни деформации (0,03 mm на база

¹ Теодор Тодоров, инж., кат. „Организация и икономика на строителството“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ttodorov_fce@uacg.bg

² Фантина Рангелова, проф. д-р инж., кат. „Организация и икономика на строителството“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: fantina_fce@uacg.bg

³ Петър Христов, доц. д-р инж., кат. „Масивни конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: pchristov_fce@uacg.bg

200 mm, при 50% от максималния товар, което би отговаряло на разтоварена от временни и някои постоянни товари конструкция), бе взето решение, колоните да се усилят след пълно разтоварване. Четири от образците на колони бяха усили с по четири надлъжни, стоманени пръти N14 B500B, изравняващ разтвор с якост 1,1 kN/cm² и един слой напречни, карбонови ленти с широчина съответно 20, 10 и 5 cm, през 10 cm през различни разстояния (фиг. 1, табл. 1). В зоните с концентрация на напреженията колоните бяха усили с 30 cm FRP ленти. За матрица (полимерно свързващо вещество) беше използвана епоксидна смола.



Фиг. 1. Опитна постановка и процентна площ на усилящите ленти

1-стенд; 2 – хидравлични крикове; 3 – стоманена плоча 5 cm; 4 – стоманобетонена шапка 20 cm; 5 – образец на зидана колона; 6 – стоманобетонна греда

Таблица 1. Процент площ на усилящата лента в средна третина на колоните

% площ на усилящата лента в средна третина на колоните за м ²				Стандартно армирани	
C1	C2	C3	C4	C5	C6
66	33	40	40	-	-

След така извършеното усиляване, образците бяха натоварени повторно, като тяхната носимоспособност се бе увеличила над два пъти (фиг. 6, фиг. 7 и фиг. 8, табл. 2, табл. 3). Колони 3 и 4 бяха натоварени съответно с 311% и 240% от товара преди усиляването. Поради технически причини и опасност от крехко разрушение, те не бяха изпитани до разрушение след усиляването, а до отваряне на недопустими пукнатини (развити – 0,3 ÷ 0,5 mm).

Таблица 2. Реализирано натоварване преди и след усилването на колоните

Колона	Реализирано натоварване, kN					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Неусилени	291	291	145	210	178	211
Усилени	630	582	453*	501*	454	405
* - натоварени до отваряне на недопустими пукнатини						

Таблица 3. Увеличение на носимоспособността според усилващата система

Площ на усилващата лента в средната третина на колоните за м', %						Стандартно армирани	
C1	C2	C3	C4	C5	C6		
66	33	40	40	-	-		
Увеличение на носимоспособността след усилването, %							
220+	200+	310+	240+	160	180		
"+" - достигнати бяха недопустими пукнатини, а не пълно разрушение на елемента							

2. Механизъм на разрушение за колони 1 и 2, резултати, анализ на резултатите

Механизмът на разрушение, който се наблюдава за колони 1 и 2 е в три обособени етапа.

В първи етап (до около 400 kN) се появиха вертикални и коси пукнатини в разтвора главно около ръбовете на колоните, на по-малко места, в средната част на сечението (фиг. 2). Появата на пукнатините не предизвика съществено изменение в общите деформации на опитните образци (фиг. 7 и фиг. 8).



Фиг. 2. Пукнатини в първи етап

Като втори етап (над 400 kN) може да се определи плавното скъсване на усилващите FRP ленти. Никъде не се наблюдава крехко разрушение или отлепване. Най-често

скъсването на лентите започваше от място с концентрация на напреженията в зоната около шапките (фиг. 3) [71], [72], и депланация на надлъжната стоманена армировка в тези участъци. В една от колоните скъсването стана в средно сечение поради появила се в миналия стадий пукнатина в разтвора (фиг. 4).



Фиг. 3. Разрушения в горната част на шапката и в колоната

Отварянето на пукнатини беше съпроводено с характерен звук на пукане при късането на влакната. При задържане на товара, понякога деформациите растяха малко в рамките на няколко минути, след което утихваха. Този процес беше свързан с разрушения в усилващите ленти и преразпределение на усилията между тях и елемента.

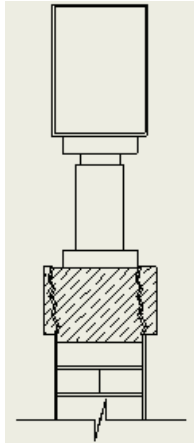
Според авторите, поради работните характеристики на усилващия материал, може да се предположи с голяма сигурност, че задържането на товара за по-дълъг период от време не би породило увеличение на деформациите във времето.



Фиг. 4. Пукнатини в FRP лентата на втори етап

Третият етап беше достигане на критерии за начало на разрушение, в следствие на частично скъсване на една усилваща лента в колоната 2. Това стана при разрушаващ товар съответно 580 kN. След скъсването на лентата, колоната не загуби носимоспособност, но поради съображения за сигурност, не беше реализирано по-голямо натоварване. Колоната 1 не беше изпитана до пълно разрушение поради достигане натоварващия капацитет на опитната постановка.

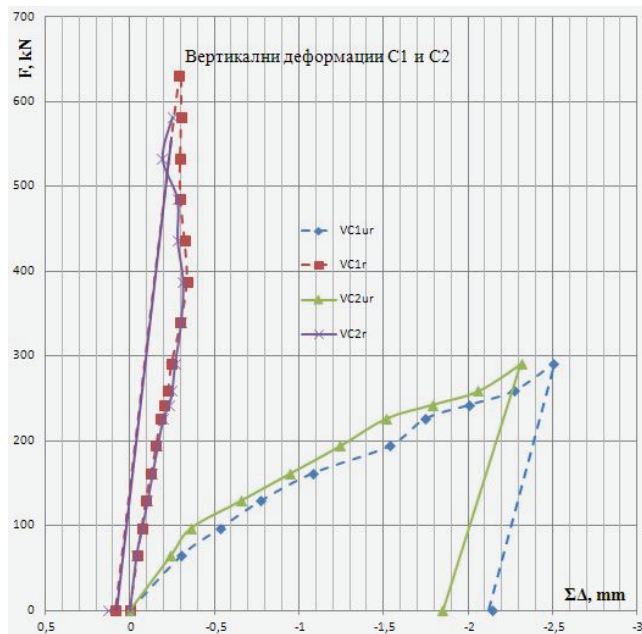
След този етап колоните увеличаваха своите деформации, при задържане на постоянно натоварване върху тях, поради смачкване на стоманобетонните шапки и предаване на голяма част от натоварването към ядрото на колоните (фиг. 3, фиг. 5). Това беше и максималното натоварване, което позволяваше хидравличната помпа в лабораторията.



Фиг. 5. Смачкване на ядрото на колоната

3. Резултати и анализ на резултатите

3.1. Работни диаграми за колони 1 и 2, резултати, анализ на резултатите

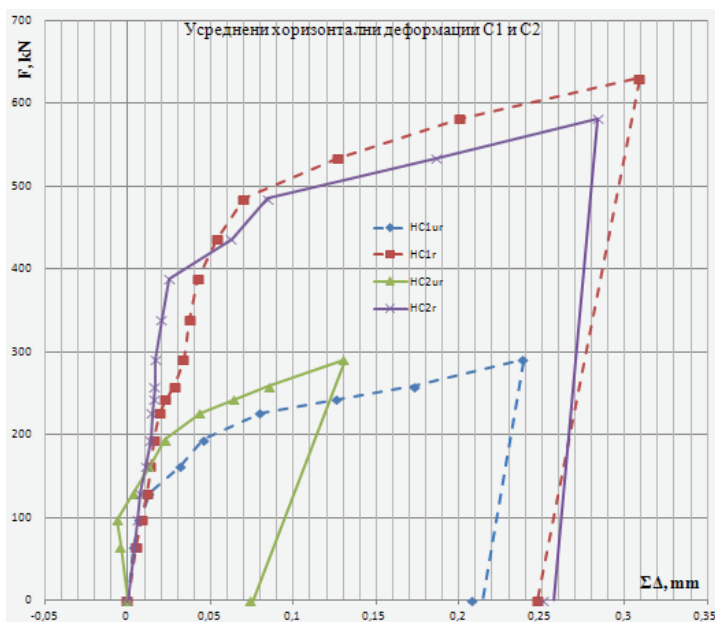


Фиг. 6. Вертикални деформации в колони 1 и 2

Отчупването на цели парчета от мазилката при натоварване около 400 kN доведе до загуба на сцепление между разтвора и зидарийните тела. Това ясно се вижда от намаляването на вертикалните деформации от страната на разрушенията. Сърцевината

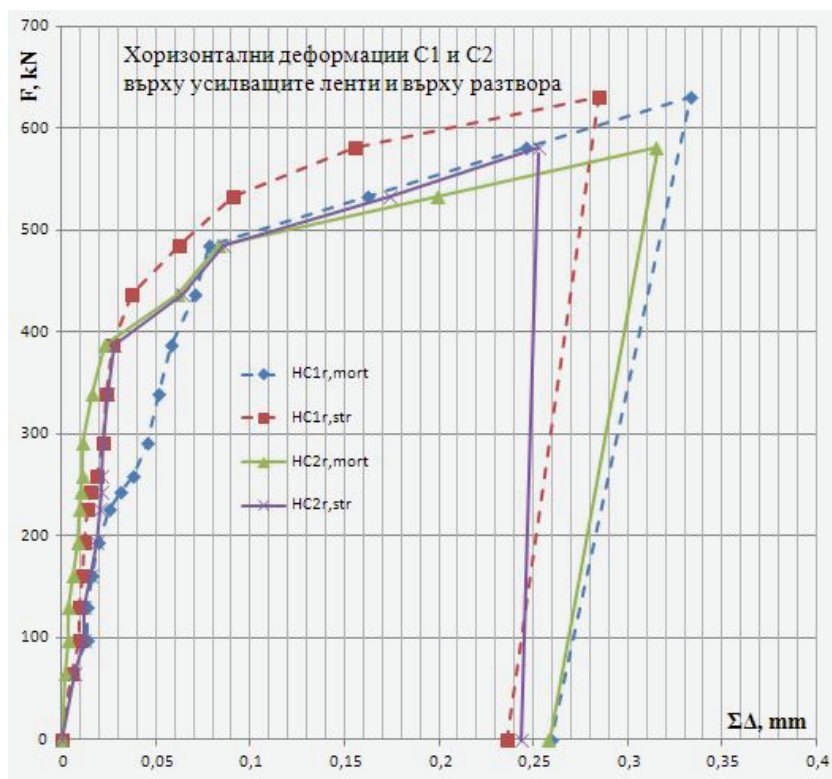
от зидария на колоната продължаваше да се скъсява по вертикално направление, но обгръщаният разтвор намали своите деформации (фиг. 5). В този етап на натоварване съдействието за поемането на вертикални сили от разтвора намали и главният принос, за увеличената носимоспособност беше от ограничаването на напречните деформации, реализирано изцяло от усилващите ленти, както и поемането на част от усилията от надлъжните стоманени пръти. Поради запазването на сцеплението между зидария, разтвор и надлъжна армировка в горна и долна зона на колоните, надлъжните пръти продължиха да съдействат при поемане на усилията в елементите. От графичното представяне на резултатите ясно се вижда, че гъстотата и широчината на усилващите ленти не е от значение за големината на вертикалните деформации (фиг. 6).

При развитието на хоризонтални деформации правят впечатление диаграмите след усилването. Въпреки двойно по-големите деформации в колона 1 преди усилването, във втория етап на натоварване, след усилването, нейните деформации са почти идентични с тези от колона 2. Това може да се дължи на по-широките усилващи ленти и на голямото съотношение в якостите между носещата и усилващата конструкция. Деформациите започват да зависят значително от физико-механичните характеристики на фибро-армираната система.



Фиг. 7. Усреднени хоризонтални деформации в колони 1 и 2

Напречните деформации по повърхността на разтвора бяха с 15 ÷ 20% повече от тези, измерени върху усилващите ленти (фиг. 8). Това беше и причината да се появят пукнатини в разтвора (фиг. 2), доста преди да настъпи разрушението в лентата. Така получените резултати дадоха насока за изследване с промяна на гъстотата на усилващите нишки. Според авторите би могло да се постигне по-висока якост със същата площ усилваща лента, но разделена на по-тесни, но по-близко разположени ивици. Това не би оскъпило чувствително процеса. Разходите за материали остават приблизително същите. Разходите за труд при усилването на вертикални елементи са 38% от общата стойност. За допълнително разчертаване, разкрояване и полагане, процесът ще се оскъпи с до 5% от общата стойност (труд и материали).



Фиг. 8. Хоризонтални деформации върху разтвор и върху FRP лента в колони 1 и 2

Хоризонталните деформации в две перпендикулярни равнини бяха аналогични. От това може да се направи заключение, че стремелът на надлъжните пръти да „отворяят“ колоната в двете успоредни равнини, не е причина за разрушението на колоната. Напречните деформации са меродавни за появата и развитието на пукнатини.

3.2. Работни диаграми за колони 3 и 4, резултати, анализ на резултатите

Колона 3 и колона 4 бяха натоварени до отваряне на недопустими вертикални пукнатини (фиг. 9) в разтвора между усилващите ленти и под тях.

Това натоварване съвпада с хоризонталните деформации и товарната степен от колони 1 и 2, след което диаграмата на хоризонталните деформации увеличава рязко своя наклон. След този етап, при колони 1 и 2, се наблюдаваше силно увеличение на деформациите за същия размер на товарните степени.

Хоризонталните деформации в колони 3 и 4 бяха с 50% по-малки от получените преди разрушението в предишните колони, защото поради технически причини не бяха реализирани последните три стъпки от натоварването, което отговаря на около 70% от разрушаващия товар, получен за колони 1 и 2.

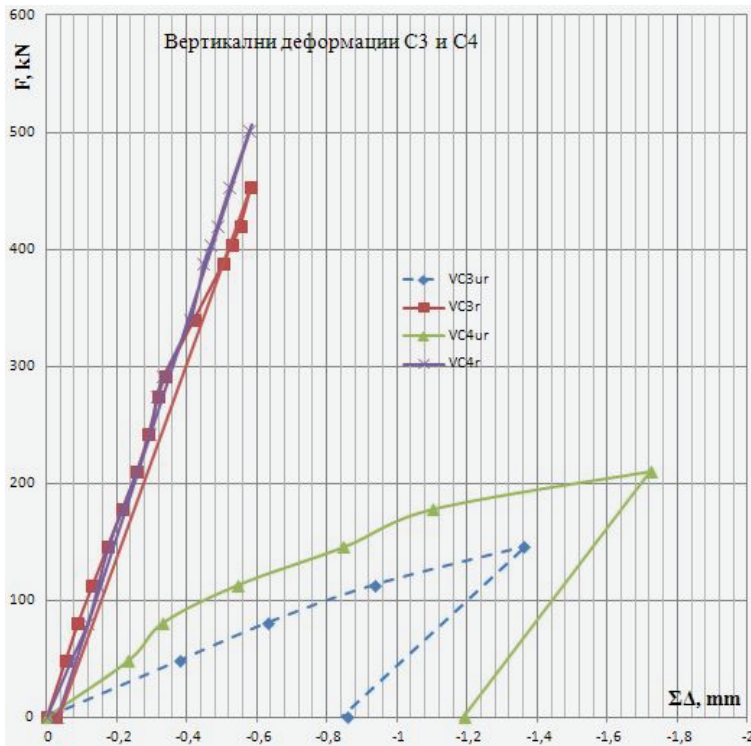
След сравнение на зидарийните тела от двата чифта колони се установи, че в първата серия колони – 1 и 2, около 75% от тухлите имаха пукнатини, а при колоните от втора серия – 3 и 4, само около 30% бяха напукани. Голяма част от пукнатините във втората серия колони бяха причинени още при първия етап на натоварване, преди тяхното усилване.



Фиг. 9. Вертикална пукнатина под усилващата лента

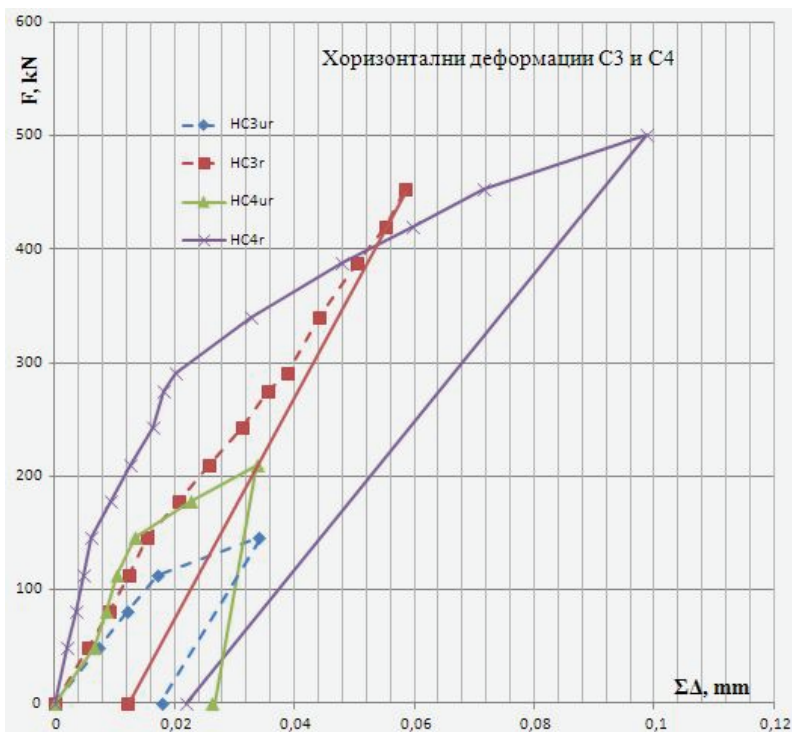
Като извод, може да се каже, че ограничаването на напречните деформации на колоната предотвратява напукването на зидарийните тела до натоварване, отговарящо на около 150 ÷ 200% от първоначалния товар преди усилването.

При развитието на вертикални деформации, след усилването, се вижда, че колоните реализират почти идентични деформации, без особено значение от гъстотата на усилващите ленти (фиг. 10). За потвърждаване на това заключение трябва да се направят по-задълбочени изследвания.

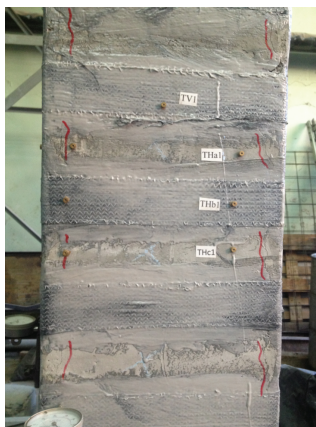


Фиг. 10. Вертикални деформации в колони 3 и 4

При развитието на хоризонтални деформации (фиг. 11), правят впечатление диаграмите след усилването. Въпреки идентичните вертикални деформации (фиг. 10), хоризонталните деформации в колона 4 се получиха чувствително по-големи. Това може да се обясни с разлика в системата на усилване. При колона 3 стоманените вертикални пръти пасваха точно на височината на колоната. При колона 4 имаше минимално разстояние между прътите и разпределителната шапка. Така ядрото на колона 4 започваше да се деформира по-съществено от усилващата система.



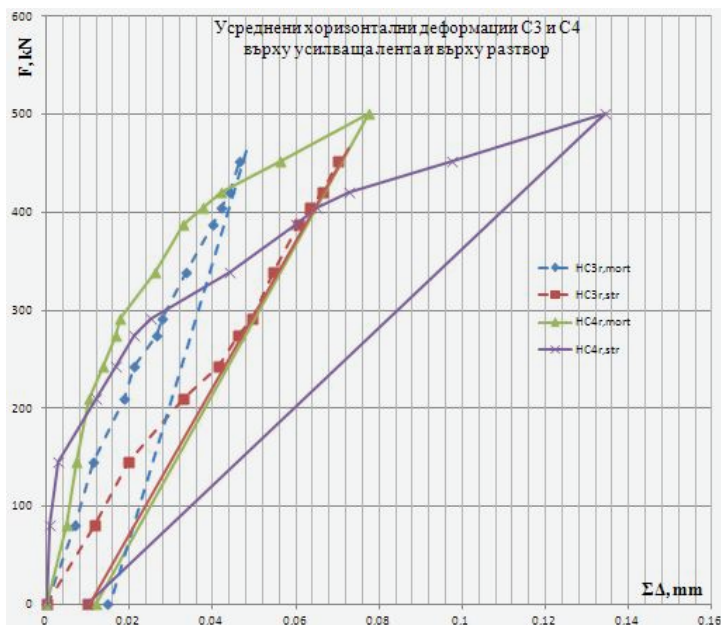
Фиг. 11. Усреднени хоризонтални деформации в колони 3 и 4



Фиг. 12. Вертикални пукнатини между страните и развора

Напречните деформации по повърхността на разтвора и тези, измерени върху усилващите ленти, се различаваха чувствително. Поради технологията на нанасяне на разтвора върху колони 3 и 4, технологичното изчакване между измазването на две перпендикулярни страни, не се реализира вертикална връзка между стените. Още по време на първите степени на натоварване се появиха вертикални пукнатини по височина на колоната в местата на връзка на разтвора (фиг. 12).

Тези пукнатини се увеличаваха с увеличаване на натоварването. Марките за часовниковите деформометри бяха разположени между две успоредни пукнатини. Така измерените деформации върху разтвора не показваха пълните деформации в колоните. Деформациите, измерени върху усилващите ленти, бяха независими от отворилите се пукнатини и показваха реалната, пълна, напречна деформация (фиг. 13).



Фиг. 13. Хоризонтални деформации върху разтвор и FRP лента в колона 3 и колона 4

3.3. Работни диаграми за колони 5 и 6, резултати, анализ на резултатите



Фиг. 14. Разрушения в колона 5

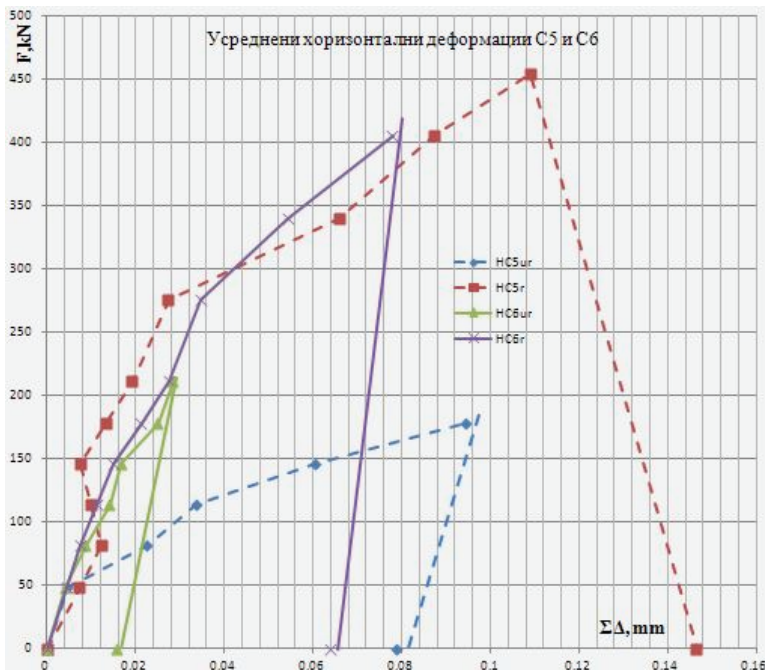
При развитието на хоризонтални деформации след усилването (фиг. 16) се вижда ясно, че остатъчните деформации на неусилените колони не играят роля. До момента на начално разрушение диаграмите на колона 5 и колона 6 вървят паралелно. Това дава голяма сигурност в точността на резултатите от изпитването. При колона 5 последният етап на натоварване съвпадна с крехко разрушение в разтвора, изразено с отчупване на парче от него, както и депланиране на разтвор от съседна страна на колоната (фиг. 14).

Това е и причината остатъчните деформации да са значително по-големи. В колона 6 разрушението настъпи от силно хоризонтални напукване при реализирането на последната товарна степен (фиг. 15).



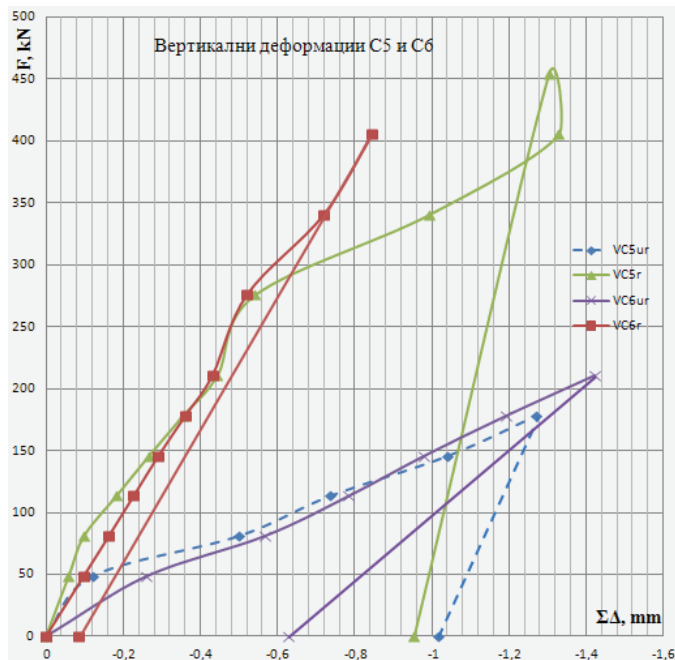
Фиг. 15. Разрушения в колона 6

Общите остатъчни деформации в двете колони говорят за пълно пластифициране на усилените колони.



Фиг. 16. Усреднени хоризонтални деформации в колони 5 и 6

Вертикалните деформации в усилените колони също са идентични до момента на образуване на пукнатини, малко преди пълното разрушение на колоните. Измерените деформации при 280 МРа в цилиндрите за колона 5 са след образуването на хоризонталната пукнатина и отчупването на голямо парче от усилящия разтвор. Намаляването на вертикалните деформации в последната степен говори за загуба на връзката между усилящия разтвор и зиданото ядро на колоната.



Фиг. 17. Усреднени вертикални деформации в колони 5 и 6

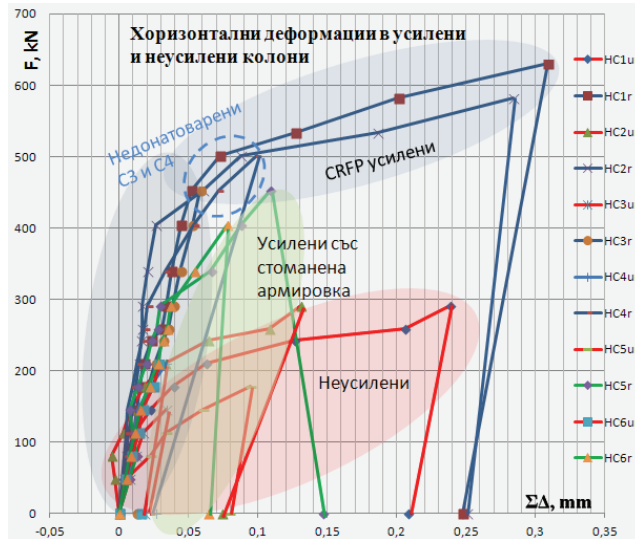
4. Съпоставка на резултатите между усиляне с напречни CFRP влакна и такова със стоманени стремена. Изводи

След окончателната обработка, при съпоставянето на диаграмите на хоризонталните деформации, се вижда, че при натоварване, равно на граничното за усилените със стоманени стремена (колона 5 и колона 6), деформациите в тях са около 0,075 mm, а тези в усилените със CFRP система – около 0,025 mm (фиг. 18). Три пъти по-малките деформации могат да се обяснят с по-големия модул на еластичност за карбоновите нишки и по-голямата площ на съдействие. Така проверката по втора група (експлоатационни) гранични състояния, за отваряне на недопустими пукнатини, ще бъде удовлетворена до по-късен етап на натоварване за CFRP системата.

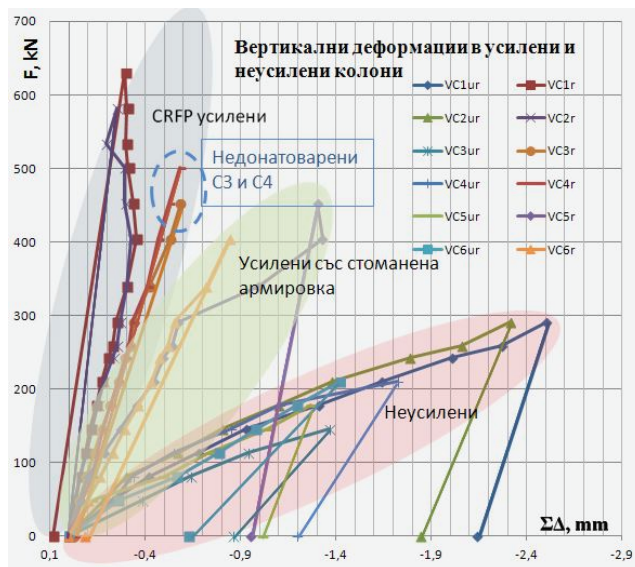
Въпреки представените резултати за измерени хоризонтални деформации, действителните такива са значително по-големи. Част от образувалите се вертикални пукнатини в елементите, усилен с CFRP система, бяха извън площите, в които бяха залепени марките за взимане на отчети.

От диаграмите с вертикални деформации се вижда, че въпреки еднаквата надлъжна армировка във всички усилен образци, напречното обрмачване с CFRP система, при едно и също натоварване, показва с около два пъти по-малки деформации, в сравнение с

тези, усилены със стоманени стремена (фиг. 19). За разлика от колоните, усилены със стоманени стремена (колона 5 и колона 6), тези с CFRP система (колони 1, 2, 3 и 4) не получиха форма на разрушение в усиления разтвор от вертикално изчерпване на граничните деформации за него. Ограничаването на напречните деформации чувствително завишава носимоспособността на зидарията и по този начин се намаляват и вертикалните деформации. Въпреки близо два пъти по-дебелото сечение на усиления високоякостен разтвор в колона 5 и колона 6, вертикалните деформации в тях стават причина за разрушения в него. Така въпреки високите якости на усиления разтвор, авторите правят извода за неговия малък принос към цялостната носимоспособност на усилените колони.



Фиг. 18. Хоризонтални деформации в усиени и неусиени колони



Фиг. 19. Вертикални деформации в усиени и неусиени колони

Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор БН-67/2014 е подкрепена финансово от Център за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *F. N.* Seismic rehabilitation of reinforced masonry columns using CFRP and GFRP wraps. 2011.
2. *G. N. N. A. Rocca, S.* Review of design guidelines for FRP confinement of reinforced concrete columns of noncircular cross sections. 2008.
3. *Б. Т.* Зидани конструкции. Неармирани и армирани зидани и тухлостомано-бетонни конструкции. 2003.
4. EC 6. 2012.
5. CNR-DT 200 R1/2013 – Guide for the design and construction of externally bonded FRP. 2013.
6. *M. E. C. G., A. M. M. F. N. E. Faella, C.* Masonry columns confined by composite materials: Design formulae. Comp.: Part B p. 42, 2011.
7. *T. T. Krevaikas, T.* Masonry Confinement with Fiber-Reinforced Polymers. J. Compos. Constr., 2005.
8. *G. A. B. A. Corradi, M.* Confinement of brick masonry columns with CFRP materials. Comp. Sci. and Tech., 2007.
9. *D. C. P. A. M. G. Di Ludovico, M.* FRP confinement of tuff and clay brick columns: Experimental study and assessment of analytical models. J. Compos. Constr., 2010.
10. Строителен справочник – The Plan [Онлайн]. Available: <http://theplan.bl.ee/>.

FAILURE MODE IN MASONRY COLUMNS, REINFORCED WITH CFRP STRENGTHENING SYSTEM. LOAD BEARING SOLUTIONS WITH LONGITUDINAL BARS

T. Todorov¹, F. Rangelova², P. Hristov³

Keywords: *manuscript, preparation, typeset, format, UACEG2009*

ABSTRACT

The paper presents the results of reinforcement of six masonry columns with 25/25/180 cm size, tested in UACEG laboratory. The bricks used in this experiment are clay without hollows. The reinforced systems used for four of them are mix of steel rods and CFRP strips. The other two are reinforced by a standard method with steel rods and stirrups.

¹ Teodor Todorov, Eng., Dept. “Construction Management and Economics”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: ttodorov_fce@uacg.bg

² Fantina Rangelova, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Construction Management and Economics”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: fantina_fce@uacg.bg

³ Petar Hristov, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Reinforced Concrete Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: pchristov_fce@uacg.bg