



Получена: 11.06.2020 г.

Приета: 14.07.2020 г.

ИЗПИТВАНИЯ НА ВИБРАЦИОННА ПЛАТФОРМА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ИЗМЕНЕНИЕТО НА КОРАВИНАТА И СОБСТВЕНАТА ЧЕСТОТА НА ОБРАМЧЕНИ ЗИДАНИ СТЕНИ ПРЕДИ И СЛЕД УСИЛВАНЕТО ИМ

Е. Махмуд¹, Е. Абдулахад²

Ключови думи: изпитване на вибрационна платформа, коравина, обрамчена зидария, усилване, собствена честота

РЕЗЮМЕ

В настоящата статия са представени част от изследванията, които са проведени на вибрационна платформа с цел получаване на оценка на влиянието на местоположението и площта на отвора върху капацитета за поемане на хоризонтални сили. В нея ще се анализира изменението на собствената честота и коравина на образците. Основната честота е определена по резонансен метод, чрез използване на хармонични и случайно генерирани сигнали във времето с малко ускорение. Въздействията са генерирани от вибрационна платформа. Основната честота е определена в различни етапи от изпитването на образците с цел получаване на количествена оценка за изменението на честотата от деградацията на коравината и акумулиране на повредите в образците.

1. Въведение

Природните бедствия като торнадо, вулканични изригвания, свлачища, цунами или земетресения причиняват милиони смъртни случаи и тежки социално-икономически проблеми, засягащи развитието на много страни. От тази гледна точка земетресенията са

¹ Емин Махмуд, инж. докторант, кат. „Масивни конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: dipl.ing.eminmahmud@gmail.com

² Емад Абдулахад, доц. д-р инж., кат. „Масивни конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: georgosing@gmail.com

една от най-опустошителните природни опасности на Земята. Земетресенията не убиват хората, а срутването на сградите е основната причина за смъртните случаи и тежките поражения. Това означава, че трябва да се положат усилия за намаляване на сеизмичната уязвимост на сградите.

Зиданите конструкции имат голямо разнообразие от форми и се използват като строителен материал от хиляди години. Съществуващите зидани сгради са строени в продължение на много векове, като се вземат предвид най-вече вертикалните статични натоварвания в съответствие с опита на строителя и без позоваване на някакъв конкретен сеизмичен код. За правилното разбиране на поведението на зиданите конструкции се провеждат в световен мащаб редица изследвания. У нас изследванията върху зиданите конструкции са сравнително малко спрямо конструкциите от стомана и стоманобетон. Проведените в нашата страна експериментални изследвания върху зиданите конструкции предимно са квазистатични изпитвания чрез прилагане на монотонна или циклична сила или преместване. По-реалното симулиране на сеизмично поведение на конструкцията се наблюдава при динамичните изпитвания, реализирани на вибрационна платформа (shaking table). Вибрационната платформа е мощен инструмент за сеизмично изследване на цялата конструкция или фрагмент от нея, на образци с реални размери или мащабирани такива, с използване на акселерограми от реални земетресения или изкуствено създадени такива, и др. С помощта на вибрационна платформа могат да се изследват различни видове конструкции. Някои от по-значимите изследвания в областта на зиданите конструкции са:

- Експерименталната програма на Graziotti и др. [1 – 5], реализирана в лабораторията EUCENTRE в Павия, Италия, включва: (1) експериментално определяне на характеристиките на блоковете и разтвора за зидария и на фрагмент от стена, изпълнена от зидария; (2) квазистатични изпитвания в равнината на зидана стройна стена; (3) динамични изпитвания (чрез вибрационна платформа) извън равнината на зидани стени; и (4) динамично изпитване чрез вибрационна платформа на двуетажна калканна къща, изградена в реален мащаб от неармирана зидария – фиг. 1.



Фиг. 1. Изследователският проект на Graziotti и др. [5]



Фиг. 2. Изследователският проект на Sharma и др. [6]

- Sharma и др. [6] – в тяхната експериментална програма изследват 9 броя зидани стени в реален мащаб, които са подложени на динамични въздействия извън тяхната равнина, симулирани от вибрационна платформа. Една от изследваните стени е с наличие на отвор за прозорец – фиг. 2.
- Tomassetti и др. [7] провеждат серия от динамични изпитвания на едноетажна конструкция от неармирана зидария и дървена покривна конструкция, които допълват изследванията на двуетажна къща с подобни характеристики. Предвидено е с изследвания образец да се симулира сеизмичното поведение на горния етаж на образца, изследван в [8] – фиг. 3.

- Целта на изследователския проект, който е реализиран в лабораторията на LNEC в Лисабон, Португалия, от Kallioras и др. [9], е изследване на сеизмичното поведение и анализиране на повреди на конструкция на къщи, изпълнени от неармирана зидария, типични за района на Гронинген. Къщата е с дървен мансарден покрив, а подът е от дървени греди и дъски, което води до гъвкава диафрагма – фиг. 4.



Фиг. 3. Изследователският проект на Tomassetti и др. [7]



Фиг. 4. Изследователският проект на Kallioras и др. [9]

- Целта на изследователския проект, който е реализиран в лабораторията EUCENTRE в Павия, Италия, от Miglietta и др. [8], е проучване на сеизмичната уязвимост на къщи с калканни стени, изградени в реален мащаб с неармирани зидани стени с първи етаж от сглобяеми стоманобетонни панели, завършени със замонолитваща плоча, която осигурява диафрагмено действие както при корава диафрагма, а покривът е дървена конструкция, която е гъвкава диафрагма (частично диафрагмено действие) – фиг. 5.



Фиг. 5. Изследователският проект на Miglietta и др. [8]



Фиг. 6. Изследователският проект FRAMA [11]

- За правилно разбиране на поведението на рамкови конструкции с пълнежна зидария в Строителния факултет в Осиек е започнат изследователски проект FRAMA [10 – 12]. Експериментите са проведени в ИЗИИС – Скопие – фиг. 6.

2. Описание на изследванията и основни цели

В научноизследователския проект се разглежда проблем, свързан със сеизмичното осигуряване на масово използваните у нас и в света конструкции с обрामчена зидария. Проведени са експериментални изследвания на вибрационна платформа на три обрामчени зидани стени с различно положение и размер на отвори.

Целта на проекта е експерименталното изследване на сеизмичното поведение на обрамчени, неармирани зидани стени със и без наличие на отвор преди и след усилването им със стъклени нишки (Glass Fiber Reinforced Polymers, GFRP). Експерименталните изследвания са проведени за получаване на оценка на влиянието на местоположението и площта на отвора върху капацитета за поемане на хоризонтални сили. Цел е и определянето на подходящи усилващи системи за повишаване на капацитета и компенсиране на загубите на коравина, както и повишаването на дуктилноста на обрамчена зидария.

За да се изпълнят целите на проекта, са подложени на изпитвания три обрамчени зидани стени с еднакви геометрични и материални характеристики, но с различна конфигурация на отворите. Първият образец е изпълнен без отвор (образец CMF), вторият образец е с отвор за прозорец (образец CMW), докато третият образец е с отвор за врата (образец CMD). Образците са изпълнени в мащаб 1:1. В [13] е дадена подробна информация за изследваните образци. Всеки образец поотделно е подложен на сеизмични въздействия, като те са приложени в равнината на образца. След приключване на изпитванията образците са усилены с GFRP и повторно подложени на изпитвания. Една и съща усилваща система е изпълнена по двете страни на образца. Частта със зидарията изцяло е шпаклована с трикомпонентна и тиксотропна епоксидна смес. Ивиците от стъклени нишки са залепени върху повърхността на стената, като се използва двукомпонентно и епоксидно лепило за импрегнация и лепене на композитен плат. Очерганията и разположенията на ивиците са съобразени с появилите се пукнатини/повреди.

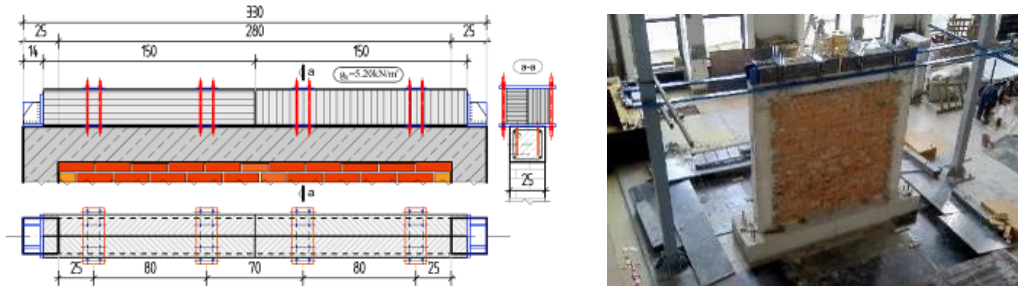
3. Обща методология при изпитване на образците – фази, въздействия и уреди

За всеки образец са извършени главно два вида изпитвания – фиг. 7. Първият вид изпитване е за определяне на динамичните характеристики (ДХ) на образците (честота, коравина). Вторият вид изпитване е за определяне на сеизмичното поведение (СП) на образците във времето. При динамичните характеристики условно е включен и индексът на повреди. Сеизмичните въздействия са симулирани с вибрационна платформа. В зависимост от вида на изпитването са използвани различни сигнали. Използвани са реални и скалирани/мащабирани записи на ускоренията от земетресението в El-Centro, Imperial Valley, California, 18 May, 1940. Освен това са използвани хармонични и случайно генерирани сигнали във времето (random and sine-sweep excitation). Изпитванията са извършени на етапи чрез увеличаване на интензивността на земетресението. По този начин е обхванато пълното сеизмично поведение на образците, започващо от линейно поведение, поява на първите пукнатини в стените до развитие на механизмите за разрушаване.

Образци и проведени изпитвания (3+3 стени, общо 80 изпитвания)											
CMF Стена без отвор 32 изпитвания				CMD Стена с отвор за врата 24 изпитвания				CMW Стена с отвор за прозорец 24 изпитвания			
CMFuS Преди усилв. 20 изпитв.		CMFS След усилв. 12 изпитв.		CMDuS Преди усилв. 13 изпитв.		CMDS След усилв. 11 изпитв.		CMWuS Преди усилв. 10 изпитв.		CMWS След усилв. 14 изпитв.	
ДХ	СП	ДХ	СП	ДХ	СП	ДХ	СП	ДХ	СП	ДХ	СП
7	13	7	5	6	7	5	6	4	6	7	7

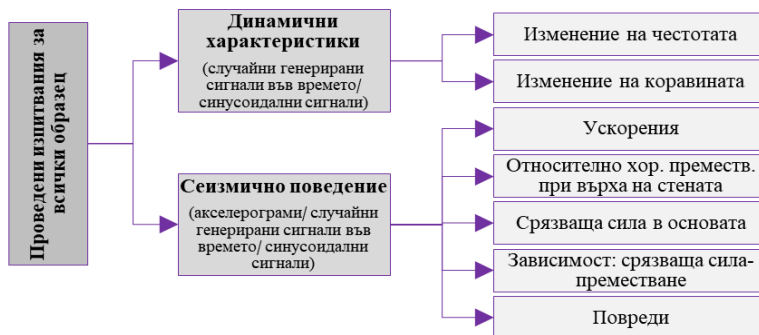
Фиг. 7. Проведени експериментални изследвания

Изпитванията са проведени на вибрационна платформа в ИЗИИС – Скопие. Подробна информация за платформата може да намерите в [14]. По време на изпитванията, освен собствено тегло на образците, се предвижда и допълнително вертикално натоварване от $5,20\text{kN/m}^2$ (фиг. 8). Товарът е фиксиран към образеца, за да се избегне взаимното движение между образеца и товара.



Фиг. 8. Допълнително вертикално натоварване и схема на страничното укрепване

Проведените експериментални изследвания са многообхватни и с голям обем. Първоначално е концентрирано влиянието на следните фактори: 1) изменение на честотата и на коравината на образците; 2) ускоренията в различни нива; 3) относителното хоризонтално преместване на върха на стената; 4) напречната сила в основата и получените хистерезисни примки; както и 5) оценка на повреди в образците – фиг. 9.

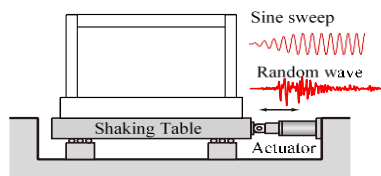


Фиг. 9. Проведени изпитвания и анализирани от тях резултати

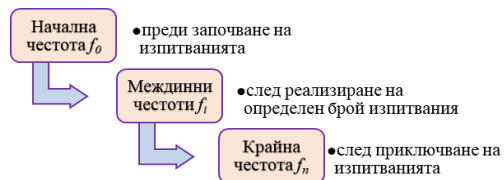
3.1. Определяне на динамичните характеристики на образците

Основната собствена честота е определена по резонансен метод. Методът се използва при относително ниски нива на хоризонтално въздействие, докато не са се появили нееластичните деформации [15 – 16]. Използвани са хармонични и случайно генерирани сигнали във времето с малко ускорение около $0,05\text{g}$ – фиг. 10. За конкретизиране на основната собствена честота на образците, възбудянето е едноосно по направлението на образеца. Основната честота е определена в различни етапи от изпитването – фиг. 11. Честотата е определена (1) преди започване на изпитванията, за да се определи началната основна собствена честота, (2) след определен брой изпитвания, за да се следи изменението на основната честота, и (3) след приключване на изпитванията, за да се преминава към определяне на крайната основна честота. Определянето на началната

честота е необходимо, за да има база за сравняване на резултатите с цел получаване на количествена оценка за изменението на честотата от деградацията на коравината и акумулиране на повредите в стената. След приключване на определен брой динамични изпитвания отново се определя собствената честота на стената. Целта е да се види до каква степен е намалена коравината на стената, и предвид това, за последващо изпитване да се използва случайно генериран или синусоидален сигнал с определен честотен диапазон. След приключване на всички динамични изпитвания на стените е определена крайната собствена честота. Целта е да се даде оценка до каква степен е деградирала коравината на стената от настъпилите в нея повреди спрямо началната коравина, както и за сравняване на началната честота и коравина на образците след усилването им.



Фиг. 10. Определяне на собствената честота на образците



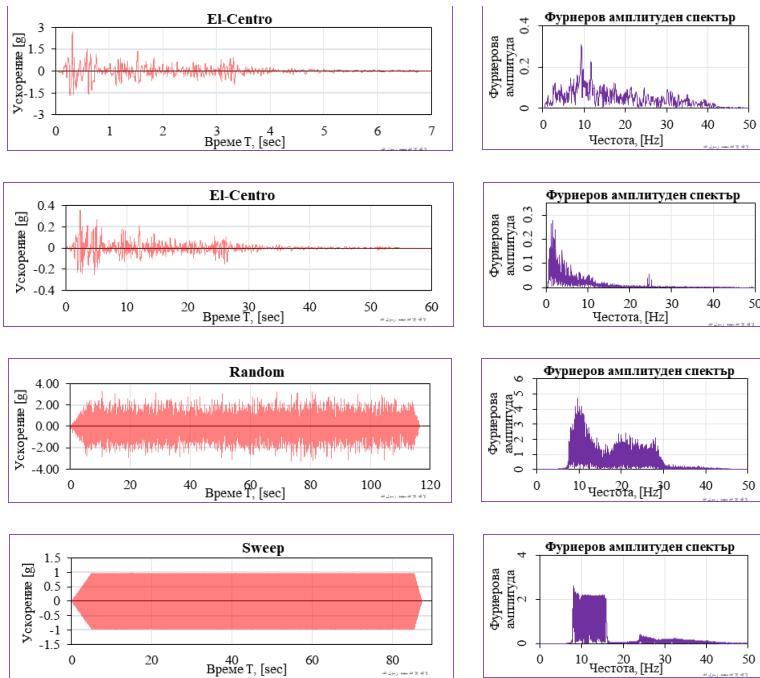
Фиг. 11. Етапи за определяне на честотата на образците

3.2. Индекс на повреди (индикатор за повреди) – Damage Index (DI)

Промяната на динамичните свойства, като намаляването на честотите, е свързана с коравината на конструкцията и следователно с концепцията за повреда, която обикновено се използва за определяне на деградацията на механичните свойства на материалите. Една от целите на проведените изследвания е да се определи индикатор на повреда въз основа на понижаването на честотите. Индексът на повреди (*Damage Index – DI*) е със стойност в диапазона от 0% – липса на повреди до 100% – пълно разрушаване [17]. За анализиране на индекса на повреда и коравината са използвани различни изрази за получаване на опростения индекс на повреди, посочени в [18 – 20].

3.3. Определяне на сеизмичното поведение на образците

За определяне на сеизмичното поведение на образците при земетресение са реализирани редица изпитвания с въздействия по направление на хоризонталната ос на образеца (в посока Y). Експерименталните изпитвания на образците започват с използване на акселерограмата (NS компонента) от земетресението в El-Centro от Калифорния, регистрирано на 18 май, 1940, в Imperial Valley. Изпитванията са проведени в условията на постепенно увеличаване на интензивността на въздействието, но без промяна на честотния състав. В образците не се наблюдават значителни повреди от избраното земетресение (немащабирани и с мащабирани акселерограми). След това се използват случайно генерирани във времето сигнали, като при всяко следващо изпитване интензивността на въздействието се увеличава, както се променя и честотният ѝ диапазон. След това се използват синусоиди, като честотният диапазон се променя почти при всяко изпитване. Интензивността на синусоидалните въздействия също нараства постепенно. На фиг. 12 са показани видове генерирани сигнали от вибрационната платформата и Фуриеровите амплитудни спектри на получените ускорения.

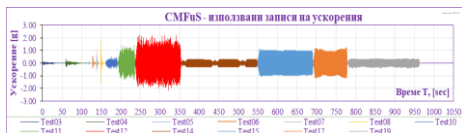


Фиг. 12. Видове генерирани сигнали от платформата и Фуриеровите спектри за получените ускорения

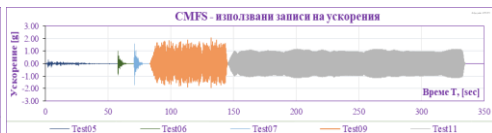
4. Експериментални изследвания

4.1. Изменение на честотата и коравината на образците

4.1.1. Образец CMF – стена без наличие на отвор



Фиг. 13. Образец CMFuS



Фиг. 14. Образец CMFS

На 6-ти март 2019 год. в ИЗИИС – Скопие са реализирани изпитвания на образец CMFuS. Като се следва общата методология за изпитване, в табл. 1 са изброени извършените изпитвания с обща информация за изследване на образец CMFuS. Извършени са общо 20 изпитвания, от които 7 изпитвания са за определяне на основната честота на образца, а останалите 13 изпитвания са за изследване на сеизмичното поведение на образца.

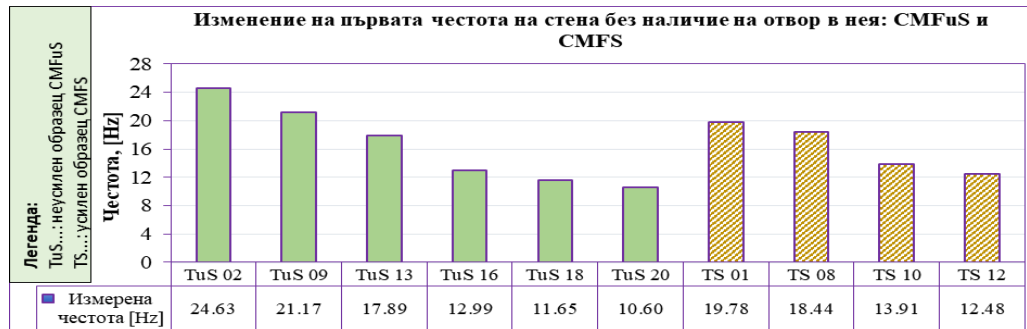
Таблица 1. Списък на извършените изпитвания за образец CMFuS

Тест №	Име на изпитването	Вид на сигнала	Входни параметри за платформата		Входни параметри за експеримента
			Честотен диапазон [Hz]	Максимално ускорение на подадения сигнал	Максимално ускорение на генерирания сигнал
01	Random_002	RE	1÷50	0,069.g	0,066.g
02	Sweep_002	SS	1÷50	0,020.g	0,030.g
03	Elcentro_Xz_50	TH	–	0,175.g	0,147.g
04	Elcentro_Xz_100	TH	–	0,350.g	0,340.g
05	Elcentro_Xz_50_X8	TH	–	0,170.g	0,142.g
06	Elcentro_Xz_200_X8	TH	–	0,681.g	0,568.g
07	Elcentro_Xz_400_X8	TH	–	1,362.g	1,088.g
08	Elcentro_Xz_800_X8	TH	–	2,721.g	1,739.g
09	Random_005	RE	1÷50	0,213.g	0,169.g
10	Random_015	RE	8÷28	0,625.g	0,537.g
11	Random_05	RE	8÷28	1,716.g	1,464.g
12	Random_09	RE	8÷28	3,345.g	2,274.g
13	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,062.g
14	Sweep_03	SS	15÷22	0,293.g	0,331.g
15	Sweep_100	SS	14÷20	0,977.g	1,089.g
16	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,062.g
17	Sweep_100_8-16	SS	8÷16	0,978.g	1,247.g
18	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,061.g
19	Sweep_03_5-12	SS	5÷12	0,293.g	0,388.g
20	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,062.g

На 26-ти март 2019 год. в ИЗИИС – Скопие са реализирани изпитвания на образец CMFS. Като се следва общата методология за изпитване, в табл. 2 са изброени извършените изпитвания с обща информация за изследване на образец CMFS. Извършени са общо 12 изпитвания, от които 7 изпитвания са за определяне на основната честота на образца, а останалите 5 изпитвания са за изследване на сеизмичното поведение на образца.

Таблица 2. Списък на извършените изпитвания за образец CMFS

Тест №	Име на изпитването	Вид на сигнала	Входни параметри за платформата		Входни параметри за експеримента
			Честотен диапазон [Hz]	Максимално ускорение на подадения сигнал	Максимално ускорение на генерирания сигнал
01	Random_005	RE	1÷50	0,212.g	0,191.g
02	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,063.g
03	Random_005	RE	1÷50	0,206.g	0,175.g
04	Random_005	RE	1÷50	0,141.g	0,117.g
05	Elcentro_Xz_100	TH	–	0,350.g	0,333.g
06	Elcentro_Xz_400_X8	TH	–	1,361.g	1,007.g
07	Elcentro_Xz_800_X8	TH	–	2,723.g	1,733.g
08	Random_005	RE	1÷50	0,186.g	0,142.g
09	Random_09	RE	12÷22	3,292.g	2,058.g
10	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,063.g
11	Sweep_1g	SS	10÷16	0,976.g	1,179.g
12	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,063.g

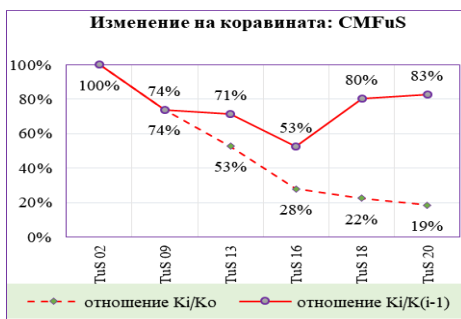


Фиг. 15. Изменение на първата собствена честота на образец CMFuS и CMFS)

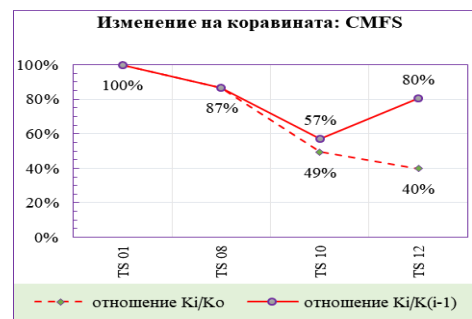
От проведените експериментални изпитвания на образец CMFuS и CMFS могат да се направят следите изводи:

- След приключване на изпитванията крайната коравината на стената преди усилване е 19% от първоначалната коравина, т.е. $K_{n,CMFuS} = 0,19.K_{0,CMFuS}$ (фиг. 15) и 40% от първоначалната коравина на стената след усилване, т.е. $K_{n,CMFS} = 0,40.K_{0,CMFS}$ (фиг. 16).
- Началната собствена честота на стената преди усилване без наличие на отвор е $f_{0,CMFuS} = 24,63$ Hz. След реализирани изпитвания в резултат на деградацията на коравината, крайната честота на стената преди усилване пада до $f_{n,CMFuS} = 10,60$ Hz, т.е. намалението е 2,32 пъти (фиг. 15).

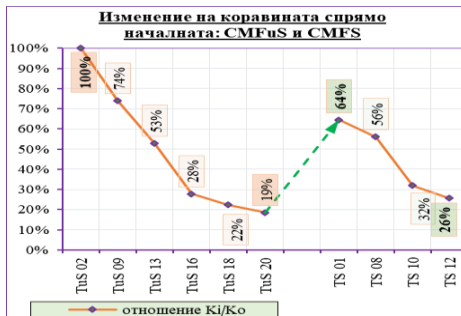
- След прилагане на избраната усилваща система, коравината на стената се увеличава 3,48 пъти и представлява 64% от първоначалната коравина на стената преди усилване, т.е. $K_{0,CMFuS} = 0,64 \cdot K_{0,CMFuS}$ (фиг. 17 и фиг. 18).
- В резултат на усилването и възстановяването на голяма част от коравината на стената първата собствена честота на стената след усилване се увеличава с 1,87 пъти и достига до $f_{0,CMFuS} = 19,78$ Hz. Честотата, която е измерена след приключване на изпитванията на усилената стена е $f_{n,CMFuS} = 12,48$ Hz (фиг. 15).
- Коравината след приключване на изпитванията на усилената стена представлява 26% от първоначалната коравина на стената преди усилване, $K_{n,CMFuS} = 0,26 \cdot K_{0,CMFuS}$ (фиг. 17) и 40% от първоначалната коравина на стената след усилване $K_{n,CMFuS} = 0,40 \cdot K_{0,CMFuS}$ (фиг. 16).



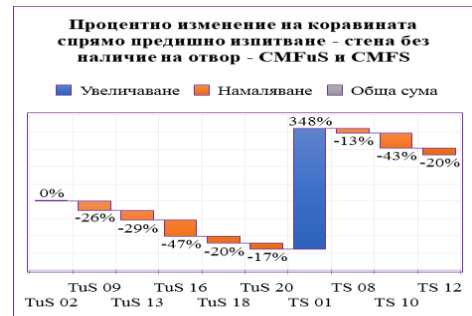
Фиг. 15. Изменение на коравината спрямо първоначалната: образец CMFuS



Фиг. 16. Изменение на коравината спрямо първоначалната: образец CMFS



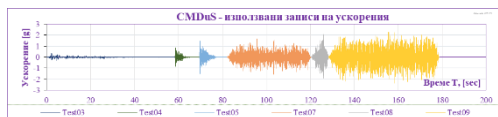
Фиг. 17. Изменение на коравината при стена без наличие на отвор CMFuS (преди усилване, TuS) и CMFS (усилена, TS)



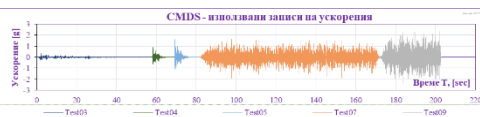
Фиг. 18. Процентно изменение на коравината спрямо предишно изпитване – CMFuS и CMFS

4.1.2. Образец CMD – стена с наличие на отвор за врата

На 15-ти март 2019 год. в ИЗИИС – Скопие са реализирани изпитвания на образец CMDuS. Като се следва общата методология за изпитване, в табл. 3 са изброени извършените изпитвания с обща информация за изследване на образец CMDuS. Извършени са общо 10 изпитвания, от които 4 изпитвания са за определяне на основната честота на образца, а останалите 6 изпитвания са за изследване на сеизмичното поведение на образца.



Фиг. 19. Образец CMDuS



Фиг. 20. Образец CMDS

Таблица 3. Списък на извършените изпитвания за образец CMDuS

Тест №	Име на изпитването	Вид на сигнала	Входни параметри за платформата		Входни параметри за експеримента
			Честотен диапазон [Hz]	Максимално ускорение на подадения сигнал	Максимално ускорение на генерирания сигнал
01	Random_002	RE	1÷50	0,185.g	0,186.g
02	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,063.g
03	Elcentro_Xz_100	TH	–	0,350.g	0,341.g
04	Elcentro_Xz_400x8	TH	–	1,362.g	0,844.g
05	Elcentro_Xz_800x8	TH	–	2,722.g	1,526.g
06	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,061.g
07	Random_05	RE	6÷15	1,986.g	1,662.g
08	Random_09	RE	6÷15	–	–
09	Random_09	RE	6÷15	3,103.g	2,355.g
10	Sweep_005	SS	1÷50	0,029.g	0,041.g

На 20-ти март 2019 год. в ИЗИИС – Скопие са реализирани изпитвания на стена CMDS. Като се следва общата методология за изпитване, в табл. 4 са изброени извършените изпитвания с обща информация за изследване на образец CMDS. Извършени са общо 14 изпитвания, от които 7 изпитвания са за определяне на основната честота на образца, а останалите 7 изпитвания са за изследване на сеизмичното поведение на образца.

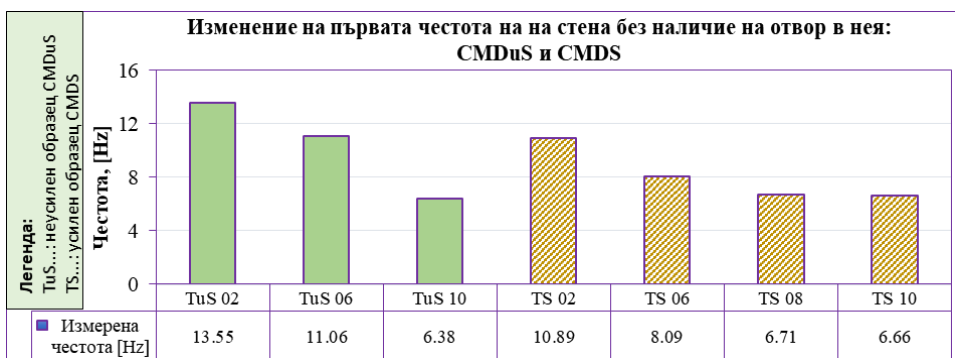
От проведените експериментални изпитвания на образец CMDuS и CMDS могат да се направят следите изводи:

- След приключване на изпитванията крайната коравината на стената преди усилване е 22% от първоначалната коравина, т.е. $K_{n,CMDuS} = 0,22 \cdot K_{0,CMDuS}$ (фиг. 22) и 37% от първоначалната коравина на стената след усилване, т.е. $K_{n,CMWS} = 0,37 \cdot K_{0,CMWS}$ (фиг. 23).
- Началната собствена честота на стената преди усилване с наличие на отвор за прозорец е $f_{0,CMDuS} = 13,55$ Hz. След реализирани изпитвания в резултат на деградацията на коравината, крайната честота на стената преди усилване пада до $f_{n,CMDuS} = 6,38$ Hz, т.е. намалението е 2,12 пъти (фиг. 21).

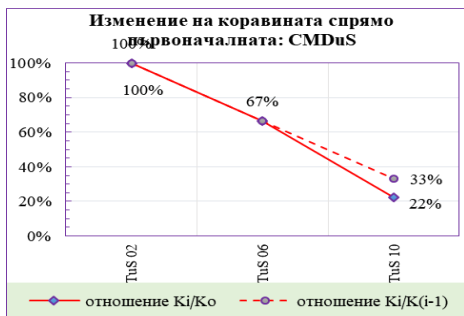
- След прилагане на избраната усилваща система, коравината на стената се увеличава 2,92 пъти и представлява 65% от първоначалната коравина на стената преди усилване, т.е. $K_{0,CMDuS} = 0,65.K_{0,CMDuS}$ (фиг. 24 и фиг. 25).
- В резултат на усилването и възстановяването на голяма част от коравината на стената, първата собствена честота на стената след усилване се увеличава с 1,70 пъти и достига до $f_{0,CMDuS} = 10,89$ Hz. Честотата, която е измерена след приключване на изпитванията на усилената стена е $f_{n,CMDuS} = 6,66$ Hz (фиг. 21).
- Коравината след приключване на изпитванията на усилената стена представлява 24% от първоначалната коравина на стената преди усилване, $K_{n,CMDuS} = 0,24.K_{0,CMDuS}$ (фиг. 24) и 37% от първоначалната коравина на стената след усилване $K_{n,CMDuS} = 0,37.K_{0,CMDuS}$ (фиг. 23).

Таблица 4. Списък на извършените изпитвания за образец CMDuS

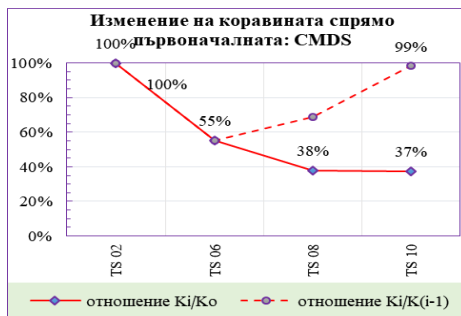
Тест №	Име на изпитването	Вид на сигнала	Входни параметри за платформата		Входни параметри за експеримента
			Честотен диапазон [Hz]	Максимално ускорение на подадения сигнал	Максимално ускорение на генерирания сигнал
01	Random_005	RE	1÷50	0,194.g	0,186.g
02	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,061.g
03	Elcentro_Xz_100	TH	–	0,350.g	0,342.g
04	Elcentro_Xz_400x8	TH	–	1,361.g	0,919.g
05	Elcentro_Xz_800x8	TH	–	2,719.g	1,610.g
06	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,076.g
07	Random_05	RE	4÷12	2,183.g	1,931.g
08	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,061.g
09	Random_09	RE	4÷12	3,060.g	2,385.g
10	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,061.g
11	Sweep_03	SS	4÷10	–	–
12	Sweep_005	SS	1÷50	–	–
13	Sweep_05	RE	4÷10	–	–
14	Sweep_005	SS	1÷50	–	–



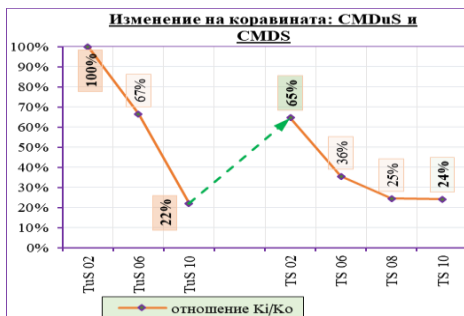
Фиг. 21. Изменение на първата собствена честота на образец CMDuS и CMDS



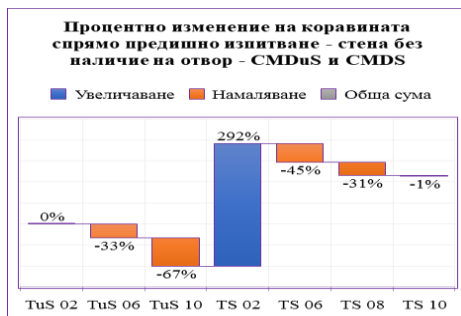
Фиг. 22. Изменение на коравината спрямо първоначалната: образец CMDuS



Фиг. 23. Изменение на коравината спрямо първоначалната: образец CMDS



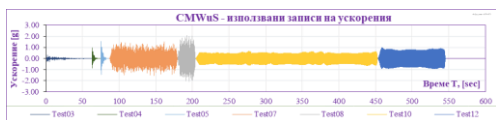
Фиг. 24. Изменение на коравината при стена без наличие на отвор CMDuS (преди усилване, TuS) и CMDS (усилена, TS)



Фиг. 25. Процентно изменение на коравината спрямо предишно изпитване – CMDuS и CMDS

4.1.3. Образец CMW – стена с наличие на отвор за прозорец

На 12-ти март 2019 год. в ИЗИИС – Скопие са реализирани изпитвания на образец CMWuS. Като следва общата методология за изпитване, в табл. 5 са изброени извършените изпитвания с обща информация за изследване на образец CMWuS. Извършени са общо 13 изпитвания, от които 6 изпитвания са за определяне на основната честота на образца, а останалите 7 изпитвания са за изследване на сеизмичното поведение на образца.



Фиг. 26. Образец CMWuS



Фиг. 27. Образец CMWS

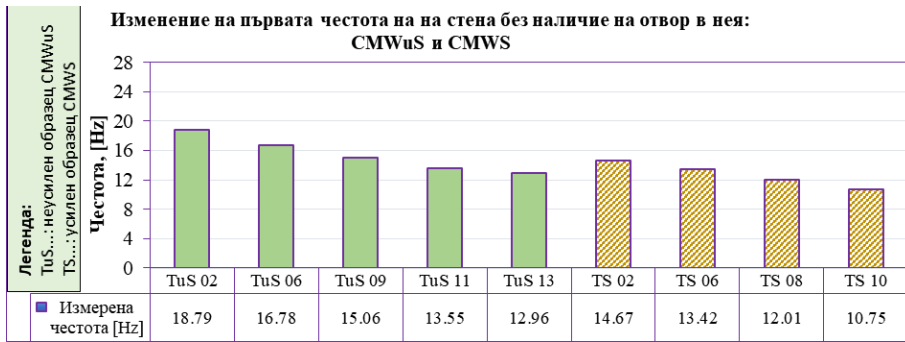
Таблица 5. Списък на извършените изпитвания за образец CMWuS

Тест №	Име на изпитването	Вид на сигнала	Входни параметри за платформата		Входни параметри за експеримента
			Честотен диапазон [Hz]	Максимално ускорение на подадения сигнал	Максимално ускорение на генерирания сигнал
01	Random_005	RE	1÷50	0,231.g	0,184.g
02	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,063.g
03	Elcentro_Xz_100	TH	–	0,350.g	0,334.g
04	Elcentro_Xz_400	TH	–	1,361.g	0,984.g
05	Elcentro_Xz_800	TH	–	2,724.g	1,570.g
06	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,062.g
07	Random_05	RE	5÷20	2,011.g	1,536.g
08	Random_09	RE	5÷20	3,106.g	2,090.g
09	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,063.g
10	Sweep_05	SS	8÷16	0,489.g	0,653.g
11	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,063.g
12	Sweep_08	SS	8÷16	0,782.g	0,994.g
13	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,062.g

На 29-ти март 2019 год. в ИЗИИС – Скопие са реализирани изпитвания на образец CMWS. Като следва общата методология за изпитване, в табл. 6 са изброени извършените изпитвания с обща информация за изследване на образец CMWS. Извършени са общо 11 изпитвания, от които 5 изпитвания са за определяне на основната честота на образца, а останалите 6 изпитвания са за изследване на сеизмичното поведение на образца.

Таблица 6. Списък на извършените изпитвания за образец CMWS

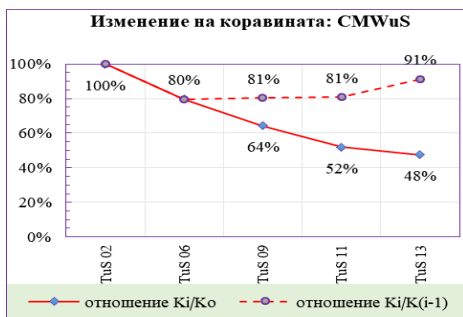
Тест №	Име на изпитването	Вид на сигнала	Входни параметри за платформата		Входни параметри за експеримента
			Честотен диапазон [Hz]	Максимално ускорение на подадения сигнал	Максимално ускорение на генерирания сигнал
01	Random_005	RE	1÷50	0,194.g	0,172.g
02	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,063.g
03	Elcentro_Xz_100	TH	–	0,350.g	0,334.g
04	Elcentro_Xz_400x8	TH	–	1,362.g	0,994.g
05	Elcentro_Xz_800x8	TH	–	2,723.g	1,657.g
06	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,063.g
07	Random_05	RE	5÷18	1,978.g	1,679.g
08	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,062.g
09	Random_08	RE	5÷14	3,065.g	2,206.g
10	Sweep_005	SS	1÷50	0,049.g	0,063.g
11	Sweep_03	SS	5÷15	0,410.g	0,514.g



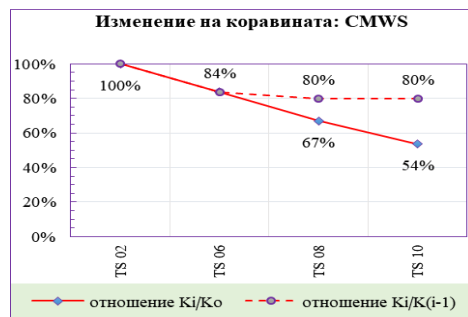
Фиг. 28. Изменение на първата собствена честота на образец CMWuS и CMWS

От проведените експериментални изпитвания на образец CMWuS и CMWS могат да се направят следите изводи:

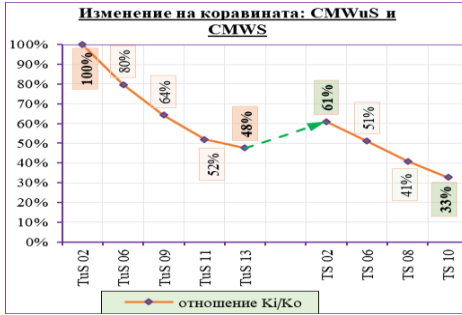
- След приключване на изпитванията крайната коравината на стената преди усилване е 48% от първоначалната коравина, т.е. $K_{n,CMWuS} = 0,48.K_{0,CMWuS}$ (фиг. 29) и 54% от първоначалната коравина на стената след усилване, т.е. $K_{n,CMWS} = 0,54.K_{0,CMWS}$ (фиг. 30).
- Началната собствена честота на стената преди усилване с наличие на отвор за прозорец е $f_{0,CMWuS} = 18,79$ Hz. След реализирани изпитвания в резултат на деградацията на коравината, крайната честота на стената преди усилване пада до $f_{n,CMFuS} = 12,96$ Hz, т.е. намалението е 1,45 пъти (фиг. 28).
- След прилагане на избраната усилваща система коравината на стената се увеличава 1,28 пъти и представлява 61% от първоначалната коравина на стената преди усилване, т.е. $K_{0,CMWS} = 0,61.K_{0,CMWuS}$ (фиг. 31 и фиг. 32).
- В резултат на усилването и възстановяването на голяма част от коравината на стената първата собствена честота на стената след усилване се увеличава с 1,13 пъти и достига до $f_{0,CMWS} = 14,67$ Hz. Честотата, която е измерена след приключване на изпитванията на усилената стена е $f_{n,CMWuS} = 10,75$ Hz (фиг. 28).
- Коравината след приключване на изпитванията на усилената стена представлява 33% от първоначалната коравина на стената преди усилване, $K_{n,CMWS} = 0,33.K_{0,CMWuS}$ (фиг. 31) и 54% от първоначалната коравина на стената след усилване $K_{n,CMWS} = 0,54.K_{0,CMWS}$ (фиг. 30).



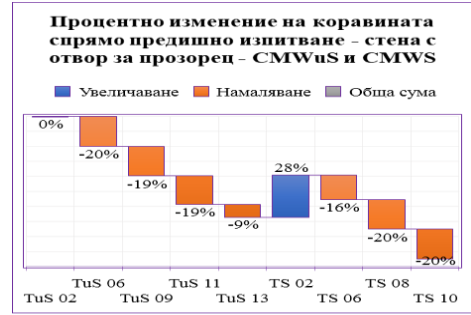
Фиг. 29. Изменение на коравината спрямо първоначалната: образец CMWuS



Фиг. 30. Изменение на коравината спрямо първоначалната: образец CMWS



Фиг. 31. Изменение на коравината при стена без наличие на отвор CMWuS (преди усилване, TuS) и CMWS (усилена, TS)

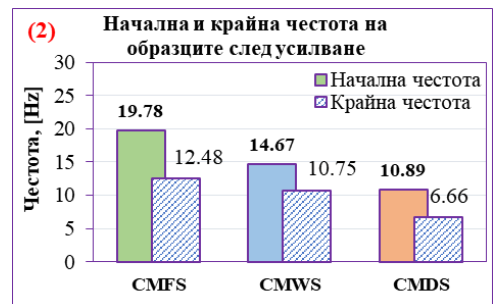
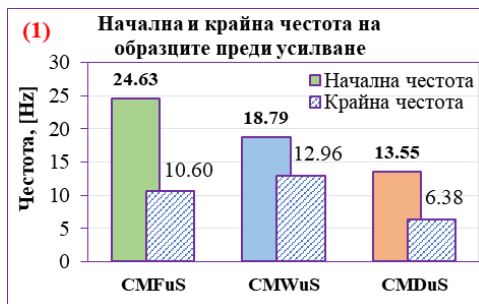


Фиг. 32. Процентно изменение на коравината спрямо предишно изпитване – CMWuS и CMWS

4.2. Влияние на отвора върху собствената честота, коравината и преместванията

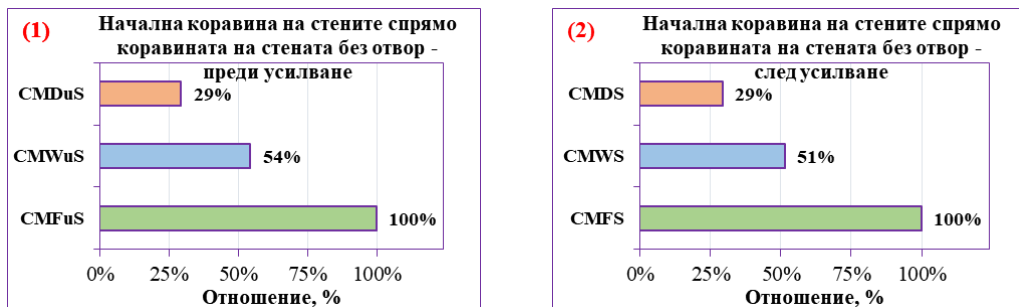
Наличието на отвор и местоположението му в стената оказват съществено влияние върху коравината ѝ. От проведените експериментални изследвания се наблюдават:

- Началната честота при образец CMFuS е 24,63 Hz, при образец CMWuS е 18,79 Hz, а при образец CMDuS е 13,55 Hz. Началната честота на образец CMWuS е с 1,30 пъти по-малка от началната честотата на образец CMFuS, а при образец CMDuS е с 1,82 пъти – фиг. 33 (1).
- При трите стени след тяхното усилване честотата се увеличава. Началната честота на образец CMFS е 19,78 Hz, при образец CMWS е 14,67 Hz, а при образец CMDS е 10,89 Hz. Началната честота на CMWS е с 1,34 пъти по-малка от честотата на CMFS, а при CMDS е с 1,82 пъти – фиг. 33 (2).
- Отношението на началната честота на стените преди усилване към началната честота след усилване и при трите стени е почти едно и също, а именно при стена CMF е $24,63/19,78 = 1,245$, при CMW е $18,78/14,67 = 1,280$ и при CMD е $13,55/10,89 = 1,244$.



Фиг. 33. Начална и крайна честота на стените преди и след усилване

- Началната коравина на образец CMWuS представлява 54% от началната коравина на образец CMFuS. При образец CMDuS началната ѝ коравина представлява 29% от началната коравина на образец CMFuS – фиг. 34 (1).
- При трите стени след тяхното усиление коравината им се увеличава. Началната коравина на образец CMWS представлява 51% от началната коравина на образец CMFS. При образец CMDS началната ѝ коравина представлява 29% от началната коравина на образец CMFS – фиг. 34 (2).
- Отношението на началната коравина на стената преди усиление към коравината на стената след усиление и при трите стени е почти едно и също, а именно при стена CMF е 1,55, при CMW е 1,64 и при CMD е 1,55.



Фиг. 34. Начална коравина на стените спрямо коравината на стената без отвор

5. Обобщени изводи и заключения от изследванията, свързани с изменението на честотата и коравината на стените

По експериментален път е определена честотата на образците и изменението ѝ, както и деградацията на тяхната коравина. Установено е влиянието на отвора в зидарията върху коравината на образците. От направения анализ на получените резултати се обобщават следните изводи:

- Експерименталните резултати показват, че началната коравина на стената с прозорец преди усиление е 54% от началната коравина на стената без отвор преди усиление. Коравината на стената с отвор за врата преди усиление представлява 29% от коравината на стената без отвор. След усиление на образците началната коравина на усилената стена с прозорец е 51% от началната коравина на усилената стена без отвор за прозорец. Началната коравина на усилената стена с отвор за врата представлява 29% от началната коравина на усилената стена без отвор за врата;
- Усилващата система възстановява до голяма степен коравината на стените. След приключване на изпитванията коравината на стената без отвор преди усиление представлява 19% от първоначалната ѝ коравина преди изпитванията. След усиление коравината на тази стена се възстановява и началната коравина на усилената стена представлява 64% от началната коравина на стената преди изпитване. При останалите стени е, както следва: при стена с отвор за прозорец възстановяването е от 48% на 61%, а при стена с отвор за врата е от 22% на 65%.

Останалите получени резултати от проведените експериментални изпитвания ще бъдат представени в други бъдещи публикации. Това са резултатите, свързани предимно със сеизмичното поведение на образците – ускорения и напречна сила в основата, премествания при върха на стените, анализирани на получените повреди и механизма на разрушаване и други резултати.

Благодарности

Тази научноизследователска разработка по договор Д-111/2018 е подкрепена финансово от Център за научни изследвания и проектиране (ЦНИП) при Университета по архитектура, строителство и геодезия (УАСГ). Авторите изразят огромна благодарност и признателност към целия екип на ЦНИП (www.uacg.bg).

Авторите изказват специална благодарност и признателност към фирмите, които съдействаха чрез безвъзмездна материална, финансова и нематериална подкрепата за успешното реализиране на експериментите: на „Изомат Интернешънал ООД“ (www.isomat.bg) за тяхното безвъзмездно осигуряване на материалите за усилване; на екипа на „A&K Инженеринг“ (www.akengineering.org) за качествено и професионално изпълнение на усилващата система; на „Баумит България ООД“ (www.baumit.bg) за оказаната безвъзмездно финансова подкрепа; на екипа на фирма „Шпици Строй“ ЕООД (www.shpici-stroi.com) и „Arcon Construction“ Ltd. (www.arcon.com.mk) за тяхното съдействие и на техния професионализъм по време на изпълнението на образците.

Специални благодарности на целия екип на Института по земетръсно инженерство и инженерна сеизмология към Университета „Св. Кирил и Методий“ в Скопие, Република Северна Македония (www.iziis.ukim.edu.mk), за високия им професионализъм, както и за постоянната им подкрепа.

Авторите изказват благодарности на целия екип на проектантско бюро „Емил Крумов & Ко“ ООД (www.kroumov.com) за тяхната огромна подкрепа.

Авторите изказват сърдечна благодарност на всички участници, допринесли за осъществяването на експерименталните изследвания.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Graziotti, F., et al.* Experimental characterisation of calcium-silicate brick masonry for seismic assessment. // *Brick and Block Masonry: Trends, Innovations and Challenges – Proceedings of the 16th International Brick and Block Masonry Conference, 2016: 1619–1628.*
2. *Graziotti, F., et al.* Out-of-plane shaking table tests on URM single leaf and cavity walls. // *Engineering Structures, 2016, 125: 455–470.*
3. *Graziotti, F., et al.* Shaking table test on a full scale URM cavity wall building. // *Bulletin of Earthquake Engineering, 2017.*
4. *Graziotti, F., et al.* Experimental response of URM single leaf and cavity walls in out-of-plane two-way bending generated by seismic excitation. // *Construction and Building Materials, 2019, 195: 650–670.*
5. *Graziotti, F., et al.* Experimental campaign on cavity-wall systems representative of the Groningen building stock. // *Report, EUC318/2015U, EUCENTRE, 2015.*

6. *Sharma, S., et al.* Out-of-plane two-way bending shaking table tests on single leaf and cavity walls. // EUCENTRE Foundation – Research Report – Protocol EUC137/2018U, 2018.
7. *Tomassetti, U., et al.* Two-way bending out-of-plane collapse of a full-scale URM building tested on a shake table. // Bulletin of Earthquake Engineering, 2018.
8. *Miglietta, M., et al.* Full-scale shaking table test on a dutch urm cavity-wall terraced-house end unit. // EUCENTRE Foundation – Research Report – EUC-BUILD-6, 2019, 2.0.
9. *Kallioras, S., et al.* LNEC-BUILD-3: An incremental shake-table test on a dutch urm detached house with chimneys. // EUCENTRE Foundation – Technical Report EUC203/2018U, 2018.
10. *Bojadjiev, J., et al.* Seismic assessment of RC building structures with masonry infill walls. // X Jubilee International Scientific Conference „Civil Engineering Design and Construction” (Science and Practice), 2018: 45–554.
11. *Necevska-Cvetanovska, G., et al.* Experimental investigations of three-storey RC building with hollow and solid masonry infill. // X Jubilee International Scientific Conference „Civil Engineering Design and Construction” (Science and Practice), 2018: 710–715.
12. *Necevska-Cvetanovska, G., et al.* Method for seismic upgrading of masonry infills in RC buildings. // 16th European Conference on Earthquake Engineering (16ECEE), 2018: 1–13.
13. *Абдулахад, Е., Махмуд, Е.* Изпълнение на образците и подготвителни дейности преди динамични изпитвания. // Годишник на УАСГ, 2019, 52 (5): 891-900.
14. *Corbi, I., Rakicevic, Z.* Shaking Table Testing for Structural Analysis. // International Journal of Mechanics, 2013, 7 (4): 459–466.
15. *He, J., Z. Fu,* Modal Analysis. Butterworth-Heinemann, 2001, ISBN 0 7506 5079 6.
16. *Ewins, D.* Modal Testing: Theory, Practice and Application. Research Studies Press LTD: Baldock, Hertfordshire, England, 2000, ISBN 0 86380 218 4.
17. *Бошнаков, К.* Компютърен анализ на строителни конструкции за оценка и ограничаване на повреди при сеизмични въздействия. // Дисертационен труд, 2015.
18. *Lemaitre, J., Desmorat, R.* Engineering Damage Mechanics: Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures, Springer, 2005, ISBN 3-540-21503-4.
19. *Chopra, A.* Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Pearson Prentice Hall, 2007, ISBN: 978-0132858038.
20. *Mendes, N., et al.* Shaking table testing of an existing masonry building: assessment and improvement of the seismic performance. // Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43: 247–266.

SHAKING TABLE TESTS FOR INVESTIGATION OF THE CHANGE OF FUNDAMENTAL FREQUENCY AND STIFFNESS BEFORE AND AFTER STRENGTHENING OF CONFINED MASONRY

E. Mahmud¹, E. Abdulahad²

Keywords: shaking table tests, stiffness, confined masonry, strengthening, fundamental frequency

ABSTRACT

This paper presents part of the research that has been conducted on a shaking table in order to obtain an assessment of the influence of the location and the area of the opening on the capacity to absorb horizontal forces. The change in the natural frequency and stiffness of the specimens is analysed. The fundamental frequency is determined by the resonance method, using harmonic sine sweep excitation and random excitation with a small acceleration, generated by the seismic shaking table. The fundamental frequency is determined at different stages of the test of the specimens in order to obtain a quantitative assessment of the change in the frequency of stiffness degradation and the accumulation of damage in the specimens.

¹ Emin Mahmud, Eng. PhD Student, Dept. "Reinforced Concrete Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: dipl.ing.eminmahmud@gmail.com

² Emad Abdulahad, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Reinforced Concrete Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: georgosing@gmail.com