

УДК 691.32, 539.3

УКРЕПЛЕНИЕ СТЕН РУЧНОЙ КЛАДКИ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ДВУХ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, БЕТОННЫМИ ПАНЕЛЯМИ, УКРЕПЛЕННЫМИ СТАЛЬНЫМИ ВОЛОКНАМИ

А. Буюккарагоз, Я. Копраман

Университет Гази, 06500 Анкара, Турция

E-mails: karagoz@gazi.edu.tr, yagmur@gazi.edu.tr

Исследованы способы укрепления стен ручной кладки бетонными блоками, армированными стальными волокнами. Большая часть образцов (18 из 24) были изготовлены с использованием бетонных панелей, содержащих стальные волокна, для укрепления стен из пустотелого глиняного и сплошного глиняного кирпича, остальные шесть служили контрольными образцами. Определены значения прочности на сдвиг, деформации и энергоемкости конструкций для различных способов упрочнения.

Ключевые слова: кладка стен, бетонные панели, укрепление, стальные волокна, прочность на сдвиг.

DOI: 10.15372/PMTF20200318

Введение. Некоторые типы зданий при воздействии на них в горизонтальном направлении (землетрясении) разрушаются. Повреждение кладки стен является одним из наиболее распространенных типов повреждений, происходящих при сейсмическом воздействии.

Многие здания, построенные ранее с использованием неармированной (URM) и армированной (RM) кладки, не соответствуют действующим техническим нормам. Поэтому в последнее время были предложены и изучены такие способы укрепления кирпичной кладки стен, как наружное армирование стальными плитами, заключение кирпичной кладки стен в стальные или бетонные оболочки, создание предварительного напряжения. Эти традиционные способы укрепления достаточно трудоемки, их использование приводит к значительному увеличению массы здания [1]. Альтернативой традиционным материалам, применяемым в системах укрепления, являются армированные волокном полимеры. Основными преимуществами таких укрепляющих систем являются большое значение отношения прочности к массе и коррозионная стойкость. Однако армированные волокном полимеры с эпоксидной смолой имеют ряд недостатков (небольшая прочность на сдвиг смолы при температуре, превышающей температуру стеклования, выделение токсичных паров, влагонепроницаемость) [2].

Композитная арматура применяется в качестве анкеров для увеличения сопротивления изгибу стен, подвергаемых нагрузкам в плоскости и поперечным нагрузкам. В рабо-

Работа выполнена при финансовой поддержке отдела научных исследований и проектов Университета Гази (код проекта 07/2013-04).

© Буюккарагоз А., Копраман Я., 2020

те [3] исследовалась прочность соединения стержней с бетонными строительными блоками. Результаты испытаний на изгиб показали, что стены, укрепленные армированными блоками, имеют большее сопротивление изгибу по сравнению со стенами, укрепленными неармированными блоками. Образцы, укрепленные блоками, армированными одним и двумя стержнями, разрушились соответственно при нагрузках, в 7 и 15,7 раза больших, чем для контрольного образца.

В работах [4, 5] исследовано поведение кладок из глиняного кирпича, укрепленных композитными материалами различного типа.

В отличие от стен зданий с железобетонными рамами стены зданий, в которых используются кладочные системы, возводятся из кирпича, газобетона и других материалов, поддерживающих конструкцию и обеспечивающих прочность при вертикальных нагрузках. Эффективность таких конструкций при сейсмических воздействиях в горизонтальном направлении очень низкая вследствие недостаточной прочности на сдвиг стен, подвергаемых вертикальным нагрузкам. Известно, что несущие системы URM имеют малую прочность на сдвиг. Поэтому необходимо увеличить прочность на сдвиг стен из кирпичной кладки при воздействии на них нагрузок в горизонтальном направлении.

Целью данной работы является разработка способа укрепления стен из пустотелого глиняного и сплошного глиняного кирпича, позволяющего увеличить горизонтальную жесткость и прочность на сдвиг. Все тестовые образцы были изготовлены с использованием стандартных материалов и методов.

1. Экспериментальное исследование. Некоторые экспериментальные исследования способов укрепления стен ручной кладки проведены в Университете Гази [6–9]. Из двух различных типов материалов были изготовлены 24 образца высотой 900 мм и длиной 900 мм. К обеим сторонам всех образцов, за исключением контрольных, с помощью эпоксидного клея Sikadur 31 были приклеены бетонные панели, содержащие стальные волокна. Высота панелей составляла 450 мм, ширина — 450 мм, толщина — 10 мм.

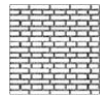
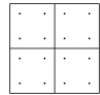
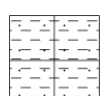
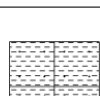
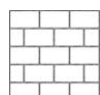
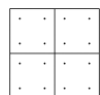
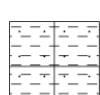
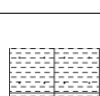
Эффективность предлагаемого способа укрепления образцов определялась на основе экспериментальных данных. В табл. 1 приведены характеристики используемых в экспериментах образцов.

1.1. Материалы образцов. Образцы были изготовлены с использованием пустотелого глиняного (НВ) и сплошного глиняного (СВ) кирпича и имели размеры $900 \times 900 \times 200$ мм. В качестве связующего вещества в каждом образце использовался кладочный раствор, который в соответствии со стандартом Американского общества испытаний и материалов (ASTM) определен как “нормальный” (N-тип) строительный раствор C270 [10]. Соотношение цемента, извести, песка и воды, указанное в этом стандарте, равно $1,0 : 1,0 : 6,0 : 1,5$ соответственно. Через 28 дней, в течение которых происходило отверждение, было проведено испытание на осевое сжатие трех образцов в форме цилиндров размером 150×300 мм, изготовленных из связующих растворов, и определена средняя прочность на сжатие, составившая 5 МПа. Прочность на сжатие неукрепленных стен определялась в соответствии со стандартом ASTM E447 для образцов в виде призм [11]. Из каждого материала было изготовлено по три образца, средние значения прочности определялись по результатам испытаний трех образцов. Размеры образцов НВ и СВ составляли 190×290 мм и 210×300 мм соответственно. В табл. 2 и на рис. 1 приведены результаты испытаний призм на сжатие (σ_c — прочность на сжатие, $\bar{\sigma}_c$ — средняя прочность на сжатие, $\bar{\sigma}_c^*$ — скорректированная прочность призм с поправочным коэффициентом в соответствии со стандартом ASTM E447, A — площадь поперечного сечения, $\sigma_c^{\max}$ — предельная прочность на сжатие).

Образцы были укреплены бетонными панелями (толщина — 10 мм, прочность на сжатие — приблизительно 40 МПа) без волокон и бетонными панелями с различным содержанием стальных волокон Dramix ZP 305. Стальные волокна имели следующие харак-

Таблица 1

Характеристики образцов

Материал	Образец	Способ упрочнения	
Сплошной глиняный кирпич (СВ)	СВВ (контрольный образец)	Образец стены, не укрепленный бетонными панелями	
	СВ0	Образец стены, укрепленный бетонными панелями без стальных волокон	
	СВ1	Образец стены, укрепленный бетонными панелями, армированными стальными волокнами с концентрацией 1 %	
	СВ2	Образец стены, укрепленный бетонными панелями, армированными стальными волокнами с концентрацией 2 %	
Пустотелый глиняный кирпич (НВ)	НВВ (контрольный образец)	Образец стены, не укрепленный бетонными панелями	
	НВ0	Образец стены, укрепленный бетонными панелями без стальных волокон	
	НВ1	Образец стены, укрепленный бетонными панелями, армированными стальными волокнами с концентрацией 1 %	
	НВ2	Образец стены, укрепленный бетонными панелями, армированными стальными волокнами с концентрацией 2 %	

теристики: длина — 30 мм, диаметр — 0,55 мм, гибкость — 55, плотность — 7,85 г/см³, предел прочности на растяжение — 1100 МПа. Для приклеивания бетонных панелей к поверхности стены использовалась двухкомпонентная эпоксидная смола (Sikadur 31). Предел прочности на сжатие, предел прочности на растяжение и адгезионная прочность эпоксидной смолы составляли 65, 20 и 3,5 МПа соответственно.

1.2. *Экспериментальная установка.* Образцы испытывались в соответствии со стандартом ASTM E591 с диагональной нагрузкой, приложенной к раме экспериментальной установки (рис. 2) [12]. Линейные деформации измерялись в направлении действия нагрузки и в перпендикулярном направлении.

Для передачи нагрузки к образцу использовалась рама с осевой нагрузкой 750 кН, приложенной через домкрат с максимальным усилием 1000 кН, и ручной гидравлический насос. Испытываемый образец наклонен к раме под углом 45°. Было проведено три испытания. В первом из них исследовалась осевая нагрузка, а в остальных двух определялась

Таблица 2

Результаты экспериментов на сжатие образцов в виде призм

Материал кладки	σ_c , кН			$\bar{\sigma}_c$, кН	$\bar{\sigma}_c^*$, кН	A , мм ²	$\sigma_c^{\max}$, МПа
	Образец 1	Образец 2	Образец 3				
Пустотелый глиняный кирпич	194,16	173,23	166,57	177,99	167,31	55 100	3,04
Сплошной глиняный кирпич	295,73	229,60	244,81	250,05	250,05	63 000	3,97

а



б



Рис. 1. Образцы НВ (а) и СВ (б) после эксперимента

степень деформации в двух направлениях. Результаты испытаний записывались с помощью электронного блока сбора данных для дальнейшей обработки на компьютере.

2. Результаты исследования и их обсуждение. Исследованы два типа образцов, изготовленных в соответствии с различными стандартами. Всего протестировано 24 образца. Результаты экспериментов использовались при определении прочности неупрочненных и упрочненных образцов. Исследовалось поведение образцов при их нагружении до максимального значения нагрузки и при дальнейшем деформировании вплоть до разрушения. Известно, что нагрузка, при которой происходит разрушение, на 15 % меньше максимальной нагрузки [13].

2.1. Режимы разрушения образцов. В ходе экспериментов контрольные образцы НВР и СВР не разрушались при напряжениях, достигавших 267 и 348 кПа соответственно. Все контрольные образцы разрушились вследствие образования магистральной трещины сдвига в направлении приложенной нагрузки.

Образцы НВ, НВ0 и НВ1 достигли предела прочности приблизительно при одном и том же значении напряжения. Максимальное касательное напряжение для упрочненных образцов на 253–300 % больше по сравнению с контрольным образцом. Наблюдается незначительное увеличение максимального напряжения для образца НВ2, однако это напряжение меньше, чем для образцов НВ1. По-видимому, это обусловлено недостаточной адгезионной прочностью склейки бетонной панели и стены в некоторых областях образца НВ2. Укрепленные образцы НВ1 и НВ2 разрушились вследствие развития сдвиговых трещин в диагональном направлении. Панель, укрепляющая образец НВР, разрушалась вблизи нижнего зажима и отделялась от стены.

В стене из кирпича СВ максимальное напряжение образцов увеличилось в 2,8–3,1 раза по сравнению с контрольным образцом. Однако добавление стальных волокон к железобетонным панелям не привело к существенному увеличению максимального напряжения. Укрепленные образцы СВ0 и СВ1 разрушились в результате возникновения трещины

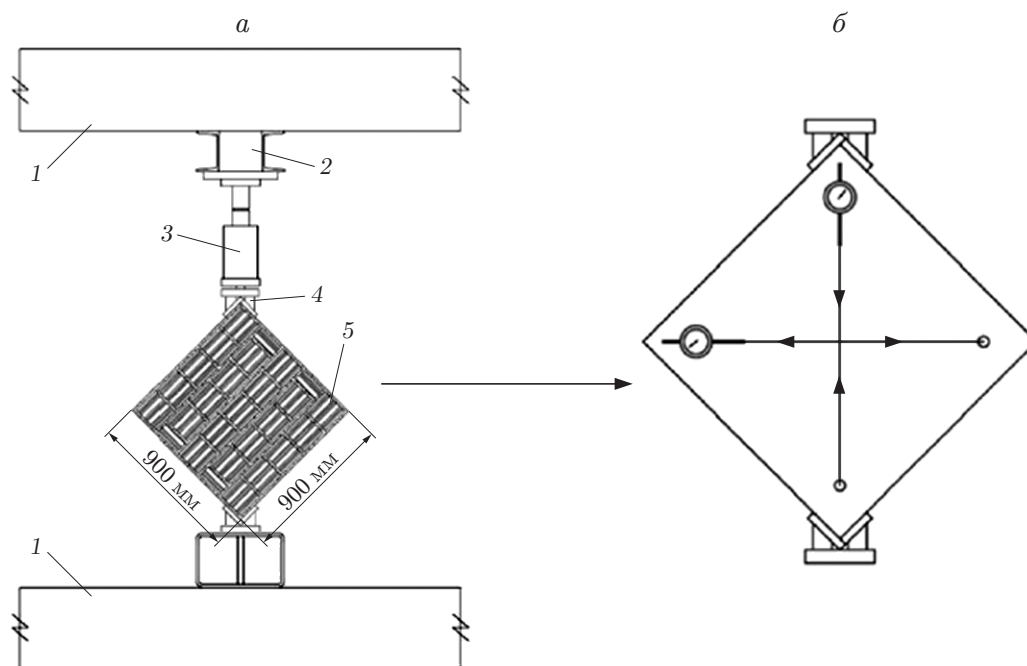


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

а — схема нагружения, *б* — схема деформирования; 1 — рама экспериментальной установки, 2 — гидравлический насос, 3 — нагружающий элемент, 4 — стальной уголок, 5 — образец

сдвига, которая распространялась в направлении действия нагрузки. В результате эти образцы разделились на две части. Однако в образце СВ2 магистральная трещина сдвига, возникающая вблизи верхнего захвата, где была приложена нагрузка, распространялась вниз влево, в результате чего произошло разрушение образца и его отделение от обеих панелей.

В табл. 3 приведены результаты испытаний образцов НВ и СВ (ε — окружная деформация, S_s — касательное напряжение). Зависимости касательного напряжения от окружной деформации представлены на рис. 3, 4. На рис. 5 показаны образцы НВ, СВ после проведенных испытаний.

Результаты исследования максимальной прочности образцов позволяют сделать вывод, что предел прочности при сжатии этих образцов пропорционален пределу прочности при растяжении. Наличие гладкой адгезионной поверхности и адгезии панелей со стеной по всей поверхности также приводит к увеличению прочности этой стены. Несмотря на то что добавление стальных волокон к бетонным панелям не приводит к значительному увеличению максимальной прочности, их наличие позволяет ограничить ширину трещин, увеличить энергоемкость и предотвратить разделение стены на сегменты.

2.2. Прочность на сдвиг и модуль сдвига. Прочность на сдвиг, деформация сдвига и модуль жесткости получены из соотношений, рекомендованных стандартом ASTM E591 [12]:

$$S_s = \frac{0,707P}{A_n}, \quad A_n = \frac{W + h}{2} tn, \quad \gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g}, \quad G = \frac{S_s}{\gamma}. \quad (1)$$

Здесь S_s — касательное напряжение, вычисленное с использованием площади нетто; P — приложенная нагрузка; A_n — площадь нетто образца; W , h , t — ширина, высота, общая толщина образца; n — отношение неразрушенной площади к общей площади, %; ΔV — укорочение в вертикальном направлении; ΔH — удлинение в горизонтальном направлении.

Таблица 3

Результаты испытаний образцов НВ и СВ

Образец	Направление деформации	Максимальные значения		Значения, при которых происходит разрушение	
		$\varepsilon \cdot 10^{-3}$	S_s , кПа	$\varepsilon \cdot 10^{-3}$	S_s , кПа
HBR	Вертикальное	-0,25	259	-0,38	227
	Горизонтальное	0,43		1,64	
HB0	Вертикальное	-0,46	786	-0,52	642
	Горизонтальное	0,09		0,50	
HB1	Вертикальное	-0,69	817	-0,81	710
	Горизонтальное	0,16		0,90	
HB2	Вертикальное	-0,16	664	-3,74	573
	Горизонтальное	0,29		3,26	
CBR	Вертикальное	-0,49	348	-1,14	296
	Горизонтальное	0,23		4,31	
CB0	Вертикальное	-0,15	1059	-0,23	902
	Горизонтальное	0,25		3,70	
CB1	Вертикальное	-0,73	958	-0,88	814
	горизонтальное	0,58		3,90	
CB2	Вертикальное	-0,73	1081	-1,00	916
	Горизонтальное	0,43		0,90	

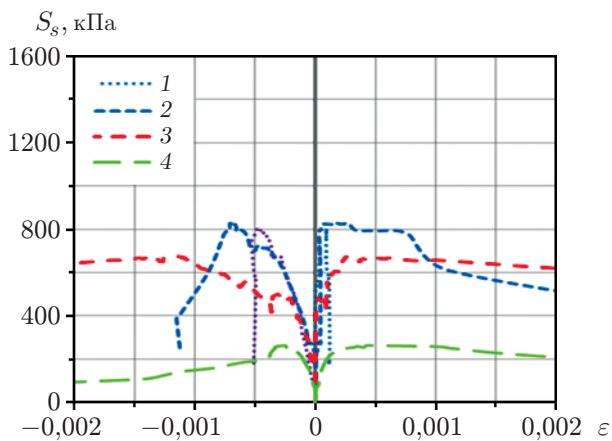


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость касательного напряжения от окружной деформации для образцов НВ:

1 — HB0, 2 — HB1, 3 — HB2, 4 — HBR

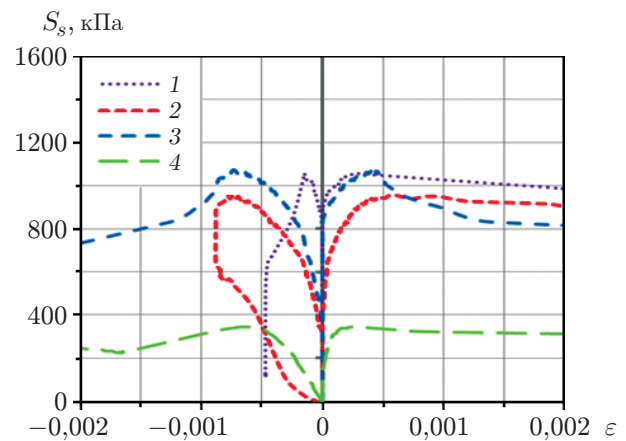


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость касательного напряжения от окружной деформации для образцов СВ:

1 — CB0, 2 — CB1, 3 — CB2, 4 — CBR

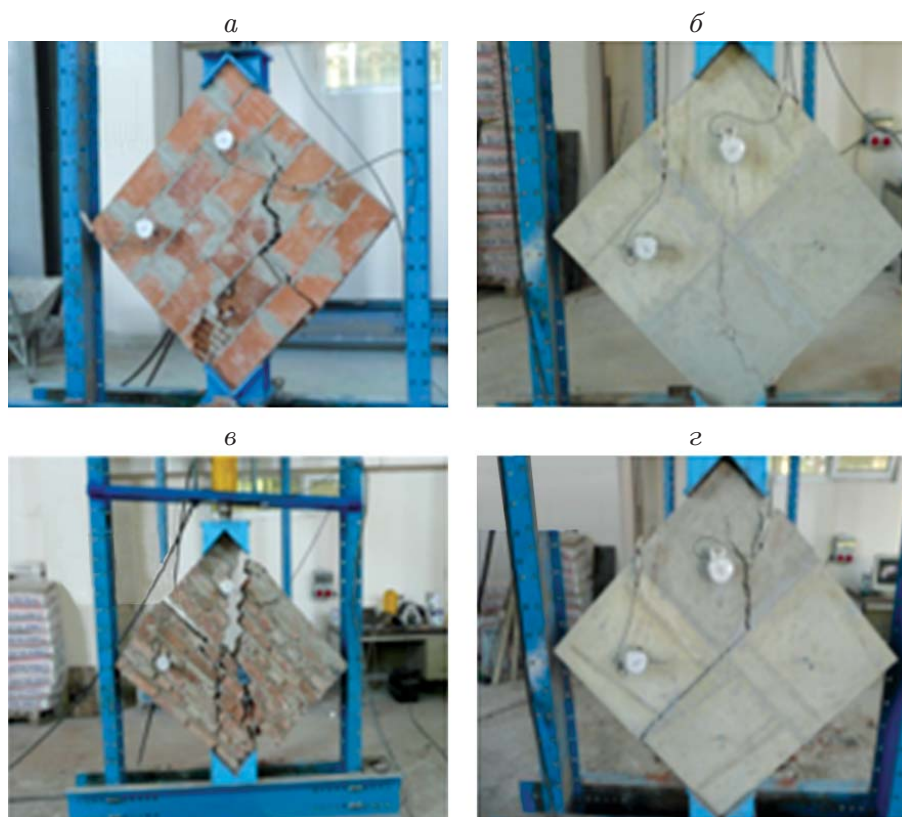


Рис. 5. Образцы HBR (а), HB2 (б) и CBR (в), CB2 (г) после испытаний

Таблица 4

Значения прочности при сдвиге S_s и ее увеличения ΔS_s ,
а также модуля сдвига G и его увеличения ΔG

Образец	S_s , кПа	ΔS_s , %	G , МПа	ΔG , %
HBR	259	—	381	—
HB0	786	303	1427	375
HB1	817	315	961	252
HB2	664	256	1476	387
CBR	348	—	483	—
CB0	1059	304	2648	548
CB1	958	275	731	151
CB2	1081	310	932	193

нии; g — длина рабочей области в вертикальном направлении; G — модуль сдвига; γ — деформация сдвига.

Уравнения (1) использовались при расчете прочности на сдвиг и модуля сдвига каждого образца (табл. 4). Наибольшие значения прочности на сдвиг зафиксированы для образцов HB1 и CB2. Из табл. 4 следует, что использование укрепляющих железобетонных панелей позволяет увеличить значения прочности на сдвиг образцов приблизительно в три раза. При этом для образцов HB значения модуля сдвига увеличивались в 2,52–3,87 раза, для образцов CB — в 1,51–5,48 раза.

Таблица 5

Затраты энергии на разрушение образцов

Образец	Направление смещения	E_1 , Дж	E_2 , Дж
HBR	Вертикальное	13	20
	Горизонтальное	23	97
HB0	Вертикальное	119	143
	Горизонтальное	29	30
HB1	Вертикальное	208	254
	Горизонтальное	54	338
HB2	Вертикальное	299	1098
	Горизонтальное	81	1001
CBR	Вертикальное	33	77
	Горизонтальное	17	332
CB0	Вертикальное	71	107
	Горизонтальное	123	1792
CB1	Вертикальное	270	342
	Горизонтальное	243	1695
CB2	Вертикальное	322	455
	Горизонтальное	214	439

2.3. *Оценка энергоемкости.* В табл. 3, 5 приведены значения величины смещения, измеренного в вертикальном и горизонтальном направлениях, а также рассчитанные значения затраченной энергии (E_1 — энергия, запасенная при нагружении до достижения максимального напряжения, E_2 — энергия, запасенная при нагружении до значения напряжения, при котором происходит разрушение). При достижении максимальной нагрузки различия смещений в усиленных и контрольных образцах составляли от –40 до 292 %. В частности, образец CB0 является более жестким по сравнению с образцом CBR. В момент разрушения смещения могли различаться в 10 раз. Образец HB2 является более пластичным по сравнению с образцом HBR. В целом в укрепленных образцах разрушение происходило более медленно, чем в контрольных образцах.

Энергия, поглощенная образцами HB до момента достижения максимального значения нагрузки, на 1605 % больше энергии, поглощенной образцом HBR. Энергия, поглощенная образцами HB до момента разрушения, на 2500 % больше энергии, поглощенной образцом HBR. Для образцов CB и CBR соответствующее различие поглощенной энергии составляло 670 и 390 % соответственно. Затраты энергии на разрушение образцов, укрепленных панелями, армированными стальными волокнами с концентрацией 2 %, существенно больше затрат энергии на разрушение контрольных образцов, особенно при нагружении до момента разрушения. Таким образом, затраты энергии на разрушение образцов значительно увеличиваются при увеличении концентрации стальных волокон. Однако при использовании бетонных панелей толщиной 10 мм применение волокон с концентрацией, превышающей 2 %, не рекомендуется.

3. Выводы. В работе проведено исследование прочности на сдвиг и энергоемкости кирпичных стен ручной кладки, укрепленных бетонными панелями с различным содержанием стальных волокон.

Из результатов проведенных экспериментов следует, что предложенный метод укрепления кирпичных стен ручной кладки является эффективным, поскольку позволяет существенно увеличить их прочность и энергоемкость. Кроме того, для использования этого метода не требуются значительные затраты.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Hamilton H., Dolan C.** Flexural capacity of glass FRP strengthened concrete masonry walls // J. Composites Construct. 2001. V. 5, N 3. P. 170–178.
2. **Hashemi S., Al-Mahaidi R.** Investigation of bond strength and flexural behaviour of FRP-strengthened reinforced concrete beams using cement-based adhesives // Austral. J. Structur. Engng. 2010. V. 11, N 2. P. 129–139.
3. **De Lorenzis L., Nanni A., La Tegola A.** Bond of near surface mounted FRP rods in concrete masonry units // Proc. of the 7th Annual intern. conf. on composites engineering (ICCE/7), Denver (USA), July 2000. S. 1., 2000.
4. **Willis C. R., Yang Q., Seracino R., Griffith M. C.** Bond behaviour of FRP-to-clay brick masonry joints // Engng Structures. 2009. V. 31, N 11. P. 2580–2587.
5. **Oliveira D. V., Basilio I., Lourenço P. B.** Experimental bond behavior of FRP sheets glued on brick masonry // J. Composites Construct. 2011. V. 15, N 1. P. 32–41.
6. **Buyukkaragoz A.** Shear behavior of aerated concrete and hollow brick walls strengthened with steel fiber reinforced concrete panels // Mech. Adv. Materials Structures. 2018. [Electron. resource]. Режим доступа: <https://doi:10.1080/15376494.2018.1519617>.
7. **Buyukkaragoz A., Sevil N., Koprman Y.** Strengthening of walls produced from aerated concrete material with steel fibered concrete panels: experimental study // J. Polytech. 2019. V. 21, N 2. P. 471–476. (in Turkish).
8. **Ozmen R. E.** Enhancing shear behaviour of masonry walls with steel sheet/strips: MSc diss., Ankara, 2018. (in Turkish).
9. **Koprman Y., Ozmen R. E., Ozdemir A., Ozgedik A.** Research on the shear behavior of masonry walls strengthened with steel members // J. Polytech. 2018. V. 21, N 2. P. 471–476. (in Turkish).
10. **ASTM C270.** Standard specification for mortar for unit masonry. West Conshohocken: Amer. Soc. for Testing and Materials, 2012.
11. **ASTM E447.** Test methods for compressive strength of laboratory constructed masonry prisms. West Conshohocken: Amer. Soc. for Testing and Materials, 1998.
12. **ASTM E591.** Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages. West Conshohocken: Amer. Soc. for Testing and Materials, 1981.
13. **Zhou D., Lei Z., Wang J.** In-plane behavior of seismically damaged masonry walls repaired with external BFRP // Composite Structures. 2013. V. 102. P. 9–19.

*Поступила в редакцию 22/VII 2019 г.,
после доработки — 22/VII 2019 г.
Принята к публикации 30/IX 2019 г.*