

О.В. КАБАНЦЕВ, О.А. СИМАКОВ, ЛЕ ВО ФУ ТОАН¹

¹Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва, Россия

ИСПЫТАНИЕ УСИЛЕННЫХ НАТУРНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ КАМЕННОЙ КЛАДКИ

***Аннотация.** Массовое восстановление зданий и сооружений после сейсмических воздействий и в зонах боевых действий с характерными последствиями минно-взрывных повреждений требует особенных эффективных методов усиления конструкций, что влечет необходимость разработки соответствующих нормативно-методических обоснований для данных методик. Данные решения в первую очередь должны базироваться на экспериментальных исследованиях, проведенных на натуральных близких к реальным образцам, и воздействиях, также соответствующих фактическим схемам нагружения конструкций. В этой связи становится вопрос выбора методик проведения испытаний с учетом важных в данном случае факторов: повторяемость и подобие, а также возможность масштабирования в случае невозможности проведения испытаний на образцах с размерами близких к реальным. Рассмотренные в настоящей статье вопросы как раз посвящены выбору методики испытания конструкций из каменной кладки после повреждений эквивалентными сейсмическими и минно-взрывными воздействиями, разработано конкретное предложение по проведению испытаний.*

***Ключевые слова:** испытания, каменная кладка, усиление, восстановление, торкретбетон.*

OL.V. KABANCEV, OL.A. SIMAKOV, LE VO PHU TOAN¹

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

TESTING OF REINFORCED LARGE-SCALE MASONRY SAMPLES

***Abstract.** The massive restoration of buildings and structures after seismic impacts and in combat zones with the characteristic consequences of mine and explosive damage requires particularly effective methods of strengthening structures, which necessitates the development of appropriate regulatory and methodological justifications for these techniques. These solutions should primarily be based on experimental studies conducted on field samples close to real samples, and impacts that also correspond to actual structural loading patterns. In this regard, it becomes a question of choosing test methods, taking into account important factors in this case: repeatability and similarity, as well as the possibility of scaling if it is impossible to conduct tests on samples with dimensions close to real ones. The issues discussed in this article are devoted to the choice of methods for testing masonry structures after damage caused by equivalent seismic and mine-explosive effects, and a specific test proposal has been developed.*

***Keywords:** testing, masonry, reinforcement, restoration, shotcrete.*

1. Введение

Задача усиления существующих зданий возникает по целому ряду причин [1, 2] среди которых можно отдельно выделить:

- восстановление конструкций после минно-взрывных воздействий;
- восстановление конструкций после сейсмических воздействий;
- превентивное повышение сейсмостойкости зданий и сооружений в следствие изменения в нормировании сейсмической опасности (сейсморайонировании).

Во многих случаях задача усиления характеризуется массовостью и большими объемами проводимых работ. При этом причины, формирующие задачи усиления, имеют широкий спектр реализации в виде как видимых внешних повреждений различных размеров, так и повреждений или деградации внутренних связей элементов конструкции.

Реализация задачи усиления повреждённого/разрушенного единичного здания в некотором районе может быть реализована с достижением эффективности по единичному параметру или узкой группе параметров. В случае массового усиления зданий и сооружений основным параметром выбора метода усиления (при гарантированном обеспечении требуемого уровня усиления) становится эффективность по критериям стоимости и скорости проведения работ, дополнительным фактором для отдельных сооружений становится возможность проведения работ без полного вывода здания из эксплуатации.

Таким образом выделяются направления усиления строительных конструкций, учитывающие:

- оптимальное использование материалов (стремление к минимально обоснованным сечениям, расходу);
- механизацию проведения работ (возможное применение робототехники)).

Одним из таких методов, учитывающих современные тенденции массового усиления строительных конструкций, является усиление односторонними аппликациями из торкретбетона.

Сама технология усиления известна достаточно давно [3], в то же время остается ряд вопросов в части обоснованного оптимального проектирования усиления.

С целью разработки методик расчета, конструктивных и технологических решений необходимо проведение испытаний усиленных конструкций.

Рассматривая работу каменной кладки в части выделенных направлений массового усиления конструкций, необходимо воссоздание монолитности [4-6], в особенности для поврежденных конструкций, имеющих характерные повреждения [7-10].

Обоснованные рекомендации по расчету и конструированию могут быть основаны только на результатах экспериментальных исследований, при этом в качестве объекта должны быть использованы натурные фрагменты зданий.

Проводя анализ имеющихся методик испытаний фрагментов каменной кладки, можно выделить 5 принципиальных схем исследований (рис. 1).

Схема рис. 1.а была применена в исследованиях [11], а впервые была использована в опытах начала XX века. Данная схема испытаний предполагает близкое к диагональному нагружению при этом преобладают сдвиговые усилия, а с определенного момента нагружения формируется отрыв верхних рядов кладки в месте приложения нагрузки.

Схема 1.б является некоторым усовершенствованием испытаний на главные растягивающие напряжения, в то же время фактические эксперименты показали механизм разрушения простенка сопоставимый с внецентренным сжатием. Такой вид напряженно-деформированного состояния не является характерным для сейсмических воздействий.

В схемах 1.в и 1.г предполагается наибольшее приближение к работе реальной конструкции при действии горизонтальных нагрузок, возникающих при сейсмических событиях. В месте с тем ранее проведенные эксперименты [17] показывают недостатки данного метода:

- при центральном нагружении (1.в) формируется нехарактерные для реальных конструкций разрушения – расслоение кладки в опорной зоне, разрушение угла образца по механизму смятия кладки и т.п.;

- при горизонтальном нагружении с двух сторон (домкраты передают «толкающее» воздействие) после образования трещин в образце возникает сложность с синхронизацией усилий в гидравлических домкратах;

- в целом, наблюдается большой разброс значений в схожих экспериментах (в рамках общей серии образцов), что не позволяет в полной мере проводить полноценный анализ результатов.

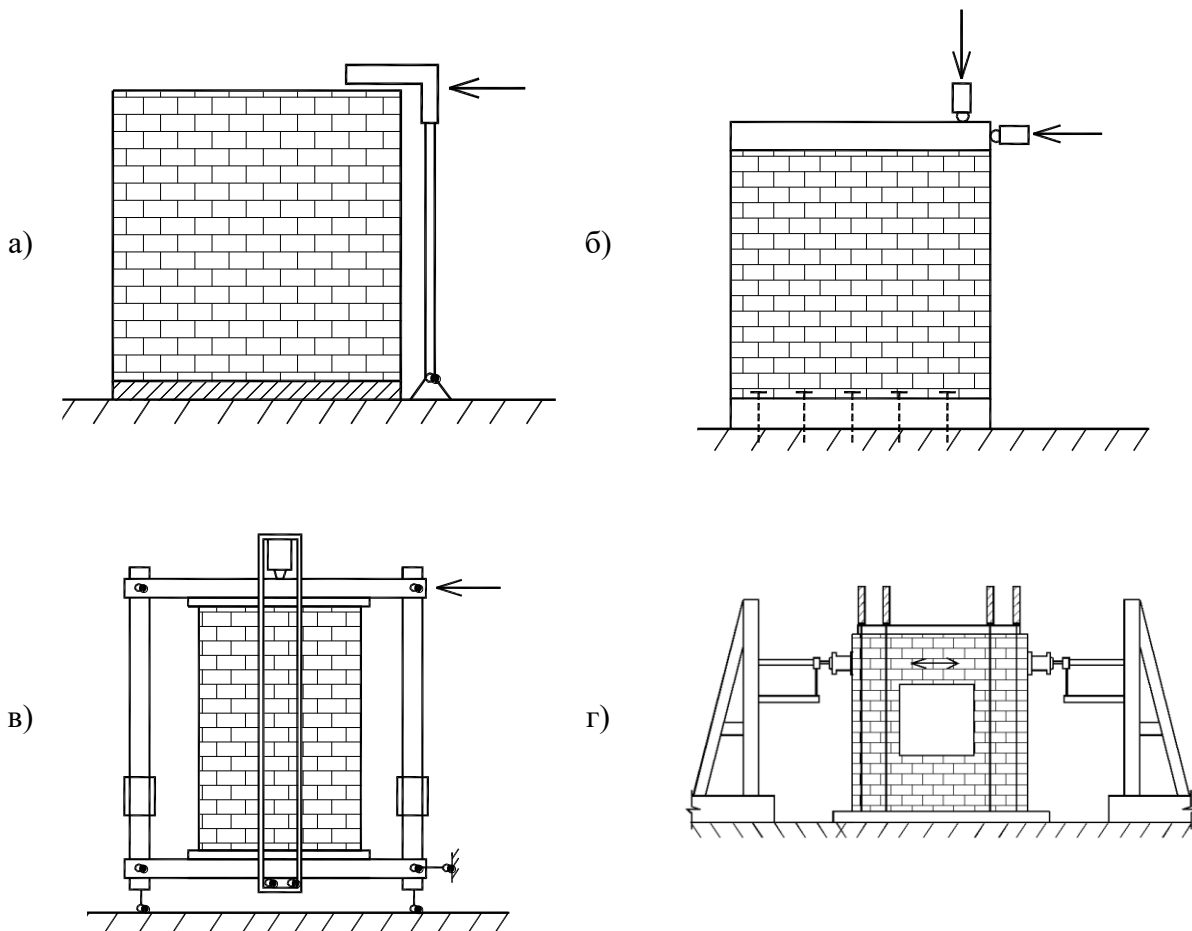


Рисунок 1 - Схемы основных методов испытания натуральных фрагментов каменной кладки

2. Модели и методы

С учетом вышеизложенного ни одна из ранее рассмотренных схем не является однозначно предпочтительной при планировании экспериментальных исследований работы образцов из каменной кладки, усиленной различными способами.

Вместе с тем можно выделить схемы испытаний на главные растягивающие напряжения (рис. 2) и схему 1.г. Первую с учетом хорошей сходимости результатов по однородным сериям, а также хорошей сходимостью с численным моделированием на основе накопленного опыта. Для второй (1.д) при определенной модернизации и устранении ранее выявленных недочетов можно добиться хорошей сходимости и максимального приближения напряженно деформированного состояния простенков к реальным зданиям.

Испытания по схеме на рис. 2 хорошо изучены [12-16], для них проработаны механизмы как статических, так и динамических испытаний. В общем виде для кладки толщиной 250 мм

подобраны размеры опорных устройств (опорные уголки с размером 150x150 мм), а также размер образца (близкий к 1050x1050 мм). В общем виде схема представлена на рис. 2.

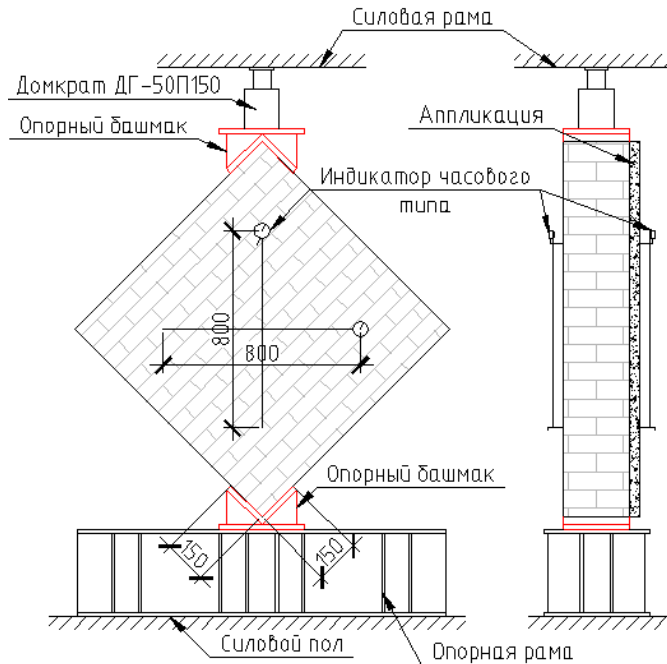


Рисунок 2 - Испытания по схеме 1.б

Нагрузка прикладывается вдоль одной из диагоналей, что формирует при нагружении образование главных напряжений – сжимающих и растягивающих, направленных по диагонали образца.

Указанная схема хорошо отработана на образцах из кладки толщиной 250 мм. При этом вполне закономерно возникают вопросы масштабирования – приведения результатов к наиболее массовым габаритам толщин несущих стен – толщинам 380 и 510 мм.

Для исследования эффективности методов усиления (повышения сейсмостойкости) каменной кладки внешними элементами усиления требования по минимизации эффектов масштабирования являются определяющими. Основание: крайне сложно однозначно трактовать степень влияния односторонней внешней конструкции усиления на повышение несущей способности каменной кладки по критериям восприятия главных растягивающих напряжений. Таким образом, минимальная толщина экспериментальных образцов для исследования эффектов усиления несущих стен из каменной кладки по критериям восприятия главных растягивающих напряжений должна быть не менее 380 мм.

Кроме этого, ранее не проводились испытания восстановленных образцов кладки (фрагменты стен с тарированными дефектами и последующим восстановлением целостности и несущей способности). Образцы с встроенными тарированными повреждениями весьма требовательны к моделированию сложного напряженного состояния конструкции так как наличие встроенных дефектов существенным образом влияет на характеристики напряженного состояния образца. При увеличении толщины образца встроенные дефекты проявляются в возрастающем объеме. Например, пробное моделирование работы экспериментального образца толщиной 380 мм, выполненное авторами по рассматриваемой схеме испытаний, показывает весьма неоднозначные результаты, свидетельствующие о невозможности в полной мере оценить эффекты от восстановления монолитности кладки.

Для прогноза поведения образца из каменной кладки толщиной 380 мм выполнены численные исследования напряженно-деформированного состояния при действии диагонального нагружения (рис. 3).

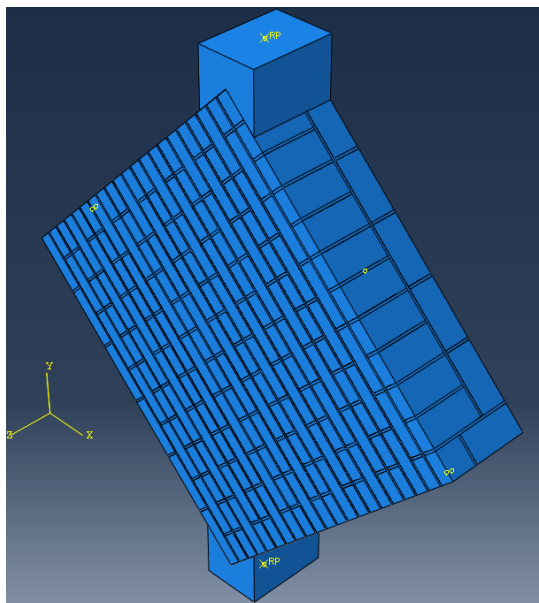


Рисунок 3 - Общий вид конечноэлементной расчетной модели

Расчетная модель сформирована конечными элементами типа «солид», с механическими характеристиками моделируемых материалов, для которых были заданы отдельные диаграммы деформирования для базовых элементов кладки (кирпич и раствор) (рис. 4, 5).

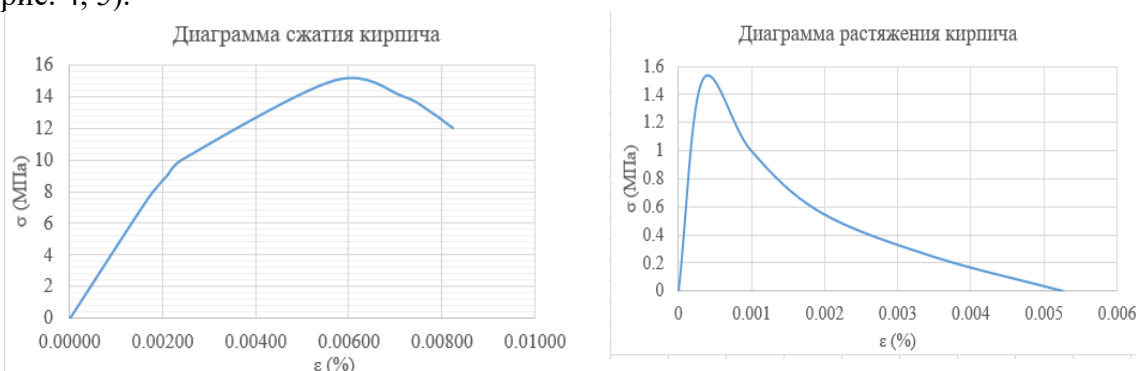


Рисунок 4 - Диаграмма деформирования кирпича М150

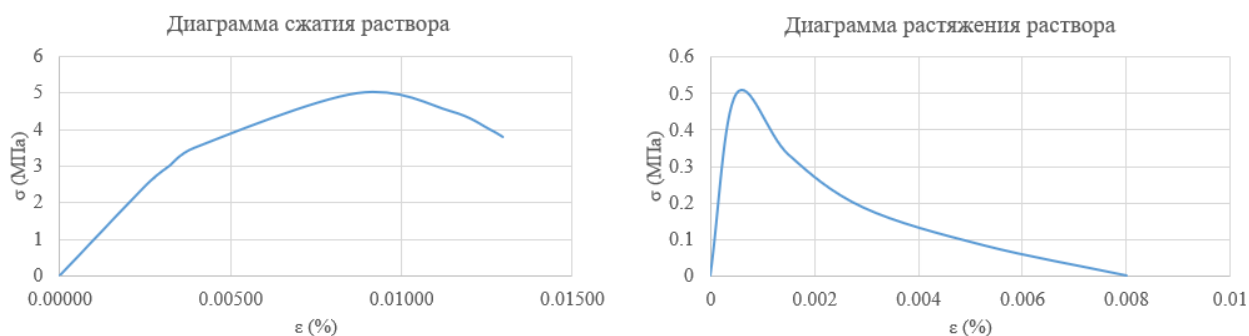


Рисунок 5 - Диаграмма деформирования раствора М50

Для построения диаграмм деформирования материалов кладки были использованы параметры, заложенные в СП 15.13330, а также пособия к СП. Для реальных испытаний конструкций и последующего анализа должны быть проведены испытания каждого из компонентов кладки с целью корректного моделирования.

3. Результаты исследования и их анализ

Результаты численного моделирования представлены на рис. 6.

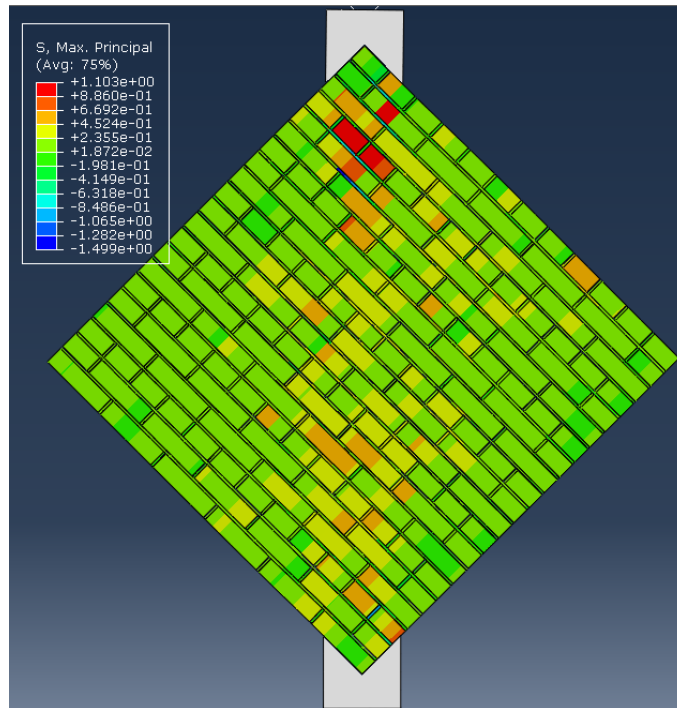


Рисунок 6 - Результаты численного моделирования работы кладки. Мозаика главных напряжений

Как показано в [9], на формирование процессов трещинообразования и разрушения образцов из каменной кладки при действии диагонального нагружения существенное влияние оказывает характеристики взаимодействия базовых материалов (кирпича и раствора), а именно – адгезионная прочность (R_{adh}) взаимодействия по контакту базовых материалов. В численных исследованиях использована величина $R_{adh}=0,128$ МПа, установленная в рамках экспериментальных исследований [9].

Проводя сопоставительный анализ с ранее проведенными исследованиями [15, 16] можно отметить особенности работы фрагмента кладки с толщиной 380 мм:

- значительные напряжения в зоне нагружения образцов, существенно превышающие прочность кладки на смятие;
- наличие трехмерного сложнапряженного состояния со значительными напряжениями в швах по толще кладки, что может приводить к разрушению образца по механизму расслоения по толщине с разрушением связевых кирпичей.

Численными исследованиями установлено, что при диагональном нагружении образца разрушение формируется по механизму смятия зон кладки, примыкающих к нагрузочным элементам. При толщинах образцов 380 мм и более и при принятых механических характеристиках базовых кладочных материалов разрушение в центральной зоне образца не происходит вследствие демпфирования нагружения в зонах смятия.

Опыт экспериментальных исследований образцов из каменной кладки [15] показывает, что в ряде случаев разрушение образца происходит по механизму «сдвиг по неперевязанному сечению» (рис.7).

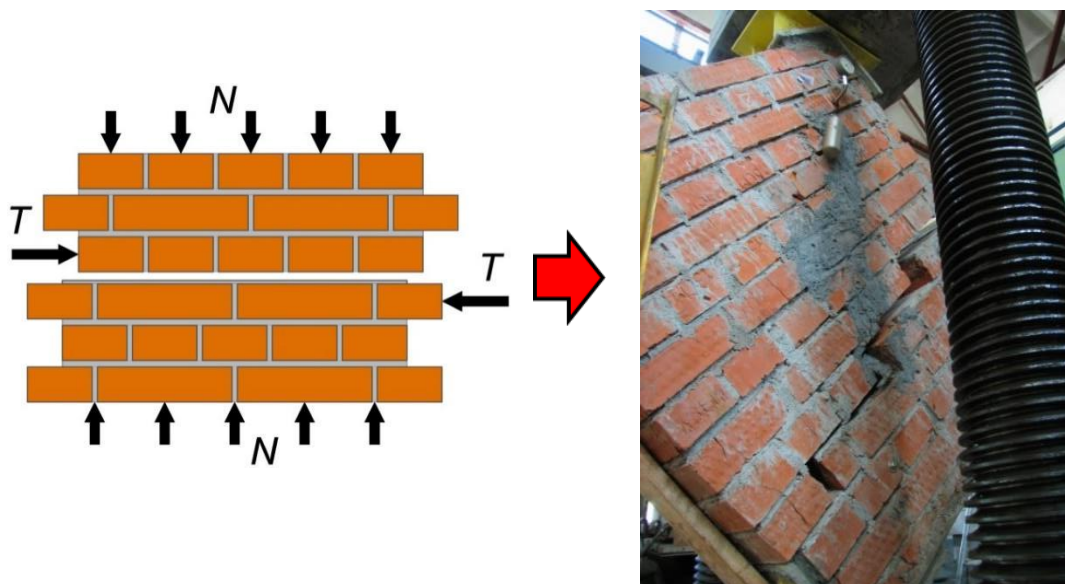


Рисунок 7 - Схема разрушения каменной кладки по механизму «сдвиг по неперевязанному сечению». Слева – схема механизма разрушения, справа – результат экспериментального исследования образца из каменной кладки при диагональном нагружении [15]

Таким образом, численными исследованиями и анализом имеющихся результатов экспериментальных исследований при диагональном нагружении образцов обоснована необходимость отказа от традиционной схемы испытаний образцов каменной кладки с толщиной 380 мм и более при диагональном нагружении и целесообразность разработки новой методики испытаний образцов с минимизацией эффектов смятия при нагружении и создании условий для реализации механизмов разрушения вследствие действия главных растягивающих напряжений с минимизацией риска разрушения по механизму «сдвиг по неперевязанному сечению».

Учитывая выявленные особенности работы образцов «толстой» кладки (толщиной более 1,5 кирпича – 380 мм) при диагональном нагружении в качестве основной схемы испытаний была выбрана схема на рис. 1.д с рядом усовершенствований. В общем виде схема испытаний представлена на рис. 8 и 9.

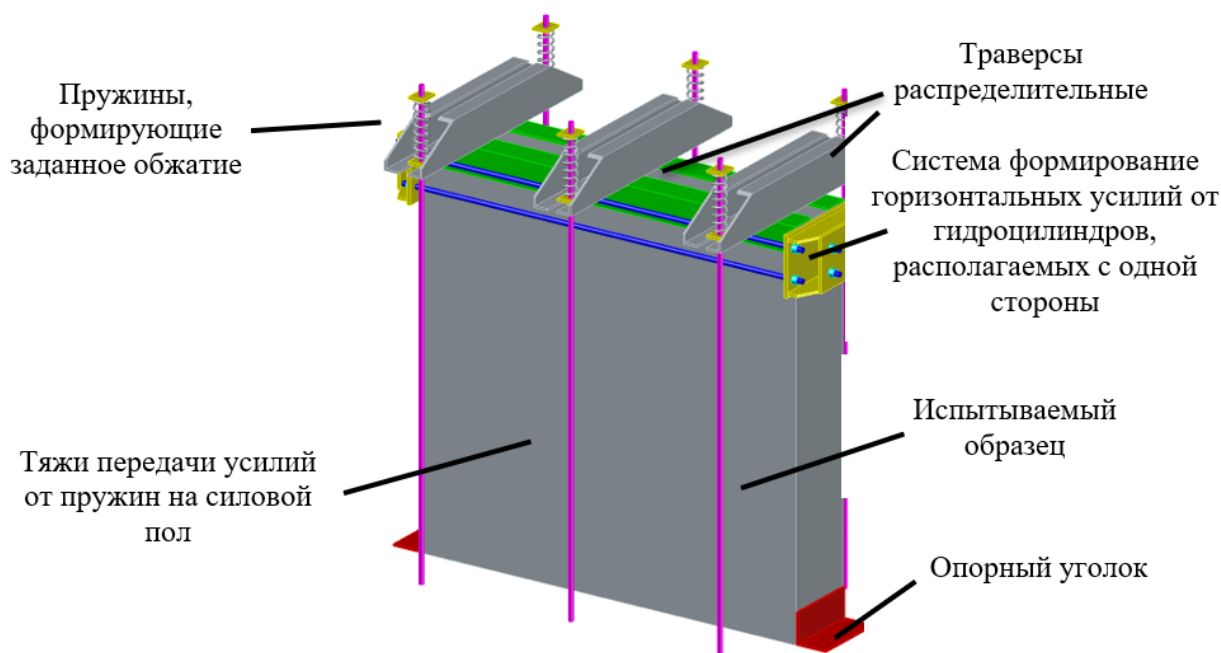


Рисунок 8 - Схема испытательного стенда

Разработанная схема испытаний в наиболее корректном виде моделирует работу каменной кладки простенков зданий при сейсмических воздействиях.

Вертикальные тязи через пружины и траверсы закрепляют образец к силовому полу. При этом пружинами можно регулировать усилие обжатия образца, моделируя работу простенков различных этажей. Горизонтальное усилие передается через траверсу с формированием обжатия верхней части образца. Схема нагружения испытываемого образца представлена на рис. 9.

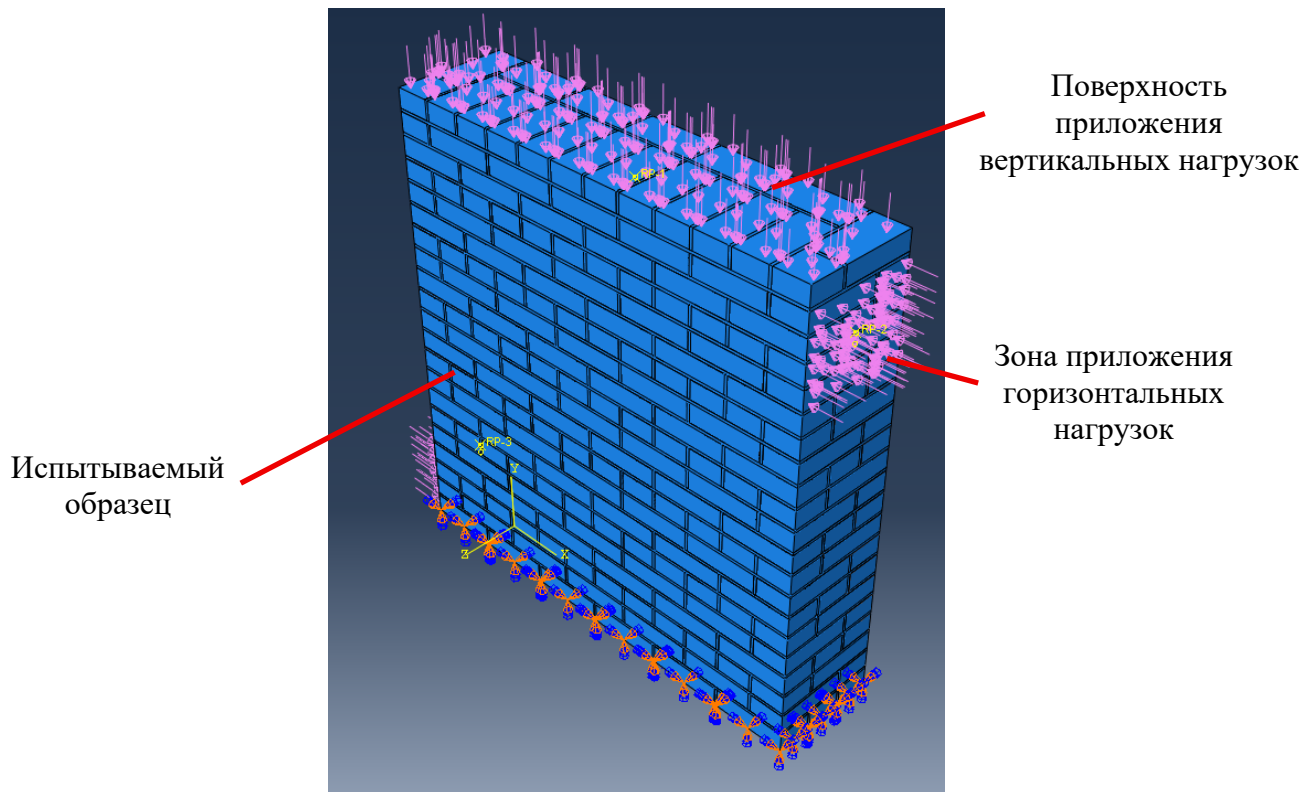


Рисунок 9 - Схема нагружения испытываемого образца

Установка пружин по концам образца, а также обжатие верхней части образца должно исключить полученные в ряде исследований «ошибочные» схемы разрушений (схемы разрушения не характерные для реальных простенков, а также расположенные в неисследуемой области), такие как: разрушение кладки в зоне опорной пяты угла образца при перекосе; формирование отрыва по нормальному сцеплению в горизонтальном шве; сдвиг – формирование двух фрагментов с практически горизонтальной площадкой сдвига.

С целью проверки выдвинутых гипотез было выполнено численное исследование работы фрагмента из каменной кладки без усиления (контрольный образец) при базовых характеристиках кладки:

- кирпич пластического формования М150;
- раствор цементно-песчаный М50;
- толщина кладки 380 мм с цепной перевязкой;
- адгезионная прочность (R_{adh}) взаимодействия по контакту базовых материалов

$R_{adh}=0,128$ МПа.

Мозаика главных напряжений представлена на рис. 10.

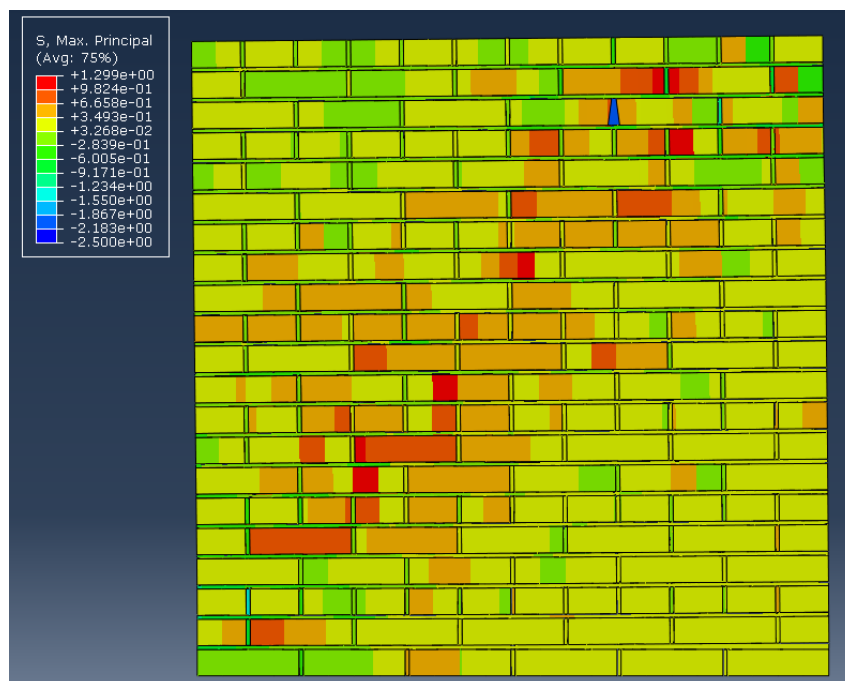


Рисунок 10 - Мозаика главных напряжений, МПа

Сопоставительный анализ со схемой испытания по рис. 1.б показывает ожидаемую картину полей главных напряжений: *большие* напряжения в центральной зоне образца. При этом площадь формирования значимых напряжений относительно равномерно распределяется вдоль главной диагонали – фактически диагонали формирования главных растягивающих напряжений. Таким образом, по результатам численных исследований разработанная методика физического эксперимента для исследования напряженно-деформированного состояния конструкций из каменной кладки с толщиной образца 380 мм и более может быть признана обоснованной и корректной.

4. Заключение

По результатам анализа схем испытания фрагментов каменной кладки, приведенного в настоящей статье, применяемых для исследований сейсмостойкости и сейсмоусиления каменных конструкций, а также для восстановления каменных конструкций после сейсмических и минно-взрывных воздействий можно сделать следующие выводы:

1. К настоящему времени накоплен значительный опыт испытания образцов каменной кладки с целью повышения сейсмостойкости, восстановления монолитности, что отчасти соответствует поставленным задачам по исследованию вопросам восстановлению конструкций.

2. Существенную сложность представляют вопросы масштабирования результатов испытаний, полученных на образцах кладки толщиной 125 и 250 мм, к толщине каменной конструкции 1,5 кирпича (380 мм) и более. Для минимизации эффектов, вносимых в результаты масштабированием на большие толщины каменных конструкций, рекомендуется проведение испытаний на образцах соответствующей толщины.

3. В качестве основной схемы испытаний усиленных и восстановленных образцов каменной кладки, в том числе оценки вопросов включения в работу элементов усиления из торкрет-бетона, предлагается использовать разработанную схему испытательного стенда, обеспечивающую моделирование вертикальной составляющей нагрузки, равномерно приложенной по грани кладки, и горизонтальной нагрузки, прикладываемой с одной стороны и передающей усилия обратного знака через специальную траверсу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еременок П. Л., Измаилов Ю. В. Монолитность и сейсмостойкость конструкций из естественного камня. – Кишинев, 1968. – 202 с.
2. Жунусов Т. Ж. Основы сейсмостойкого строительства. – Алма-Ата, 1990. – 270 с. Гуревич А. М., Малоглазов Б. И., Рассказовский В. Т. Комплексные конструкции стен со сборно-монолитными сердечниками // Строительство и архитектура Узбекистана. – 1970. – № 2.
3. Гуревич А. М., Малоглазов Б. И., Рассказовский В. Т. Комплексные конструкции стен со сборно-монолитными сердечниками // Строительство и архитектура Узбекистана. – 1970. – № 2.
4. Измаилов Ю. В., Буровенко В. А., Кирпий А. Ф. Усиление зданий, поврежденных землетрясением // Карпатское землетрясение 1986 г. / Под ред. Друмя А.В., Шебалина Н.В., Складнева Н.Н., Графова С.С., Ойзермана В.И. – Кишинев, 1990. – С. 303–317.
5. Кабанцев О. В., Тонких Г. П., Симаков О. А., Симаков А. Б., Баев С. М. Повышение сейсмостойкости каменных конструкций односторонними аппликациями из торкрет-бетона // Аэропорты. Прогрессивные технологии. – 2011. – № 2. – С. 26–32. – EDN: TSQAKV.
6. Кабанцев О. В., Тонких Г. П. и др. Пособие по оценке сейсмостойкости и сейсмоусилению общеобразовательных зданий с несущими стенами из каменной кладки. – М.: 26 ЦНИИ МО РФ, 2002.
7. Kabantsev O. V. A discrete model of masonry under conditions of biaxial stress state // Vestnik of TSUAB. – 2015. – № 4. – P. 113–134.
8. Kabantsev O. V., Tamrazyan A. G. Modeling of elastic-plastic deformation of masonry under conditions of biaxial stress state // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2015. – Vol. 11, Iss. 3. – P. 87–100.
9. Мальцев А. М. Основы железобетонного строительства. – М.: Транспечать НКПС, 1929. – 62 с.
10. Мартемьянов А. И., Ширин В. В. Способы восстановления зданий и сооружений, поврежденных землетрясением. – М., 1978. – 204 с.
11. Поляков С. В. Сейсмостойкие конструкции зданий (основы теории сейсмостойкости). – М., 1983. – 304 с.
12. Поляков С. В., Коноводченко В. И. Прочность и деформации виброкирпичных панелей при перекосе // Сейсмостойкость сборных крупноэлементных зданий. – М., 1963. – С. 131–148.
13. Поляков С. В., Садыхов З. Г. Прочность и деформации сплошных виброкаменных панелей при перекосе // Сейсмостойкость сборных крупноэлементных зданий. – М., 1963. – С. 170–183.
14. Поляков С. В., Сафаргалиев С. М. Монолитность каменной кладки. – Алма-Ата, 1991. – 160 с.
15. Симаков О. А. Анализ факторов, вызывающих необходимость усиления железобетонных конструкций // Строительство и реконструкция. – 2019. – № 1 (81). – С. 76–84. – <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-81-1-76-84>.
16. Тонких Г. П., Кабанцев О. В., Симаков О. А., Симаков А. Б., Баев С. М., Панфилов П. С. Экспериментальные исследования сейсмоусиления каменной кладки наружными бетонными аппликациями // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2011. – № 2. – С. 35–42. – EDN: QCWDBZ.
17. ElGawady M. A., Lestuzzi P., Badoux M. Retrofitting of Masonry Walls Using Shotcrete // Proc. NZSEE Conference. – New Zeland, 2006.

REFERENCES

1. ElGawady M. A., Lestuzzi P., Badoux M. Retrofitting of Masonry Walls Using Shotcrete. *Proc. NZSEE Conference*. 2006.
2. Eremenok P.L., Izmailov Yu.V. Monolitnost i sejsmostojkost konstrukcij iz estestvennogo kamnya [Solidity and earthquake resistance of natural stone structures]. Chisinau, 1968. 202 p. (rus).
3. Gurevich A.M., Maloglazov B.I., Rasskazovsky V.T. Kompleksnyye konstrukcii sten so sborno-monolitnymi serdechnikami [Complex wall structures with prefabricated monolithic cores]. *Construction and architecture of Uzbekistan*. 1970. No. 2. Pp. ... (rus).
4. Izmailov Yu.V., Burovenko V.A., Kirpiy A.F. Usilenie zdaniy, povrezhdennyh zemletryaseniem [Reinforcement of buildings damaged by the earthquake]. The Carpathian earthquake of 1986. Ed. Drumia A.V., Shebalina N.V., Skladneva N.N., Grafova S.S., Oizerman V.I. Chisinau, 1990. Pp. 303-317. (rus).
5. Kabantsev O.V., Tamrazyan A.G. Modeling of elastic-plastic deformation of masonry under conditions of biaxial stress state. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2015. Vol. 11. Iss. 3. Pp. 87–100. (rus).
6. Kabantsev O.V. A discrete model of masonry under conditions of biaxial stress state. *Vestnik of TSUAB*. 2015. No. 4. Pp. 113–134. (rus).
7. Kabantsev O.V., Tonkikh G.P., Simakov O.A., Simakov A.B., Baev S.M. Povyshenie sejsmostojkosti kamennyh konstrukcij odносторонними аппликациями из торкрет-бетона [Increasing the seismic resistance of stone structures by single-sided applications of shotcrete]. *Airports. Advanced technologies*. 2011. No. 2. Pp. 26-32. (rus).
8. Kabantsev O.V., Tonkikh G.P. et al. The Grant according to seismic stability and to seismic-strengthening the general armies buildings with bearing walls from a stone laying. Moscow, 26 TSNII MO the Russian Federation, 2002.

9. Malcev A.M. Osnovy zhelezobetonного stroitelstva [Fundamentals of reinforced concrete construction]. Moscow: Transpechat NKPS, 1929. (rus).
10. Martemyanov A.I., Shirin V.V. Sposoby vosstanovleniya zdaniy i sooruzhenij, povrezhdennyh zemletryaseniem [Methods of restoring buildings and structures damaged by an earthquake]. Moscow, 1978. 204 p. (rus).
11. Polyakov S.V. Sejsmostojkie konstrukcii zdaniy (osnovy teorii sejsmostojkosti) [Earthquake-resistant structures of buildings (fundamentals of the theory of seismic resistance)]. Moscow, 1983. 304 p. (rus).
12. Polyakov S.V., Konovodchenko V.I. Strength and deformation of vibro-brick panels during skewing. Earthquake resistance of prefabricated large-element buildings. Moscow, 1963. Pp. 131-148.
13. Polyakov S.V., Sadykhov Z.G. Prochnost i deformacii sploshnyh vibro-kamennyh panelej pri perekose [Strength and deformation of continuous vibrating wall panels during skewing]. Earthquake resistance of prefabricated large-element buildings. Moscow, 1963. Pp. 170-183. (rus).
14. Polyakov S.V., Safargaliev S.M. Monolitnost kamЕННОj kladki [Monolithic masonry]. Alma Ata, 1991. 160 p. (rus).
15. Simakov O.A. Analysis of factors causing the need for strengthening of reinforced concrete constructions. *Building and Reconstruction*. 2019. No. 1(81). Pp. 76-84. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-81-1-76-84> (rus).
16. Tonkikh G.P., Kabantsev O.V., Simakov O.A., Simakov A.B., Baev S.M., Panfilov P.S. Eksperimentalnye issledovaniya sejsmousileniya kamЕННОj kladki naruzhnymi betonnymi aplikacijami [Experimental studies of seismic reinforcement of masonry by external concrete applications]. *Earthquake-resistant construction. Safety of structures*. 2011. No. 2. Pp. 35-42. (rus).
17. Zhunusov T.J. Osnovy sejsmostojkogo stroitelstva [Fundamentals of earthquake-resistant construction]. Alma Ata, 1990. 270 p. (rus).

Информация об авторе:

Кабанцев Олег Васильевич

Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва, Россия,

доктор технических наук, профессор кафедры Железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: ovk53@mail.ru

Симаков Олег Александрович

Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва, Россия,

кандидат технических наук, доцент кафедры Железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: simakov-ne@mail.ru

Ле Во Фу Тоан

Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва, Россия,

аспирант кафедры Железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: hskdtoan@gmail.com

Information about author:

Kabantsev Oleg V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

E-mail: ovk53@mail.ru

Simakov Oleg A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

E-mail: simakov-ne@mail.ru

Le Vo Phu Toan

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

Postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

E-mail: hskdtoan@gmail.com

Статья поступила в редакцию 01.10.2025
Одобрена после рецензирования 09.11.2025
Принята к публикации 13.11.2025

The article was submitted 01.10.2025
Approved after reviewing 09.11.2025
Accepted for publication 13.11.2025