

кой трудоемкости, связанной с максимально равномерным размещением арматуры в плите;

- обеспечить максимальную стабильность предприятиям строительной отрасли благодаря созданию конструкций с повышенной надежностью. Увеличение индекса надежности снизит стоимость ликвидации последствий отказа и не приведет к банкротству предприятий. При индексе надежности 4,75 стоимость ликвидации последствий отказа составляла менее 1% от стоимости конструкций на протяжении всего срока службы;
- сократить количество несчастных случаев и повысить безопасность жизнедеятельности населения.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Надежность строительных конструкций общие принципы: СТБ ISO 2394-2007. – Мн: Госстандарт. – 65 с.
2. Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций: СТБ ЕН 1990-2007. Мн: Госстандарт. – 57 с.
3. «Об утверждении приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2011–2015 годы»: Указ Президента Республики Беларусь от 22 июля 2010 г. № 378
4. Конструкции бетонные и железобетонные: СНБ 5.03.01-02. – Мн.: Стройиздат, 2002. – 247 с.
5. Kennedy, G. Practical Yield Line Design / G. Kennedy, C.H. Goodchild – Surrey: The Concrete Center, 2004. – 171 p.
6. Давыдок, А.И. Перспективы развития и подготовки инженерных кадров Республики Беларусь : сб. тр. XVIII Междунар. научно.-метод. семинара 28-29 ноября 2012 г. / Под общ. ред. Д.Н. Лазоревского, А.И. Колтунова - Новополоцк: ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 146 -150.
7. Экономика Беларуси – 2010 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Экономика_Беларуси – Дата доступа: 27.07.2010
8. Население Беларуси – 2010 [Электронный ресурс]– Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Население_Беларуси – Дата доступа: 27.07.2010

УДК 693.22

Демчук И.Е.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ПРИ ДИАГОНАЛЬНОМ СЖАТИИ

В данном исследовании выполнены экспериментальные исследования и численное моделирование процесса деформирования и разрушения образцов каменной кладки, подверженных диагональному сжатию. В численных моделях учитывалась физическая нелинейность деформационных свойств материалов кладочных элементов и растворных швов, а также их контактное взаимодействие. По результатам исследования произведено сравнение результатов численных и экспериментальных данных.

ВВЕДЕНИЕ

Каменная кладка в инженерных расчетах, как правило, рассматривается как гомогенный анизотропный материал, прочностные и деформационные характеристики которого при различных сочетаниях кладочных элементов и растворов получают на основании испытаний опытных образцов. Изготовление и испытание опытных образцов кладок является достаточно дорогостоящим и трудоемким. Поэтому в последнее время для получения прочностных и деформационных харак-

теристик каменных кладок зачастую прибегают к численному моделированию процессов деформирования и разрушения моделей каменных кладок.

В соответствии с предложением Lourenço [1], в инженерных расчетах каменная кладка может быть представлена сплошной или дискретной моделью.

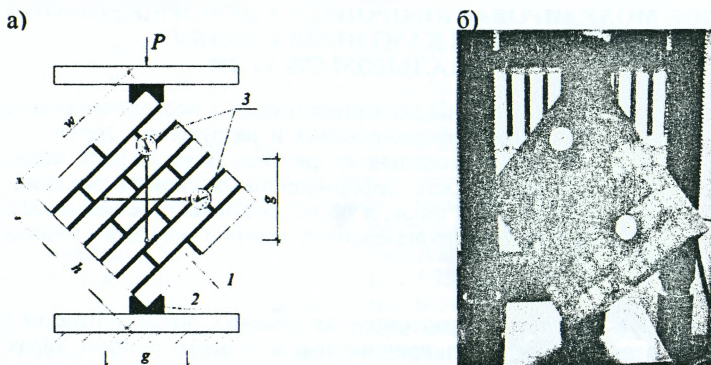
В случае сплошной модели (метод макро моделирования) кладка рассматривается как однородный материал, объединяющий элементы каменной кладки и раствор в единое целое. Такой метод описывает поведение кладки с точки зрения макроуровня или средних напряжений и деформаций. Конечно-элементная сетка в таких моделях не зависит от геометрического расположения составных элементов кладки.

В дискретных моделях (метод микро моделирования) используется три отдельных элемента, представляющих собой камни, раствор и поверхность между ними. Такая подробная модель может лучше представить нарушение сцепления, проскальзывание и разрыв, которые наблюдаются между раствором и кладочным элементом. На основании расчета дискретной модели можно определить анизотропию деформационных свойств кладки как композиционного материала, а также выявить характер трещинообразования и разрушения кладки, в том числе значения разрушающих нагрузок. Поэтому дискретные модели в последнее время активно используются для моделирования процессов испытаний образцов каменной кладки [2], [3]. Однако такой метод является достаточно затратным с точки зрения машинных ресурсов, что в определенных случаях является ограничивающим фактором.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Испытания проводились на образцах каменной кладки, изготовленных из полнотелых керамических кирпичей на растворе общего назначения различной прочности, которая определялась одновременно с испытанием образцов в соответствии с методикой [4].

Серия испытаний проводилась в соответствии со стандартом [5]. Испытываемые образцы подвергались сжатию сосредоточенной силой, приложенной под углом 45° к горизонтальным растворным швам (Рис. 1), и доводились до разрушения. Было изготовлено три серии опытных образцов кладки на растворе прочностью при сжатии $f_m=10.9$ МПа, $f_m=7.9$ МПа и $f_m=3.1$ МПа.



1 – кладочный элемент; 2 – передаточный опорный башмак; 3 – индикаторы перемещений часового типа ИГП-1 с ценой деления 0.001 мм

а) схема испытания, б) опытный образец в испытательной установке

Рисунок 1 – Испытание образца при диагональном сжатии в соответствии с [5]

В таблице 1 представлены результаты испытаний на диагональное сжатие с указанием разрушающих нагрузок и предельных напряжений сдвига.

Таблица 1 – Результаты испытаний на определение прочности при диагональном сжатии

№ серии	№ образца	Прочность кладочного раствора при сжатии f_m (МПа)	Разрушающая нагрузка $F_{i,max}$ (Н)	Разрушающее напряжение сдвига S_{ii} (МПа)
1	2	3	4	5
КРО-1дс	1	10.9	77400	0.96
	2		61800	0.71
	3		57600	0.66
КРО-2дс	1	7.9	74500	0.88
	2		47200	0.57
	3		66200	0.80
	4		59700	0.69
	5		63300	0.73
КРО-3дс	1	3.1	27500	0.33
	2		37900	0.44
	3		32800	0.38

При испытаниях опытных образцов имели место следующие механизмы их разрушения:

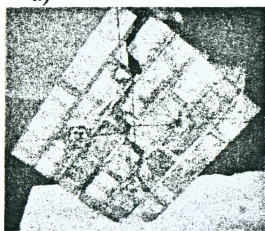
- раскалывание по диагонали, при котором траектория критической трещины в меньшей или большей степени отклоняясь от линии действия сжимающего усилия, проходит по камням и отдельным вертикальным и горизонтальным швам кладки (Рис.2,а);

- сдвиг по горизонтальным растворным швам (Рис.2,б).

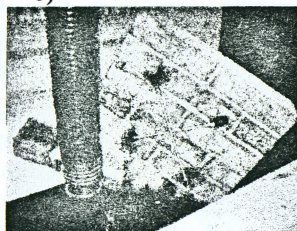
- раскалывание по диагонали, при котором критическая трещина имеет ступенчатую траекторию и проходит только по горизонтальным и вертикальным швам кладки (Рис.2,в).

Во всех случаях разрушение опытных образцов носило хрупкий характер.

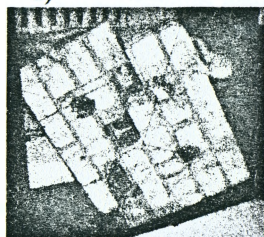
а)



б)



в)



а – раскалывание по диагонали,
 б – сдвиг вдоль горизонтальных растворных швов,
 в – раскалывание по зигзагообразной траектории по границе контакта камней и растворных швов
 Рисунок 2 – Характерные механизмы разрушения образцов кладки

По результатам испытаний были измерены деформации в вертикальном и горизонтальном направлениях. Полученные диаграммы деформирования будут представлены ниже при сравнении с результатами численного моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

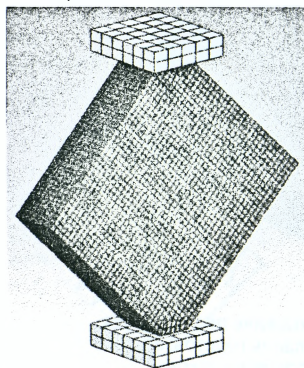
В рамках более раннего исследования [6] было отдельно рассмотрено поведение контактной поверхности по методу микромоделирования опытного образца каменной кладки при испытании на срез в соответствии с [7]. Была рассмотрена объемная задача с использованием объемного конечного элемента (КЭ) SOLID186 без учета трещинообразования и контактных КЭ CONTA174/TARGE170 с учетом начального сопротивления сдвигу. Данные опции КЭ-модели были использованы и в настоящей работе, за исключением типа объемного элемента.

Что касается нелинейных свойств материалов, то деформационные характеристики кирпича и раствора были получены по результатам предварительно проведенных экспериментальных исследований [8] (табл.2).

Таблица 2 – Деформационные характеристики кирпича и раствора

Материал	Прочность при сжатии f_c (МПа)	Прочность при растяжении f_t (МПа)	Модуль упругости E (МПа)	Коэффициент поперечной деформации ν
1	2	3	4	5
Полнотелый керамический кирпич	25.7	1.08	11850	0.113
Раствор:				
- М 31	3.1	0.31	4600	0.23
- М 79	7.9	0.79	9210	0.19
- М 109	10.9	1.09	10580	0.17

КЭ-анализ проводился в среде Ansys Workbench, где рассматривалась объемная задача с использованием КЭ SOLID65, допускающего учет трещинообразования, и контактных КЭ CONTA174/TARGE170.



Геометрические размеры образца были приняты 510x515x120 мм при толщине растворного шва 10 мм. Для полного соответствия реальному эксперименту в КЭ-модели учитывалось также контактное взаимодействие опытного образца кладки с плитами пресса (Рис.3).

Рисунок 3 – Объемная КЭ-модель опытного образца при испытании на диагональное сжатие

Длина баз для регистрации деформаций в вертикальном и горизонтальном направлениях была принята равной 320мм.

Размер КЭ для образца был принят равным 15 мм, для плит пресса – 40 мм. КЭ-модель закреплена в нижней опорной части от перемещений в трех ортогональных направлениях. К верхней опорной части приложено усилие в вертикальном направлении.

Контакт между кладочными элементами и раствором задавался с использованием опции «frictional» с соответствующим коэффициентом трения и с учетом начального сопротивления сдвигу. Контакт между образцом и плитами прессы задавался с использованием опции «frictional» с коэффициентом трения 0.2.

Значения начального сопротивления сдвигу (f_{vo}) и угла внутреннего трения (α) были приняты на основании ранее проведенных экспериментальных исследований [9] (см. табл.3).

Таблица 3 – Характеристики сдвига образцов кладки [9]

Серия	Прочность кладочного раствора при сжатии f_m (МПа)	Нормализованная прочность кирпича f_b (МПа)	Начальное сопротивление сдвигу f_{vo} (Н/мм ²)	Коэффициент внутреннего трения α
1	2	3	4	5
КРО-1с	10.9	44.1	0.50	0.55
КРО-2с	7.9		0.39	0.68
КРО-3с	3.1		0.22	0.55

Свойства материала предполагали учет диаграммы деформирования, а также учет появления и развития трещин как в результате превышения предельных растягивающих напряжений, так и в результате превышения предельных сжимающих напряжений.

На рис.4 приведены расчетные и экспериментальные диаграммы «главные растягивающие напряжения S_3 – относительные деформации ϵ ».

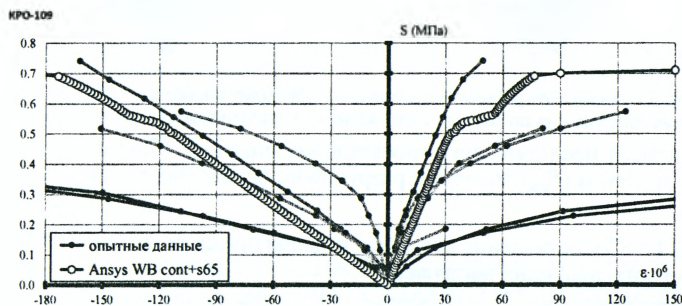


Рисунок 4 – Сравнение диаграмм деформирования при испытаниях опытных образцов на диагональное сжатие при прочности раствора $f_m=10.9$ МПа

Что касается характера трещинообразования, то при любых прочностях раствора первые трещины наблюдались в зонах швов. Образование трещин в пределах кладочных элементов происходило при высокой прочности кладочного раствора и незначительном нарушении контакта лишь в финальной стадии нагружения при превышении главными растягивающими напряжениями предела прочности камня на растяжение (Рис.5).

Анализ полученных данных показал, что характер трещинообразования и нарушение сплошности контакта определяются областью действия максимальных главных растягивающих напряжений. В данной области наблюдаются наибольшие контактные сдвигающие напряжения и происходит наиболее интенсивное раскрытие трещин.

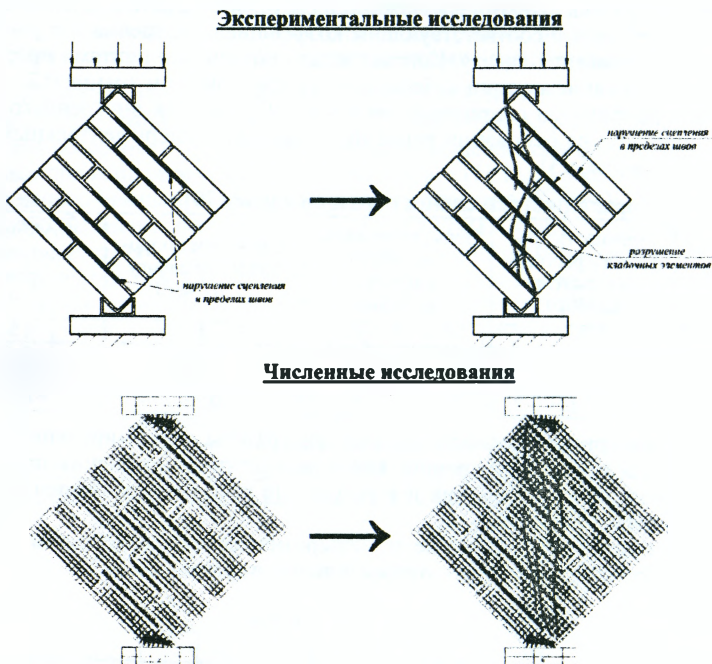


Рисунок 5 – Характер трещинообразования в образцах кладки на начальной и конечной стадиях нагружения по результатам экспериментальных и численных исследований

В таблице 4 представлено сопоставление опытных (S_{obs}) и полученных численным расчетом (S_{cal}) значений разрушающих главных растягивающих напряжений.

Таблица 4 – Сопоставление опытных и аналитических значений разрушающих главных растягивающих напряжений

Прочность кладочного раствора на сжатие f_m (МПа)	Опытные значения S_{obs} (МПа)	Аналитические значения S_{cal} (МПа)	Отклонения %
1	2	3	4
10.9	0.78	0.71	9
7.9	0.73	0.58	21
3.1	0.38	0.37	3

Из таблицы 4 следует, что разница между опытными и полученными расчетом МКЭ значениями разрушающих главных растягивающих напряжений находилась в пределах 3-21%. Данные расхождения объясняются факторами, имеющими случайный характер (нестабильностью качества растворных швов опытных образцов кладки, характером работы контактной зоны), которые трудно учесть в КЭ-моделях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали достаточную сходимость результатов численного анализа образцов каменной кладки, подверженных диагональному

сжатию, как с количественной (значения разрушающих нагрузок), так и с качественной точки зрения (характер трещинообразования).

Результаты исследований с использованием микромоделей показали их адекватность и дальнейшую возможность перехода к макромоделям каменной кладки с эквивалентными деформационными и прочностными характеристиками.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Lourenço, P.B. Computational Strategies for Masonry Structures. PhD thesis, Technical University Delft. Delft University Press, The Netherlands, ISBN 90-407-1221-2, 1996. – 220p.
2. Соколов, Б.С. Исследования сжатых элементов каменных и армокаменных конструкций: научное издание / Б.С. Соколов, А.Б. Антаков. - М.:Издательство АСВ, 2010. - 104 с.
3. Кашеварова, Г.Г. Моделирование процесса разрушения кирпичной кладки зданий в натурных и численных экспериментах / Г.Г. Кашеварова, А.Ю. Зобачева, С.И. Дубинский // Научно-технический журнал - Строительная механика и расчет сооружений – 2010. – №1 (230). – С. 69-74.
4. Методы испытания раствора для каменной кладки. Часть 11. Определение прочности на растяжение при изгибе и прочности при сжатии затвердевшего раствора: EN 1015-11:1999+A1:2006. – Brussels: CEN/TC 125, 2006. – 18 с.
5. Diagonal tensile strength tests of small walls specimens. TC76-LUM: RILEM LUMB6 1991. - Brussels: TC76-LUM, 1991. – 5 p.
6. Демчук, И.Е. Численное исследование параметров сдвига в каменной кладке / И.Е. Демчук // Строительная наука - 2014: теория, образование, практика, инновации (посвящается 55-летию ИСИА САФУ): сборник трудов Междунар.научно-техн. конф., г.Архангельск, 22-23 мая 2014г. / Под ред. Б.В. Лабудина. – Архангельск: Изд-во ООО «Типография «ТОЧКА», 2014. – С. 112-119.
7. Методы испытания каменной кладки. Часть 3. Определение начальной прочности при сдвиге: СТБ EN 1052-3-2008 – Введ.20.02.2008. – Минск: Госстандарт. – 12 с.
8. Галалюк, А.В. Влияние прочности раствора при сжатии на величину модуля упругости раствора и коэффициент Пуассона / А.В. Галалюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – Рівне, 2012. – Випуск 24. – С. 100-112.
9. Демчук, И.Е. Исследование прочности сцепления растворов в каменной кладке / И.Е. Демчук, В.Н. Деркач // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2012. – №1(73): Строительство и архитектура. – С.71-76.

УДК 693.22

Деркач В.Н.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ УЧЕТА СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ КАРКАСА С КАМЕННЫМ ЗАПОЛНЕНИЕМ

Каркасные здания с каменным заполнением являются сложными многоэлементными системами, включающими конструктивные элементы с различными прочностными и деформационными характеристиками. В настоящее время при проектировании таких зданий каркас здания и каменное заполнение в виде наружного стенового ограждения и внутренних перегородок рассматриваются отдельно друг от друга без учета взаимного влияния, с использованием различных расчетных моделей. Как правило, предполагается, что влияние заполнения на статическую работу конструкций каркаса ограничивается передачей нагрузки от собственного веса каменной кладки.

В действительности участие каменного заполнения в работе каркаса имеет многофакторный характер. Заполнение воспринимает не только вертикальную, но и горизонтальную нагрузку, заметно повышает пространственную жесткость здания, существенно влияет на распределение и значения внутренних усилий в элементах каркаса.