

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2020, №1, Том 7 / 2020, No 1, Vol 7 <https://t-s.today/issue-1-2020.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/13SATS120.pdf>

DOI: 10.15862/13SATS120 (<http://dx.doi.org/10.15862/13SATS120>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Даниш А.Б., Леденев В.В., Савинов Я.В. Кейта Я. Экспериментальное исследование несущей способности моделей стен с проемами при одноосном и двухосном нагружении // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2020 №1, <https://t-s.today/PDF/13SATS120.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/13SATS120

For citation:

Danish A.B., Ledenev V.V., Savinov Y.V., Keyta Y. (2020). An experimental study of the bearing capacity of wall models with openings under one and two-way loading. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(7). Available at: <https://t-s.today/PDF/13SATS120.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/13SATS120

УДК 624.02.98

Даниш Абдул Барей

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов, Россия
Аспирант
E-mail: abdulbareidanish@gamil.com

Леденев Вектор Васильевич

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов, Россия
Профессор
Доктор технических наук, профессор
E-mail: ledenev1938@mail.ru

Савинов Ярослав Вячеславович

Компания ООО СП «Мостострой», Тамбов, Россия
Кандидат технических наук
E-mail: savinov.yv@mail.ru

Кейта Яя

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов, Россия
Аспирант
E-mail: yaya.keyta@mail.ru

Экспериментальное исследование несущей способности моделей стен с проемами при одноосном и двухосном нагружении

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных и численных исследований напряженно-деформированного состояния моделей стен из керамзитобетона при одноосном вертикальном сжатии в условиях бокового защемления, и без него. Описаны механизмы разрушения стен с проемами. Получены функциональные зависимости между разрушающими нагрузками начала трещинообразования и влияющими параметрами. Показано, что проемы являются концентраторами напряжений, приводящие к возникновению микро и макро-повреждениям, появлению и развитию трещин, а в отдельных случаях и к потере устойчивости конструкций (стен). Полученные функции влияния могут быть включены в традиционные методы расчета с целью их уточнения.

Приведены факторы, влияющие на процесс трещинообразования и разрушения. Их моделирование позволит прогнозировать и предупреждать неблагоприятные явления.

Рассмотрены практические способы регулирования напряжений, усилий и перемещений, снижающие влияние различных концентраторов.

Проведённый в данной статье анализ механизма разрушения моделей стен позволяет изучить влияние размеров, положения и формы оконных проемов на несущую способность стен. Например, наличие концентраций напряжений в районе углов у квадратных проемов и их отсутствие у круглых. Система индикаторов часового типа ИЧ-10 позволила контролировать деформации моделей из плоскости стен, что особенно важно при условиях бокового защемления.

Экспериментальные значения прочности стен с проемами сравнили с расчетными, что позволило увидеть степень упрощения классических расчетных моделей, применяемых в практике проектирования.

Ключевые слова: трещины; модели стен; наклонные трещины; механизм разрушения; концентраторы напряжений; эмпирические зависимости

Введение

Осмотр жилых домов в Тамбове и Кабуле (Афганистан) показал, что несущие стены имеют трещины в стенах. Они различаются направлением, расположением, величиной раскрытия, причинами возникновения, возрастом, стабильностью и плотностью на единицу площади [1].

Причинами появления трещин могут быть ошибки, допущенные на стадиях изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации. Осмотр зданий в г. Тамбове и Кабул (Афганистан) показал, что во многих жилых монолитных и кирпичных зданиях имеются повреждения, среди которых наиболее распространенными являются сквозные трещины в несущих стенах. Статистических исследований в масштабах города пока не проводилось. Многие поврежденные здания продолжают деформироваться, поэтому необходим мониторинг динамики их деформирования. До сих пор не выяснена общая картина деформированного состояния гражданских зданий города. В настоящее время эксплуатирующие службы не имеют простой и достоверной методики оценки остаточной прочности несущих стен не силовыми повреждениями. Это приводит к переоценке несущей способности конструкций и дальнейшему накоплению повреждений или к выбору неправильного способа укрепления. Существующие методы оценки остаточной прочности несущих строительных конструкции с повреждениями рассматривают лишь дефекты, связанные с перегрузками и пожарами. Они отличаются не высокой надежностью. причинами этого являются: большое число влияющих факторов, учет которых почти невозможен; отсутствие совершенных расчетных моделей, наиболее полно учитывающих свойства материалов. Для совершенствования методики расчета стен необходимы всесторонние экспериментальные исследования, анализ причин повреждений. В лаборатории строительных конструкций ТГТУ в течение 20 лет проводится опыты с моделями стен различным видом нагружения, армирования и проемом. Авторы исследовали характер деформирования и разрушения стен на моделях в условия одно и двухосного напряженного состояния.

Ранее проведенными техническими обследованиями [2; 12] выявлено, что основными причинами появления трещин в зданиях этих городов являются:

- сверхнормативные смещения и отклонения из плоскости стен;

- изменение гидрогеологических условий при эксплуатации, включая подтопление территорий;
- недостаточная жесткость материалов стеновых конструкций;
- грубые инженерные ошибки при изысканиях, проектировании, строительстве, и эксплуатации (отсутствие специальных мероприятий в сложных геологических условиях, низкое качество работ, изменение расчетных схем, несоблюдение требований нормативных документов и др.);
- неучтенные температурные, коррозионные, динамические и другие внешние воздействия.

Наиболее неблагоприятными являются сквозные трещины в несущих стенах, снижающие их эксплуатационные характеристики [3].

Для эффективной заделки трещин необходимо знать:

- механические параметры поврежденных стен и здания в целом;
- причины возникновения трещин и степень их стабилизации;
- способы повышения жесткости как самих поврежденных стен и зданий;
- ремонтные материалы, механизмы и инструменты для инъекций этих материалов;
- способы регулирования напряжений и деформаций Б.А. Гарагаш 2012. Т1, Т2 [4].

Кроме того, следует установить расчетные модели несущих стен, нагрузки и воздействия.

Цели экспериментов:

1. Установить функциональные зависимости между нагрузкой трещинообразования q_{erc} , разрушающей нагрузкой q_u и влияющими параметрами:
 - размерами, числом, формой, расположением проемов;
 - граничными условиями.
2. Выявить механизм деформирования, трещинообразования и характер разрушения моделей стен в зависимости от параметров проемов и граничных условий.

Концентрация напряжений около проемов

Вопрос подробно рассматривался и рассматривается в гидротехнике [5], в механике [6].

В строительных конструкциях часто встречаются местные ослабления сечений. Напряжения у края ослабления резко возрастают, напряженное состояние становится объемным. В контурных областях, особенно в районах углов проемов возникают микро, а затем и макротрещины [7]. На практике вводят коэффициенты запаса. Разрушение является процессом накопления дефектов и повреждений до критических величин. В случае тонкостенных конструкций, например, оболочек, возможна потеря устойчивости у проема [8].

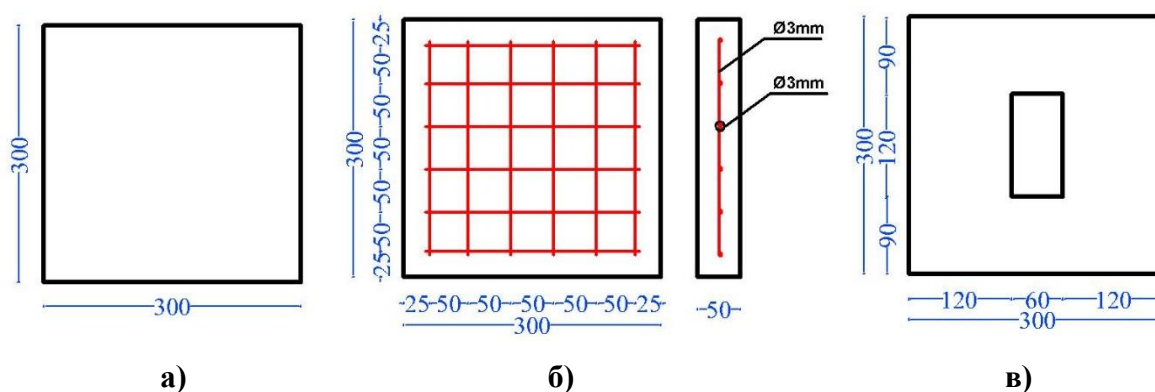
Авторы [9–11] провели всестороннее исследование поведения стен при одноосно и двухосно нагружения с отверстиями. Особое внимание было уделено панелям с коэффициентами гибкости, превышающими 30. Однако в этом исследовании рассматривались только эффекты небольших централизованных отверстий, и в результате предлагаемые методы

проектирования ограничены в типах отверстий. Поэтому необходимы дополнительные исследования для определения влияния изменения размера и расположения отверстий, таких как двери или окна. Не получена формула для определения несущей способности стены с отверстием.

В рассматриваемых экспериментах предусматривается выявить и количественно оценить влияние концентраторов напряжений (проемов различных форм) на несущую способность стены.

Методика испытаний

При проведении экспериментов использовали бетонные пластины с размерами $a \times b \times h = 300 \times 300 \times 50$ мм, где a – ширина модели, b – высота и h – толщина. Масштаб геометрического подобия $a/h = b/h$ выбран равным 10. Крупным заполнителем бетона являлся гранитный щебень и керамзит с максимальной крупностью 10...20 мм; мелким – кварцевый песок из карьера «Красненский» г. Тамбова с модулем крупности $M_k = 1,1$. В качестве вяжущего материала использован «Мальцевский портландцемент» марки 400. Расчетный класс бетона В-3,5. Бетонную смесь составом по массе Ц/Ц:В/Ц:П/Ц:Щ/Ц = 1:0,65:1,95:3,57 приготавливали в бетономешалке гравитационного типа. Затем, ее укладывали в стальную опалубку и уплотняли в течение 5...7 с на виброплощадке СМЖ-539 ПС. На третьи сутки опалубку разбирали, а образцы маркировали и упаковывали в полиэтиленовые пакеты. С одного замеса получали 6 образцов, всего было выполнено 36 образцов. Они твердели в течение двадцати восьми суток при температуре 26...28 °С. Для контроля прочности бетона каждого замеса изготавливали по 3 кубика размером 100×100×100 мм. В качестве арматуры применяли стальную проволоку $\varnothing 3$ мм (рисунок 3б). Распределенную нагрузку передавали на образец через прокладку из трехслойной фанеры. Испытания проводили на гидравлическом прессе ИП-500. Нагрузку на образец увеличивали со скоростью 4 кН/с до его разрушения. Фиксировали нагрузку трещинообразования F_{cr} , и разрушения образца – F_{dis} (таблица 1–2). Определяли эмпирические зависимости разрушающей нагрузки от параметров начальных дефектов, представленных в относительных величинах. В ходе исследования контролируемый параметр изменяли ступенями, число ступеней применим не менее 10. Повторность опытов составляли 3...5. Опыты проводили с шестью моделями стен (рисунок 1) изготовленных из керамзитобетона.



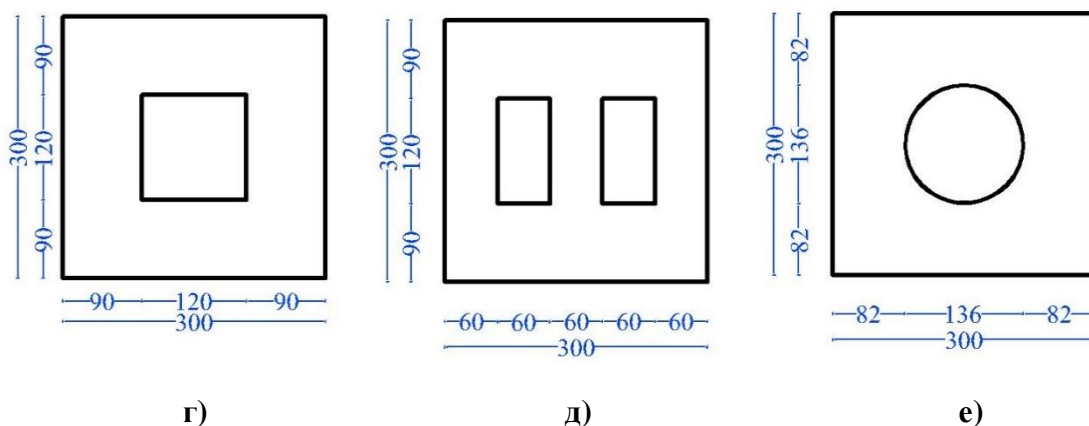


Рисунок 1. Виды моделей: (а) МС-1 – неармированная модель без проёмов; (б) МС-2 – армированная стенкой модель без проёмов; (в) МС-3 – неармированная модель стен с проёмом 60×120; (г) МС-4 неармированная модель стен с проёмом 120×120; (д) МС-6 – неармированная модель с круглым отверстием диаметром $D = 136$; (е) МС-5 – неармированная модель стен с двумя симметрично расположенными проемами 60×120

Нагружение моделей проводили в условиях свободного одноосного (рисунок 2а) и одноосного вертикального сжатия с защемлением боковых граней (б). Была разработана принята в работу следующая программа экспериментов (табл. 1):

Таблица 1
Программа экспериментов

П.п.	Количество моделей, шт.	Варьируемый параметр	Вид моделей
1	2	Без проема, без арматуры	МС-1
2	2	Без проема, с армированием	МС-2
3	3	С квадр. проемом 0,2b×0,4h без армирования	МС-3
4	3	С квадр. проемом 0,4 b ×0,4h без армирования	МС-4
5	3	С круглым проемом 0,45h, без армирования	МС-5

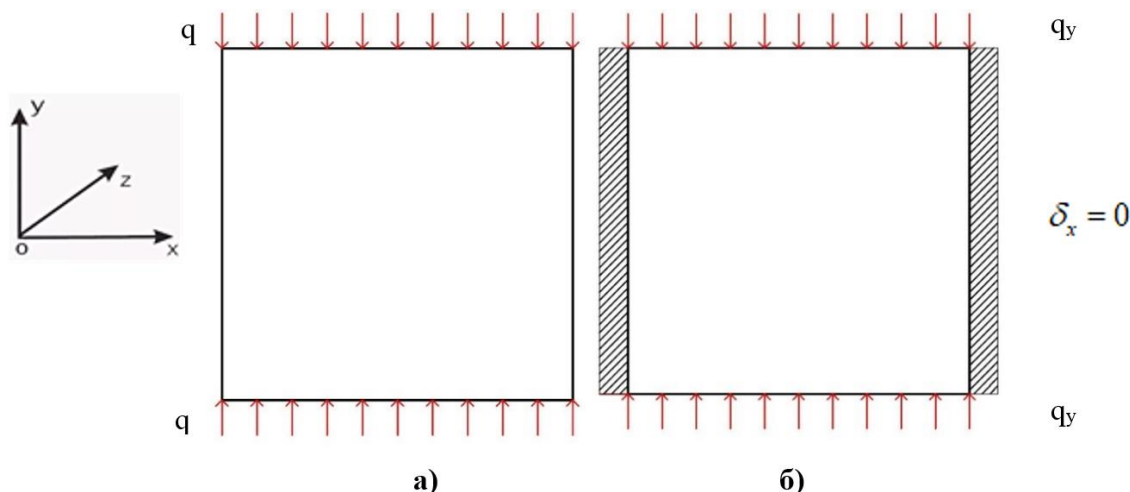
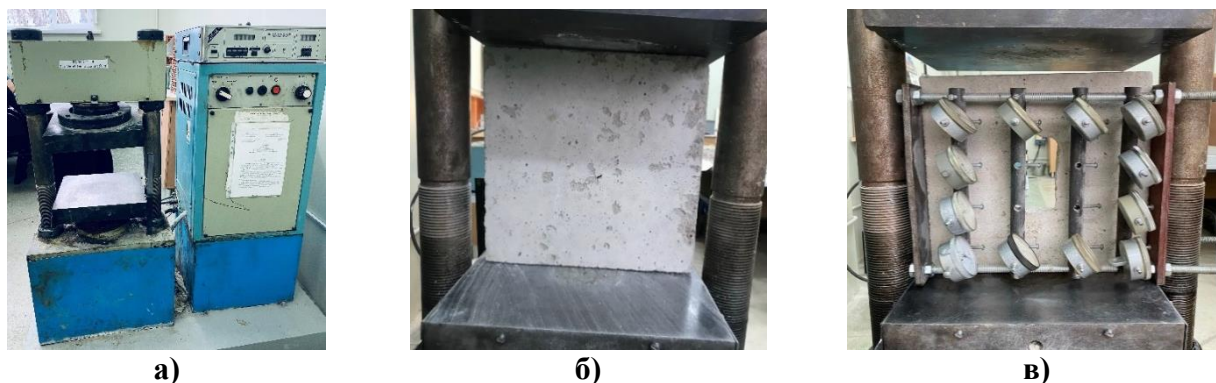


Рисунок 2. Схемы образцов при свободном одноосным (а) и одноосным нагружением при защемлении боковых граней модели (б)

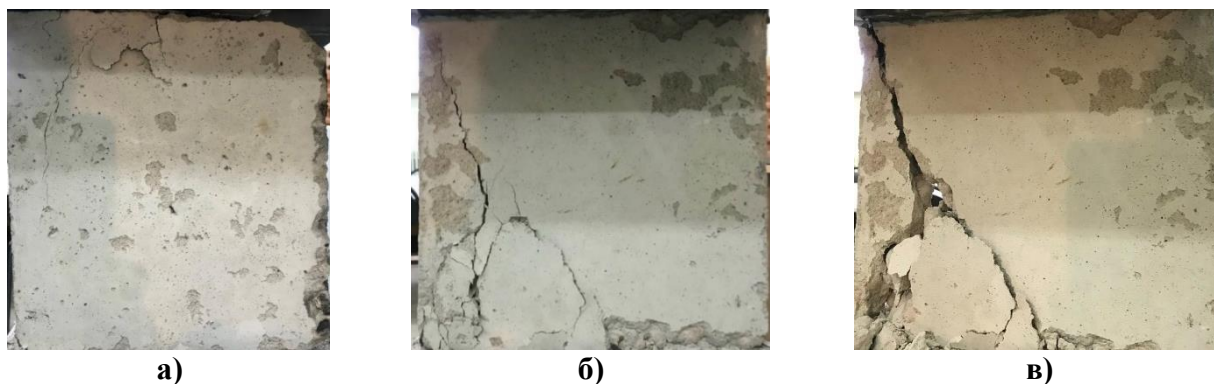
Модели устанавливали вертикально между плитами прессы (рис. 3а,б), боковые перемещения модели измеряли 14-ю индикаторами ИЧ-10 (рисунок 3в).



а) б) в)
Рисунок 3. Испытательная установка: (а) гидравлический пресс ИП-500; (б) модель стены; (в) модель стены с индикаторами ИЧ-10 для измерения боковых деформаций модели

Характер трещинообразования и разрушения МС-1

Зарождается и развивается наклонная трещина, исходящая верхнего угла и входящая в нижней противоположный (рисунок 4). Угол наклона и горизонту около 55° . Одновременно осыпается бетон боковых граней (30 кН), откалываются лещадки (> 35 кН), концентрируясь вдоль магистральной трещины (рисунок 4).



а) б) в)
Рисунок 4. Картины разрушения неармированных модели стен при одноосном нагружения: (а) разрушения верхнего (б) и (в) разрушения нижнего угла

Модели, армированные одной сеткой МС-2

Очаг разрушения появился в верхнем углу. Здесь формировались наклонные трещины. Перед разрушением образовалась наклонная магистральная трещина (рисунок 5).



а) б)
Рисунок 5. Картины разрушения армированных моделях стен МС-2 при одноосном нагружения: (а) трещинообразования; (б) разрушения

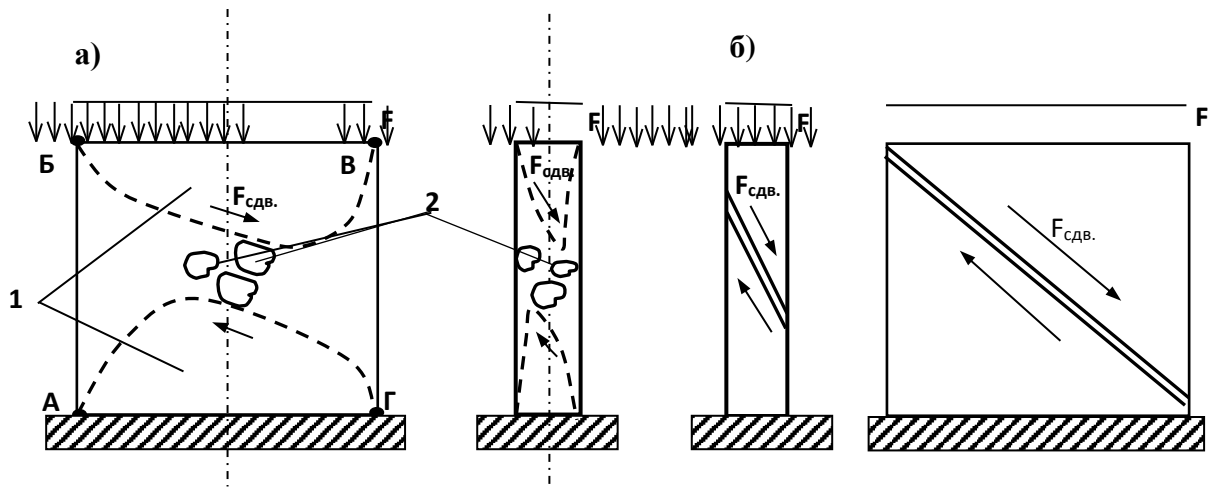


Рисунок 5.1. Испытание моделей стены без начальных дефектов:
 (а) механизм сдвигового разрушения в плоскости (б) из плоскости стены

При нагружении образцов в приопорных зонах возникают концентрации сжимающих напряжений σ_x (рисунок 5.1а). С приближением к центру пластин эти концентрации затухают в глубине образца. В результате образуются «пирамиды» сжатого бетона как в плоскости, так и из плоскости стены, которые перемещаются навстречу друг другу. Случайные включения крупного заполнителя 2 нарушают соосность движения «пирамид» 1 (рисунок 5.1а,б), что приводит к сдвигу оси встречного движения «пирамид» относительно друг друга. Случайное сочетание твердых включений в материале стены определяет по какой плоскости происходил сдвиг.

Модели, без армирования с проемом $0,2b \times 0,4h$ МС-3

Рассмотрим случай испытания модели с симметрично расположенным квадратным проёмом в условиях бокового обжатия и без.

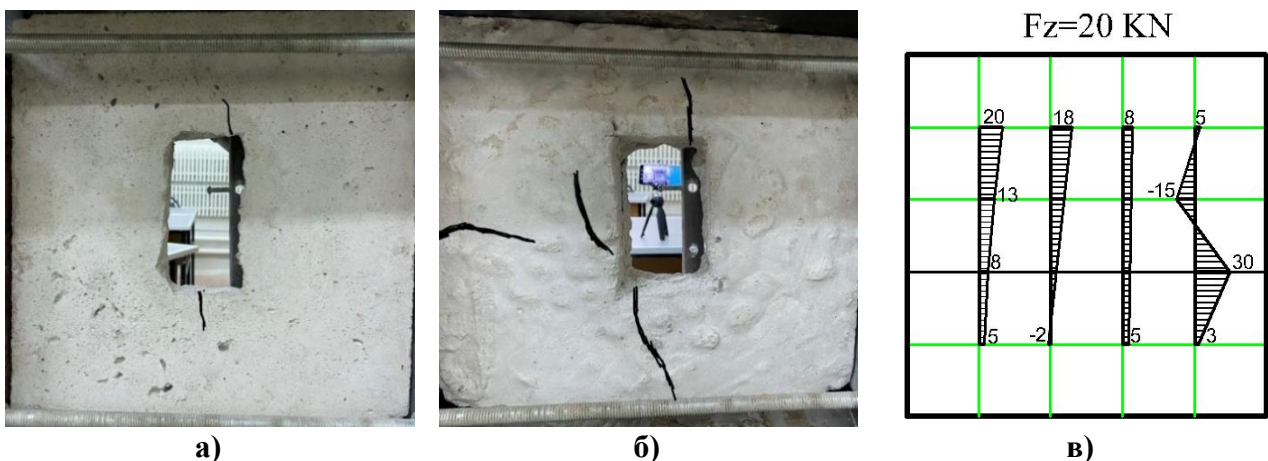


Рисунок 6. Первые трещины, появившийся в моделях МС-3 при одноосного (а), двухосного (б) сжатия и эпюры боковых горизонтальных перемещений (в)

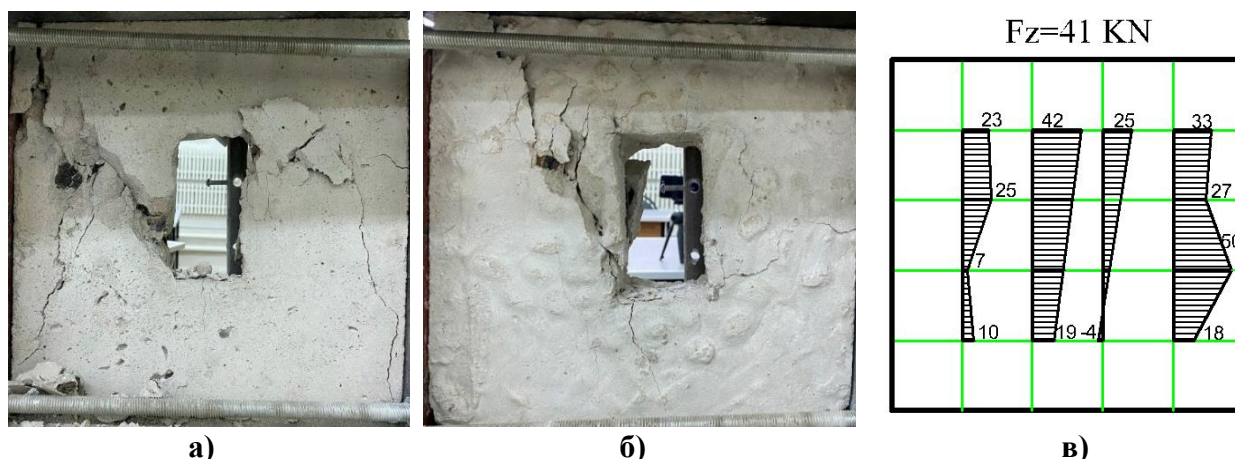


Рисунок 7. Картины трещин в моделях МС-3 от разрушающей нагрузки при одноосного (а), двухосного (б) сжатия и эпюры боковых горизонтальных перемещений (в)

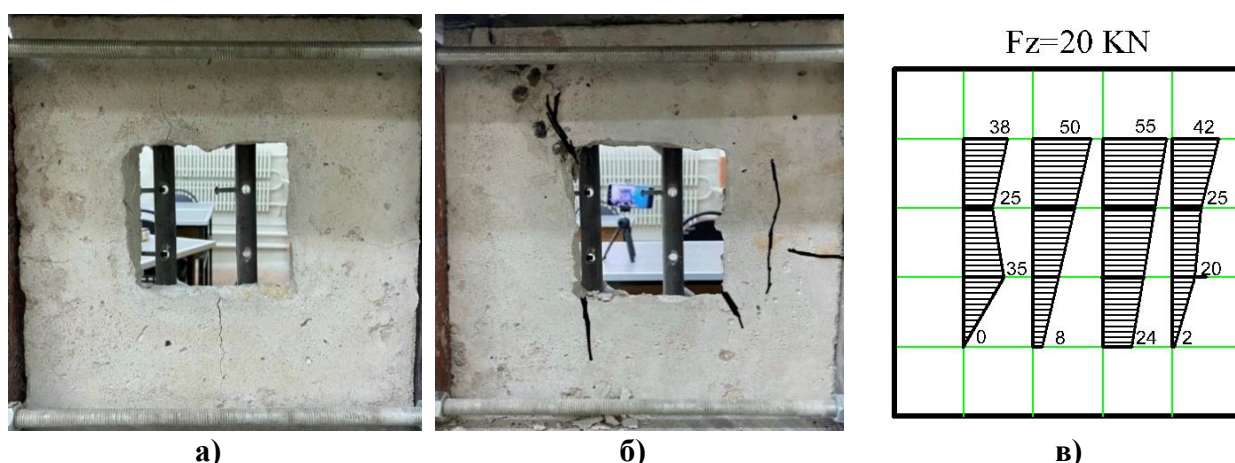


Рисунок 8. Начальные трещины в моделях МС-4 при одноосном (а), двухосном (б) сжатия и эпюры боковых горизонтальных перемещений (в)

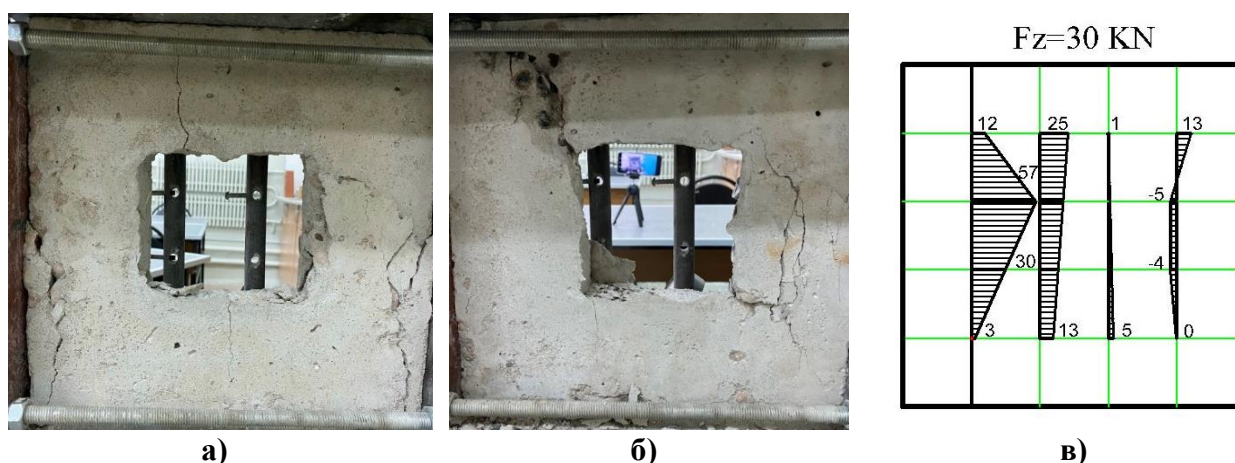


Рисунок 9. Картины трещин в моделях МС-4 от разрушающей нагрузки при одноосного (а), двухосного (б) сжатия и эпюры боковых горизонтальных перемещений (в)

Исследование механизма разрушения

Стены с оконным проемом работают как два независимые столба – простенка жестко соединенных хрупкими горизонтальными перемычками снизу и сверху. Модели чаще всего разрушались по асимметричному и реже – по симметричным механизмам (рисунки 8–10).

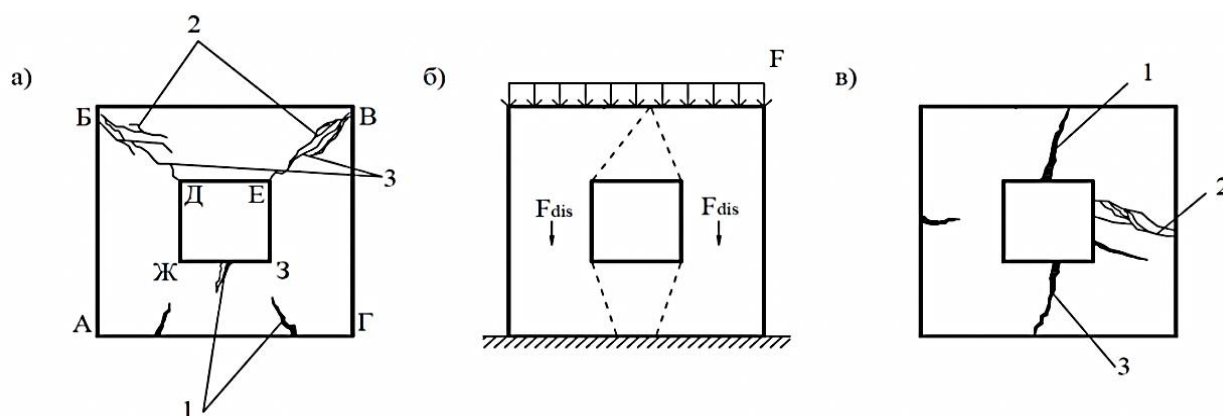


Рисунок 10. Модели стены с оконными проемами: (а) картина трещин и механизм разрушения; (б) картина трещин и механизм разрушения при симметричной схеме деформирования; (в) картина трещин при асимметричной схеме

Случай 1, симметричная схема разрушения, наблюдаемые процессы

При $\bar{F}_{dis} = 0,22$ под проемом появлялись вертикальные трещины 1 (рисунок 10а). Затем в верхних углах проема Д и Е раскрывались многочисленные наклонные трещины 2 в направлении к т. Б и С соответственно. Вдоль сечений БД и ВЕ начиналось смятие бетона и скол лещатки 3 наступало разрушение.

Механизм разрушения

На участке стены под проемом сжимающие усилия F_{com} отсутствовали. По линии действия силы F_{com} появились трещины разрыва 1 (рисунок 10б). В надоконной и подоконной части возникали растягивающие горизонтальные напряжения σ_x (рисунок бг,д), где раскрывались трещины разрыва 1 и 3. В приоконных участках простенков концентрировались сжимающие напряжения σ_y и происходил сдвиг 2.

Случай 2, асимметричная схема разрушения, наблюдаемые процессы

Трещина 1 появилась (рисунок 10в) при $\bar{F}_{dis} = 0,875$. В одном из простенков раскрывались многочисленные наклонные 2 и горизонтальная 3 трещины, вызывавшие разрушение.

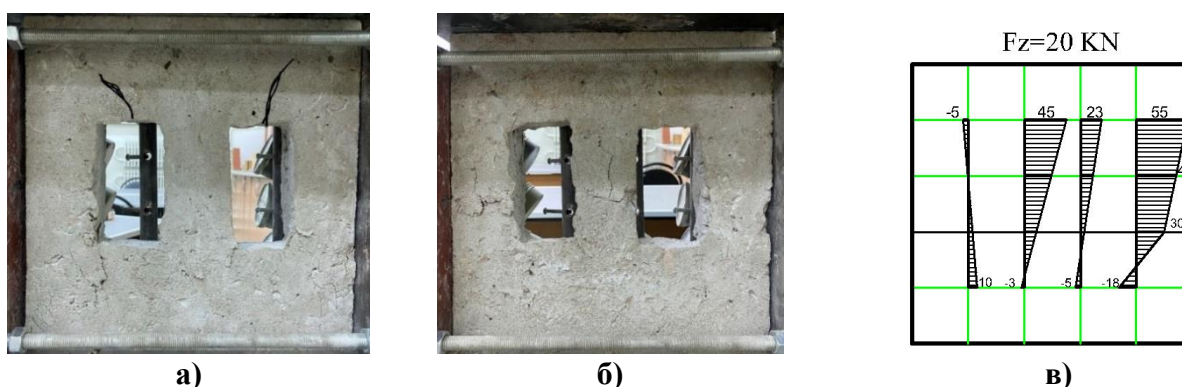


Рисунок 11. Начальные трещины в моделях МС-5 при одноосном (а), двухосном (б) сжатия и эпюры боковых горизонтальных перемещений (в)



Рисунок 12. Картины трещин в моделях МС-5 от разрушающей нагрузки при одноосного (а), двухосного (б) сжатия и эпюры боковых горизонтальных перемещений (в)

Модели, без армирования с круглым проемом $D = 0,45h$ МС-5

В зависимости от наличия боковых ограничений деформаций и без них, образцы с круглыми проемами деформировались по разным схемам. Схема 1. Без бокового ограничения над проемом образовывался расклинивающий эффект, где возникали растягивающие горизонтальные напряжения, в результате один из простенков изгибался. Образовывалась первая вертикальная трещина над проемом в зоне растяжения и одновременно с ней росла и горизонтальная трещина в зоне изгиба простенка (рис. 13а). Схема 2. При боковом ограничении расклинивающие силы компенсируются силами обжатия (защемления) в результате разрушение происходит по механизму сдвига в зонах наименьшего сечения простенков, т. е. в их средних зонах (рис. 13б).

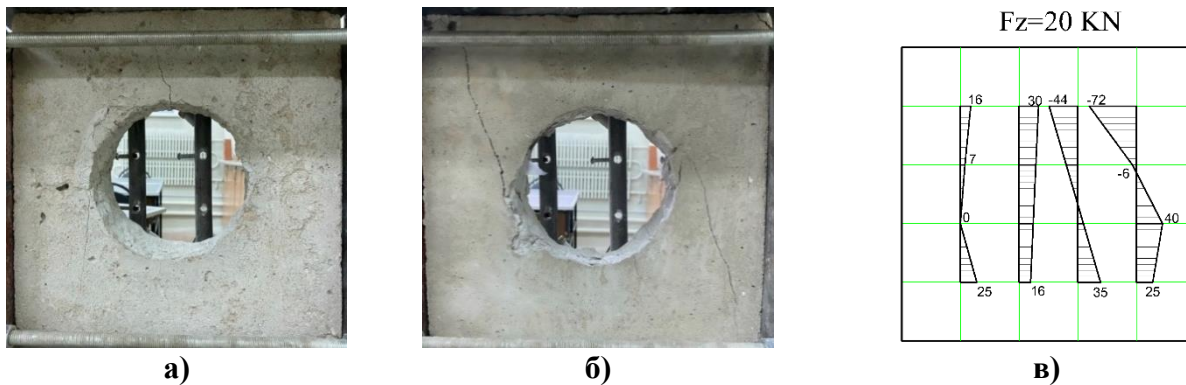


Рисунок 13. Начальные трещины в моделях МС-6 при одноосном (а), двухосном (б) сжатия и эпюры боковых горизонтальных перемещений (в)

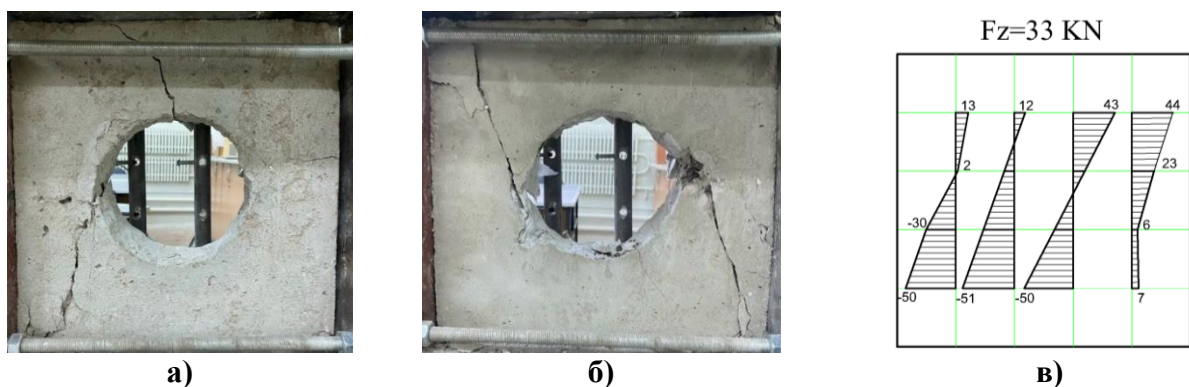


Рисунок 14. Картины трещин в моделях МС-6 от разрушающей нагрузки при одноосном (а), двухосном (б) сжатии и эпюры боковых горизонтальных перемещений (в)

Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Выполним расчет прочности стен с проемами согласно СНиП 2.06.08-87. Расчетная высота модели стены равна ее геометрической высоте в свету $l_0 = 30$ см. Определяем гибкость простенков:

$$\lambda = h \div i = 30 \div 0,53 = 56,6$$

По найденным значениям гибкости определяем коэффициенты продольного изгиба: $\varphi = 0,81$. Расчетная разрушающая нагрузка для модели стены без дефектов будет равна прочности поперечного сечения стены при действии вертикальных нагрузок с учетом коэффициента продольного изгиба φ :

$$F_{расч. dis} = q_l \times A = \varphi R_b A,$$

где для керамзитобетона класса В3,5 кубиковая прочность R_b соответственно равна 45,8 кгс/см². В случае ограничений боковых перемещений стены при защемлении мы можем принять коэффициент продольного изгиба равным $\varphi = 1$. Полученные таким образом расчетные значения разрушающей нагрузки $F_{расч. dis}$ для стен с проемами сведены в таблицу 3. Экспериментальные данные приведены в табл. 2 и 3, расчетные в табл. 4.

Таблица 2

Результаты опытов при одноосном нагружении моделей

Марка модели	Тип проема	Прочность бетона R_b , кН	Геометрические характеристика моделей, мм							F_{crc} , кН	F_{dis} , кН
			h	b	T	h'	b'	h'/h	b'/b		
МС-1	без проемов	32	300	300	50	-	-	-	-	35	69
МС-2	без проемов	80	300	300	50	-	-	-	-	85	182
МС-3	окон. прям.	32	300	300	50	120	60	0.4	0.2	20	50
МС-4	окон. квад.	32	300	300	50	120	120	0.4	0.4	7	29
МС-5	2 окон. прям.	32	300	300	50	120	60	0.4	0.2	30	40
МС-6	окон. круг.	32	300	300	50	136	136	0.45	0.45	10	15

Примечание: Обозначения: h , b и t – высота, ширина и толщина моделей; h' , b' – высота и ширина прямоугольного проема и диаметр круглого; F_{crc} – нагрузка трещинообразования; F_{dis} – разрушающая нагрузка.

Таблица 3

Результаты опытов при двухосном нагружении моделей

Марка модели	Тип проема	Прочность бетона R_b , кН	Геометрические характеристика моделей, мм							F_{crc} , кН	F_{dis} , кН
			h	b	T	h'	b'	h'/h	b'/b		
МС-3	окон. прям.	45	300	300	50	120	60	0.4	0.2	30	57
МС-4	окон. квад.	45	300	300	50	120	120	0.4	0.4	20	41
МС-5	2 окон. прям.	45	300	300	50	120	60	0.4	0.2	20	30
МС-6	окон. круг.	45	300	300	50	136	136	0.45	0.45	20	33

Примечание: Обозначения: h , b и t – высота, ширина и толщина моделей; h' , b' – высота и ширина прямоугольного проема и диаметр круглого; F_{crc} – нагрузка трещинообразования; F_{dis} – разрушающая нагрузка

Таблица 4

Расчетные значения разрушающей нагрузки $F_{расч. dis}$

Марка модели	Тип проема	Прочность бетона R_b , кгс/см ²	Ширина простен v , см	$F_{расч. dis}$, кН (без защемления)	$F^*_{расч. dis}$, кН (с защемлением)
МС-1	без проемов	45.8	30	54.67	67.5
МС-3	окон. прям.	45.8	22.5	41.00	50.62
МС-4	окон. квад.	45.8	15	27.33	33.75
МС-5	2 окон. прям.	45.8	15	27.33	33.75
МС-6	окон. круг.	45.8	15	27.33	33.75

Сравнение расчетных и экспериментальных величин приведено на рисунок 15.

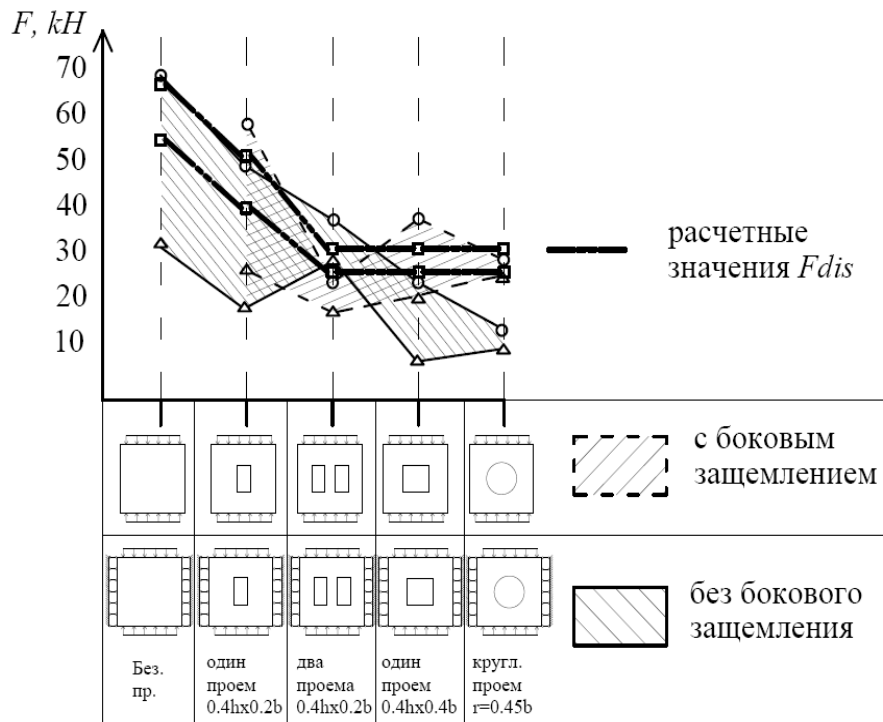


Рисунок 15. Диаграммы распределения расчетных величин F_{dis} , для разных граничных условий

Из рисунка 15 мы видим, что боковое защемление эффективно при одиночных прямоугольных и, особенно в круглых проемах, где происходит увеличение несущей способности на 20 и 75 % соответственно. В случае с двумя проемами защемление не дало значительного эффекта, что объясняется отсутствием влияния защемления на средний свободный простенок, который разрушается в первую очередь.

Выводы

1. Несущая способность моделей с одним или двумя оконными проемами при одинаковой ширине простенков, приблизительно одинакова. Она пропорциональна ширине простенков, которые воспринимают вертикальную нагрузку, при этом надоконные и подоконные простенки в работе почти не участвуют.
2. Расчетные значения F_{dis} достаточно близки к экспериментальным, что свидетельствует о хорошей сходимости экспериментальных данных кроме случая с двойным проемом. Здесь экспериментальные данные значительно ниже расчетных.
3. Боковое обжатие увеличивает несущую способность моделей стен на 30...45 % (рисунок 15). В случаях, когда $F_x = 0$ обжимное устройство ограничивало только распорные напряжения. Эффект усиления достигал 30...35 %.
4. В случае с двумя проемами боковое ограничение перемещений эффекта не дало (см. среднюю часть рис. 15). Что объясняется отсутствием влияния защемления на средний простенок между проемами.
5. Оконные проемы круглой формы в случаях без бокового фиксирования снижают прочность стен значительно сильнее квадратных и прямоугольных. Что можно

объяснить возникновением в них значительных распорных усилий с концентрацией в средней части стены (рисунок 13, 14).

ЛИТЕРАТУРА

1. Даниш А.Б. Повреждения стен близко расположенных зданий вследствие взаимного влияния их фундаментов / А.Б. Даниш, В.В. Леденев, Я.В. Савинов // строительная механика и конструкции. – Воронеж. – 2019. – № 3. (22). – С. 109–117.
2. Даниш А.Б. Высокая изменчивость деформативных свойств грунтов как основная причина повреждений каменных зданий в г. Тамбове / А.Б. Даниш, В.В. Леденев, Я.В. Савинов // строительная механика и конструкции. – Воронеж. – 2019. – № 3. (22). – С. 98–108.
3. Леденёв В.В. Прочность и трещиностойкость стен: монография / В.В. Леденёв. – Тамбов: изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», – 2015. – 224 с.
4. Гарагаш Б.А. Надежность пространственных систем "основание-сооружение" при неравномерных деформациях основания в 2-х томах. Том 1. – М.: АВС, 2012. – 416 с.
5. Гастев В.А. Краткий курс сопротивления материалов / В.А. Гастев. – М.: Наука, 1977. – 456 с.
6. Метод фотоупругости: в 3-х т. Т. 1. Решение задач статики сооружений. Оптически чувствительные материалы / Н.А. Стрельчук, Г.Л. Хесин, Ф.Ф. Губин и др.; под общ. ред. Г.Л. Хесина. М.: Стройиздат, 1975. – 311 с.
7. Аверин А.Н. Анализ напряженно-деформированного состояния конечноэлементных моделей балки-стенки с прямоугольным вырезом / А.Н. Аверин, Е.А. Шевченко // Строительная механика и конструкции. – Воронеж. – 2011 – № 2(7). – С. 32–43.
8. Даниш А.Б. Плоская задача о развитии начальной наклонной трещины по механизмам отрыва и сдвига в бетонном образце в условиях одноосного сжатия / А.Б. Даниш, В.В. Леденев, Я.В. Савинов, Я. Кейта. – Системные технологии. – 2019. – № 33. – С. 10–15.
9. Doh J.H. Evaluation of experimental work on concrete walls in one and two-way action / J.H. Doh, S. Fragomeni // Australian Journal of Structural Engineering. – № 6 (1). – pp. 37–52, 2005.
10. Lee D.J. Finite element analysis of reinforced concrete walls with openings in one and two way action / D.J. Lee, H. Guan, J.H. Doh, S. Fragomeni // Proceedings of the 19th biennial conference on the mechanics of structures and materials. – New Zealand, 29 November – 1 December 2006, pp. 681–686, 2006.
11. Saheb S.M. Ultimate strength of R.C. wall Panels in two-way in-plane action / S.M. Saheb, P. Desayi // Journal of Structural Engineering, ASCE. – Vol. 116. № 5. – pp. 1384–1402, 1990.
12. Леденев, В.В. Распространенные виды повреждений стен и методика учета влияния их на остаточную прочность / В.В. Леденев, В.П. Емельянов, Я.В. Савинов // Вестник ТГТУ. – 2004, Т. 10 № 4–2. – С. 1094–1102.

Abdul Barei Danish

Tambov state technical university, Tambov, Russia
E-mail: abdulbareidanish@gmail.com

Ledenev Victor Vaselevech

Tambov state technical university, Tambov, Russia
E-mail: ledenev1938@mail.ru

Savinov Yaroslav Vyacheslavovich

Mostostroy Company, Tambov, Russia
E-mail: savinov.yv@mail.ru

Keyta Yaya

Tambov state technical university, Tambov, Russia
E-mail: yaya.keyta@mail.ru

An experimental study of the bearing capacity of wall models with openings under one and two-way loading

Abstract. The results of an experimental and numerical studies of the stress-strain state of wall models under one and two way action are presented.

The mechanisms of destruction of walls with openings are described. The functional dependencies between the destructive loads of the onset of crack formation and the influencing parameters are obtained.

It is shown that the openings are stress concentrators, leading to the occurrence of micro and macro damage, the appearance and development of cracks, and in some cases to the loss of stability of structures (walls).

The obtained influence functions can be included in traditional calculation methods with the aim of clarifying them.

The factors affecting the process of cracking and fracture are given. Their modeling will allow to predict and prevent adverse events.

Practical methods for regulating stresses, forces, and displacements that reduce the influence of various concentrators are considered.

The analysis of the destruction mechanism of wall models carried out in this article allows one to study the influence of the size, position, and shape of window openings on the bearing capacity of walls. For example, the presence of stress concentrations in the region of the corners of square openings and their absence in round ones. The system of indicators of the sentry type ICh-10 made it possible to control the deformation of models from the plane of the walls, which is especially important under conditions of lateral pinching.

The experimental values of the strength of the walls with openings compared with the calculated ones, which made it possible to see the degree of simplification of the classical calculation models used in design practice.

Keywords: cracks; wall models; inclined cracks; fracture mechanism; stress concentrators; empirical dependencies

REFERENCES

1. Danish A.B., Ledenev V.V., Savinov Ya.V. (2019). Damage to the walls of closely located buildings due to the mutual influence of their foundations. *Building mechanics and structures*, 3(22), pp. 109–117 (in Russian).
2. Danish A.B., Ledenev V.V., Savinov Ya.V. (2019). High variability of the deforming properties of soils as the main cause of damage to stone buildings in the city of Tambov. *Structural Mechanics and Structures*, 3(22), pp. 98–108 (in Russian).
3. Ledenev V.V. (2015). Prochnost' i treshchinostoykost' sten. [*Strength and crack resistance of walls.*] Tambov: publishing house "Tambov State Technical University", p. 224.
4. Garagash B.A. (2012). Nadezhnost' prostranstvennykh sistem "osnovanie-sooruzhenie" pri neravnomernykh deformatsiyakh osnovaniya v 2-kh tomakh. Tom 1. [*Reliability of spatial systems "base-structure" with uneven deformations of the base in 2 volumes. Volume 1.*] Moscow: ABC, p. 416.
5. Gastev V.A. (1977). Kratkiy kurs soprotivleniya materialov. [*Short course of resistance of materials.*] Moscow: Science, p. 456.
6. Strel'chuk N.A., Khesin G.L., Gubin F.F. (1975). Metod fotouprugosti: v 3-kh tomakh. Tom 1. Reshenie zadach statiki sooruzheniy. Opticheski chuvstvitel'nye materialy. [*Photoelastic method: in 3 volumes. Volume 1. The solution of the problems of the statics of structures. Optically Sensitive Materials.*] Moscow: Stroyizdat, p. 311.
7. Averin A.N., Shevchenko E.A. (2011). Analysis of the stress-strain state of the finite element models of the beam-wall with a rectangular cut. *Structural mechanics and structures*, 2(7), pp. 32–43 (in Russian).
8. Danish A.B., Ledenev V.V., Savinov Ya.V., Keyta Ya. (2019). The flat problem of the development of an initial inclined crack according to the separation and shear mechanisms in a concrete sample under uniaxial compression. *System technologies*, 33, pp. 10–15 (in Russian).
9. Doh J.H., Fragomeni S. (2005). Evaluation of experimental work on concrete walls in one and two-way action. *Australian Journal of Structural Engineering*, 6(1), pp. 37–52.
10. Lee D.J., Guan H., Doh J.H., Fragomeni S. (2006). *Finite element analysis of reinforced concrete walls with openings in one and two way action*, pp. 681–686.
11. Saheb S.M., Desayi P. (1990). Ultimate strength of R.C. wall Panels in two-way in-plane action. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 5(116), pp. 1384–1402.
12. Ledenev V.V., Emel'yanov V.P., Savinov Ya.V. (2004). Common types of wall damage and methods for accounting for their influence on residual strength. *Bulletin Tambov State Technical University*, 4–2(10), pp. 1094–1102 (in Russian).