

ПРОЧНОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ МОДЕЛЕЙ СТЕН С НАЧАЛЬНЫМИ ДЕФЕКТАМИ

В.В. Леденев, С.П. Морозов, Я.В. Савинов

Кафедра «Конструкции зданий и сооружений», ТГТУ

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: механизм разрушения; начальные дефекты; прочность; трещиностойкость; эмпирические зависимости.

Аннотация: Описаны результаты лабораторных опытов с бетонными и железобетонными моделями стен, имеющими различные начальные дефекты. Установлены функциональные зависимости между несущей способностью моделей, видами и параметрами дефектов. Изучены механизмы разрушения моделей.

На основании проведенного обследования технического состояния жилых и общественных зданий в г. Тамбове [1] выявлены наиболее распространенные дефекты стен в виде трещин, штраб, разрушенных участков кладки, различных ослаблений в сопряжениях стен с другими конструкциями. Всесторонних исследований влияния вида и размера дефекта на несущую способность стен не проводилось. Имеющиеся в литературе предложения по оценке степени снижения несущей способности [2, 3, 4] весьма ориентировочны, часто не подтверждаются на практике.

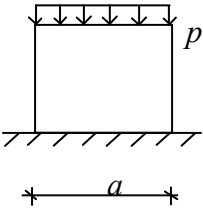
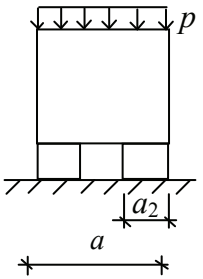
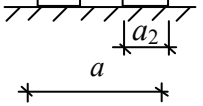
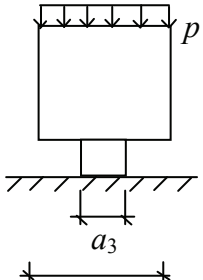
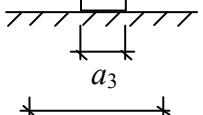
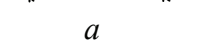
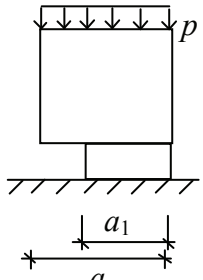
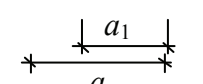
Цель проведенных нами экспериментов – установить зависимость несущей способности стен от параметров дефектов и изучить механизм разрушения моделей.

Методика испытаний. В качестве моделей стен использовали бетонные и железобетонные пластины размером 300×300×50 мм. Реальные размеры конструкции 3×3×0,5 м ($a \times b \times h$). Коэффициент геометрического подобия $\alpha = L_n/a_n = 10$ принят согласно [5]. Анализ механизмов разрушения проведен по методике [6].

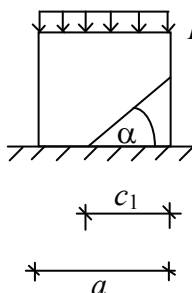
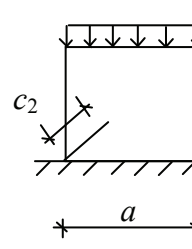
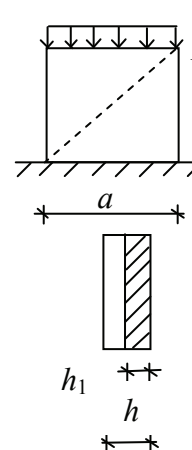
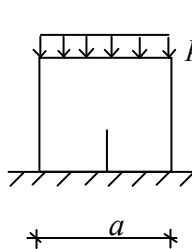
Бетон классов В15 и В20 приготавливали следующего состава: Ц/Ц:В/Ц:П/Ц:Щ/Ц = 1:0,65:1,95:3,57. Крупным заполнителем являлся гранитный щебень Павловского карьера крупностью 10 ... 20 мм; мелким – кварцевый песок с Тамбовского карьера «Красненский» с модулем крупности $M_k = 1,6$; вяжущим – Мальцевский портландцемент марки 400. Бетонные модели не армировали или конструктивно армировали сеткой с ячейками 60×60 мм из проволоки $\varnothing 4$ Вр-I. Бетон премешивали в бетономешалке гравитационного типа, укладывали в стальную опалубку и уплотняли вибрированием в течение 7 сек. На третьи сутки опалубку снимали, образцы маркировали, укладывали в полиэтиленовые пакеты и хранили при $t = 18^\circ\text{C}$ и $\varpi \approx 55\%$ в течение 30 суток. С одного замеса получали 5 образцов. Трещины в моделях создавали путем укладки полос из аргелита толщиной 0,3 мм в свежеприготовленную бетонную смесь. Всего было приготовлено 127 моделей. Эксперименты проводили на прессе ПСУ-125. Модели вертикально устанавливали между плитами. Распределенную нагрузку передавали на образец через прокладки из 3-х слойной фанеры. Неполное опирание модели на нижнюю плиту пресса создавали установкой стальных пластин толщиной 4 мм. Сосредоточенную силу передавали через стальные стержни диаметром 10 мм. Поставлено 15 серий опытов с 3-х кратной повторностью (табл. 1).

Таблица 1

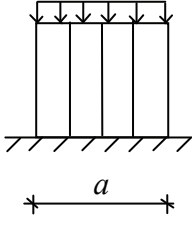
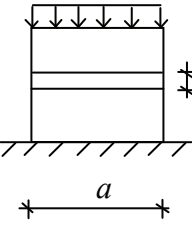
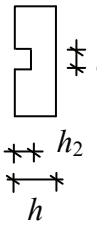
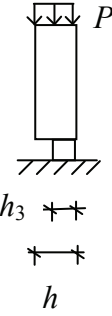
Влияние начальных дефектов в моделях стен на их несущую способность

Номер серии	Вид дефекта	Параметр дефекта		Схема образцов с дефектами	$F_{cr,m}$, кН/10	F_{dis} , кН/10	\bar{F}_{dis}
		индекс	величина				
1	2	3	4	5	6	7	8
Неармированные образцы							
1	Без начальных дефектов	-	-		18,08	18,95	1
2		\bar{a}_2	0,66		-	14,17	0,75
			0,5		-	13,17	0,7
3	Неполное опирание	\bar{a}_3	0,33		-	8,37	0,44
			0,5		9,07	9,53	0,5
			0,66		10,9	11,12	0,59
4		\bar{a}_1	0,5		-	6,27	0,33
			0,75		-	6,80	0,36

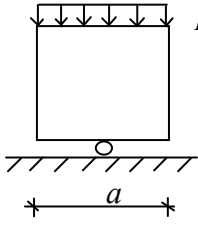
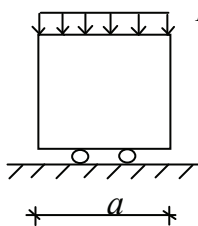
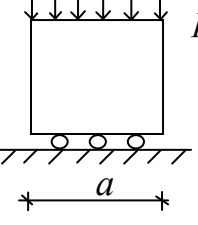
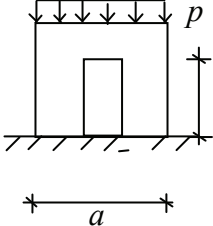
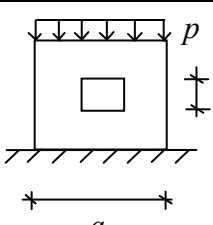
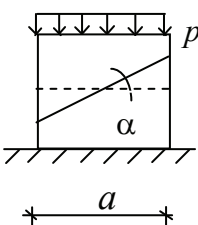
Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
5	Сквозные наклонные трещины при $\alpha = 45^\circ$	\bar{c}_1	0,25		-	17,50	0,92
			0,5		-	13,88	0,73
			0,75		-	6,76	0,36
			1		-	11,02	0,58
6	Сквозная наклонная трещина по диагонали	\bar{c}_2	0,2		-	15,93	0,84
			0,33		-	11,5	0,61
			0,5		-	12,4	0,65
			0,75		-	9,2	0,49
7	Несквозная диагональная трещина	\bar{h}_1	0,25		-	14,63	0,77
			0,5		-	11,57	0,61
			0,75		-	9,4	0,5
8	Сквозная вертикальная трещина	\bar{c}	0,25		-	20,4	1,08
			0,5		-	18,2	0,96
			0,75		-	16,9	0,89

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
9	Сквозные вертикальные трещины по всей высоте	n	1		-	13,3	0,7
			2		-	13,47	0,71
			3		7,3	7,8	0,41
			4		8,25	8,45	0,45
10	Образцы со штрабой	\bar{h}_2	0,25		5,8	6,82	0,36
			0,5			3,22	3,82
11	Не полное опирание по толщине	-	-		8	8,9	0,47

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
12	Точечное опирание по длине	n	1		2	2,2	0,12
			2		-	4	0,21
			3		5	5,7	0,3
13	Образец с дверным проемом	-	-		5	5,45	0,29
14	Образец с оконным проемом	-	-		2,10	5,53	0,29
15	Сквозные наклонные трещины	α	30		-	13,4	0,71
			45		-	14,2	0,68
			60		-	8,5	0,63
			90		-	8,2	0,66

Испытания образцов без начальных дефектов. Влияние частичного опирания. Рассмотрены случаи неполного опирания по краям, центру и с одной стороны.

Относительные величины опирания соответственно обозначены: $\bar{a}_2 = a_2/a = 0,5 \dots 1$; $\bar{a}_3 = a_3/a = 0,66 \dots 1$; $\bar{a}_1 = a_1/a = 0,5 \dots 1$.

Зависимости разрушающей нагрузки от относительных параметров получены в виде:

$$\bar{F}_u(\bar{a}_2) = 2,49(\bar{a}_2)^3 - 4,54(\bar{a}_2)^2 + 3,05\bar{a}_2; \quad (1)$$

$$\bar{F}_u(\bar{a}_3) = 1,9(\bar{a}_3)^3 - 2,64(\bar{a}_3)^2 + 1,6\bar{a}_3 + 0,12; \quad (2)$$

$$\bar{F}_u(\bar{a}_1) = 7,04(\bar{a}_1)^4 - 10,24(\bar{a}_1)^3 + 3,72(\bar{a}_1)^2 + 0,48\bar{a}_1. \quad (3)$$

Для всех опытов описаны наблюдаемые процессы и механика разрушения. Приведем данные для нескольких случаев (рис. 1...-4).

1. $\bar{F}_u = \bar{F}_u(\bar{a}_2)$. *Наблюдаемые процессы.* По мере увеличения нагрузки над кромками опор в т. А и Е появились трещины 1 (рис. 1, а). Далее, над т. А развивалась трещина 2 в наклонном направлении. В результате происходил откол над опорной части АБВ. Образец отклонялся в сторону отколовшейся части и больше не воспринимал нагрузку.

Механика разрушения. При нагружении модели над внутренними кромками опор в т. А и Е (рис. 1, б) возникли зоны концентрации напряжений 1. Вдавливаемый бетон создавал локальные растягивающие усилия F_{str} . Когда в одной из зон они достигали предельных значений, начинала расти трещина разрыва 3, выключая из работы приопорную часть образца АБВ (рис. 1, б). После скола этой части возникал эксцентриситет ОС и образец потерял устойчивость.

При снижении площади опирания на 34 % образцы теряют около 30 % несущей способности, а при снижении площади на 35 – 50 %.

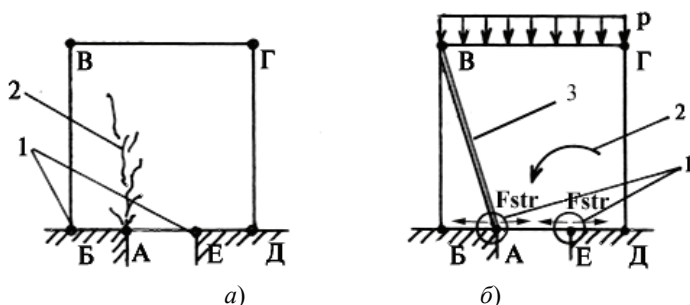


Рис. 1 Модели без начальных дефектов с неполным опиранием по краям: а) схема трещин; б) механизм разрушения

2. $\bar{F}_u = \bar{F}_u(\bar{a}_3)$. *Наблюдаемые процессы.* В начале нагружения над боковыми кромками опоры в т. А и Е (рис. 2, а) появлялись волосяные вертикальные трещины. С ростом нагрузки происходил скол лещатки 1 в надопорной части. После частичного смятия надопорной части начинала расти снизу вверх центральная вертикальная трещина 2, разделявшая образец на две части АБВЖК и ЕКЖГД. Раздвигаясь снизу, они сползали с центральной опоры и теряли устойчивость.

Механика разрушения. В процессе нагружения над краями опоры в т. А и Е (рис. 2, б) возникают зоны концентрации напряжений 1, сопровождающиеся смятием бетона 2. Отдельные зоны смятия начинают объединяться над всей опорой, обретая клиновидную форму 3. «Клин» смятого бетона, вдавливаясь в образец, раздвигает его, создавая локальные растягивающие напряжения F_{str} . Бетон деформируется по меха-

низу отрыва. В результате чего, начинает устойчиво расти вертикальная трещина 4. Смятый бетон над нижней опорой имеет низкий коэффициент трения. По нему происходит соскальзывание частей образца АБВЖК и ЕКЖГД с центральной опоры.

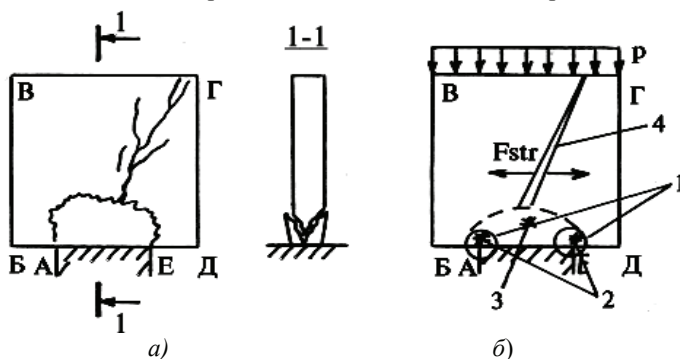


Рис. 2 Образцы без начальных дефектов с неполным опиранием по центру: а) схема трещин; б) механизм разрушения

3. $F_u = F_u(\bar{a}_1)$. *Наблюдаемые процессы.* При нагружении образца над краем опоры в т. А возникла вертикальная волосяная трещина 1, и появлялся скол лещатки 2. С увеличением нагрузки вертикальная трещина росла вверх, отсекая участок АБВГ, а скол лещатки распространялся по всей нижней при опорной зоне АБ (рис. 3, а).

Механика разрушения. Вначале напряжения с неопёртой части АБ (рис. 3, б) передавались на соседний участок (окрестность т. А), где возникла перегрузка. Далее из-за несимметричности нижнего неполного опирания возник эксцентриситет. Образец стремится повернуться вокруг т. А. Ему препятствует бетон на площадке АО, где появились дополнительные сжимающие напряжения с концентрацией в т. А. Произошло смятие 2 бетона на площадке АО. Разрушенный бетон вдавливался в образец, создавая локальные усилия F_{str} . Начала раскрываться вертикальная трещина разрыва 1, отсекая не опёртую часть АБВГ. Трещина 1 идет вдоль границы АГ, разделяющей зоны с разным напряженным состоянием.

Подобные описания сделаны для всех серий опытов.

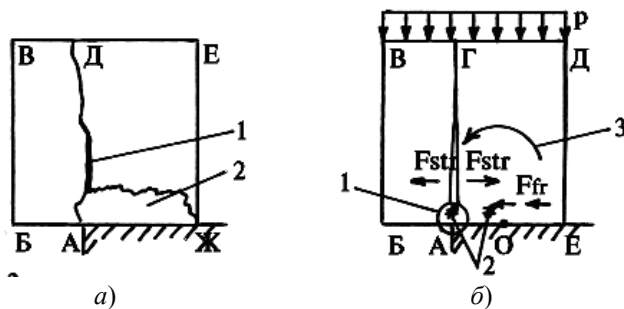


Рис. 3 Образцы без начальных дефектов с неполным опиранием с одной стороны: а) схема трещин; б) механизм разрушения

Испытания образцов с дефектами. Модели с наклонной начальной сквозной трещиной (серия 5). Эксперименты проводили при $\alpha = 45^\circ$ и $\bar{c}_1 = c_1 / a = 0,25 \dots 1$. Модели с $\bar{c}_1 < 0,75$ и $\bar{c}_1 \geq 0,75$ имели разные механизмы разрушения. Эмпирическая зависимость получена в виде

$$\bar{F}_u(\bar{c}_1) = 8,96(\bar{c}_1)^4 - 14,29(\bar{c}_1)^3 + 5,84(\bar{c}_1)^2 - 1,03\bar{c}_1. \quad (4)$$

Испытания образцов с начальной сквозной диагональной трещиной (серия 6). В опытах принимали $\alpha = 45$, $\bar{c}_2 = c_2/a = 0,2 \dots 0,75$. Пластины с $c_2 \leq 0,5$; $0,5 \leq \bar{c}_2 \leq 0,75$ и $c_2 \geq 0,75$ разрушались по разным механизмам. Влияние исследуемого параметра описано уравнением

$$\bar{F}_u(\bar{c}_2) = 1 - 1,2\bar{c}_2 + 1,35(\bar{c}_2)^2 - 0,69(\bar{c}_2)^3. \quad (5)$$

Испытания образцов с начальной несквозной диагональной трещиной при изменении ее относительной глубины (серия 7). Эксперименты проводили при $\bar{h}_1 = h_1/h = 0,25$; $0,5$ и $0,75$. Зависимость разрушающей нагрузки от параметра несквозной трещины \bar{h}_1 описана полиномом 2-й степени

$$\bar{F}_u(\bar{h}_1) = 0,77(\bar{h}_1)^2 - 1,2\bar{h}_1 + 1. \quad (6)$$

Испытания образцов с начальной вертикальной трещиной при изменении ее относительной длины (серия 8). В опытах принимали $c = c/b = 0,25$; $0,5$; $0,75$ и 1 . Зависимость несущей способности образца от относительной длины вертикальной трещины получена в виде

$$\bar{F}_u(\bar{c}) = 0,43(\bar{c})^3 + 0,17(\bar{c})^2 - 0,04\bar{c} + 1. \quad (7)$$

Испытания образцов с начальными вертикальными трещинами при изменении их числа (серия 9). Число вертикальных трещин принимали равным 1; 2; 3 и 4. Эмпирическая зависимость представлена полиномом второй степени

$$\bar{F}_u(n) = 0,029n^2 - 0,26n + 0,98. \quad (8)$$

Результаты испытаний образцов с горизонтальной штрабой при изменении ее глубины (серия 10). Эксперименты проводили при относительной высоте штрабы $\bar{h}_2 = h_2/h = 0$; $0,25$ и $0,5$. Получено следующее уравнение

$$\bar{F}_u(\bar{h}_2) = 4,69(\bar{h}_2)^4 - 11,73(\bar{h}_2)^3 + 10,59(\bar{h}_2)^2 - 4,54\bar{h}_2 + 1. \quad (9)$$

Испытания армированных и неармированных моделей без начальных дефектов. Проведены опыты по ранее рассмотренным схемам и при наличии песчаной подсыпки под нижней гранью. Арматура препятствует развитию растягивающих и сдвигающих напряжений, рассеивает локальные концентрации напряжений. Песок играет роль смазки. Трещина разрыва в этом случае возникает раньше, чем без подсыпки.

Испытание моделей стен с дверными и оконными проемами (серия 13 и 14). Эксперименты проводили с образцами из бетона класса В17,5. Размеры дверных и оконных проемов соответственно равны $0,3a \times 0,75b$; $0,3a \times 0,3b$. Внутренние углы дверей и окон являются концентраторами напряжений. Схемы трещинообразования существенно отличаются от ранее рассмотренных пластин без вырезов. Образцы разрушались по симметричным (рис. 4, а) и асимметричным (рис. 4, в) схемам.

Наблюдаемые процессы. Первые наклонные трещины I (рис. 4, а) появлялись в углах Д и Е. Они раскрывались в сторону углов Б и В. Вдоль них начинала скалываться лещатка 2. С увеличением силы p участок стены БВЕД, опускаясь вниз, раздвигал сверху простенки АБДЖ и ЗЕВГ. Образец разрушался.

Механика разрушения. При нагружении модели участок стены над проемом работает как балка, воспринимая изгибающие усилия в среднем сечении и сдвигающие усилия F_{sh} в наклонных сечениях БД и ЕВ (рис. 4, б). Дверной проем является концентратором напряжений, искажающим работу бетонной пластины. Концентрации напряжений достигают экстремальных в точках положительных перегибов линии очертания концентратора. Этими точками являются внутренние углы т. Д и Е. Отсюда начинают расти трещины сдвига 3. С увеличением внешней нагрузки до $p > R_b$, вдоль сечений БД и ЕВ происходит сдвиг ΔI по наклонным сечениям. По мере роста вели-

ны Δl простенки отклоняются на величину $\sin \Delta l$. Дальнейший прирост внешней нагрузки расходуется на совершение работы по опусканию части БВЕД и поворота 2 частей АБДЖ и ЗЕВГ вокруг т. А и Г соответственно.

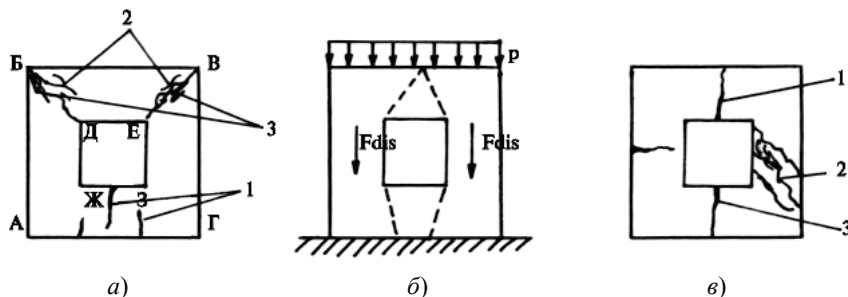


Рис. 4 Модели стены с оконными проемами:
картина трещин (а) и механизм разрушения (б) при симметричной схеме деформирования; в) картина трещин при асимметричной схеме

Влияние угла наклона естественных трещин (серия 15). Эксперимент проводили при углах $\alpha = 30, 45, 60$ и 90° . Зависимость несущей способности модели стены от угла α представлена функцией (табл. 1)

$$\bar{F}_u(\alpha) = 1,03^{-4} \alpha^2 - 0,012\alpha + 1. \quad (10)$$

Абсолютные значения разрушающих нагрузок при экспериментах с естественными трещинами ниже, чем в случае с заложенными тонкими пластинками, имитирующими трещины.

Испытания при сосредоточенной передаче нагрузок. В практике строительства такие случаи встречаются часто. В опытах под нижней гранью ставили поперек стены отдельные стержни. Их число N изменяли от 1 до 3 (табл. 1). Стержни являлись концентраторами напряжений и, местами, зарождения разрывных трещин (рис. 5). С увеличением числа опор несущая способность образцов резко возрастает

$$\bar{F}_u(N) = 0,163 \ln(N) + 0,1. \quad (11)$$

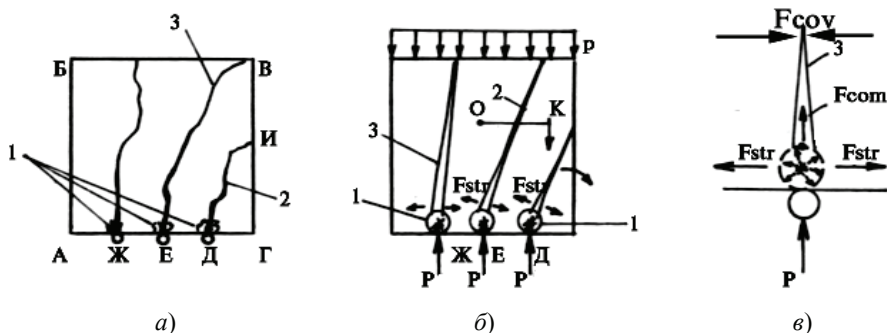


Рис. 5 Модели без начальных дефектов при действии сосредоточенной силы:
а) картина трещин; б) механизм появления первой трещины

Проведенный первый этап исследования влияния начальных дефектов на величины разрушающей нагрузки и механизм трещинообразования позволил получить эмпирические зависимости, которые могут быть использованы при оценке степени снижения несущей способности элементов. Картины пластических шарниров могут послужить основой теоретических решений по методу предельного равновесия.

На втором этапе работы планируется уточнить некоторые зависимости путем увеличения числа опытных точек, а также учесть влияние ограничения боковых деформаций стенок и степени защемления торцов плит.

Список литературы

1. Савинов Я.В., Васильев И.Л., Туманян А.Л. Особенности инженерно-геологического районирования территории Тамбова // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Вып. 4. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 1999. – С.124-126.
2. Комисарчик Р.Г. Методы технического обследования ремонтируемых зданий. – М.: Стройиздат, 1975. – 88 с.
3. Михалко. Ремонт конструкций крупнопанельных зданий. – М.: Стройиздат, 1986. – 312 с.
4. Колотилкин Б.М. Надежность функционирования жилых зданий. – М.: Стройиздат, 1989. – 376 с.
5. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформации напряжений: Справочник. – М.: Машиностроение, 1983. – 289 с.
6. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей: Учеб. пособие для строит. вузов. – М.: Высш. шк., 1991. – 288 с.

Durability and Crack Resistance of Walls Models with Initial Flaws

V.V. Ledenev, S.P. Morozov, Ya.V. Savinov

Department "Design of Buildings and Constructions", TSTU

Key words and phrases: durability; crack resistance; destruction mechanism; initial flaws; empirical dependencies.

Abstract: Results of laboratory experiments with concrete and reinforced concrete models of walls having initial flaws are described. Functional dependencies between bearing ability of the models and types and parameters of flaws are determined. Mechanisms of models destruction are studied.

Haltbarkeit und Ribfestigkeit der Wandemodelle mit den Anfangsschaden

Zusammenfassung: Es sind die Ergebnisse der Laborexperimente mit den Beton- und Eisenbetonmodellen der Wände, die verschiedene Anfangsschaden haben, beschrieben. Es sind die Funktionalabhängigkeiten zwischen der Tragfähigkeit der Modelle, den Arten und Parametern der Schaden festgestellt. Es sind die Mechanismen der Zerstörung der Modelle erlernt.

Solidité et résistance aux frissures des modèles des murs avec les défauts primaires

Résumé: On a décrit les résultats des expériences de laboratoire avec les modèles des murs en béton et en béton armé qui ont de différents défauts primaires. On a établi les dépendances fonctionnelles entre la capacité porteuse des modèles et les paramètres de défauts. On a étudié les mécanismes de la destruction des modèles.