

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МОДЕЛИ 7-ЭТАЖНОГО КАРКАСНОГО ЗДАНИЯ НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ОБРУШЕНИЕ

Приводится детальный анализ трех схем загрузки (центральное, правосторонне и левостороннее) железобетонного макета здания с размерами в плане 2x2м и ячейкой колонн 0,5x0,5м при испытании его на прогрессирующее обрушение. Детально сопоставляются теоретические и экспериментальные данные. Установлено, что равномерная картина роста деформаций как в экспериментальных, так и в теоретических исследованиях свидетельствует о перераспределении усилий в колоннах, расположенных вблизи к эпицентру разрушения, а максимальное увеличение деформаций происходит с удалением колонн первого этажа. Расположение равномерно распределенной нагрузки (центральное, левосторонне и правосторонне) оказывает особое влияние на общий процесс развития деформаций в колоннах: если колонны расположены на одном участке с приложенной нагрузкой, то деформации в них при поэтапном нагружении нарастают больше, чем в колоннах, расположенных вне зоны приложения равномерно распределенной нагрузки. Уменьшение деформаций отмечается по мере удаления вглубь от эпицентра разрушения.

Ключевые слова: железобетонный каркас, экспериментальные и теоретические данные, прогрессирующее обрушение, перераспределение усилий.

Основные проблемы и цель исследования

На сегодняшний день перед исследователями и проектантами строительного направления актуально стоит проблема исследования процесса прогрессирующего (лавинообразного) обрушения. Существует достаточное количество теоретических исследований в данном направлении [1,2,3,4,5], а экспериментальных данных по данному вопросу недостаточно. И в этих работах практически не освещены вопросы сопоставления (качественно и количественно) теоретических данных с экспериментальными исследованиями. Не освещены вопросы влияния различных видов загрузки на развитие процесса прогрессирующего обрушения.

Основная часть

В качестве экспериментальной модели рассматривался макет семиэтажного железобетонного каркаса с размерами в плане 2х2м, ячейкой колонн 0,5х 0,5м и сечением колонн 50х50мм. Высота этажа 328мм.

В предлагаемом исследовании при помощи программного комплекса SCAD office (версия 21.1) был произведен статический расчет трех вариантов схем загрузки (рис.1а, б, в) монолитного семиэтажного каркаса здания (аналог экспериментальной модели) в упругой стадии при внезапном удалении различных колонн первого этажа. Другими словами, в программном комплексе на этапе максимального нагружения подключался модуль ПО (прогрессирующего обрушения). Конструктивные схемы для трех вариантов схем были одинаковыми, различие состояло только в расположении нагрузки. Расчет производился поэтапно с аналогией экспериментальных исследований, выполненных на семиэтажном железобетонном макете [6].

Нагрузка в теоретическом расчете принималась аналогично экспериментальной и прикладывалась в три этапа:

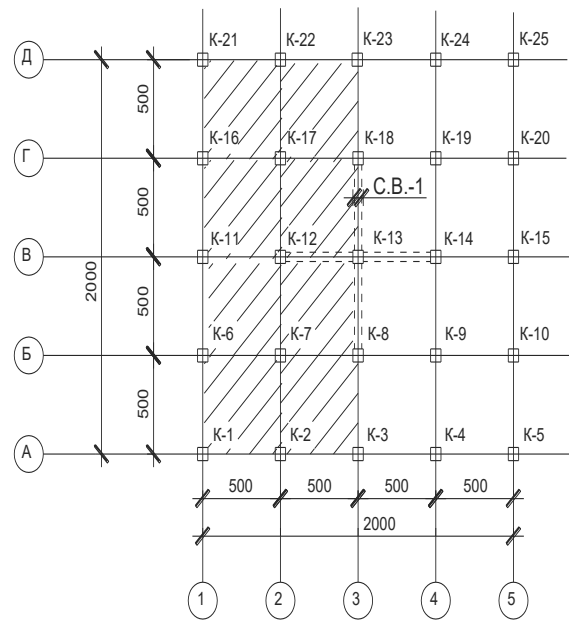
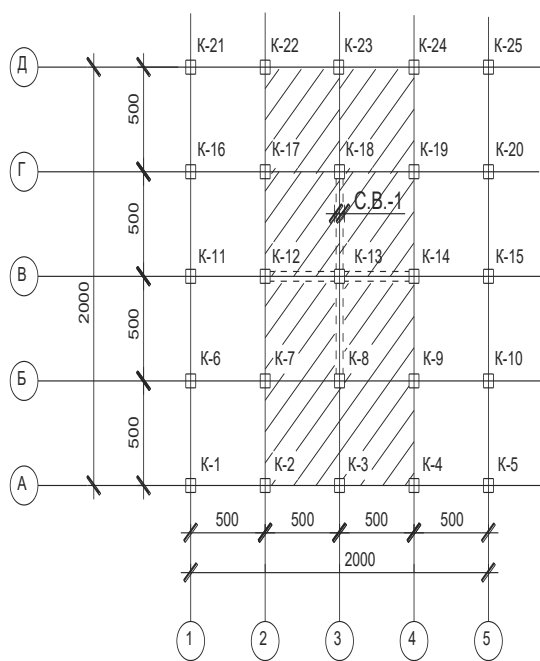
1 этап - прикладывалась равномерно распределенная нагрузка $p_1 = 15 \text{ кН/м}^2$ только на седьмом этаже;

2 этап – к существующей нагрузке p_1 добавили на оставшиеся этажи (кроме седьмого) равномерно распределенную нагрузку $p_2 = 2,4 \text{ кН/м}^2$;

3 этап - к существующей нагрузке на седьмом этаже $p_1 = 15 \text{ кН/м}^2$ добавили $p_1' = 10 \text{ кН/м}^2$, а к нагрузке $p_2 = 2,4 \text{ кН/м}^2$ на каждый последующий этаж добавили равномерно распределенную нагрузку $p_2' = 1,1 \text{ кН/м}^2$. После максимального нагружения каркаса осуществлялось удаление определенной колонны первого этажа. В первой и второй схемах нагружения удалялась средняя колонна крайнего ряда первого этажа К-3 (рис.1а,1б), а в третьей схеме удалялась промежуточная колонна первого этажа К-9 (рис.1в).

На основании обработки экспериментальных данных и полученных в программном комплексе «SCAD» теоретических данных были получены графики зависимости относительных деформаций ε от внешнего напряжения для отдельных колонн первого этажа для всех трех схем загрузки (рис.2,3,4).

В таблице 1 представлены данные сопоставления теоретических и экспериментальных величин деформаций и напряжений для колонн К-2 и К-4, расположенных симметрично относительно удаляемой колонны К-3 для I схемы загрузки.



в)

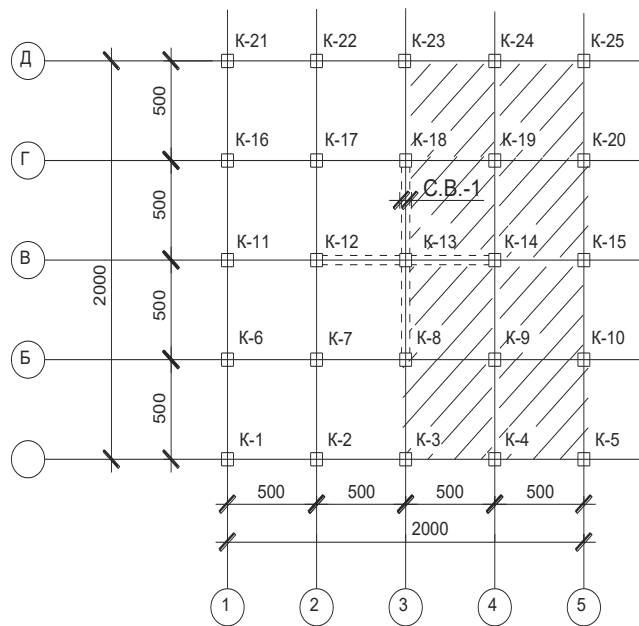


Рис.1. Схемы загрузки экспериментальной модели здания : а) центральное загрузку (схема I); б) левостороннее загрузку (схема II); в) правостороннее загрузку (схема III).

Таблица 1.

Сопоставление теоретических $\varepsilon_{теор.}$ и экспериментальных $\varepsilon_{эксп.}$ деформаций и напряжений $\sigma_{теор.}$ и $\sigma_{эксп.}$ для симметричных колонн К-2 и К-4 при I схеме нагружения.

№ этапа нагружения	К-2 (эксп.)		К-2(теор.)		К-4(эксп.)		К-4(теор.)	
	$\sigma_{эксп.}$	$\varepsilon_{эксп.}$	$\sigma_{теор.}$	$\varepsilon_{теор.}$	$\sigma_{эксп.}$	$\varepsilon_{эксп.}$	$\sigma_{теор.}$	$\varepsilon_{теор.}$
1-й этап	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,078	0,026	0,08	0,028	0,078	0,03	0,08	0,028
2-й этап	0,114	0,057	0,12	0,04	0,114	0,06	0,12	0,04
3-й этап	0,156	0,073	0,168	0,06	0,156	0,075	0,168	0,06
4-й этап	0,271	0,103	0,268	0,1	0,271	0,105	0,268	0,1

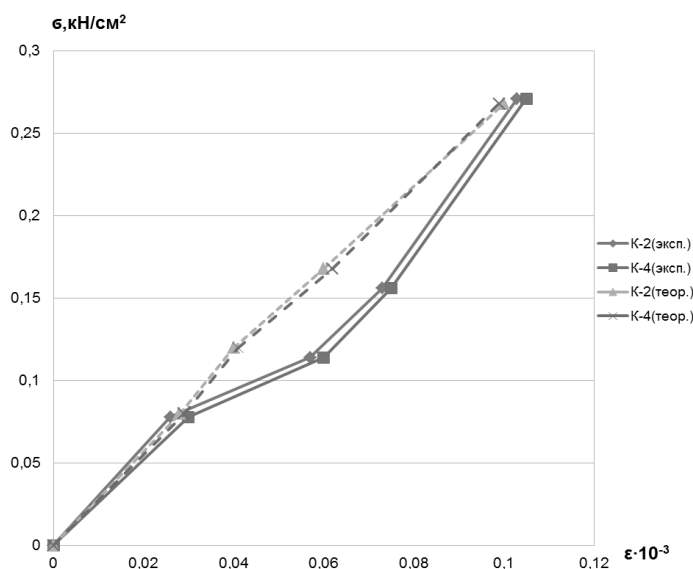


Рис.2. График экспериментальных и теоретических значений зависимости деформаций ε_n от внешних загрузений для колонн К-2 и К-4 для I схемы нагружения экспериментальной модели.

Рассматривая первый этап нагружения (без удаления колонны) при I схеме загрузки макета (центральное нагружение) в симметричных колоннах К-2 и К-4 по отношению к колонне К-3 можно пронаблюдать равномерную картину роста деформаций как в экспериментальных, так и в теоретических исследованиях от 0 до $0,03 \cdot 10^{-3}$ (табл.1). В свою очередь второй этап нагружения имеет свои отличия: в экспериментальных исследованиях рост деформаций с увеличением напряжений (до $0,114 \text{ кН/см}^2$) достиг величины $0,06 \cdot 10^{-3}$, что в два раза больше, чем на первом этапе нагружения, а в теоретических данных деформации достигли величины $0,04 \cdot 10^{-3}$, что составило *разницу роста деформаций* между экспериментальными и теоретическими данными $0,02 \cdot 10^{-3}$ (29,8%).

Третий этап загрузки в экспериментальных исследованиях увеличивает рост деформаций до величины $0,075 \cdot 10^{-3}$, а в теоретических данных деформации увеличиваются до $0,06 \cdot 10^{-3}$ и *разница роста деформаций* в этом случае составила $0,015 \cdot 10^{-3}$ (17,8%). Как видно величина разницы роста деформаций между экспериментальными и теоретическими данными очень похожа, что говорит о сопоставимых результатах при проведении экспериментальных исследований. После удаления средней колонны (4-й этап) крайнего ряда К-3 как в экспериментальных исследованиях, так и в теоретических расчетах произошел рост деформаций в симметричных (относительно удаляемой колонны) колоннах К-2 и К-4. В экспериментальных исследованиях деформации достигли величины $0,105 \cdot 10^{-3}$, а в теоретических данных – $0,1 \cdot 10^{-3}$, что составило *разницу роста деформаций* между экспериментальными и теоретическими исследованиями всего $0,005 \cdot 10^{-3}$ (2,9%). Такое отличие в величинах разниц роста деформаций между поэтапной загрузкой макета и этапом удаления колонны К-3 говорит о том, что на самом деле, как в экспериментальных исследованиях, так и в теоретических данных процесс перераспределения усилий происходит более равномерно при спокойном поэтапном нагружении, а с удалением колонны происходит наибольший скачок роста деформаций.

Из представленного графика видно, что на основании теоретических данных симметричные колонны К-2 и К-4 имеют однотипное развитие как деформаций, так и напряжений, что имеет небольшое расхождение с экспериментальными исследованиями. Данное отличие между экспериментальными и теоретическими значениями деформаций и напряжений составляет в среднем 0,5%-0,9%.

В таблице 2 представлены данные сопоставления теоретических и экспериментальных величин деформаций и напряжений для колонн К-2 и К-4, расположенных симметрично относительно удаляемой колонны К-3 для II схемы загрузки.

Таблица 2.

Сопоставление теоретических $\varepsilon_{теор.}$ и экспериментальных $\varepsilon_{эксп.}$ деформаций и напряжений $\sigma_{теор.}$ и $\sigma_{эксп.}$ для колонн К-2 и К-4 при II схеме загрузки.

№ этапа загрузки	К-2(эксп.)		К-2(теор.)		К-4(эксп.)		К-4(теор.)	
	$\sigma_{эксп.}$	$\varepsilon_{эксп.}$	$\sigma_{теор.}$	$\varepsilon_{теор.}$	$\sigma_{эксп.}$	$\varepsilon_{эксп.}$	$\sigma_{теор.}$	$\varepsilon_{теор.}$
1-й этап	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,116	0,03	0,112	0,041	0,02	0,012	0,04	0,015
2-й этап	0,188	0,06	0,184	0,068	0,039	0,013	0,044	0,016
3-й этап	0,238	0,09	0,264	0,098	0,039	0,013	0,044	0,016
4-й этап	0,336	0,15	0,356	0,132	0,101	0,038	0,108	0,04

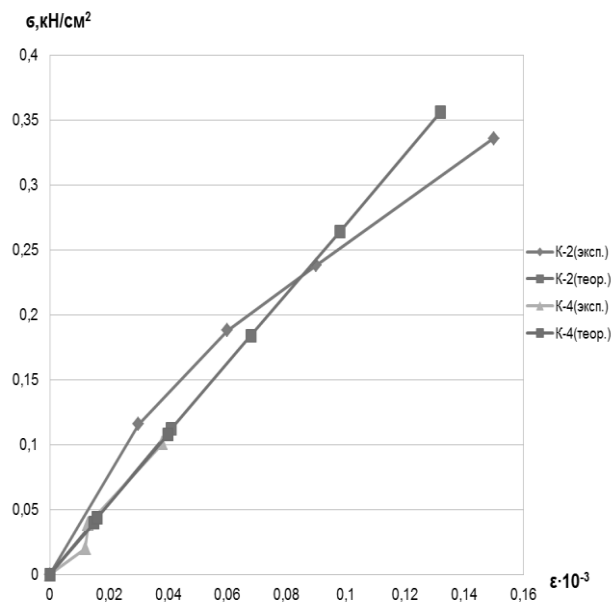


Рис.3. Графік експериментальних і теоретических значень залежності деформацій ε_n від зовнішніх загрузок для колонни К-2 для II схеми загрузження експериментальної моделі.

При II схемі загрузження (лівосторонне) перший етап загрузки збільшує напруження в колонні К-2 до величини $0,116 \text{ кН/см}^2$ і деформації зростають до $0,03 \cdot 10^{-3}$ (експериментальні дослідження), а в теоретических даних напруження досягають величини $0,112 \text{ кН/см}^2$ і деформації – $0,041 \cdot 10^{-3}$ (табл.2). *Різниця роста деформацій* між експериментальними і теоретическими даними після першого етапу загрузження склала $0,011 \cdot 10^{-3}$ (36,7%). А якщо розглядати перший етап загрузження колонни К-4, яка є симетричною колонні К-2 (відносно видаляемої колонни К-3), можна спостерігати зростання напружень до $0,02 \text{ кН/см}^2$ в експериментальних дослідженнях і до $0,04 \text{ кН/см}^2$ в теоретических даних, що в два рази більше. Деформації в свою чергу в експериментальних дослідженнях досягли величини $0,012 \cdot 10^{-3}$, а в теоретических даних – $0,015 \cdot 10^{-3}$, що склало *різницю роста деформацій* між експериментальними і теоретическими даними $0,003 \cdot 10^{-3}$ (25%). На другому етапі загрузження *різниця роста деформацій* в колонні К-2 склала $0,008 \cdot 10^{-3}$ (13,3%), а в колонні К-4 – $0,003 \cdot 10^{-3}$ (23%). Третій етап загрузження дає *різницю роста деформацій* в колонні К-2 також $0,008 \cdot 10^{-3}$ (8,9%), а в колонні К-4 не відбуваються зміни. Після видалення середньої колонни першого етапу крайнього ряду К-3 *різниця роста деформацій* в колонні К-2 досягає величини $0,018 \cdot 10^{-3}$ (12%), а в колонні К-4 всього $0,002 \cdot 10^{-3}$ (5,3%). Таке розходження в величинах різниць роста деформацій

между симметричными колоннами К-2 и К-4 можно объяснить смещением равномерно распределенной нагрузки, т.е. в первой схеме макет загружался центрально, а во второй нагрузка прикладывалась слева, и колонна К-4 не входила в область загрузки, в отличие от колонны К-2.

В целом равномерная картина роста деформаций как в экспериментальных, так и в теоретических исследованиях свидетельствует о перераспределении усилий при поэтапном нагружении и максимально увеличиваются деформации с удалением средней колонны крайнего ряда К-3.

В таблице 3 представлены данные сопоставления теоретических и экспериментальных величин деформаций и напряжений для колонн К-3 и К-5, расположенных симметрично относительно удаляемой колонны К-9 для III схемы загрузки при удалении промежуточной колонны первого ряда К-9.

Таблица 3.

Сопоставление теоретических $\varepsilon_{теор.}$ и экспериментальных $\varepsilon_{экс.}$ деформаций и напряжений $\sigma_{теор.}$ и $\sigma_{экс.}$ для колонн К-3 и К-5 при III схеме загрузки.

№ этапа загрузки	К-3 (эксп.)		К-3(теор.)		К-5(эксп.)		К-5(теор.)	
	$\sigma_{экс.}$	$\varepsilon_{экс.}$	$\sigma_{теор.}$	$\varepsilon_{теор.}$	$\sigma_{экс.}$	$\varepsilon_{экс.}$	$\sigma_{теор.}$	$\varepsilon_{теор.}$
	0	0	0	0	0	0	0	0
1-й этап	0,078	0,02	0,08	0,029	0,061	0,02	0,064	0,024
2-й этап	0,112	0,036	0,116	0,042	0,101	0,041	0,104	0,039
3-й этап	0,154	0,054	0,156	0,058	0,142	0,059	0,152	0,056
4-й этап	0,158	0,058	0,16	0,059	0,135	0,051	0,144	0,053

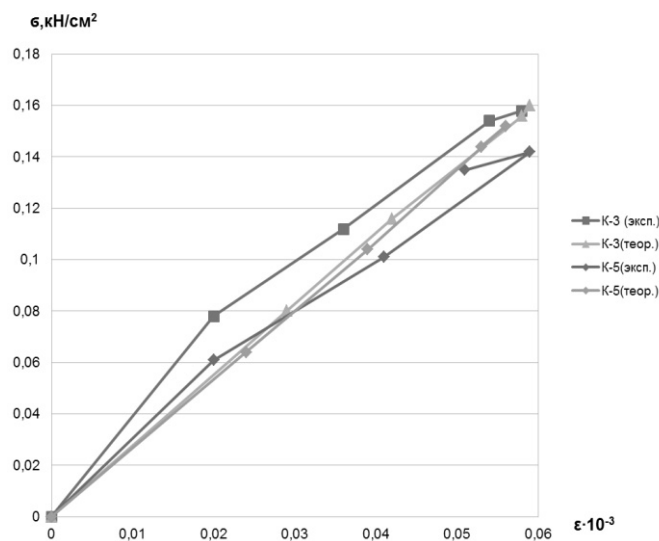


Рис.4. График экспериментальных и теоретических значений зависимости деформаций

ε_n от внешних загрузок для колонны К-5 для III схемы загрузки экспериментальной модели.

Третья схема загрузки (правосторонне загрузеие) отличалась от предыдущих двух не только расположением равномерно распределенной нагрузкой, но и удаляемой колонной. В этом случае удалялась промежуточная колонна первого этажа К-9 (рис.1в). При этом рассматривались колонны крайнего ряда К-3 и К-5 (по оси А). Первый этап загрузки в экспериментальных исследованиях увеличивает напряжения в колонне К-3 до величины $0,078 \text{ кН/см}^2$ и деформации возрастают до $0,02 \cdot 10^{-3}$, а в теоретических наблюдениях напряжения достигают величины $0,08 \text{ кН/см}^2$ (что очень близко к экспериментальным исследованиям) и деформации – $0,029 \cdot 10^{-3}$ (табл.3). Разница роста деформаций между экспериментальными и теоретическими данными после первого этапа загрузки составила $0,009 \cdot 10^{-3}$ (45%). В колонне К-5 также можно наблюдать рост как напряжений, так и деформаций. Разница роста деформаций в колонне К-5 на первом этапе загрузки составила всего $0,004 \cdot 10^{-3}$ (20%). С каждым последующим этапом загрузки деформации в экспериментальных исследованиях и в теоретических данных возрастают. Интересным представляется случай удаления промежуточной колонны К-9 (4-й этап), при котором в колонне К-3 продолжают расти деформации, а в колонне К-5 происходит перераспределение усилий и деформации уменьшаются на величину $0,008 \cdot 10^{-3}$ в экспериментальных исследованиях и – $0,003 \cdot 10^{-3}$ в теоретических данных.

Выводы

Таким образом, на основании проведенного анализа экспериментальных исследований и теоретических данных на модели семиэтажного каркасного железобетонного здания, по полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. При исследовании процесса прогрессирующего обрушения как в экспериментальных исследованиях, так и в теоретических данных происходит равномерное нарастание деформаций в колоннах, расположенных в непосредственной близости от удаляемой колонны до появления процесса прогрессирующего обрушения.

2. При учете прогрессирующего обрушения наблюдается значительный рост деформаций в соседних колоннах, а в колоннах отдаленных от разрушаемой колонны этот рост незначителен.

3. Расположение равномерно распределенной нагрузки (центральное, левосторонне и правосторонне) оказывает некоторое влияние на общий процесс развития деформаций в колоннах, т.е. если колонны расположены на одном участке с приложенной нагрузкой, то деформации в них при

поетапном загрузении нарастают больше, чем в колоннах, расположенных вне зоны приложения равномерно распределенной нагрузки.

4. Разница роста деформаций между экспериментальными и теоретическими данными прямо зависит от расположения нагрузки.

5. Процесс развития деформаций в процессе локального разрушения в реальном экспериментальном исследовании не всегда совпадает с теоретическими данными, что связано с более плавным перераспределением усилий в жестком каркасе многоэтажного здания.

Литература

1. Алмазов, В.О., Плотников, А.И., Расторгуев, Б.С. Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению. //Вестник МГСУ 2/2011.- С.15-20.
2. Кабанцев, О.В. Расчет конструкций многоэтажных и высотных железобетонных зданий с учетом изменения основных параметров расчетной модели в режимах возведения в эксплуатации. // Бетон и железобетон взгляд в будущее. 3-я Всероссийская (2-я Международная) конференция по бетону и железобетону 12-16 мая 2014г. Т.1 -С. 282-292.
3. Люблинский, В.А., Тамразян, А.Г. Безопасность несущих систем зданий при локальном изменении жесткостных характеристик несущих элементов.// Бетон и железобетон взгляд в будущее. 3-я Всероссийская (2-я Международная) конференция по бетону и железобетону 12-16 мая 2014г. Т.1- С. 90-99.
4. Тихонов, И. Н., Мешков В. З. Армирование железобетонных конструкций с целью предотвращения прогрессирующего обрушения. // Бетон и железобетон взгляд в будущее. 3-я Всероссийская (2-я Международная) конференция по бетону и железобетону 12-16 мая 2014г. Т.1- С. 379-388.
5. Choi, H. J, Krauthamer T. Investigation of Progressive Collapse Phenomenal in a Multi Story Building // 11 th International Symposium on the Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Mannheim, Germany, 5-9 May 2003.
6. Шаповалов, А.Н., Руденко, В.В. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния железобетонного здания в случае прогрессирующего обрушения. //Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 5/7(77).-С.4-9.

Анотація

У статті наводиться детальний аналіз трьох схем навантаження (центральне, правостороннє і лівостороннє) залізобетонного макету будівлі з розмірами в плані 2х2м і осередком колон 0,5х0,5м при випробуванні його на

прогресуюче обвалення. Детально зіставляються теоретичні і експериментальні дані. Встановлено, що рівномірна картина зростання деформацій як в експериментальних, так і в теоретичних дослідженнях свідчить про перерозподіл зусиль у колонах, розташованих поблизу епіцентру руйнування, а максимальне збільшення деформацій відбувається з видаленням колон першого поверху. Розташування рівномірно розподіленого навантаження (центральне, лівосторонній і правостороннє) надає особливий вплив на загальний процес розвитку деформацій в колонах: якщо колони розташовані на одній ділянці з прикладеним навантаженням, то деформації в них при поетапному завантаженні наростають більше, ніж в колонах, розташованих поза зоною розташування рівномірно розподіленого навантаження. Зменшення деформацій зазначається у міру видалення всередину від епіцентру руйнування.

Ключові слова: залізобетонний каркас, експериментальні та теоретичні дані, прогресуюче руйнування, перерозподіл зусиль.

Annotation

The article gives a detailed analysis of the three loading schemes (Central, right and left) of the concrete layout of the building with dimensions in plan 2x2m and cell columns 0,5x0,5m when tested to progressive collapse. Details are compared with theoretical and experimental data. It is established that a uniform pattern of growth of the strain both in experimental and theoretical studies show a redistribution of effort in the columns located close to the epicenter of destruction, the maximum increase in strain occurs with the deletion of columns of the first floor. The location of uniformly distributed load (Central, left and right) has a particular effect on the overall process of development of deformations in the columns: if columns are located on the same plot of applied load, strain in them when the load increasing more than in the columns outside the zone of application of a uniformly distributed load. The decrease in deformation is noted as the distance inland from the epicenter of the destruction.

Keywords: reinforce-concrete framework, experimental and theoretical information, progressive collapse, redistribution of efforts.