

УДК 624.042: 624.046

В.В. Руденко

Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, Харьков

АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ ИСПЫТАНИИ МНОГОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ОБРУШЕНИЕ

В статье приводится детальный анализ трех схем загрузки (центральное, правосторонне и левостороннее) железобетонного макета здания с размерами в плане 2х2м и ячейкой колонн 0,5х0,5м при испытании его на прогрессирующее обрушение. Детально сопоставляются теоретические и экспериментальные данные. 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. 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

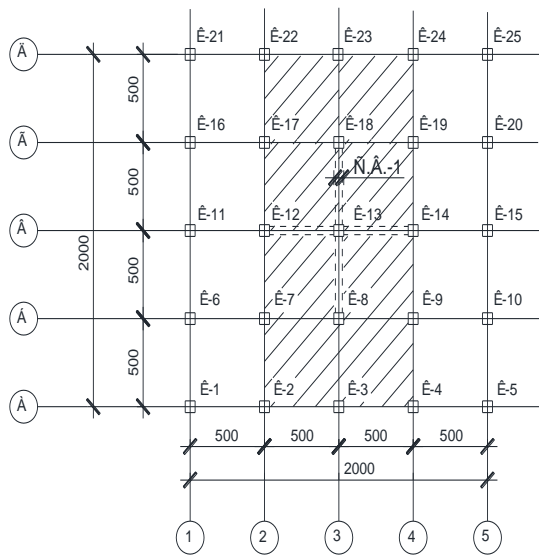
внезапном удалении различных колонн первого этажа. Другими словами, в программном комплексе на этапе максимального нагружения подключался модуль ПО (прогрессирующего обрушения). Конструктивные схемы для трех вариантов схем были одинаковыми, различие состояло только в расположении нагрузки. Расчет производился 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;

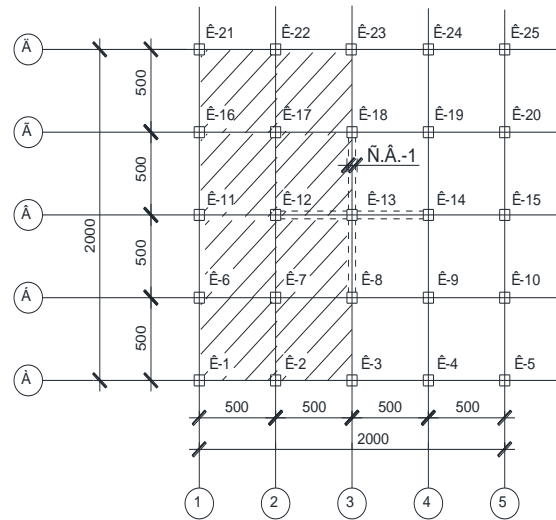
2 этап - к существующей нагрузке p_1 добавили на оставшиеся этажи (кроме седьмого) равномерно распределенную нагрузку $p_2 = 2,4 \text{ кН/м}^2$;

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 загрузки 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).

а)



б)



в)

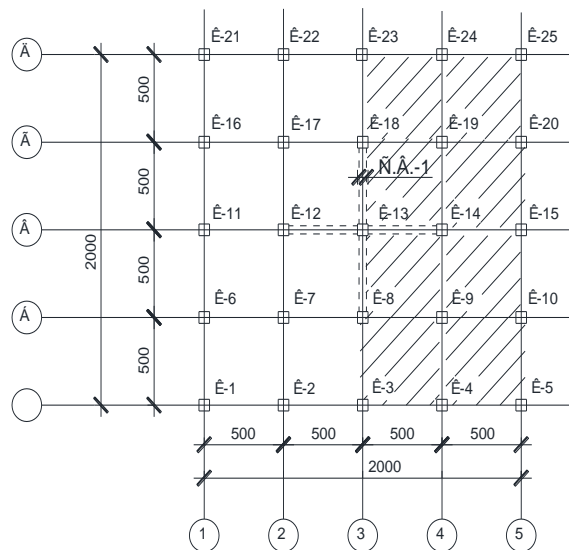


Рис.1. Схемы загрузке экспериментальной модели здания : а) центральное загрузке (схема I);

б) левостороннее загрузке (схема II); в) правостороннее загрузке (схема III).

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 загрузке (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 загрузке.

Таблица 1.

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

№ этапа загрузки	К-2 (эксп.)		К-2(теор.)		К-4(эксп.)		К-4(теор.)	
	$\sigma_{эксп.}$	$\epsilon_{эксп.}$	$\sigma_{теор.}$	$\epsilon_{теор.}$	$\sigma_{эксп.}$	$\epsilon_{эксп.}$	$\sigma_{теор.}$	$\epsilon_{теор.}$
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

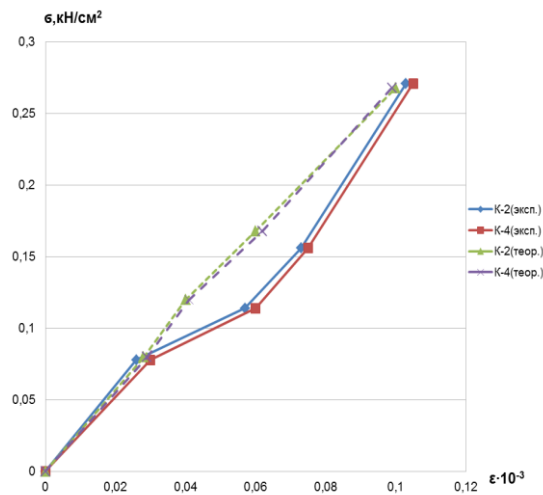


Рис.2. График экспериментальных и теоретических значений зависимости деформаций ϵ_n от внешних нагрузений для колонн К-2 и К-4 для I схемы загрузки экспериментальной модели.

Рассматривая первый этап загрузки (без удаления колонны) при I схеме загрузки макета (центральное загрузеие) 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 загрузки 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 загрузки, 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

загружении, 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 одностипное 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 $\epsilon_{теор.}$ и экспериментальных $\epsilon_{эксп.}$ 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.)	
	$\sigma_{эксп.}$	$\epsilon_{эксп.}$	$\sigma_{теор.}$	$\epsilon_{теор.}$	$\sigma_{эксп.}$	$\epsilon_{эксп.}$	$\sigma_{теор.}$	$\epsilon_{теор.}$
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

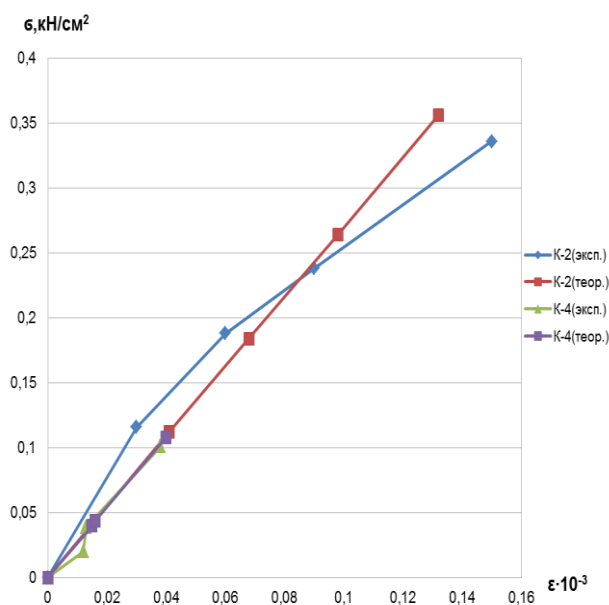


Рис.3. График экспериментальных и теоретических значений зависимости деформаций ϵ_n от внешних нагрузений для колонны К-2 для II схемы загрузки экспериментальной модели.

При II схеме загрузки (левосторонне) первый этап загрузки увеличивает напряжения в колонне К-2 до величины 0,116кН/см² и деформации возрастают до 0,03·10⁻³ (экспериментальные исследования), а в теоретических данных напряжения достигают величины 0,112 кН/см² и деформации – 0,041·10⁻³ (табл.2). Разница роста деформаций между экспериментальными и теоретическими данными после первого этапа

загрузки составила 0,011·10⁻³ (36,7%). А вот если рассматривать первый этап загрузки колонны К-4, которая является симметричной колонне К-2 (относительно удаляемой колонны К-3), можно наблюдать рост напряжений до 0,02 кН/см² в экспериментальных исследованиях и до 0,04 кН/см² в теоретических данных, что в двое больше. Деформации в свою очередь в экспериментальных исследованиях достигли величины 0,012·10⁻³, а в

теоретических данных - $0,015 \cdot 10^{-3}$, что составило *разницу роста деформаций* между экспериментальными и теоретическими данными $0,003 \cdot 10^{-3}$ (25%). На втором этапе загрузки *разница роста деформаций* в колонне К-2 составила $0,008 \cdot 10^{-3}$ (13,3%), а в колонне К-4 – $0,003 \cdot 10^{-3}$ (23%). Третий этап загрузки дает *разницу роста деформаций* в колонне К-2 также $0,008 \cdot 10^{-3}$ (8,9%), а в колонне К-4 не происходит изменений. После удаления средней колонны первого этажа крайнего ряда К-3 *разницу роста деформаций* в колонне К-2 достигает величины $0,018 \cdot 10^{-3}$ (12%), а в колонне К-4 всего $0,002 \cdot 10^{-3}$ (5,3%). Такое расхождение в величинах разниц роста деформаций 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 загрузке 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 $\epsilon_{теор.}$ и экспериментальных $\epsilon_{эксп.}$ деформаций и напряжений $\sigma_{теор.}$ и

$\sigma_{эксп.}$ 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.)	
	$\sigma_{эксп.}$	$\epsilon_{эксп.}$	$\sigma_{теор.}$	$\epsilon_{теор.}$	$\sigma_{эксп.}$	$\epsilon_{эксп.}$	$\sigma_{теор.}$	$\epsilon_{теор.}$
	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

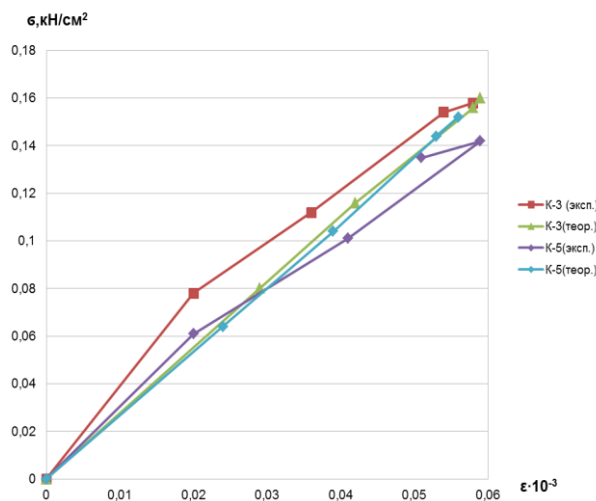


Рис.4. График экспериментальных и теоретических значений зависимости деформаций ϵ_n от внешних нагрузений для колонны К-5 для III схемы загрузки экспериментальной модели.

Третья схема загрузки (правосторонне загрузке) 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 поэтапном нагружении 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.

References

1. Almazov, V. O., Plotnikov, A. I., Rastorguev, B. S. (2011) Problems of resistance of building to making progress collapse. Vestnik MGSU 2, 15-20.
2. Kabancev, O. B. (2014). Calculation of constructions of multistory and pitch reinforce concrete building taking into account the change of basic parameters of calculation model in the modes of erection in exploitation. Concrete and reinforced concrete look in the future.3th All-russian (2th International) conference on a concrete and reinforced concrete of May,12-16, 1, 282-292.
3. Lublenske, V. A., Tamrazan, A. G. (2014). Safety of the bearing systems of building at the local change of stiff descriptions of bearing elements. Concrete and reinforced concrete look in the future.3th All-russian (2th International) conference on a concrete and reinforced concrete of May, 12-16, 1, 90-99.
4. Tihonov, I. N., Meshkov, V. Z. (2014). Reinforcement of reinforce-concrete constructions with the purpose of prevention of the making progressive collapse. Concrete and reinforced concrete look in the future.3th All-russian (2th International) conference on aconcrete and reinforced concrete of May, 12-16, 1, 379-388.
5. Choi, H. J, Krauthamer T. (2003). 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.

6. *Shapovalov, A. N., Rudenko, V. V. Experimental research of the tensely-deformed state of reinforce-concrete building in case of the making progressive collapse. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 5/7(77), 4-9.*

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В. С. Шмуклер, Харківський національний університет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, Харьков.

Автор: РУДЕНКО Виктория Владимировна
Харківський національний університет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, Харьков.
E-mail – Rudikv@ukrl.net

АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ ПРИ ВИПРОБУВАННІ БАГАТОПОВЕРХОВОЇ БУДІВЛІ НА ПРОГРЕСУЮЧЕ РУЙНУВАННЯ

В. В. Руденко

Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків

У статті приводиться детальний аналіз трьох схем навантаження (центральне, правостороннє і лівостороннє) залізобетонного макету будівлі з розмірами в плані 2x2 м і з клітиною колон 0,5x0,5 м при випробуванні його на прогресуюче руйнування. Детально розглядаються теоретичні та експериментальні дані. Рівномірна картина росту деформацій як в експериментальних, так і в теоретичних дослідженнях свідчить про перерозподіл зусиль в колонах, які розташовані близько до епіцентру руйнування, а максимальне збільшення деформацій відбувається з видаленням колон першого поверху. Зменшення деформацій наголошується у міру видалення углиб від епіцентру руйнування.

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

ANALYSIS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL DATA AT TEST OF MULTISTORY BUILDING ON MAKING PROGRESSIVE COLLAPSE

V. V. Rudenko

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkov

To the article presented the detailed analysis three charts of loading (central, right-side and left-side) reinforce-concrete layout of building is driven with sizes in the plan 2x2m and cell of columns 0,5x0,5m at the test of him on the progressive collapse. The theoretical and experimental data presented in detail. The even picture of growth deformations both in experimental and in theoretical researches testifies to the redistribution of efforts in columns, located near-by to the epicenter of destruction, and the maximal increase of deformations takes place with the delete of columns ground floor. Diminishing of deformations is marked as far delete deep into from the epicenter of destruction.

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