

Дорофеев Виталий Степанович, д-р техн. наук, профессор,
Одесская государственная Академия строительства и
архитектуры, г. Одесса (Украина)

Егупов Вячеслав Константинович, инженер Одесская
государственная Академия строительства и архитектуры,
г. Одесса (Украина)

УЯЗВИМОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЗДАНИЙ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

VULNERABILITY REINFORCED CONCRETE BUILDINGS UNDER SEISMIC ACTIONS

АНОТАЦИЯ

В данной статье рассмотрены причины и выполнен анализ уязвимости зданий при сейсмических воздействиях. Сформулированы особенности компьютерного моделирования уязвимости зданий с учетом совместной работы пространственного железобетонного каркаса и неравномерности поля ускорений под сооружением.

ABSTRACT

In this article are considered the causes and the analysis of the vulnerability of buildings under seismic actions. Formulated especially computer simulation taking into account teamwork 3d a rein-concrete framing and non-uniformity of a field of accelerations under a construction.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос, на который ищут ответ исследователи: почему одни здания разрушаются, а другие хорошо переносят землетрясения – один из важнейших вопросов современной теории сейсмостойкости. Один из возможных ответов – различия в конструктивных решениях, позволяющие лучше воспринимать неравномерные воздействия, и также эффекты от возможных резонансов (рисунок 1.).



Рисунок 1. Общий вид разрушенных и уцелевших зданий
(г. Нефтегорск, 1995; провинция Сычуань, Китай, 2008)

Анализ характерных повреждений и причин уязвимости железобетонных зданий

Основные факторы, влияющие на оценку уровня уязвимости, можно определить, анализируя повреждения зданий от землетрясений.

Характерные повреждения конструкций зданий можно условно разделить на несколько групп.

Многочисленные разрушения торцовых частей зданий зафиксированы при анализе последствий землетрясений. Во многих случаях это вызвано поворотом перекрытий зданий относительно вертикальной оси, когда центры сил инерции и упругости не совпадают. Однако, эффект кручения наблюдается также и в зданиях с идеальным архитектурно-планировочным решением, в которых предусмотрено симметричное во всех направлениях распределение масс и жесткостей. Объяснением этому могут служить пространственные формы колебаний и неравномерность поля колебаний грунта под фундаментом здания [6].

Для распространенных в строительстве типов зданий с ядрами жесткости в средней части имеется своя особенность колебаний. На первое место в оценке сейсмостойкости выходят крутильные колебания, поскольку для протяженных зданий инерционные характеристики, связанные с вращением перекрытий относительно вертикальных осей, становятся доминирующими. При таких колебаниях в наихудших условиях опять оказываются торцовые элементы здания.

Большие повреждения внутренних стен и средней части перекрытий. Колебания протяженных зданий с неоднородной структурой имеют особенности. При концентрации жесткостей по торцам практически отсутствуют крутильные колебания (их частоты выходят за рамки учитываемого в расчетах спектра), но увеличивается влияние тех пространственных характеристик внешних воздействий грунта, которые вызывают деформации перекрытий в своей плоскости при больших расстояниях между торцовыми диафрагмами. При расстояниях в 50–60 м торцовые диафрагмы являются для перекрытий почти не смещающимися опорами, а форма перекрытий определяется с одной полуволной. Эта форма колебаний и соответствующая ей частота являются определяющими при оценке сейсмостойкости здания.

Сейсмостойкость каркасных зданий повышается постановкой диафрагм жесткости. Роль перекрытий как деформируемых в своей плоскости дисков в этом случае значительно повышается, что видно из пространственной формы колебаний и зависимости сейсмических нагрузок от длины здания и его расчетной модели [5].

Повреждения преимущественно верхних этажей. Ташкентское землетрясение 1966 г., эпицентр которого находился в черте города, показало, что помимо горизонтальных колебаний в расчетах следует учитывать и вертикальные колебания. Повреждения преимущественно верхних этажей можно объяснить близостью преобладающих периодов сейсмического воздействия к периодам вертикальных колебаний зданий и распределением сейсмической нагрузки пропорционально

вертикальной форме колебаний (максимальные перемещения на уровне верхних этажей).

Сдвиг поперечных стен в вертикальной плоскости относительно друг друга и разрушение перекрытий из своей плоскости. Картина повреждений протяженных зданий в Турции (землетрясение 27 июня 1998 г.) объясняется тем, что для таких зданий преобладающей является частота, соответствующая крутильным колебаниям в вертикальной плоскости (сдвиг поперечных стен в вертикальной плоскости относительно друг друга). При проектировании таких зданий учитывались равномерные по длине горизонтальные нагрузки в плоскости перекрытий, нагрузками в вертикальной плоскости по традиции пренебрегли, а они как раз и привели к разрушению.

Разрушения и повреждения зданий при совпадении периодов внешнего воздействия и периодов собственных колебаний.

Землетрясение в Армении 7.12.1988 г. по катастрофическим последствиям, по причиненному ущербу, количеству жертв (более 25 тыс. человек) является крупнейшим в истории Кавказа. Многие здания, хотя и сохранили устойчивость, имели сильные разрушения: смещение плит перекрытия и лестничных маршей, большие трещины и смещения в наружных и внутренних стенах и другие. Одной из особенностей разрушения протяженных зданий, имеющих направление продольной оси, близкое к направлению на эпицентр, был отрыв торцевых частей зданий.

Из общего числа современных многоэтажных зданий обрушились или сильно пострадали в Спитаке – 87%, в Ленинакане – 52%, в Кировакане – 24% (рисунок 2).



Рисунок 2. Разный уровень уязвимости для зданий различных конструктивных схем (Спитак, 1988; фото Немчинова Ю.И.)

Важным наблюдением является то, что масштаб разрушений в Ленинакане был больше, чем в Кировакане, который находился ближе

к зоне разрыва. Особенно плохо себя проявили каркасно-панельные 9-этажные здания серии 111 в Ленинакане, где обрушились все 133 здания этой серии. В Кировакане ни одно из зданий этой серии не разрушилось и не получило серьезных повреждений. Причиной большой уязвимости зданий этой серии в Ленинакане, помимо нерациональности их конструктивного решения и низкого качества строительства, является то, что для этих зданий имело место существенное увеличение сейсмического воздействия из-за совпадения периодов колебаний этих зданий с периодами колебаний грунта во время землетрясения (резонанс).

По данным [10], при измерении микроколебаний грунтов при афтершоках преобладающие периоды колебаний грунтов в Ленинакане составили 0,5-0,6 сек, в Спитаке – 0,2-0,3 сек, в Кировакане – 0,2-0,4 сек. Вибрационные и микросейсмические испытания зданий серии 111, проведенные в Ереване в 1978–1987 гг. до землетрясения, показали, что их периоды находятся в диапазоне 0,55-0,7 сек (в зависимости от уровня воздействия). Учитывая большую продолжительность землетрясения, возрастание уровня воздействия для этих зданий из-за резонанса в Ленинакане имеет большую вероятность. Это подтверждается и тем, что такие же здания, но имеющие 5 этажей (их период почти в 2 раза меньше, чем в 9-этажных) не обрушились и получили только незначительные повреждения [10].

Комплексная оценка уязвимости на основе совместно работающих упрощенных моделей зданий, воздействий, материала

Целью расчетов зданий и сооружений является обеспечение прочностной надежности или оценка его состояния (уязвимости). Эта цель может быть достигнута, если основные модели, обеспечивающие оценку вероятности разрушения конструкции (модели здания, воздействий, материала и разрушения) будут согласованы.

Указанные выше новые экспериментальные данные можно учесть с помощью последовательно усложняющихся пространственных перекрестных расчетных моделей (рисунок 3), описываемых в общем случае одним матричным уравнением строительной механики:

$$(A + B + C - M \cdot \omega^2) \cdot \vec{q} = 0, \quad (1)$$

где А, В, С – матрицы жесткости подструктур («А» – поперечные рамы, стены и другие, «В» – перекрытия, «С» – продольные рамы, стены, ограждения и другие).

$$K = H^T \begin{bmatrix} A & 0 \\ & B \\ 0 & C \end{bmatrix} H \quad I = \begin{bmatrix} 1 & & 0 \\ & 1 & \\ 0 & & 1 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} I \\ I \\ I \end{bmatrix} \quad (2)$$

Здесь H – единичная матрица-вектор, t – операция транспонирования.

Подставив H в K и выполнив перемножение матриц, получим

$$K=A+B+C.$$

Наиболее простой моделью здания является плоская балочная перекрестная система. Она состоит из двух балочных подструктур «А» и «В».

Следующими по сложности являются пространственные перекрестные модели здания, состоящие, как и плоская балочная, из двух подструктур «А» и «В». Их элементами являются поперечные рамы, стены, диафрагмы («А») и перекрытия («В»), работающие только в своей плоскости.

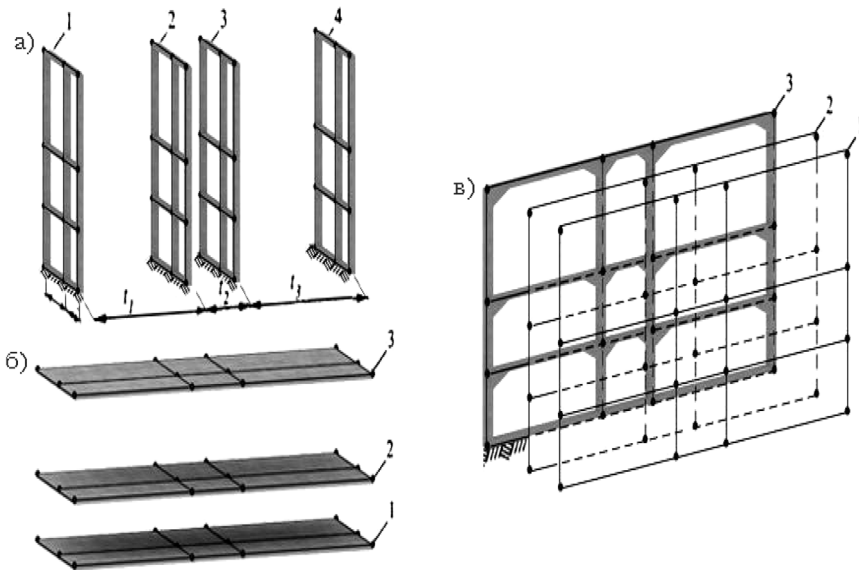


Рисунок 3. Составляющие пространственной системы:
а, б, в – подсистемы А, В, С соответственно

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перемещения системы определяются в основном формой колебаний, очень близкой к одной из собственных форм колебаний сооружения. Реакция зданий на сейсмические воздействия существенно зависит от периода собственных колебаний, а также от преобладающего периода внешнего воздействия.

Для жестких сооружений (с малыми периодами собственных колебаний) перемещения обычно малы, а ускорения достаточно велики. Для гибких сооружений (с длинными периодами), наоборот, перемещения сравнительно велики, а ускорения достаточно малы. Эти выводы очень важны для оценки уязвимости сооружений различной этажности и жесткости.

Колебания несимметричных сооружений во время землетрясений являются особенно сложными. В них возникают пространственные поступательно-крутильные формы колебаний, а элементы конструкции, кроме изгиба, испытывают деформации кручения. Следует отметить, что при одновременном действии изгибающих и крутящих моментов сооружение хуже сопротивляется внешним нагрузкам.

Объяснением того факта, что для разных типов зданий характер разрушения пропорционален разным формам колебаний, является сложный спектральный состав сейсмического воздействия. Близость преобладающих периодов сейсмического воздействия к соответствующим периодам колебаний зданий и порождает деформации, соответствующие этим колебаниям.

При землетрясениях наблюдалось, что в период основной фазы сейсмических возмущений проявляются несколько циклов длиннопериодных колебаний с близкими амплитудами. В таких случаях реакция сооружения может увеличиться после прохождения основной фазы землетрясения, если период собственных колебаний сооружения совпадает с периодом изменения ускорений при землетрясении.

Неточность знаний о сейсмической опасности в Украине, недостаточность и недостоверность сейсмологической информации, изношенность основных фондов привели к увеличению сейсмического риска как в сейсмически активных районах, так и в районах, которые раньше относились к несейсмическим.

Рост этажности зданий и сооружений, отход от симметричных форм расположения сооружений в плане, постоянное увеличение техногенной нагрузки территорий являются причиной повышения вероятности возникновения техногенных катастроф, связанных с естественной геодинамической активностью и землетрясениями. Необходимо проведение

комплекса мероприятий по приведению сейсмостойкости объектов до уровня нормативных требований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Newmark, N., Rosenblueth, E. Fundamentals of Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.Y., 1971.
2. Yegupov, V., Yegupov, K., Starodub, V., Mazur, P., Kostrijitskiy, A. Simulation and Automation of Calculations of Buildings (Structures) on Seismic Effects. An International Journal Computers & Structures, Pergamon, Oxford, 1997, Vol. 63, No. 6, pp. 1065-1083.
3. Alexandr Kendzera, Konstantin Yegupov, Vyacheslav Yegupov Seismic monitoring of the southwestern areas of the Ukraine and adjacent areas. Second european conference on earthquake engineering and seismology, Istanbul aug. 25-29, 2014.
4. Philippe Gueguen, Maria Rosaria Gallipoli, Manuel Navarro etc. Testing buildings using ambient vibrations for earthquake engineering: a European review. Second european conference on earthquake engineering and seismology, Istanbul aug. 25-29, 2014.
5. Егупов, В.К., Егупов, К.В., Лукаш, Э. П. Практические методы расчета зданий на сейсмостойкость. – Киев: Будивельник, 1982.-144 с.
6. Егупов, К.В. Проблемы проектирования на сейсмостойкость протяженных и несимметричных сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2000. – № 1, с. 23–29.
7. Кукунаев, В. С. Механическая модель железобетонных плит различной толщины с трещинами. – Симферополь: Изд-во «Сталь», 2008. – 176 с.
8. Немчинов, Ю. И. Сейсмостойкость зданий и сооружений. В двух частях. – Киев: 2008. – 480 с.
9. Поляков, С. В. Сейсмостойкие конструкции зданий. (Основы теории сейсмостойкости): Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1983. 304 с.
10. Хачиян, Э. Е. Прикладная сейсмология. – Ереван: Изд-во «ГИ-ТУТЮН» НАН РА, 2008. – 491 с.
11. Строительство в сейсмических районах Украины : ДБН В.1.1-12:2006. – [Действует с 2007-01-02]. – К. : Минрегионстрой Украины, 2006. – 84 с. – (Национальный стандарт Украины).

Статья поступила в редколлегию 24.11.2014