

УДК 624.012.4 : 624.042.7

**ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ЗДАНИЯ
НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗНЫХ МЕТОДОВ**

Кичаева О.В., Раджабзадег Могсен

*Харьковский национальный университет строительства
и архитектуры, г. Харьков, Украина*

В статье приведены результаты численных исследований напряженно-деформированного состояния монолитного железобетонного здания при сейсмическом воздействии в условиях Ирана. Сейсмическое воздействие задавалось с использованием: статической теории определения сейсмических нагрузок, спектрального метода динамической теории и прямым динамического метода с применением инструментальных записей ускорений грунта при землетрясениях («time-history»), который представляет собой сейсмическую нагрузку, изменяющуюся во времени.

The article contains results of numerical investigations of stress-strain state of monolithic reinforced concrete of buildings under seismic impact in terms of Iran. Seismic impact was using: static theory of seismic loads, the spectral method of the dynamic theory and modification of direct dynamic method with the use of instrumental records accelerations ground during earthquakes («time-history»), which is a seismic loading, changing in time.

Более 85 % территорий Ирана являются сейсмоопасными, около 20 % из 160 разрушительных землетрясений, зафиксированных в прошлом веке по всему миру, произошли в Иране.

Во многих случаях к этому присоединяются неблагоприятные условия площадки: плохие грунты, близость тектонических разломов, сложный рельеф и т.д. При этом сейсмическая опасность постоянно растет. В большинстве городов Ирана значителен удельный вес сооружений, построенных без учета сейсмичности.

В соответствии с ростом инженерных знаний при изучении характера сейсмических воздействий на здания, характера работы всего здания в целом на сейсмические воздействия менялись и методы расчета на сейсмичность. Можно выделить следующие методы расчета зданий на сейсмо-стойкость:

- 1) методы, основанные на статической теории сейсмичности.
- 2) методы расчета по акселограммам прошлых землетрясений.
- 3) метод расчета по спектральным кривым.
- 4) стохастические методы расчета.

Статическая теория сейсмостойкости является наиболее простой, но она игнорирует деформацию здания. Начало разработки этой теории положено трудами Омори и Сано в 1900 г. По этой теории колебания здания сводятся к идентичному движению вместе с основанием. Ускорение всех точек здания равны ускорению основания, а распределение сейсмических инерционных сил по высоте подобно распределению масс. Максимальные значения сейсмических сил представляются горизонтально направленными статическими силами, и определяются по формуле:

$$S = m W_0 = Q \frac{W_0}{g} = k_c Q, \quad (1)$$

где m , Q – масса и вес части сооружения; S – сейсмическая сила, действующая на эту часть; W_0 – максимальное сейсмическое ускорение; g – ускорение силы тяжести.

Величина k_c является коэффициентом пропорциональности между весом части здания и сейсмической силы максимального ускорения грунта и ускорения силы тяжести. В статистической теории величина этого коэффициента устанавливается на основе макросейсмических данных разрушительных землетрясений и принимается в практических расчетах в соответствии с балльностью района. Очевидно, что статический метод расчета справедлив лишь для жестких сооружений, деформации которого пренебре-

жительно малы по сравнению со смещениями оснований при землетрясениях.

Недостатки статического метода были частично сглажены в динамическом методе расчета на сейсмостойкость. Мононобе (Япония) в 1920 году принял колебания основания по синусоидальному закону и рассмотрел установившиеся вынужденные колебания сооружения, представленные в виде системы с одной степенью свободы. В результате для расчета сейсмических сил была получена формула:

$$S = k_c \beta Q, \quad (2)$$

где k_c – т.н. коэффициент сейсмичности; Q – вес сооружения; β – коэффициент динамичности, равный

$$\beta = \frac{1}{1 - T^2 / T_0^2}, \quad (3)$$

где T – период собственных колебаний здания; T_0 – период колебаний основания при землетрясении.

В решении предполагалось, что движение основания при землетрясении представлено плавным, достаточно регулярным колебательным процессом с периодом порядка T_0 – 1 сек.

На самом деле основание сооружения при землетрясении испытывает сложные многочастотные сейсмические движения, носящий нерегулярный характер, не поддающийся простому аналитическому описанию. В тоже время реальные сооружения представляют собой системы с распределенными массами, обладающими сложным спектром собственных колебаний, как-то сочетающимся со спектром колебаний основания при землетрясении.

Под влиянием этих факторов была развита новая форма динамического метода расчета на сейсмостойкость, получившая название спектрального метода или метода расчета по спектральным кривым. Идея этого метода состоит в том, что вместо описания развития во времени процесса сейсмических колебаний здания (сооружения), принимаются в рассмотрение максимальные величины различных факторов движения основания при землетрясении (ускорений, скоростей, смещений) по отдельным компонентам процесса

колебаний. Эти величины определяются на основе анализа сейсмограмм и акселерограмм реальных землетрясений. В результате получают спектральные кривые, описывающие максимальные сейсмические смещения, скорости, ускорения. С помощью этих спектральных кривых рассчитываются максимальные сейсмические усилия в здании и сооружении, и затем оценивается их прочность и несущая способность. Идея спектрального метода впервые была предложена М. Био в 1933 г. Использование спектрального метода позволило существенно повысить надежность и эффективность сейсмического строительства.

Недостатком этого метода является невозможность проследить развитие сейсмического воздействия на сооружение во времени. Кроме того, спектральный метод использует разложение решения в ряд по нормальным формам свободных колебаний и потому пригоден для анализа только линейных колебаний.

От этих недостатков избавлен метод расчета по фактическим акселерограммам, который позволяет получить все параметры НДС сооружения в виде функций во времени. Это позволяет более полно выполнить оценку прочности и надежности здания (сооружения) в сейсмических районах. Однако вопрос упирается в получении таких акселерограмм до землетрясения. Практически каждое землетрясение имеет свою акселерограмму для конкретного района, конкретных инженерно-геологических условий, положения центра землетрясения относительно объекта и т.д. Угадать, какую акселерограмму использовать для расчета сооружения в каждом конкретном случае для возможного землетрясения – задача чрезвычайно трудная.

Внедрение вероятностных методов в теорию инженерных расчетов нашло свое отражение в теории сейсмостойкости. Признано, что решение задачи сейсмостойкости должно оцениваться на вероятностных (статистических, стохастических) методах, учитывающих случайный характер процесса землетрясения. Уже спектральный метод содержит в себе идею отказа от полного детерминистического описания сейсмических колебаний. Это приводит к вероятностной постановке задачи сейсмостойкости, где функция для ускорений является реализацией случайного процесса, вероятные характеристики которого могут быть установлены по инструментальным записям прошлых землетрясений. При этом решение задачи состоит в определении вероятностных характе-

ристик смещений по заданным вероятностным характеристикам сейсмического воздействия.

Использование программных комплексов, работа которых основана на использовании метода конечных элементов, позволяет выполнять расчеты на прочность и жесткость не отдельных конструктивных элементов, а всего здания в целом, включая фундаменты и основание. Расчетная схема системы «основание – фундамент – здание» при таком расчете моделируется конечными элементами и, в динамическом аспекте представляет собой систему со многими степенями свободы. При сейсмическом воздействии, представляющем кинематическое динамическое нагружение на здание через основание и фундамент, такая система «основание – фундамент – здание» должна рассматриваться как динамическая система со многими степенями свободы. Само сейсмическое воздействие представляет собой чрезвычайно хаотичный и нерегулярный характер движения почвы и основания, поэтому математическое описание сейсмического воздействия представляет очень сложную задачу.

В рамках численного исследования рассмотрено 5-этажное здание в г. Куме (Иран) на территории с 10%-й вероятностью превышения расчетной сейсмической интенсивности в течение 50 лет, также характеризующейся нормами Ирана [1] как район с очень высокой сейсмической опасностью и уровнем ускорения грунта 0,35g, что соответствует 9 баллам по шкале MSK-64. Здание монолитное железобетонное каркасного типа с размерами в плане 14,4 x 12 м, высота этажа 3,24 м, общая высота составляет 16 метров (рис. 1).

Сейсмическая нагрузка задавалась: 1) в виде эквивалентной статической нагрузки (метод 1); 2) по спектральному методу расчета (метод 2); 3) прямым динамическим методом с применением инструментальных записей ускорений грунта при землетрясениях («time-history») (метод 3). Расчет выполнялся с помощью программного комплекса ETABS (SAP2000), основанном на методе конечных элементов, расчетная схема здания – рис. 2. В рамках исследования НДС здания по прямому динамическому методу были выполнены линейный и нелинейный расчеты. Для задания сейсмической интенсивности использовались акселерограммы разрушительного землетрясения в г. Бам (Иран), произошедшего в 2003 г.

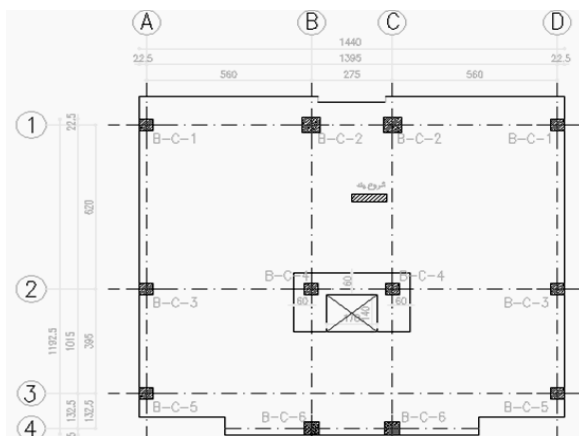


Рис. 1. Типовой план здания

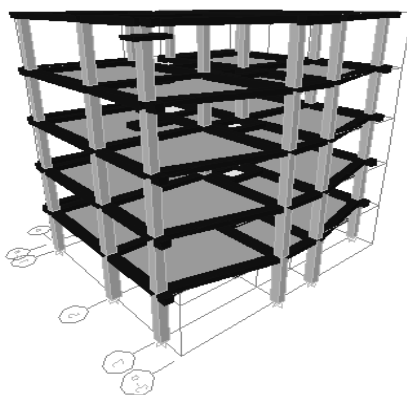
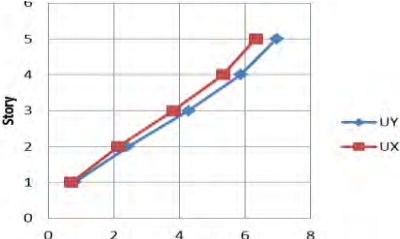
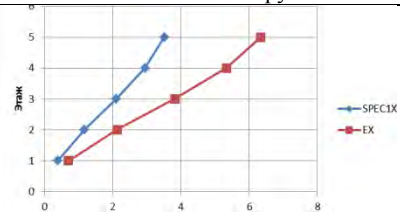
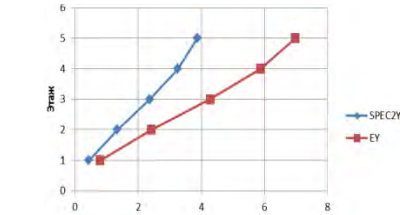
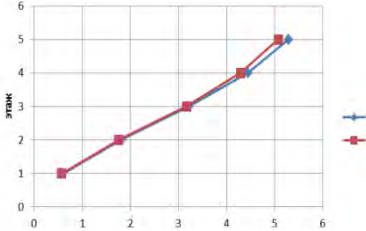
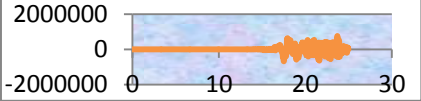
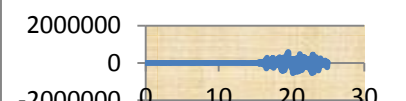
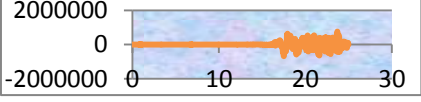
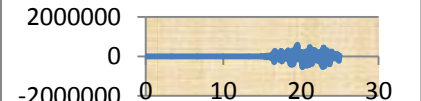


Рис. 2. 3D-модель здания

На основании анализа результатов численного расчета видно, что значения перемещений центра масс этажей при трех вышеперечисленных методах распределились так (табл. 1): 1) максимум наблюдается при расчете по методу 2, минимум – по методу 3; 2) значения перемещений, вычисленные методом 1, близки к значениям, вычисленным по методу 2; 3) значения перемещений (метод 1) меньше перемещений (метод 2) на 0,4 ... 2,7 %, перемещения по методу 3 меньше перемещений по методу 1 на 14 ... 19 %.

Перемещения центра масс этажей в зависимости от метода расчета

Метод расчета	Графики перемещений, см
Значения перемещений центра масс этажей, см	
Эквивалентная нагрузка $S = k_c \beta Q$	
0,6958 – 6,3375 (с 1-го по 5-й этаж)	 <p>перемещения по осям x (UX) и y (UY) по результатам расчета по эквивалентной нагрузке</p>
Динамический спектральный метод определения сейсмических нагрузок	 <p>а) перемещения по оси x по результатам спектрального расчета (SPEC1X) и эквивалентной нагрузки (EX)</p>
0,6986 – 6,5125 (с 1-го по 5-й этажи)	 <p>б) перемещения по оси y по результатам спектрального расчета (SPEC2Y) и эквивалентной нагрузки (EY)</p>

Метод расчета.	Графики перемещений, см
Значения перемещений центра масс этажей, см	
Прямой динамический методом с применением инструментальных записей ускорений грунта при землетрясениях («time-history»)	
 <p>а) амплитуда горизонтальных ускорений по x, cm/s^2</p>	<p>перемещения по осям x (UX) и y (UY) по результатам расчета по динамическим методом («time-history»)</p>
 <p>б) амплитуда горизонтальных ускорений по y, cm/s^2</p>	
Прямой динамический метод с применением инструментальных записей ускорений грунта при землетрясениях («time-history»)	
 <p>а) амплитуда горизонтальных ускорений по x, cm/s^2</p>	
 <p>б) амплитуда горизонтальных ускорений по y, cm/s^2</p>	
<p>0,5984 – 5,2875 (с 1-го по 5-й этажи)</p>	

Литература

1. Iranian buildings codes and standards. Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings. Standard No. 2800, 3rd Edition / Building and Housing Research Center. – 83 p.