

В.А. Сахаров, Г.В. Гетун, В.А. Мельник

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ДЕФОРМАЦИИ ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ЧИСЛЕ ЭТАЖЕЙ

Вступление

Возведение высотных зданий и сооружений в сейсмически опасных районах может вызывать значительные деформации конструкций вследствие их колебаний. Характер колебаний таких зданий существенно зависит от высоты, размеров в плане, жесткости, а также от грунтовых условий. Колебания зданий с малой этажностью могут иметь иной характер. Причем в конструкциях с меньшей этажностью могут возникать более высокие усилия и деформации, чем в высоких зданиях. В современных условиях, когда финансирование строительства нестабильно, время строительства может растягиваться от нескольких лет до десятилетий. При проектировании зданий в сейсмически активном регионе расчет на сейсмические нагрузки, как правило, проводят только для построенного здания. Недостаток инвестиций также может приводить к «конструктивному» уменьшению этажности здания вследствие изменения его назначения. Не до конца возведенное здание может иметь критические усилия и деформации в элементах, которые невозможно обнаружить при рассмотрении «целого» здания.

Целью работы является исследование влияния сейсмических нагрузок на напряженно-деформированное состояние несущих конструкций высотного здания при различном количестве этажей.

1. Постановка задачи

В данной работе исследования проведены на базе реального высотного здания, построенного в Украине. Высота здания составляет 150 м (45 наземных этажей и 2 подземных). Геометрические размеры в плане составляют 35x38 м. Здание является монолитно-каркасным с несущим внутренним ядром жесткости и пилонами по периметру. Здание имеет свайные фундаменты из буро-

набивных свай диаметром 1 м и длиной 36 м, объединенные плитным ростверком толщиной 2 м.

Грунтовое основание состоит из слоев супесей и песков, параметры которых представлены в таблице 1 на рисунке 1.

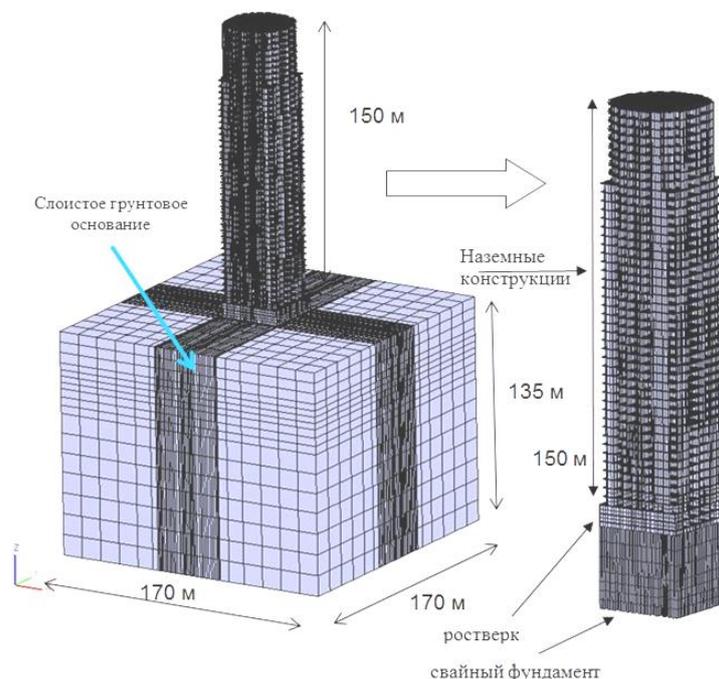


Рис. 1. Конечно-элементная модель (КЭМ) системы «основание-фундамент-здание»

Для корректного учета работы грунтового основания использовался объемный грунтовой массив. При сейсмическом воздействии вместе с объемной жесткостью учтены массовые силы грунтового основания.

Исследование распределения напряженно-деформированного состояния несущих конструкций под действием сейсмических нагрузок проводилось для системы «основание - фундамент - здание». Расчеты выполнялись методом конечных элементов на базе автоматизированной системы научных исследований (АСНД) «VESNA» в пространственной постановке прямым интегрированием во времени по схеме Ньюмарка.

Работа грунтового массива описывалась объемными изопараметрическими конечными элементами с характеристиками согласно инженерно-геологическим исследованиям. Конструкции плитного ростверка, плит перекрытия и покрытия моделировались пространственными элементами, колонны и сваи - стержневыми элементами. Другие вертикальные несущие элементы здания представлялись элементами оболочек согласно геометрическими физико-механическими параметрами (рис. 1).

ТАБЛИЦА 1

Физико-механические характеристики грунтового основания

ИГЭ	Название грунта	Нормативные значения							
		Природная влажность	Число пластичности	Показатель консистенции	Плотность грунта, г/см ³	Коэффициент пористости	Модуль деформации, кгс/см ²	Удельное сцепление, кгс/см ²	Угол внутр. трения, град
		W	I _p	I _L	ρ	e	E	c	φ
1	Супесь пластичная	0,24	0,05	0,67	1,94	0,71	70	0,09	18
2	Супесь твердая	0,20	0,03	<0	1,90	0,67	150	0,15	26
3	Песок мелкий, плотный, маловлажный	0,04	–	–	1,78	0,55	350	0,03	33

В реальных условиях сейсмические колебания со временем затухают. Такие процессы можно охарактеризовать двумя причинами: внутреннее сопротивление за счет деформирования материала конструкции, узлов и т.д. и внешнее сопротивление вследствие взаимодействия с окружающей средой. Таким образом, для описания процессов деформирования системы под действием динамической нагрузки с учетом затухания для дискретных систем со многими степенями свободы в МКЭ необходимо решать систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$[M] \frac{d^2}{dt^2} \{U\} + [C] \frac{d}{dt} \{U\} + [K] \{U\} = \{Q(t)\} \quad (1)$$

где:

[M] - матрица масс;

[C] - матрица затухания;

[K] - матрица жесткости;

{U} - вектор перемещений;

{Q(t)} - вектор нагрузок, как функция времени.

Для описания процессов затухания и формирования матрицы [C] необходимо использовать зависимости, полученные на базе экспериментальных данных для соответствующих сред. Однако учитывая сложность и высокую стоимость, а в некоторых случаях и невозможность проведения таких экспериментов, были использованы нормативные данные [1].

Во многих случаях из-за большого количества уравнений используют методы, которые предусматривают одинаковые параметры затухания для всех сред, что не соответствует действительности. В данной работе параметры затухания принимались согласно свойствам соответствующих материалов по теории Фойгта и по рекомендациям норм [1].

Параметр затухания находится в линейной зависимости от частоты и определяется в зависимости от выбранной частоты [5]:

$$\kappa = \frac{\delta}{\pi \cdot \omega_0} \quad (2)$$

где ω_0 - круговая частота (первая собственная частота здания $\omega_0 = 4,78 \text{ с}^{-1}$ (0,76 Гц)).

Значения параметров определялись по декременту колебаний: для грунтов основания $\delta_{гр} = 0,6$, для конструкций здания $\delta_{к} = 0,3$.

Матрица демпфирования в этом случае будет определяться согласно формуле:

$$[C] = \kappa[K] \quad (3)$$

При численных исследованиях, волны, которые распространяются в исследуемом объеме грунта, могут отражаться от внешнего контура (где ограничены только перемещения или углы поворотов). В реальных условиях энергия этих волн излучается во внешнюю среду. В данной работе этот эффект учитывается по методу граничного демпфирования, предложенного Лизмером [6], который обеспечивает поглощение энергии волн, приходящих на границу.

Представленная модель для описания взаимодействия элементов системы «основание - фундамент - здание» позволяет детально исследовать поведение здания при действии сейсмической нагрузки.

В качестве сейсмической нагрузки использована трехкомпонентная акселерограмма № 8 из набора нормативных синтезированных акселерограмм [1], выбранная по преобладающему периоду собственных колебаний ($t = 6$ сек). Сейсмичность площадки была принята 7 баллов. С целью детального анализа характера деформирования здания расчеты проводились для временного отрезка длительностью 6 секунд (рис. 2).

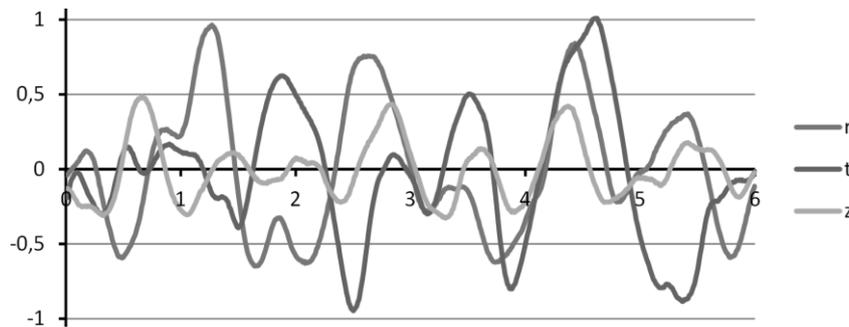


Рис. 2. Расчетная синтезированная акселерограмма № 8 ($t = 6$ сек)

По техническим условиям, максимальные относительные перемещения этого здания должны составлять не более $1/500$ высоты.

2. Результаты расчетов

Составленная конечно-элементная модель (КЭМ) насчитывала 723183 уравнений (рис. 1). Время моделирования 6 секунд поведения здания составило 8 часов с учетом предоставленных ресурсов ПК на базе IntelCore i7, RAM 16 Гб, HDD 1 Тб.

В результате моделирования всего здания было получено, что от начала воздействия до 3,7 сек наблюдается увеличение амплитуды колебаний конструкций. Максимальное отклонения верхздания в плане составили 24 см (рис. 3). Нарастающая амплитуда колебаний не повторяющая интенсивность нагрузки (рис. 2) указывает на их резонансный характер.



Рис. 3. Горизонтальные колебания верха 47-ми этажного здания

Наиболее загруженными элементами зафиксированы пилоны и стены подвального этажа, которые находятся на внешнем периметре здания. Дополнительные напряжения от сейсмической нагрузки составили около 230...250 кПа, в отдельных зонах концентраторов напряжений значения достигали 1-2 МПа.

Как указывалось ранее, характер колебаний высотного здания существенно зависит от высоты и жесткости здания. Кроме этого при неполном числе этажей здание имеет другие собственные частоты, которые могут входить в резонанс с сейсмической нагрузкой в иных диапазонах. Для исследования влияния сейсмической нагрузки на здание с различным числом этажей были проведены расчеты зданий высотой от 10 до 47 этажей через каждые пять этажей. Использованные акселерограммы сейсмических нагрузок были подобраны для здания с максимальной этажностью.

В результате численных исследований было получено, что максимальные перемещения и крен здания достигаются при неполной этажности здания (рис. 4). Как видно из диаграммы максимальное отклонение в 43 см зафиксировано при 25 этажном здании. Дальнейшее увеличение этажности вплоть до 47 этажа приводило к уменьшению амплитуды колебаний почти вдвое.

Анализ изменения перемещений этажей при разной высоте здания показал, что максимальные отклонения формируются в верхней точке исследуемого здания, когда здание еще не «пригружено» вышележащими этажами. С увеличением высоты и массы здания амплитуда колебаний этажа постепенно

спадает. Как показали исследования, после надстройки 15 этажей колебания перекрытия стабилизируются (рис. 5).

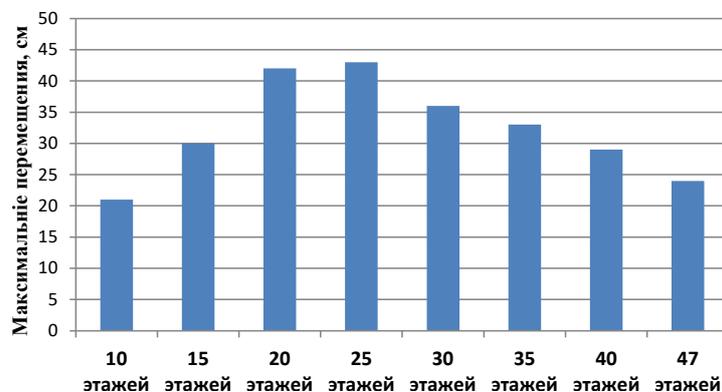


Рис. 4. Максимальные перемещения здания в зависимости от количества возведенных этажей

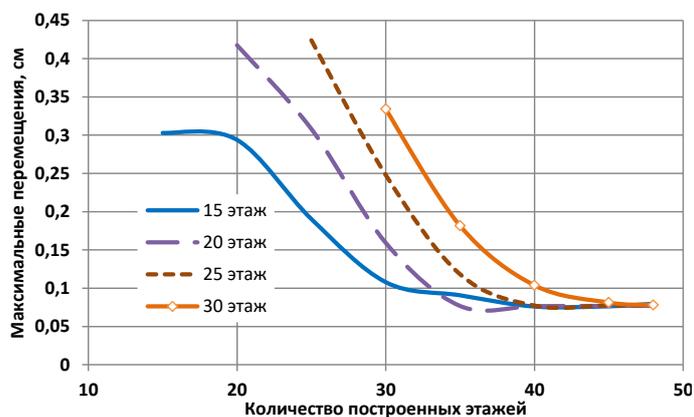


Рис. 5. Максимальные перемещения этажей при различной этажности здания

Заключение, выводы

При проектировании зданий и сооружений на восприятие сейсмической нагрузки необходимо проводить комплексные исследования поведения конструкций, в т.ч. на различных этапах строительства. Для оценки сейсмического влияния расчеты следует проводить для системы «основание - фундамент - здание» методами прямого интегрирования во времени, обеспечивающими возможность учета реальных динамических параметров соответствующих сред. В результате проведенной работы сделаны следующие выводы:

1. Колебания здания под действием сейсмической нагрузки существенно зависят от геометрических и жесткостных параметров здания и носит резонансный характер.

2. Сейсмическая нагрузка, ориентированная на взаимодействие с высотным зданием может вызывать большие амплитуды колебаний при меньшем числе этажей.
3. На этапе проектирования здания следует проводить оценку собственных частот колебаний, в т.ч. при различной этажности здания с целью выявления возможных резонансных проявлений.
4. Повышение количества вышерасположенных этажей способствует уменьшению амплитуды колебаний нижних этажей. Для исследуемого здания уменьшение имеет тенденцию к стабилизации максимальных перемещений после надстройки 15 этажей.

Литература

- [1] ДБН В.1.1-12:2006. Строительств сейсмических регионах Украины, Минстрой Украины, К.: 2006.
- [2] ДБН В.2.2-24:2009. Проектирование высотных жилых и гражданских зданий, Минрегионстрой Украины, К.: 2009.
- [3] Гетун Г.В., Сахаров В.О., Мельник В.А., Дослідження впливу сейсмоізоляції на напружено-деформований стан висотної будівлі під дією сейсмічних навантажень, Світ геотехніки, 3.: НДІБК, 2013, Вип. 2, 18-23.
- [4] Бирбраер А.Н., Расчет конструкций на сейсмостойкость, Наука, СПб.: 1998, 256 с.
- [5] Смирнов А.Ф., Александров А.В., Лящеников Б.Я., Шапошников Н.Н., Строительная механика, Динамика и устойчивость сооружений, Стройиздат, М.: 1984, 416 с.
- [6] Lysmer J., Kuhlemeyer R.L., Finite Dynamic Model for Infinite Media, Proc. ASCE, August 1969, 95, EM4.

Analysis of influence of seismic load on high-rise building deformations depending on number of floors

Abstract

In the article results of influence of seismic load on deformations of constructions of high-rise building with different number of floors are presented. Calculations have been made by the finite element method under direct time integration with Newmark's scheme, taking into account damping. It is shown that maximum building oscillations can appear under partial height of a building. This effect should be taken into consideration in designing of buildings.

Analiza wpływu obciążeń sejsmicznych na deformacje wieżowca w zależności od liczby kondygnacji

Streszczenie

W pracy przedstawione są wyniki wpływu obciążeń sejsmicznych na deformacje konstrukcji wieżowca przy różnej liczbie kondygnacji. Obliczenia zostały przeprowadzone metodą elementów skończonych drogą całkowania bezpośredniego względem czasu metodą Newmarka z uwzględnieniem tłumienia. Pokazano, że drgania maksymalne mogą występować przy niepełnej wysokości budynku. Zjawisko to należy uwzględnić przy projektowaniu budynków.