

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КАРКАСНОГО ЗДАНИЯ С ЯДРОМ ЖЕСТКОСТИ В ПРЕДЕЛЬНОМ СОСТОЯНИИ

Испытаниям подвергалась железобетонная крупномасштабная модель 9-этажного каркасного здания с ядром жесткости в 1/5 натуральной величины (рис. 1). Габаритные размеры модели составляют: высота этажа по осям ригелей—60 см, общая высота—5,55 м, размер сооружения в плане по осям колонн—3,60 м. Сечения стоек—10×10 см, ригелей—10×12 см, ядро жесткости—квадратное, коробчатого поперечного сечения с двумя вертикальными рядами проемов. Толщина стенок ядра—6 см, постоянная на всю высоту (рис. 2). Все конструкции выполнены из монолитного железобетона. Плиты междуэтажных перекрытий размером на ячейку 120×120. Перекрытие 9-го этажа—монолитное толщиной 7 см.

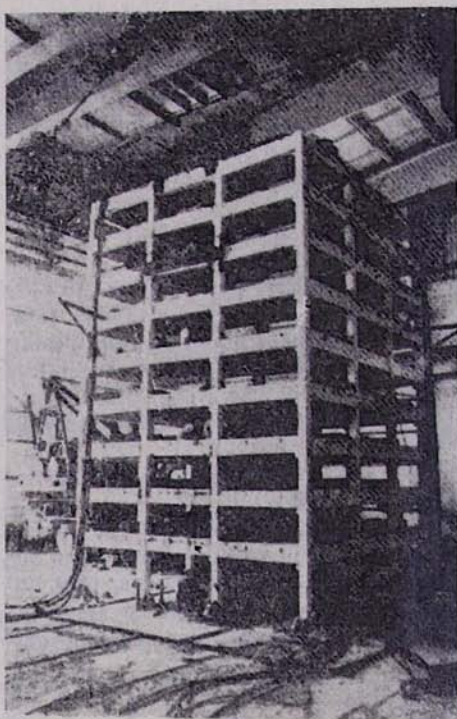
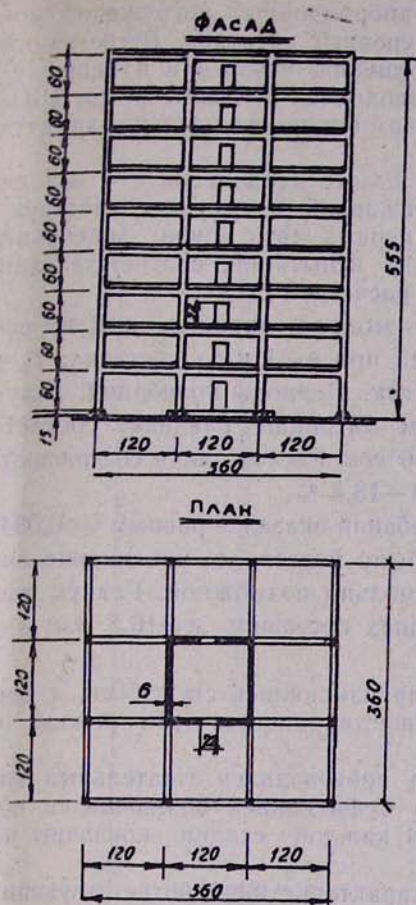


Рис. 1. Модель 9-этажного каркасного здания с ядром жесткости

Модель была запроектирована по принципу простого подобия, общий вес модели с пригрузом 45 т. Несущие конструкции модели были рассчитаны на сейсмические воздействия согласно СНИП 11-А. 12—69. Суммарная расчетная сейсмическая нагрузка на модель составила $\sum S_{рас} = 12,10$ т.

Динамическая горизонтальная нагрузка создавалась с помощью вибромашины ВИД-12, установленной на перекрытии 9-го этажа.



Конструкция перемычки над проемом в ядре жесткости

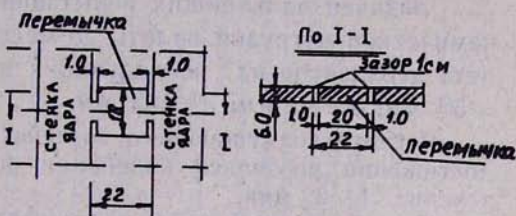


Рис. 2. Конструкция модели 9-этажного каркасного здания с ядром жесткости

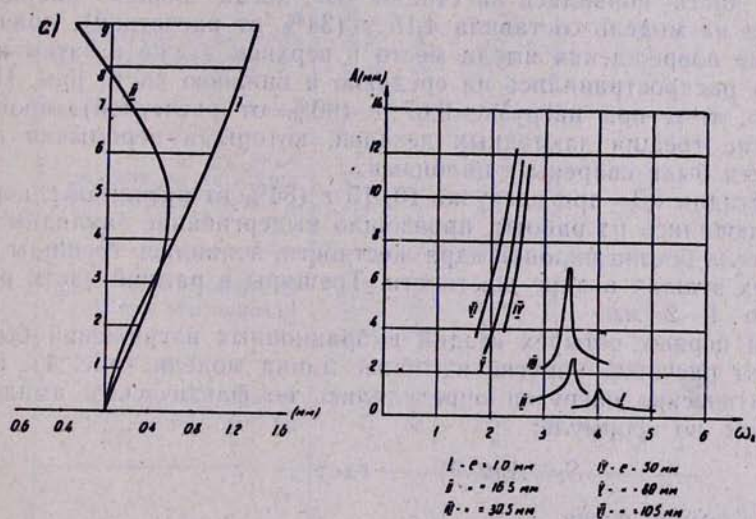


Рис. 3. а) Экспериментальные формы колебаний модели.

б) Резонансные графики в различных стадиях испытаний модели

Было осуществлено шесть стадий вибрационных нагружений модели, которым соответствовало шесть уровней нагрузок. Регистрация колебательного процесса (амплитуд смещений, ускорений и напряжений в арматуре ядра жесткости) производилась сейсмометрами ВБП, акселерограммами СПЭД и тензодатчиками сопротивлений на арматуре ядра жесткости.

На первой стадии испытаний при вылете дебалансов $e=1$ мм не было зарегистрировано никаких повреждений в несущих конструкциях модели, т. е. периоды и формы первых двух тонов колебаний (рис. 3а), определенные на этой стадии испытаний, соответствовали упругой работе сооружения и принятой расчетной схеме.

Период первой формы колебаний модели, определенный по осциллограммам резонансных испытаний при $e=1$ мм, составил: $T_1=0,249$ сек, второй формы — $T_2=0,069$ сек. Периоды колебаний, полученные расчетным путем по расчетным матрицам влияния, соответственно равны: $T_1=0,253$ сек; $T_2=0,056$ сек. Расхождения составляют: для первой формы — 1,4 %, для второй — 18,8 %.

Логарифмический декремент колебаний оказался равным $\delta=0,094$.

Задачей дальнейших испытаний было поэтапное увеличение динамической нагрузки вплоть до максимально возможной. Радиус вылета дебалансов на последующих этапах составил: $e=16,5$ мм; $e=50$ мм; $e=80$ мм; $e=105$ мм.

Частота возмущающего воздействия изменялась ступенями, а при достижении резонанса колебания осуществлялись в этом режиме в течение 1—2 мин.

После каждого этапа нагружения производился тщательный визуальный осмотр конструкций модели с фиксацией появившихся повреждений. Резонансные графики для каждой стадии показаны на рис. 3б.

В табл. 1 приведены основные характеристики соответствующие каждой стадии нагружения.

Повреждения несущих конструкций в виде трещин в зоне узлов рамной части появились на стадии «В», когда общая инерционная нагрузка на модель составила 4,15 т (34% от расчетной), причем отмеченные повреждения имели место в верхнем этаже и затем на стадии «С» распространились на среднюю и нижнюю части рам. На стадии «С», т. е. при нагрузке 9,67 т (80% от расчетной), произошло раскрытие трещин закладных деталей, которыми переемы в ядре жесткости были сварены с пилонами.

На стадии «Д» при нагрузке 10, 15 т (84% от расчетной), переемы выключились из работы, произошло выдергивание закладных деталей из тела бетона пилонов ядра жесткости, появились трещины в нижних двух этажах в ядре жесткости. Трещины в рамной части раскрылись до 1—2 мм.

Для первых четырех стадий вибрационных нагружений были определены расчетом упругие изгибные линии модели (рис. 4). Расчетные статические нагрузки определялись по фактическим амплитудам смещений по формуле:

$$S_i = A_i m_i \omega^2, \quad \text{где:} \quad (1)$$

$i=1 \div 8$ — номер этажа.

Нагрузка на девятом этаже, в уровне расположения вибромашины, определялась по формуле:

Таблица 1

№ № п/п	Стадия испытаний	Радиус вылета дебалансов (мм) e	Резонансная частота колебаний, ω гц	Уровень инерционной нагрузки по низу модели ΣS т	Логарифмический декремент колебаний δ	Максимальные напряжения в арматуре σ кг/см ²	Зарегистрированные повреждения в несущих конструкциях
1	A	1	4,01	2,297	0,0936	210	Повреждений нет. Трещины в колоннах 9-го этажа, в ригелях 5 и 8-го этажей в зоне узлов. В ядре жесткости повреждений не отмечено. Раскрытие трещин, появившихся в стадии «B», появление трещин в ригелях и колоннах в уровне 1—4-го этажей, появление волосных трещин в зоне контакта закладных деталей в перемычках. Трещины в пилонах ядра жесткости в первом и втором этажах, выключение из работы перемычек в шахте, раскрытие трещин в зоне узлов в рамной части. Раскрытие до 1 мм трещин в ядре жесткости в уровне первого и второго этажей, появление новых в этих же уровнях и в третьем этаже. Вертикальные трещины по линии сопряжения стенок взаимоперпендикулярного направления в ядре жесткости и в первых четырех этажах. Многочисленные горизонтальные и косые трещины в ядре жесткости в первых четырех этажах, раскрытие вертикальных трещин до 1 мм. Многочисленные трещины в рамной части в зоне узлов по всей высоте модели.
2	B	16,5	3,556	4,15	0,501	380	
3	C	30,5	3,45	9,67	0,508	1186	
4	D	50	2,72	10,15	0,561	2010	
5	E	80	2,56	9,88	0,879	2090	
6	F	105	2,44	9,82	1,093	2200	

$$S_p = A_p m_p \omega^2 + \frac{Q_p e n^2}{90000}, \quad (2)$$

где: Q_p —вес дебалансов;

e —радиус вылета дебалансов;

n —количество оборотов в мин.

Из приведенных графиков видно, что экспериментальные формы колебаний удовлетворительно соответствуют расчетным. Отметим, что при расчетах на стадиях В, С, Д в расчетную схему и жесткостные характеристики поврежденных элементов вводились соответствующие поправки. Так, например, в стадии «Д» изгибная жесткость пере-

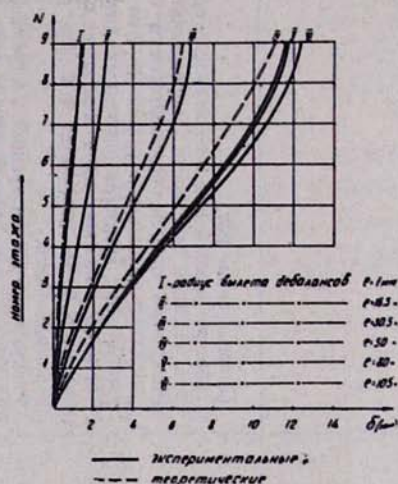


Рис. 4. Упругие линии прогибов модели

чек принималась равной нулю, а жесткость пилонов ядра в первом и втором этажах определялась с учетом трещин.

Максимальная инерционная нагрузка на модель была достигнута в стадии «Д» — $0,84 \sum S_{расч}$. В стадиях «Е» и «Ф», несмотря на дальнейшее увеличение радиуса вылета дебалансов до 105 мм, общая нагрузка на модель не только не возросла, но даже несколько снизилась. Причины этого будут проанализированы ниже, здесь же отметим, что в стадиях Е, Ф, ввиду развития локальных повреждений, как в рамной части, так и в ядре жесткости, наблюдалось некоторое уменьшение общей жесткости модели, количественная оценка которой была затруднительна.

Анализ изменения динамических характеристик в процессе виброиспытаний показывает, что с ростом амплитуды возмущающего воздействия F_0 , т. е. с увеличением радиуса вылета дебалансов, частота колебаний падает (кривая 1 рис. 5). Это происходит по двум причинам. Во-первых, уменьшается жесткость сооружения за счет появившихся повреждений. Этот фактор доминирует на двух участках графика изменения частоты: на участке А—В и С—Д. В стадии «В» появились повреждения в рамной части, а в стадии «Д» — из работы выключились перемычки в ядре жесткости и появились трещины в пилонах ядра в двух нижних этажах,

Изменение частоты колебаний на участке С—Д нанесено на графике пунктиром, так как в процессе нагружения в стадии «Д» переключки выключились из работы не мгновенно с достижением резонансной частоты $\omega = 2,72$ гц, а постепенно с приближением к этой точке, причем, был зафиксирован только устойчивый режим колебаний в резонансе в стадии «Д». На участке В—С небольшое уменьшение частоты обусловлено частичным развитием локальных повреждений на общем фоне упругой работы конструкций.

Участок графика Д—Е—F также характеризуется незначительным уменьшением частоты колебаний, хотя возмущающее воздействие увеличилось на 70%. На этом участке снижение частоты обусловлено ростом декремента колебаний (кривая II). График II имеет три характерных участка. На первом участке А—В при возрастании инерционной нагрузки от 0,19 до 0,34 от $\Sigma S_{расч.}$ появляются многочисленные микроповреждения и декремент колебаний увеличивается от 0,10 до 0,50, затем на участке В—С—Д при возрастании инерционной нагрузки от 0,34 до 0,84 $\Sigma S_{расч.}$ декремент колебаний стабилизируется в пределах 0,5—0,6. На участке Д—Е—F снова наблюдается резкое увеличение декремента до величины 1,09.

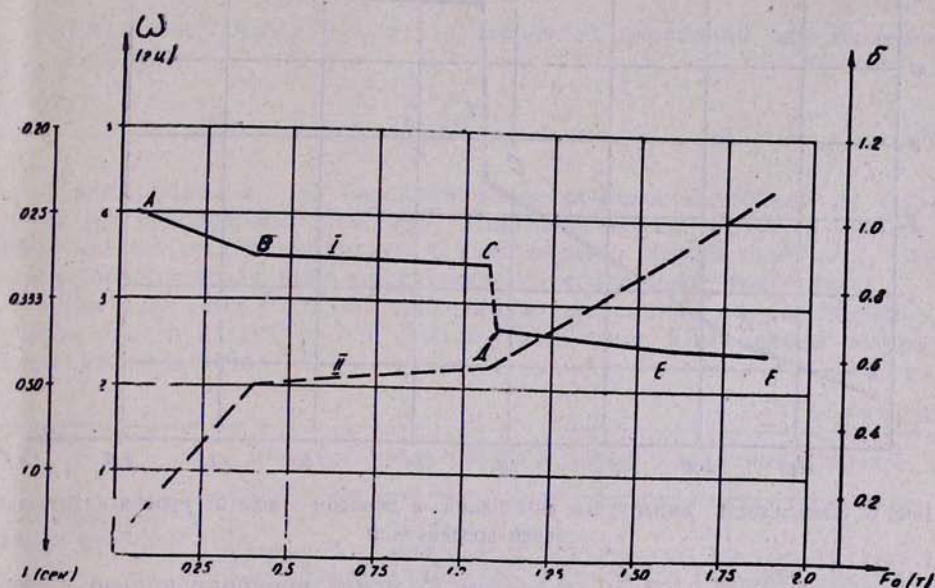


Рис. 5. Зависимость частоты (I) и декремента колебаний (II) от амплитуды возмущающего воздействия

Такая картина увеличения диссипативных свойств сооружения хорошо согласуется с качественной картиной поведения модели при колебаниях.

На первом участке при возрастании уровня нагрузки до 0,34 $\Sigma S_{расч.}$ появляются многочисленные микроповреждения и волосные трещины, которые резко увеличивают рассеяние энергии при колебаниях.

В стадиях нагружения, соответствующих рабочему уровню нагрузок (0,34—0,8) $\Sigma S_{расч.}$, когда еще не произошло серьезных повреждений несущих конструкций, декремент колебаний стабилизируется, при появлении же больших повреждений в перемычках и пилонах ядра

жесткости и их развитии в процессе колебаний (стадии Д, Е, F) возрастает внутреннее трение и затухание резко увеличивается. В этом состоит причина того, что в стадиях Е и F инерционная нагрузка на модель не возрастает, несмотря на значительное увеличение (на 70%) возмущающего воздействия. Это состояние можно охарактеризовать как адаптацию сооружения к гармоническому внешнему воздействию за счет увеличения коэффициента рассеяния энергии. Эффект адаптации наглядно прослеживается на графике изменения амплитуд колебаний, зарегистрированных в верхнем этаже в зависимости от величины возмущающего воздействия, создаваемого в этом же уровне вибромашиной— F_0 (рис. 6). Этот график имеет также три характерных участка.

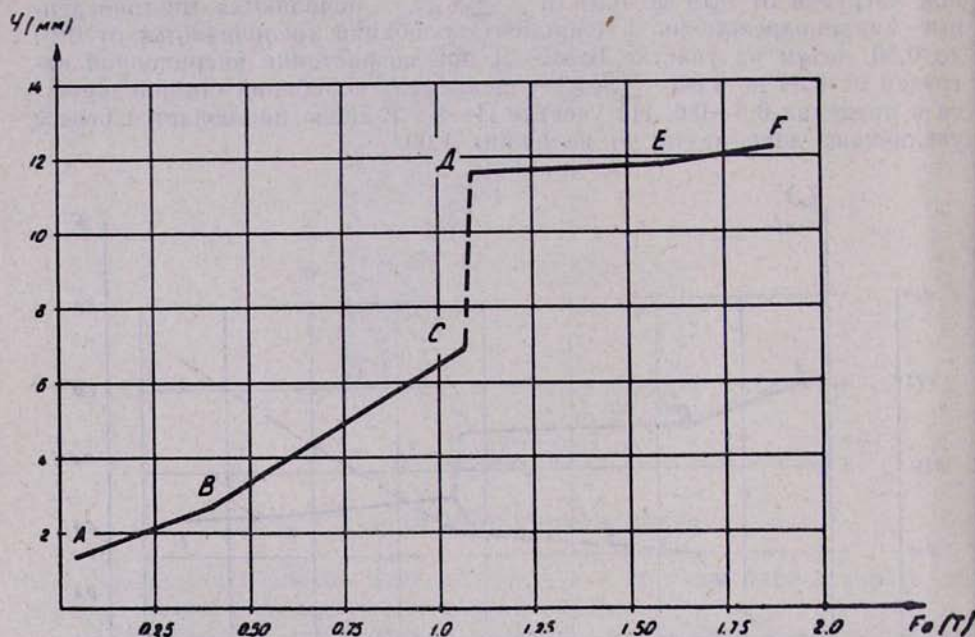


Рис. 6. Зависимость амплитуды колебаний в девятом этаже от уровня возмущающего воздействия

На участке А—В—С с ростом F_0 почти пропорционально увеличиваются и амплитуды перемещений. Затем на участке С—Д происходит резкое увеличение амплитуд за счет выключения из работы перемычек.

На участке Д—Е—F, несмотря на значительный рост амплитуды возмущения, прогибы растут незначительно, что объясняется интенсивным увеличением декремента колебаний в этих режимах, из-за чего значительная часть энергии вибратора расходуется на преодоление сил внутреннего трения.

Отметим, что определение декремента колебаний на всех стадиях испытаний производилось методом, основанным на разложении колебаний системы по главным направлениям. Этот метод дает более надежные результаты, чем определение декремента по ширине резонансного графика, так как построение последнего связано с рядом неустраиваемых неточностей. Для более точного построения амплитудно-частотной характеристики, особенно в области резонанса, необходим

Достаточно мелкий шаг изменения частоты возбудителя—0,01—0,02 *гц* и устойчивая его работа в этом режиме. Существующие вибромашинны, в том числе и использованная в данном эксперименте ВИД—12, не обеспечивают этих требований.

Выражение для определения амплитуды колебаний в «К»-ой точке многомассовой системы в резонансном режиме при гармоническом внешнем воздействии $f_k = F_0 \sin \omega_i t$, приложенном в этой же точке „К“, имеет вид:

$$X_k = \sum_{i=1}^n \frac{F_0 r_{ki}^2}{\omega_i^2 \varepsilon_i}, \quad (3)$$

где F_0 —амплитуда внешнего воздействия;

r_{ki} —ординаты собственных функций, нормированные по массе;

ω_i —резонансная частота колебаний.

Имея в виду, что $\delta = \pi \gamma$, можно записать:

$$\varepsilon_i = \frac{\omega_i \delta}{2\pi}. \quad (4)$$

После подстановки (4) в (3) декремент колебаний определяется по формуле:

$$\delta = \frac{2\pi}{X_k} \sum_{i=1}^n \frac{F_0 r_{ki}^2}{\omega_i^2}. \quad (5)$$

Таким образом, для определения декремента колебаний по формуле (5) необходимы значения амплитуд колебаний (X_k), резонансных частот (ω_i) и амплитуды возмущающего воздействия (F_0). Все эти величины могут быть определены с необходимой точностью.

Для всех шести стадий декременты колебаний определялись с учетом одного и двух членов суммы (5). В табл. 2 приведены результаты этих расчетов.

Таблица 2

Учитываемые формы колебаний	Декремент колебаний „ δ “ в стадиях резонансных испытаний					
	стадия А $e=1,0$ мм	стадия В $e=16,5$ мм	стадия С $e=30,5$ мм	стадия D $e=50$ мм	стадия Е $e=80$ мм	стадия F $e=105$ мм
Первая и вторая форма	0,0936	0,501	0,561	0,577	0,879	1,093

Таким образом, в процессе виброиспытаний динамические характеристики модели существенно изменяются. Этот фактор имеет важное значение при расчетах сооружений на воздействие акселерограмм землетрясений. Расчетные модели сооружений с нестационарными динамическими и диссипативными свойствами позволяют получить лучшее соответствие между нормативными и физическими расчетами на сейсмические воздействия [1].

По результатам вибрационных испытаний модели была произведена оценка несущей способности и напряженного состояния несущих конструкций модели в режиме расчетных нагрузок. Максимальное

напряжение, зарегистрированное в арматуре ядра жесткости, составляет: $\sigma = 2200 \text{ кг/см}^2$, т. е. 1,56 раз меньше, чем расчетное сопротивление арматуры, принятое при проектировании модели ($R = 3400 \text{ кг/см}^2$).

Проведенные исследования позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Экспериментальные периоды колебаний модели, соответствующие упругой работе сооружения (стадия А), удовлетворительно согласуются с расчетными. Расхождения составляют 1,4% для первой формы колебаний и 18,8% — для второй.

2. В процессе виброиспытаний существенно изменились динамические характеристики модели. Период первой формы колебаний увеличился в 1,65 раз, а декремент колебаний возрос с 0,10 до 1,10. Эти интервалы могут быть использованы при расчетах железобетонных рамно-связевых конструкций, как систем с изменяющимися динамическими характеристиками, на акселерограммы землетрясений.

3. При испытаниях модели с помощью вибромашины ВИД—12 выявлен эффект адаптации сооружения к гармоническому внешнему воздействию, выражающийся в значительном увеличении диссипативных свойств конструкции и падении собственных частот по мере роста воздействия.

4. В процессе роста динамических нагрузок выявлен характер повреждений в основных несущих конструкциях модели и произведена оценка их напряженного состояния. В первую очередь повреждения появляются в рамной части сооружения, затем в перемычках ядра жесткости. Это приводит к перераспределению усилий в системе и резкому увеличению изгибающих моментов и напряжений в пилонах ядра жесткости.

Несущая способность модели при динамических нагрузках, близких к расчетным, не была исчерпана, а ее запас, определенный как отношение расчетного сопротивления арматуры к зарегистрированным

при испытаниях напряжениям, равен: $k = \frac{3400}{2200} = 1,56$.

Институт механики и сейсмостойкости

АН Узбекской ССР.

Ташкентский политехнический институт

ЛИТЕРАТУРА

1. Рассказовский В. Т., Бабич Л. И. Экспериментальные исследования весовых функций модели 9-этажного каркасного здания с ядром жесткости. Журн. «Строительство и архитектура Узбекистана», № 3, 1978.