

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. Нормативные методы расчета на землетрясения и методики определения динамических характеристик зданий и сооружений	6
1.1. Этапы развития теории сейсмостойкости.....	6
1.2. Линейно-спектральный метод в нормах проектирования	8
1.3. Прямой динамический метод расчета на сейсмические воздействия.....	11
1.4. Динамические методы обследования зданий и сооружений.....	14
1.5. Методы возбуждения колебаний при определении динамических характеристик в натуральных исследованиях	18
1.6. Существующие подходы к расчету сейсмостойкости при повторных землетрясениях	21
Глава 2. Исследование влияния локальных повреждений на динамические характеристики железобетонных зданий и сооружений различных конструктивных схем.....	23
2.1. Исследования здания с полным рамным каркасом	23
2.2. Исследования здания перекрестно-стеновой конструктивной схемы.....	28
2.3. Модальный анализ зданий в ПК LS-DYNA.....	31
2.4. Расчет здания с полным рамным каркасом на микросейсмическое воздействие.....	37
2.5. Расчет здания перекрестно-стеновой конструктивной схемы на микросейсмическое воздействие.....	50
2.6. Динамические исследования купольной части защитной оболочки АЭС	57
Глава 3. Разработка методики расчета сейсмостойкости зданий и сооружений при повторных землетрясениях на основе нелинейного динамического метода	68
3.1. Моделирование сейсмического воздействия методом канонических разложений	68
3.2. Расчет здания с полным рамным каркасом на повторные землетрясения....	71
3.3. Анализ сейсмостойкости здания перекрестно-стеновой конструктивной схемы при повторных землетрясениях.....	80

Глава 4. Оценка сейсмостойкости зданий и сооружений при повторных землетрясениях	90
4.1. Модальный анализ и расчет на микросейсмическое воздействие многоэтажного железобетонного здания	90
4.2. Определение сейсмостойкости жилого многоэтажного железобетонного здания при повторных землетрясениях	94
4.3. Оценка сейсмостойкости защитной оболочки АЭС при повторных землетрясениях	100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	103
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	105

ВВЕДЕНИЕ

Явление сильного землетрясения на определенной местности с наибольшей вероятностью представляет собой длительный динамический процесс в виде множества отдельных мощных подземных толчков в течение нескольких дней (а иногда и месяцев). Как правило, первый толчок самый сильный, за ним следует множество толчков постепенно убывающей силы, так называемые афтершоки (от англ. *after* — после, *shock* — удар, толчок), хотя некоторые из них могут быть лишь немного слабее основного. Опыт показывает, что первые два толчка по силе проявления могут быть практически одинаковыми. Однако в действующих нормах проектирования вероятность возникновения повторных землетрясений не учитывается. В нормативных документах отсутствуют требования к сейсмостойкости зданий и сооружений при повторных сейсмических воздействиях после первого землетрясения с учетом возникших локальных повреждений. Это связано, в том числе, с отсутствием в настоящее время достоверных методик оценки сейсмостойкости при повторных землетрясениях. Разработка данных методик и анализ сейсмостойкости зданий и сооружений при повторных землетрясениях, для которых не проводятся усиления после первого землетрясения, — это актуальные проблемы. Также важен вопрос о том, какие изменения претерпевают динамические характеристики здания (частоты и формы собственных колебаний) при локальных повреждениях его несущих конструкций.

Проблемами сейсмостойкости зданий и сооружений и развитием динамических методов расчета занимались и продолжают заниматься многие отечественные и зарубежные ученые. Решению актуальных задач теории сейсмостойкости посвящены работы: Я.М. Айзенберга [1–3], М.Ю. Абелева, А.М. Белостоцкого [15], А.Н. Бирбраера [16], А.В. Грановского [3], М.А. Дашевского, Г.А. Джинчвелашвили [24–27], В.И. Жарницкого [31–32], К.С. Завриева [34], В.Б. Заалишвили [113], О.В. Кабанцева [36], Р. Клафа [104], Э.Н. Кодыша [2], И.Л. Корчинского, С.В. Кузнецова [20], А.М. Курзанова [45], О.В. Мкртычева [50–60], В.Л. Мондруса [112], Ю.П. Назарова [62], В.И. Смирнова [75–76], Дж. Пензиена [38], А.Е. Саргсяна [73–74], А.Г. Тамразяна [80], Н.Н. Трекина [2], А.Г. Тяпина [89], А.М. Уздина [90], Г. Хаузнера [101; 106], Э.И. Хачияна [92], А.К. Чопра [105], Г.Э. Шаблинского [98], Ю.Т. Чернова [93–94] и многие другие.

Ряд современных работ посвящен прогнозированию и моделированию афтершоковых процессов. Проблема разработки метода расчета зданий на сейсмические нагрузки с учетом воздействий основного и первого повторного толчков для защиты жизни и здоровья людей рассматривается в работах А.В. Масляева [47–49].

Глава 1

НОРМАТИВНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА НА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

1.1. Этапы развития теории сейсмостойкости

Под сейсмостойкостью понимается способность зданий и сооружений противостоять сейсмическим воздействиям, это характеристика зданий и сооружений, описывающая степень их устойчивости к землетрясениям в пределах допустимого риска [77].

В развитии теории сейсмостойкости можно выделить два основных этапа: разработка статической теории; разработка динамической теории.

Статическая теория сейсмостойкости. Началом зарождения теории сейсмостойкости сооружений как научной дисциплины следует считать период конца XIX и начала XX вв., следующий за разрушительными японскими землетрясениями в 1891 г. Мино — Овари. В начале 1900 г. японские ученые Ф. Омори, Сано впервые попытались создать научно-обоснованную теорию сейсмостойкости [16; 109]. Омори устанавливал кирпичные столбики на сейсмическую платформу, в горизонтальной плоскости которой сообщались гармонические колебания. Путем увеличения интенсивности колебаний столбики доводились до разрушения. Таким образом можно было определить наибольшие ускорения и разрушающие инерционные силы, соответствующие ускорениям. На основании своих экспериментов и исследований Омори выдвинул так называемую статическую теорию сейсмостойкости, разработав методику определения сейсмических сил. Представив сооружение в виде твердого недеформируемого тела с жесткой заделкой в основании и считая, что при горизонтальных движениях грунта основания все части сооружения движутся одновременно с ускорением, равным ускорению основания, он предложил определять значение инерционной сейсмической силы по формуле [18]

$$S = K_c \cdot Q, \quad (1.1)$$

где Q — вес сооружения, $Q = m \cdot g$; K_c — коэффициент сейсмичности, представляющий собой отношение максимального значения ускорения основания к ускорению свободного падения, $K_c = \ddot{y}_{0\max} / g$.

Статическую теорию можно было применять лишь для достаточно жестких сооружений, для которых недостатки данной теории не имели существенного значения, а именно, когда деформации сооружений по сравнению со смещениями основания пренебрежимо малы.

Динамическая теория сейсмостойкости. Следующий шаг в развитии теории сейсмостойкости сделал японский ученый Н. Мононобе [16; 18]. В своих исследованиях он рассматривал сооружение как упругую систему, не

сушую лишь один сосредоточенный груз весом Q , и принимал, что грунт колеблется по гармоническому закону. В 1921 г. Мононобе получил формулу для определения сейсмической силы:

$$S = \beta \cdot K_c \cdot Q, \quad (1.2)$$

где Q — вес сооружения, $Q = m \cdot g$; K_c — коэффициент сейсмичности, $K_c = \dot{y}_{0\max} / g$; β — коэффициент динамичности

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{T^2}{T_0^2}} = \frac{1}{1 - \frac{f_0^2}{f^2}}, \quad (1.3)$$

где $T(f)$ — период (частота) собственных колебаний сооружения; $T_0(f_0)$ — период (частота) колебаний основания при землетрясении.

Анализируя формулы (1.1) и (1.2), видим, что в теории Мононобе при расчете максимальной сейсмической нагрузки, в отличие от теории Омори, учитываются динамические характеристики самого сооружения при помощи коэффициента динамичности β .

Теория Мононобе внесла существенный вклад в развитие теории сейсмостойкости. Развивая динамическую теорию Мононобе, в 1928 г. К.С. Завриев в своих исследованиях учел влияние собственных колебаний системы, опираясь на теорию гармонических вынужденных колебаний. В начальный момент землетрясения, приняв ускорение основания равным максимальному значению, а скорость — равной нулю, Завриев описал гармоническое колебание грунта уравнением

$$y_0(t) = a_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right), \quad (1.4)$$

где a_0 — амплитуда колебания почвы.

Тогда уравнение для определения максимального значения сейсмической силы для упругой системы с одной сосредоточенной массой примет вид

$$S = \beta_1 \cdot K_c \cdot Q, \quad (1.5)$$

$$\text{где } \beta_1 = \frac{2}{1 - \frac{T^2}{T_0^2}} = \frac{2}{1 - \frac{f_0^2}{f^2}}. \quad (1.6)$$

Из формул (1.3) и (1.5) видно, что по теории Н. Мононобе значение максимальной сейсмической силы будет в 2 раза меньше, чем по теории К.С. Завриева.

В дальнейшем в работах А.Г. Назарова была развита концепция сейсмического удара, предполагающая возможность представления сейсмического воздействия в виде импульса.

Спектральная теория сейсмостойкости. В указанных выше теориях принимается, что колебания грунта происходят по гармоническому закону. Однако при землетрясении грунт, можно сказать, колеблется хаотически, что не может быть описано простым аналитическим выражением. Поэтому возникает проблема определения сейсмической нагрузки для реальных записей акселерограмм землетрясения.

В 1934 г. американский ученый М. Био [102] предложил метод оценки сейсмических сил с использованием инструментальных записей колебаний основания (акселерограмм) во время землетрясения. Он сконструировал механическую модель, которая включает в себя набор маятников, имеющих различные периоды собственных колебаний, установленных на подвижной платформе. Придавая платформе движение, соответствующее колебаниям грунта (основания) при землетрясении, было возможно фиксировать максимальные отклонения и ускорения маятников. Используя полученные данные записей ускорений маятников, можно построить спектр ускорений (спектральную кривую), т.е. график зависимости максимальных ускорений колебаний маятников от периода их собственных колебаний.

Спектральная теория далее нашла развитие в работах Г. Хаузнера [101, 106], Н. Ньюмарка, И.Л. Корчинского, А.Г. Назарова, Э.И. Хачияна [92], Н.А. Николаенко, Я.М. Айзенберга [1–3], А.Н. Бирбраера [16] и других ученых.

Вопросы различных областей теории сейсмостойкости зданий и сооружений и развития методов динамического расчета зданий и сооружений рассматриваются в трудах В.А. Амбарцумяна, А.А. Амосова, А.М. Белостоцкого, В.В. Болотина, И.И. Воровича, А.В. Грановского, М.А. Дашевского, Г.А. Джинчвелашвили, А.В. Дукарта, В.Б. Зылева, И.Е. Ицкова, О.В. Кабанцева, Н.В. Колкунова, Б.Г. Коренева, С.В. Кузнецова, Е.Н. Курбацкого, А.М. Курзанова, О.В. Лужина, А.М. Масленникова, О.В. Мкртычева, В.Л. Мондруса, В.И. Смирнова, Ю.П. Назарова, Ю.И. Немчинова, В.А. Ржевского, А.Е. Саргсяна, А.П. Сеницына, А.Г. Тамразяна, А.Г. Тяпина, А.М. Уздина, А.П. Филиппова, Ю.Т. Чернова, Р. Клафа, Дж. Пензиена, А.К. Чопра и др.

1.2. Линейно-спектральный метод в нормах проектирования

Линейно-спектральный метод представлен в действующих нормах проектирования и заключается в использовании расчетного спектра реакции, представляющего собой аппроксимацию спектров реакции для представительного набора акселерограмм землетрясений [90]. Этот спектр может использоваться для определения упругой реакции систем с одной и многими степенями свободы. Спектральный метод расчета конструкций на сейсмические воздействия является основным как за рубежом, так и в нашей стране. Данный метод предполагает определение сейсмических инерционных нагрузок (сил), приложенных в центре тяжести массы. Конструкция затем рассчитывается на действие сил, приложенных к конструкции статически. Динамические свойства конструкции учитываются при определении нагрузок. Для этого движение систе-

мы раскладывается по формам колебаний, т.е. представляется как сумма некоторых движений (форм колебаний).

При выполнении расчетов зданий и сооружений на основе линейно-спектральной теории исходное расчетное сейсмическое воздействие задается или в виде спектральной кривой коэффициента динамичности β и соответствующего коэффициента сейсмичности, или в виде набора акселерограмм [77]. Инструментальные или синтезированные акселерограммы определяют закон движения грунта на свободной поверхности площадки строительства и представляются, как правило, специализированными организациями (Институт физики Земли РАН). Согласно спектральному методу сейсмические нагрузки являются квазистатическими, что облегчает расчет на сочетание сейсмических и прочих нагрузок. К недостаткам относится то, что спектральный метод корректен только при расчете линейных систем. Спектральный метод, как правило, применяется при использовании [90; 95]:

- упрощенных моделей сооружений, отражающих поступательные колебания для расчета зданий и сооружений простой геометрической формы с симметричным и регулярным расположением масс и жесткостей, и с наименьшим размером в плане — не более 30 м;

- расчетных моделей, которые, помимо поступательных, учитывают крутильные сейсмические воздействия (сейсмический момент, неравномерное поле колебаний грунта) для расчета зданий и сооружений, несимметричных в плане или по высоте, а также каркасных зданий высотой более 50 м.

Спектральная методика оценки сейсмостойкости сооружений является основной в нормах большинства стран. Эта методика базируется на опыте прошлых землетрясений и обеспечивает необходимую сейсмостойкость сооружений путем использования при расчете эмпирической системы расчетных коэффициентов, что позволяет по-разному трактовать не только результаты, но и исходные посылки нормативной методики.

Расчеты на сейсмостойкость зданий и сооружений в России рекомендуется проводить по спектральной теории, которая лежит в основе СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах.

В соответствии с [77], расчетная сейсмическая нагрузка S_{ik}^j по направлению обобщенной координаты с номером j , приложенная к узловой точке k расчетно-динамической модели и соответствующая i -й форме собственных колебаний зданий и сооружений, определяется по формуле

$$S_{ik}^j = K_1 S_{0ik}^j, \quad (1.7)$$

где K_1 — коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения; S_{0ik}^j — значение сейсмической нагрузки для i -й формы собственных колебаний здания и сооружения,

$$S_{0ik}^j = Q_k^j A \beta_i K_\psi \eta_{ik}^j, \quad (1.8)$$

здесь Q_k^j — вес здания или сооружения, отнесенный к точке k по обобщенной координате j ; A — значение ускорения в уровне основания; следует принимать равным 0,1; 0,2; 0,4 соответственно для расчетной сейсмичности 7, 8, 9 баллов; β_i — коэффициент динамичности, соответствующий i -й форме собственных колебаний зданий или сооружений; K_ψ — коэффициент, принимаемый в соответствии с указаниями норм; η_{ik}^j — коэффициент, зависящий от формы деформации здания или сооружения.

В этих нормах коэффициент динамичности β_i предлагается определять по графикам рис. 1.1 или по формулам (1.9) и (1.10) в зависимости от расчетного периода собственных колебаний T_i здания или сооружения по i -й форме.

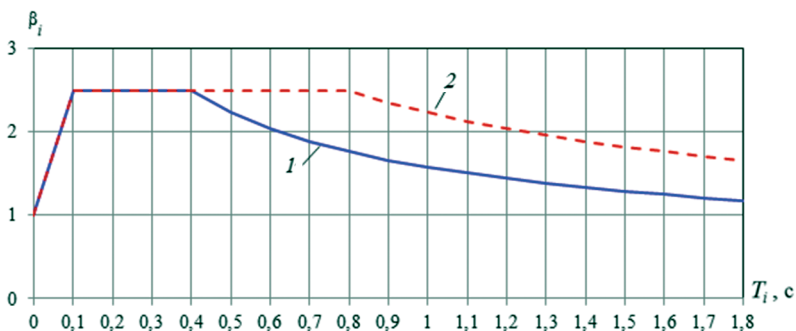


Рис. 1.1. Зависимость коэффициента динамичности β_i от периода собственных колебаний T_i

Для грунтов категорий I и II по сейсмическим свойствам (кривая 1) при:

$$\begin{aligned} T_i \leq 0,1 \text{ с} & \quad \beta_i = 1 + 15 T_i; \\ 0,1 \text{ с} < T_i < 0,4 \text{ с} & \quad \beta_i = 2,5; \\ T_i \geq 0,4 \text{ с} & \quad \beta_i = 2,5(0,4/T_i)^{0,5}; \end{aligned} \quad (1.9)$$

для грунтов категории III по сейсмическим свойствам (кривая 2) при:

$$\begin{aligned} T_i \leq 0,1 \text{ с} & \quad \beta_i = 1 + 15 T_i; \\ 0,1 \text{ с} < T_i < 0,8 \text{ с} & \quad \beta_i = 2,5; \\ T_i \geq 0,8 \text{ с} & \quad \beta_i = 2,5(0,8/T_i)^{0,5}; \end{aligned} \quad (1.10)$$

во всех случаях значения β_i должны приниматься не менее 0,8.

1.3. Прямой динамический метод расчета на сейсмические воздействия

С конца 1970-х гг. благодаря развитию вычислительной техники в расчетах сейсмостойкости сооружений начали применяться динамические методы, основанные на методах прямого интегрирования и заключающиеся в непосредственном использовании инструментальной или синтезированной акселерограммы при интегрировании уравнений движения [90; 95]. При динамических расчетах конструкций на сейсмическое воздействие используются современные программные комплексы, в основе которых лежат метод конечных элементов [22; 87; 88] и разные схемы прямого интегрирования уравнений движения. При этом воздействие задается акселерограммой землетрясения, а дифференциальные уравнения движения системы с конечным числом степеней свободы в матричной форме могут быть представлены в виде [38; 50; 51]

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f^a, \quad (1.11)$$

где u — искомый вектор узловых перемещений; \dot{u} — вектор узловых скоростей, $\dot{u} = v$; \ddot{u} — вектор узловых ускорений, $\ddot{u} = a$; M — матрица масс; C — матрица демпфирования; K — матрица жесткости; f^a — вектор приложенных нагрузок.

Решение системы (1.11) можно получить при использовании явных и неявных схем прямого интегрирования уравнений движения. При использовании метода Ньюмарка, реализующего неявную схему интегрирования, выражение (1.11) в момент времени t_{n+1} представляется в виде [54; 83]

$$M\ddot{u}_{t+\Delta t} + C\dot{u}_{t+\Delta t} + Ku_{t+\Delta t} = f_{t+\Delta t}^a. \quad (1.12)$$

При решении задач в линейной постановке вычисление $u_{t+\Delta t}$ сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений.

При решении задачи в нелинейной постановке, когда учитываются физическая геометрическая нелинейности, элементы матрицы K зависят не только от свойств материала конструкций, но и от напряженно-деформированного состояния системы, т.е. от вектора перемещений u . Задача, таким образом, заметно усложняется и сводится к решению нелинейных алгебраических уравнений на каждом шаге интегрирования по времени. Наиболее эффективными в этом случае становятся явные схемы интегрирования уравнений движения системы. Одним из методов, реализующих данную схему, является метод центральных разностей. Особенность явных схем заключается в том, что узловые скорости v и ускорения a вводятся в расчет как неизвестные и вычисляются напрямую, а не путем дифференцирования перемещений [51].

При определении перемещений вместо выражения (1.11) используется выражение (1.13) с запаздыванием по времени:

$$\text{M}\ddot{\mathbf{u}}_t + \text{C}\dot{\mathbf{u}}_t + \text{K}\mathbf{u}_t = \mathbf{f}_t^a. \quad (1.13)$$

Явные схемы интегрирования используют рекуррентные соотношения, которые выражают перемещения, скорости и ускорения на данном шаге через их значения на предыдущих шагах.

Вектор ускорений имеет вид

$$\mathbf{a}_t = \text{M}^{-1} \left(\mathbf{f}_t^{\text{ext}} - \mathbf{f}_t^{\text{int}} \right), \quad (1.14)$$

где $\mathbf{f}_t^{\text{ext}}$ — вектор внешних сил; $\mathbf{f}_t^{\text{int}}$ — вектор внутренних сил.

Векторы скоростей и перемещений на соответствующем шаге определяются следующими уравнениями:

$$\mathbf{v}_{t+\Delta t/2} = \mathbf{v}_{t-\Delta t/2} + \mathbf{a}_t \Delta t; \quad (1.15)$$

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}_t + \mathbf{v}_{t+\Delta t/2} \frac{\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t}}{2}. \quad (1.16)$$

При использовании диагональной матрицы масс можно вычислить обратную матрицу, уменьшив время одной итерации и упростив расчет. Отсюда следует, что явные методы не связаны с решением систем алгебраических уравнений. Наиболее трудоемкой операцией становится вычисление вектора $\mathbf{f}_t^{\text{int}}$, который учитывает все виды нелинейностей.

Описанные выше схемы интегрирования уравнений движения имеют как преимущества, так и недостатки. Например, опыт применения явных схем указывает на наличие его существенного недостатка, состоящего в быстром накоплении погрешности при вычислениях. Главное достоинство применения явных схем — простота решения получаемой системы алгебраических уравнений. Но для жестких систем и систем с плохо обусловленной матрицей явные схемы требуют ограничений на шаг интегрирования по времени, которые связаны с условием устойчивости. В некоторых случаях нужно ограничивать шаг по времени для получения приемлемой точности, хотя решение будет устойчивым и при довольно большом шаге.

Применение неявных схем позволяет иногда получать устойчивое решение при достаточно большом шаге интегрирования по времени. Но для случая нелинейной задачи на каждом шаге потребуются решить систему нелинейных алгебраических уравнений. Для получения же необходимого уровня точности может потребоваться мелкая сетка и малый шаг интегрирования по времени, что приведет к значительному росту времени расчета.

Сравнительный анализ схем прямого интегрирования уравнений движения показал, что для оценки надежности зданий при расчете на сейсмические воздействия с учетом геометрической, физической и конструктивной нелинейностей наиболее эффективным является применение явных схем интегрирования.

Прямой динамический метод, заключающийся в численном интегрировании уравнений движения, как правило, применяется для расчета:

- зданий и сооружений с принципиально новыми конструктивными решениями, не прошедшими экспериментальной проверки (объекты экспериментального строительства);

- объектов повышенного уровня ответственности при использовании коэффициентов надежности по ответственности $\gamma_n > 1$;

- зданий и сооружений высотой более 50 м и сооружений с пролетами более 30 м;

- зданий и сооружений, оснащенных системой сейсмоизоляции и другими системами регулирования сейсмической реакции.

При расчетах с использованием акселерограмм нормирование производится следующим образом:

$$a_i(t) = A_i y_i(t), \quad (1.17)$$

где i — номер компоненты трехмерного вектора колебаний; A_i — максимальное значение амплитуды ускорений; $y_i(t)$ — нормированная на единицу функция, описывающая колебание грунта во времени.

Акселерограммы могут строиться на основе инструментальных записей сильных и промежуточных по величине землетрясений, зарегистрированных непосредственно на строительной площадке либо в условиях, близких к условиям площадки проектируемого здания или сооружения. Величины в этом случае определяются с учетом оценки сейсмической опасности на площадке строительства. Иногда допускается использование синтезированных расчетных акселерограмм, построенных с учетом характеристик площадки и ее расположения относительно опасных сейсмических зон [95]. Также расчетные акселерограммы могут быть получены численным моделированием при рассмотрении землетрясения в виде нестационарного случайного процесса [70].

Следуя общим принципам сейсмостойкого строительства, необходимо провести несколько расчетов конструкции: на слабые частые воздействия (без нарушения нормальной эксплуатации), на воздействие умеренной силы и повторяемости (при ограниченном объеме повреждений) и на сильные редкие воздействия (при обеспечении сохранности жизни людей и ценного оборудования). В настоящее время проведение динамического расчета в указанной постановке вызывает серьезные трудности из-за ограниченности имеющейся информации о виде воздействия и работе материала за пределами упругости. Принципиальные вопросы динамического расчета сооружений на сейсмические нагрузки требуют серьезной проработки и исследований. Во всех случаях применения динамических методов расчета их результаты должны рассматриваться совместно с результатами нормативных расчетов (если такие возможны) и материалами экспериментальных исследований.

Обычно динамические расчеты применяются при исследовании сейсмостойкости существенно нелинейных систем, например, сооружений на сейсмоизолированных фундаментах и при анализе работы конструкций за пределами упругости. Однако даже в тех случаях, когда решены вопросы моделирования работы конструкции и сформулированы критерии ее сейсмостойкости (такая ситуация имеет место, в частности, в расчетах конструкции, не допускающих повреждений несущих элементов, в расчетах любых сооружений на «частые» и «слабые» землетрясения и т.п.), серьезные проблемы могут возникнуть при задании исходных данных параметров сейсмического воздействия.

1.4. Динамические методы обследования зданий и сооружений

Натурные динамические исследования в России были начаты примерно в середине XX в. в Центральном научно-исследовательском институте экспериментального проектирования (ЦНИИЭП) жилища и Центральном научно-исследовательском институте строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А. Кучеренко. Определению динамических характеристик и прочности зданий при динамических (сейсмических) нагрузках в свое время были посвящены работы И.Л. Корчинского, Г.А. Шапиро, М.А. Дашевского, Г.Э. Шаблинского и др.

О результатах таких испытаний докладывалось на международных конференциях по сейсмостойкому строительству. Задача этих исследований состояла в определении динамических параметров объектов и сравнении их с результатами расчетов, выполненных по одной из расчетных схем с использованием ЭВМ. Быстрое развитие ЭВМ позволяло все более приближать расчетные схемы к реальным конструкциям. Параллельно развивалась техника экспериментов в сторону уменьшения трудоемкости путем замены светолучевых магнитоэлектрических осциллографов и магнитографов на современные персональные компьютеры с программами регистрации процесса записи, обработки и анализа результатов экспериментов.

Впервые методика натурных динамических исследований в полном объеме была апробирована на строительных конструкциях реакторного отделения Крымской АЭС. В связи с тем, что это реакторное отделение к началу исследований еще не было подготовлено к эксплуатации, оно стало отличным объектом для проведения испытаний.

Натурные исследования проводятся на уже построенных сооружениях. Для получения достоверных результатов натурных динамических исследований необходимо разработать их методику, создать комплекс специальной мобильной аппаратуры, отвечающей современным требованиям.

За последние примерно 25 лет огромный прогресс в электронике и вычислительной технике привел к коренным изменениям в регистрации различного рода колебаний (вибраций). Новые типы первичных при-

боров — велосиметры, акселерометры — обладают более высокой чувствительностью, имеют более широкий рабочий частотный диапазон при повышенной точности измерений. Данные приборы могут быть аналоговыми и цифровыми. В первом случае требуется аналого-цифровой преобразователь (АЦП), так как регистраторами обычно служат персональные компьютеры. Разработаны программы обработки записей колебаний (вибраций). При измерениях параметров колебаний, как правило, фиксируются смещения и ускорения. Для измерения ускорений промышленностью выпускаются акселерометры различного типа и размеров с разным рабочим диапазоном частот.

В последние 15–20 лет в разных научно-исследовательских организациях России довольно интенсивно развиваются динамические методы обследования состояния зданий и сооружений. Суть методов заключается в том, чтобы по особенностям динамических характеристик строительных конструкций оценить их состояние (наличие дефектов в несущих конструкциях, степень их опасности для дальнейшей эксплуатации здания или сооружения и т.д.). Методы различаются подходом к проблеме, типами измерительных приборов, программными обеспечениями для обработки результатов экспериментов и обоснованием тех или иных выводов по результатам обследования.

В работе А.Ф. Еманова [30] теоретически обосновывается использование когерентных волн в определении динамических характеристик различных строительных конструкций. Практическому использованию этого метода посвящены работы [35; 44; 72]. Метод защищен несколькими патентами [63–65].

При оценке состояния строительных конструкций по их динамическим характеристикам используется метод, разработанный московскими специалистами Центра исследований экстремальных ситуаций (ЦИЭКС), который занимается разработкой, производством, совершенствованием и внедрением диагностических комплексов для оценки технического состояния зданий и сооружений. Этим центром согласно работам [43; 44; 46; 61] были разработаны и неоднократно модернизированы комплексы «Струна» и «Стрела», представляющие собой совокупность аппаратных и программных средств, для экспериментального определения основных динамических характеристик строительных конструкций и последующего анализа их прочности и устойчивости.

Диагностический комплекс «Струна» был создан московскими специалистами ЦИЭКС С.П. Сушевым, В.И. Ларионовым, В.Н. Сотинным и Н.Н. Хлаповым для определения повреждений вследствие землетрясения, износа или несоблюдения технологии строительства зданий и сооружений. Комплекс «Струна», по мнению его авторов, предназначен для анализа повреждений зданий и сооружений от землетрясений. Он состоит из трехкомпонентных датчиков, в которых находятся три тонких плоских керамических стержня — пьезоэлементы, отвечающие за направле-

ние колебаний корпуса датчика и, следовательно, здания в пространстве. Вес прибора «Струна» составляет 0,150 кг. Диапазон частот данного прибора — 0,1–150 Гц. В корпус прибора «Струна» также вмонтирован радиопередатчик, отправляющий сигналы на базовую станцию, которая может находиться на расстоянии до 1 км. Сигналы на базе оцифровываются с помощью преобразователя и передаются на портативный компьютер, на котором установлено специальное программное обеспечение для анализа сигналов и определения устойчивости, сейсмостойкости и физического износа здания или сооружения. Прибор «Струна» фиксирует все шумы и вибрации, в том числе шум шагов, машин на улице и др. Для фильтрации шумов также применяется искусственный возбудитель вибрации в виде мешка с песком, которым ударяют по зданию. Датчики легко измеряют искусственную вибрацию и выделяют частоту собственных колебаний здания. Отклонение от определенной частоты здания в сторону преимущественно низких частот свидетельствует о большой степени износа, наличии дефектов и (или) разрушений. С помощью компьютера можно создать визуализацию колебаний здания. Если здание колеблется как единое целое, то это говорит о его устойчивости, в том числе и сейсмической. Если колебание частей здания происходит по-разному, это свидетельствует о разрыве сплошности, т.е. у здания есть дефекты. После этого с помощью обычных инструментальных методов вычисляется возможность устранения опасности [46].

Аппаратно-программный мобильный диагностический комплекс для экспериментального определения основных динамических характеристик строительных конструкций «Стрела-П» предназначен для оперативной оценки технического состояния зданий и сооружений, опасности их обрушения и возможного индивидуального риска для людей, находящихся внутри или поблизости объектов [43].

Таким образом, за последние годы появился ряд работ, в которых предлагаются инженерно-сейсмические методы определения динамических характеристик строительных конструкций и использование их для оценки надежной работы таких конструкций вплоть до остаточного ресурса их эксплуатации. Следует также отметить, что технология предлагаемого комплекса работает в основном от ударов (или сброса) мешков с песком, в качестве измерительных приборов предлагается использовать акселерометры. На измеряемые этими комплексами полезные сигналы обычно накладываются фоновые колебания случайного характера, а при анализе особенностей колебаний зданий и сооружений обычно требуется анализировать еще и смещения. Для определения смещений потребуется двойное интегрирование сигналов акселерометров, что при случайном характере колебаний приводит к очень большим погрешностям.

Учитывая эти обстоятельства и получая заказы на проведение динамических исследований зданий и сооружений с целью составления их динамических паспортов, под руководством доктора технических наук, профессо-

ра Г.Э. Шаблинского [7; 10–12; 96–97; 99] была разработана своя методика и технология проведения таких работ с использованием своего аппаратно-программного комплекса, который совершенствовался по мере появления и освоения новых типов приборов регистрации колебаний и программных комплексов обработки экспериментальных данных.

В натуральных динамических исследованиях¹ в разное время применялись следующие типы приборов:

– Модернизированный однокомпонентный виброметр (велосиметр) СМ-3. Рабочий диапазон частот 0,5–100,0 Гц. Принцип действия датчика основан на электромагнитной индукции. Механический маятник с закрепленной индукционной катушкой перемещается в магнитном поле постоянного магнита.

– Широкополосный цифровой трехкомпонентный виброметр (велосиметр) СМГ-6ТD фирмы Guralp. Рабочий диапазон частот 0,033–100 Гц. Принцип действия такой же, как у СМ-3, но в одном корпусе установлены три датчика, измеряющие колебания по трем ортогональным направлениям.

– Широкополосный трехкомпонентный сейсмометр SP400 фирмы Eentec (0,067–100 Гц). Сейсмометры имеют три однокомпонентных молекулярно-электронных датчика, смонтированных в общем корпусе. Принцип работы молекулярно-электронных сейсмических датчиков состоит в следующем: внешний механический сигнал вызывает поток рабочей жидкости, который, в свою очередь, преобразуется в электрический ток с помощью системы электродов.

Для записи и дальнейшей обработки сигнала использовался программный комплекс АСТest, включающий модуль подготовки и проведения эксперимента и модуль обработки данных. Комплекс АСТest предназначен для обработки материалов записей колебаний, проводимых при исследованиях в натуральных и лабораторных условиях (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003611315 от 29 мая 2014 г. «Программный комплекс автоматизации экспериментальных и технологических установок — АСТest»).

В реальном масштабе времени производится первичная математическая обработка измеряемых параметров. Вся информация сохраняется в формате базы данных и доступна для дальнейшей обработки и сравнительного анализа.

Также для обработки полученных записей использовался программный пакет DADiSP 2002 [103].

Для сравнения работы указанных выше приборов, регистрирующих колебания, в 2011–2012 гг. были проведены методические эксперименты с одновременной записью колебаний на одном из восемнадцатиэтажных зданий. Здание имеет монолитный железобетонный каркас с жесткими железобетон-

¹ Натурные динамические исследования, приведенные в данной работе, проводились под руководством д.т.н., проф. Г.Э. Шаблинского при участии к.т.н. А.А. Румянцева, к.т.н. Е.Ю. Сергеевцева, к.т.н. П.И. Андреевой.

ными дисками перекрытий и кирпичным заполнением фасадов. Записи колебаний проводились на восемнадцатом этаже здания, где регистрировались его горизонтальные колебания. Для записи колебаний здания применялись все три типа описанных выше приборов: модернизированный велосиметр CM-3; SMG-6TD и SP400.

По результатам испытаний получено, что все сейсмометры зарегистрировали примерно одинаковые показатели. Апробация модернизированных и новых сейсмометров проводилась также на ряде других объектов: здание проектного бюро «Вертолеты России», административное здание НИУ МГСУ, Ростовская и Балаковская АЭС и др. Практический опыт работы показал, что сейсмометр SP400 (рис. 1.2) является наиболее функциональным и рекомендован для дальнейших динамических исследований строительных конструкций зданий и сооружений.



Рис. 1.2. Трехкомпонентный сейсмоприемник SP400 фирмы EENTEC

1.5. Методы возбуждения колебаний при определении динамических характеристик в натуральных исследованиях

При исследованиях колебаний различных объектов с целью определения динамических характеристик (частот и форм собственных колебаний, декрементов колебаний) для регистрации колебаний конструкций их необходимо возбудить. Существуют различные естественные источники возбуждения колебаний сооружений:

– микросейсм (микрколебания основания сооружения, связанные с сейсмическими явлениями);

– фоновые колебания техногенного характера (колебания грунтовых оснований сооружений, связанных с движением различного транспорта вблизи объекта исследования, работой людей и оборудованием на объекте);

– динамическая составляющая ветровой нагрузки на здание.

В случае неэффективности воздействия этих возбудителей колебаний на здание применяются искусственные возбудители:

– импульсные воздействия;

– использование специальных вибраторов.

Импульсный метод возбуждения колебаний подразумевает приложение единовременной импульсной нагрузки в ключевой точке отдельной несущей конструкции здания, например, в точке, где предполагаются максимальные амплитуды колебаний. Тем самым импульс возбуждает искомые колебания частот и форм с максимумом амплитуд, находящимся в точке приложения импульса.

Так, в пролетных конструкциях для определения первой формы вертикальных колебаний необходимо прикладывать импульсное воздействие в середине пролета конструкции. Для получения кососимметричной формы колебаний пролетной конструкции импульсную нагрузку необходимо прикладывать уже на расстоянии примерно четверти пролета от опоры.

При использовании импульсного метода возбуждения колебаний также очень важен фактор воздействия непосредственно на несущие конструкции здания (минуя различные номинально несущие, изолирующие, отделочные или облицовочные конструкции). Невыполнение этого условия может повлечь за собой искажение результатов эксперимента.

При исследовании динамических характеристик отдельной конструкции или какой-либо части сооружения (отдельно взятой группы конструкций, выделенной из общего объема сооружения) в качестве импульса может быть использован сброс небольшого груза (до 50 кг) с небольшой высоты (1,5 м), например, сброс мешка с песком на плиты перекрытия в середине пролета ригеля перекрытия. Также в качестве импульса могут быть использованы различные ударные нагрузки. В отдельных случаях требуются возбуждения колебаний не отдельной конструкции, а всего сооружения в целом. В этом случае импульсную нагрузку необходимо прикладывать в ключевых точках конструкций здания: узлах опирания ригелей на колонны, узлах опирания второстепенных балок на главные балки и т.п. При таких исследованиях также важна величина импульсной нагрузки, которая должна быть достаточной для возбуждения колебаний всего сооружения в целом.

При импульсном воздействии с целью возбудить колебания всего здания в целом необходимо применять грузы большей массы и с различными направлениями импульсов. Этот метод применялся в исследованиях, проведенных на здании закрытого плавательного бассейна в г. Анапе, где в качестве импульса применялось ударное воздействие на конструкции бассейна спе-

циально изготовленными железобетонными кубами с помощью подъемного крана (рис. 1.3) [96–97]. Ударная нагрузка прикладывалась в различных точках кольцевой подстропильной балки, опоясывающей все здание, а также производился сброс железобетонного куба на грунт в непосредственной близости от здания.

Импульсный метод позволяет определить частоты собственных колебаний, однако построение форм колебаний невозможно, так как приложенная нагрузка является точечной и максимальные амплитуды будут регистрироваться вблизи точки приложения нагрузки.

Резонансный метод возбуждения колебаний является наиболее эффективным и в то же время значительно более трудоемким.

Данный метод подразумевает создание и использование в качестве возбудителей колебаний специальных вибраторов, устанавливаемых непосредственно на само сооружение или вблизи него на грунте. Вибратор создает гармонические колебания и может плавно изменять частоты этих колебаний и, следовательно, частоты воздействия на сооружение. В этом случае происходит плавное и полностью подконтрольное «сканирование» частот колебаний вибратора и вынужденных колебаний сооружения. В момент, когда частота вибратора совпадает с одной из собственных частот конструкций здания или сооружения, в конструкции возникает резонансный эффект, который фиксируется регистрирующими приборами. Таким образом, этот метод является наиболее эффективным в исследовании динамических характеристик конструкций, динамического мониторинга, а также проверки сейсмостойкости зданий.

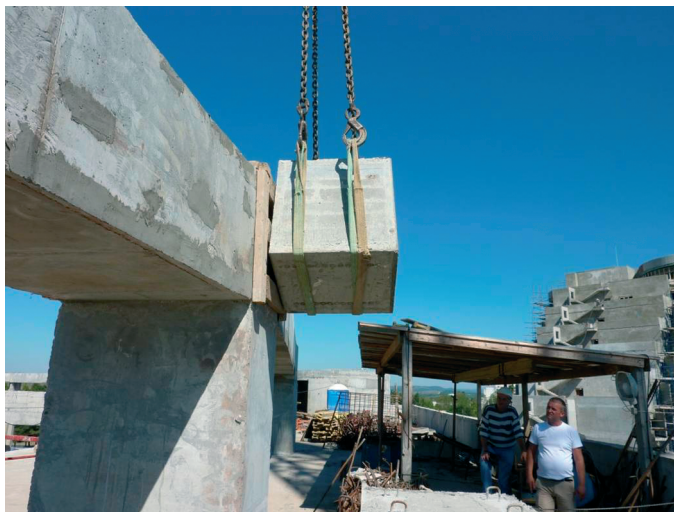


Рис. 1.3. Импульсное ударное воздействие на кольцевую железобетонную балку

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru