А. И. Сапожников

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗАВАРИЙНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И УРАГАНОВ

Астрахань 2015

ŋqdqȺeɎ bɆ dədɆbɎɜə d ɕɔɑbɔȺ ɈqddɎqȺè

А. И. Сапожников

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗАВАРИЙНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И УРАГАНОВ

Допущено НМС по редакционно-издательской
деятельности при министерстве образования
и науки Астраханской области,
приказ № 629 от 25.06.2007г.

Астрахань
2015

ББК 38.5-0.28.8
С. 19
УДК 624.15.04.699.841

Рецензент: В.В. Микитянский, академик ИА, докт. техн. наук профессор, Засл. Деятель науки РФ, заведующий кафедрой в АГТУ

С.19 Обеспечение безаварийной эксплуатации зданий и сооружений при действии землетрясений и ураганов /А. И. Сапожников. – Астрахань: АГТУ, 2015. – 35с.: 11илл.

В брошюре приводится методика динамического расчета объектов с учетом их собственных, собственных сопутствующих и вынужденных колебаний, дан анализ особенностей поведения несущих элементов зданий и сооружений при динамических нагрузках, предложены пути повышения их прочности и жесткости.

ŋqdqyeY bE debEbYze d ecaqcy Jqdqyqyè

Введение

Разгадать причину обрушения зданий и сооружений при землетрясениях и ураганах, - значит сохранить жизнь десяткам тысяч людей и обеспечить целостность многих городов и целых районов.

В настоящее время такая разгадка еще не состоялась, комиссии, обследующие последствия землетрясений и ураганов, постоянно находят причину разрушения зданий и сооружений в низком качестве строительных работ. Однако строительство происходит в полевых условиях и это достигнутый уровень качества, присущий имеющимся условиям проведения работ. Причину разрушений следует искать в кабинетах ученых и проектировщиков. Они должны обеспечить устойчивость объектов к проявлениям стихии при имеющемся качестве строительства.

Забегая вперед и опираясь на разумную внушаемость читателя, берусь заявить, что обсуждаемые разрушения происходят из-за неправильного определения сейсмических и ветровых нагрузок и из-за несоответствия действительного поведения нагруженных конструкций характеру их разрушения, принимаемому в расчете.

ŋqdbyeɣ bƎ debƎbɣзe d eɜɑbɔɐɣ Ɉqdbɣbɣè

1. Определение сейсмической и ветровой нагрузки на здания и сооружения, приведенные к осциллятору

Выбор осциллятора в качестве расчетной модели в данной работе вызван не столько ее практической пользой, сколько желанием добиться высокого уровня понимания студентами проблем, связанных с определением динамических нагрузок на здания и сооружения (ЗиС), поскольку повышение точности определения нагрузки – одна из основных задач качественного проектирования ЗиС.

Следует сразу же уяснить разницу в передаче объекту сейсмической и ветровой нагрузок. Первая передается кинематическим путем, т.е. в результате поступательно-возвратного перемещения основания (по осям X, Y, Z), по результирующему направлению, вторая – фактическим воздействием на объект. В том и другом варианте нагружения объекта его математическое описание может представлять собой импульс, гармоническое воздействие, воздействие системы гармонических сил–полигармоническое воздействие, негармоническое и комплексное воздействие.

Следует отметить, что для зданий и сооружений, имеющих достаточно широкий спектр частот, в то же время с близкорасположенными значениями, импульс следует рассматривать в контексте отношения времени его действия Δt и величины $T/4$, где T – период колебания объекта. Импульсом следует считать воздействие относительно только тех форм колебаний, для которых $\Delta t \ll T_i/4$, T_i - период колебания объекта по i - й форме. При значениях Δt, близких к величине $T_i/4$, наблюдается так называемый ударный резонанс.

В настоящее время нет методов определения точного значения сейсмической нагрузки, и ее вычисляют на основе записей прошлых землетрясений. Такой подход может дать лишь условные значения нагрузки, во-первых, потому что каждое землетрясение индивидуально, во-вторых, записи колебания на незастроенной территории и на основании здания могут (должны) заметно отличаться.

Вместе с тем, следует учесть, что грунт пропускает конкретный спектр частот, наполняемость которого так или иначе, в конце концов, удастся определить. Сложнее, если вообще возможно, установить значения амплитудных параметров движения земли, привязанных к той или иной частоте ее колебания. Здесь остается принимать их значения на основе записей прошлых землетрясений и, чтобы не полагаться на авось, проблему сейсмостойкости зданий и сооружений решать не только путем все более тщательного уточнения величины сейсмической нагрузки, но и путем изучения

ŋqdbyeɣ bƎ dəbƎbʎɜe d ɛɑɑbɔʎ ɹqdbɣqʎè

их способности ее воспринимать. Из этого вытекает еще одна важная задача, решение которой будет способствовать динамической устойчивости сооружений. Речь идет о соответствии предполагаемого в расчете и реального поведения нагруженных конструкций.

Но вернемся к определению сейсмической нагрузки. Приняв ее в виде одного или системы импульсов, следует вначале определить периоды нескольких низших форм колебания рассматриваемого объекта, с целью сравнения величин Δt и $T_i/4$, где $i=1$; 2; 3; …, *К*, при которых выполняется условие, что $\Delta t \ll T_K/4$, и эти *К* форм рассчитывать на импульсивное воздействие. Для номеров $i > K$ следует осуществлять расчет на «ударный резонанс», когда $T_K/4 > \Delta t > T_r/4$, где между *К* и *r* располагается несколько форм колебания со значениями $T_K/4 \lesseqgtr 1{,}5\Delta t$. В этом интервале нагрузка описывается функцией $P\sin\omega_i t\Big|_{t_i}^{t_{i+1}}$, действующей на полупериоде – от $t_i = 0$ до $t_{i+1} = T/2$, или на четверти периода – от $t_i=0$ до $t_{i+1}=T/4$.

Давление ветра на здание статическим называется условно, на самом деле это длинопериодное воздействие, продолжительность которого существенно превышает четверть периода, т.е. $\tau_g \gg T_g/4$, где *T* – период колебания здания.

Помимо длинопериодных, имеются еще динамические краткопериодные пульсации ветра, у которых $\tau_g \ll T_g/4$.

Поскольку эти воздействия проявляются одновременно, их математическая характеристика описывается простейшей функцией

$$S_\Sigma(t) = f_g \sin\frac{\pi t}{T_g} + f_K \sin\frac{\pi t}{T_K}.$$

В общем случае это равенство должно представлять собой разложение в ряд Фурье ветрового воздействия, т.е. содержать еще и члены $f\cos\dfrac{\pi t}{T}$, имеющие в момент времени $t=0$ численное значение, т. к. $\cos 0 = 1$. Иными словами, как и при землетрясении, нагрузка порождает начальные условия: косинусы – начальные смещения; синусы – скорости (или импульсы). Ветровое воздействие передается зданию, в отличие от сейсмического воздействия, динамическим, а не кинематическим путем. Начальные условия вносят свой вклад в величину ветрового воздействия.

Приведем качественные характеристики ветрового воздействия: $T_g=15$с, $T_K=3$с, $f_g = kq_{og}$, $f_K = kq_{oK}$, где *k* – ветровая характеристика района.

Рассмотрим решение задачи при действии импульса. Его величина S_o определяется из известного равенства теоретической механики для количества движения $mV = F\,\Delta t = S_o$, т. е. $V_k = S_o/m$.

Уравнение колебаний осциллятора имеет вид

$$M\ddot{y}(t) + (1 + \frac{\gamma}{\omega_0}\frac{d}{dt})Cy(t) = q(t), \tag{1}$$

где M – масса осциллятора;

C – коэффициент его жесткости;

γ – характеристика демпфирования;

ω_0 – преобладающая частота воздействия;

y – смещение осциллятора;

q – величина нагрузки,

решение, которого при $q(t) = 0$ и начальных условиях $y(0) = y_0$, $\dot{y}(0) = V_0$ имеет вид $y(t) = e^{-\varepsilon t}(A\sin\omega t + B\cos\omega t) = e^{-\varepsilon t}\left(y_0\cos\bar{\omega}t + \frac{\varepsilon y_0 + V_0}{\bar{\omega}}\sin\bar{\omega}t\right)$, где $\varepsilon = \gamma\omega^2/2\omega_0$,

$\bar{\omega} = \sqrt{\omega^2 - \varepsilon^2}$, ω_0 - преобладающая частота внешнего воздействия.

При $q(t) \neq 0$ решение уравнения (1) принимает вид

$$y(t) = e^{-\varepsilon t}(A\sin\omega t + B\cos\omega t) + \frac{1}{\omega^2}\int_0^t q(\tau)e^{\varepsilon(t-\tau)}\sin\omega(t-\tau)d\tau,$$

где A и B – произвольные постоянные.

С учетом начальных условий $y(0) = y_0$, $\dot{y}(0) = V_0 = S_0/m$ при значении нагрузки $q(t) = P\cos\omega_0 t$ имеем

$$y(t) = e^{-\varepsilon t}\left\{\left[y_0\cos\bar{\omega}t + \frac{\varepsilon y_0 + V_0}{\bar{\omega}}\sin\bar{\omega}t\right] + R\left[\cos\varphi\cdot\cos\bar{\omega}t + \frac{\varepsilon\cos\varphi - \omega_0\sin\varphi}{\bar{\omega}}\sin\bar{\omega}t\right]\right\} + $$
$$+ R\cos(\omega_0 t + \varphi), \tag{2}$$

где $R = P/\sqrt{\left(\bar{\omega}^2 - \omega_0^2\right)^2 + 4\varepsilon^2\omega_0^2}$, $\varphi = arctg 2\varepsilon\omega_0/\left(\bar{\omega}^2 - \omega_0^2\right)$, $P = q/M$.

Если нагрузка представляет собой функцию $P(t) = P\sin\omega_0 t$, то члены $\cos\varphi$, $\sin\varphi$ в последнем равенстве меняются местами.

2. Определение характера колебания зданий и сооружений как системы с *n* степенями свободы при действии динамической нагрузки

Изучение теории колебаний зданий и сооружений (а именно в этом случае важно исследование гармонических колебаний, наиболее простых для изучения и в то же время самых опасных) должно состоять в освоении студентами ее алгоритмов.

Теория включает две важные задачи:

- методику исследования свободных колебаний, т.е. определения собственных колебаний и соответствующих им изменения формы объектов;

- методику определения изменения положения объекта в течение времени под действием приложенных к нему динамических (в том числе гармонических) нагрузок.

Для простоты понимания материала методики излагаются на примере системы с двумя степенями свободы.

2.1. Свободные колебания

Уравнения колебаний системы с двумя степенями свободы имеют вид

$$\begin{cases} M_1\ddot{V}_1 + r_{11}V_1 + r_{12}V_2 = 0, \\ M_2\ddot{V}_2 + r_{21}V_1 + r_{22}V_2 = 0, \end{cases} \qquad (3)$$

где M_i - массы; r_{ij} - коэффициенты жесткости; V_i - смещения масс.

Решение задачи ищем в виде

$$V_1(t) = \mathrm{V}_1 \sin(\omega t + \beta), \quad V_2(t) = \mathrm{V}_2 \sin(\omega t + \beta), \qquad (4)$$

амплитуды отклонения образуют соотношение $V_2 / V_1 = \mathrm{V}_2 / \mathrm{V}_1 = \mu$, используя которое, придадим равенствам (4) следующий вид

$$V_1 = \mathrm{V}_1 \sin(\omega t + \beta), \quad V_2 = \mu V_1 = \mu \mathrm{V}_1 \sin(\omega t + \beta) \qquad (5)$$

Подстановка (5) в (3) приводит к уравнениям

$$\begin{cases} (r_{11} - M_1\omega^2) + \mu\, r_{12} = 0, \\ r_{21} + \mu(r_{22} - M_2\omega^2) = 0, \end{cases}$$

которые определят уравнение частот $(r_{11} - M_1\omega^2)\cdot(r_{22} - M_2\omega^2) - r_{12}^2 = 0$ и, соответственно, частоты собственных колебаний ω_1 и ω_2, а также соотношения

$$\begin{cases} \mu_1 = -\dfrac{r_{11} - M_1\omega_1^2}{r_{12}} = -\dfrac{r_{21}}{(r_{22} - M_2\omega_1^2)}, \\ \mu_2 = -\dfrac{r_{11} - M_1\omega_2^2}{r_{12}} = -\dfrac{r_{21}}{(r_{22} - M_2\omega_2^2)}. \end{cases}$$

Приняв теперь $V_2^{(1)} / V_1^{(1)} = \mathrm{V}_2^{(1)} / \mathrm{V}_1^{(1)} = \mu_1$, $\mathrm{V}_2^{(1)} = \mu_1 \mathrm{V}_1^{(1)}$, получим уравнения колебания по первой форме $\begin{cases} V_1^{(1)} = \mathrm{V}_1^{(1)} \sin(\omega_1 t + \beta_1), \\ V_2^{(1)} = \mu_1 \mathrm{V}_1^{(1)} \sin(\omega_1 t + \beta_1), \end{cases}$ где β_1 - начальная фаза, соответствующая ω_1; индекс сверху (1) – номер формы колебания; а приняв $V_2^{(2)} / V_1^{(2)} = \mathrm{V}_2^{(2)} / \mathrm{V}_1^{(2)} = \mu_2$, $V_2^{(2)} = \mu_2 V_1^{(2)}$, получим уравнения колебания по второй форме $\begin{cases} V_1^{(2)} = \mathrm{V}_1^{(2)} \sin(\omega_2 t + \beta_2), \\ V_2^{(2)} = \mu_2 \mathrm{V}_1^{(2)} \sin(\omega_2 t + \beta_2). \end{cases}$

Из полученного решения можно увидеть, что по каждому из главных колебаний обе массы проходят нулевое положение и достигают максимальных отклонений одновременно. По каждому из главных колебаний их амплитуды находятся в постоянном соотношении (μ_1 или μ_2).

Полное решение задачи имеет вид

$$\begin{cases} V_1 = V_1^{(1)} + V_1^{(2)} = \mathrm{V}_1^{(1)} \sin(\omega_1 t + \beta_1) + \mathrm{V}_1^{(2)} \sin(\omega_2 t + \beta_2), \\ V_2 = V_2^{(1)} + V_2^{(2)} = \mu_1 \mathrm{V}_1^{(1)} \sin(\omega_1 t + \beta_1) + \mu_2 \mathrm{V}_1^{(2)} \sin(\omega_2 t + \beta_2). \end{cases} \tag{6}$$

Оно описывает результирующее движение объекта, которое не является простым гармоническим колебанием, т.к. суммирует движения с различными частотами.

В равенствах (6) имеются четыре произвольные постоянные $\mathrm{V}_1^{(1)}$, $\mathrm{V}_1^{(2)}$, β_1 и β_2, определяемые из следующих начальных условий $V_1(0) = V_{10}$, $V_2(0) = V_{20}$, $\dot{V}_1(0) = \dot{V}_{10}$, $\dot{V}_2(0) = \dot{V}_{20}$.

2.2. Вынужденные колебания

Их появление вызывают силы

$$\rho_1 = P_1 \sin(kt + \delta), \quad \rho_2 = P_2 \sin(kt + \delta), \tag{7}$$

представляющие правую часть уравнений (3).

Решение ищем в виде

$$V_{1p} = \mathrm{V}_{1p} \sin(kt + \delta), \quad V_{2p} = \mathrm{V}_{2p} \sin(kt + \delta) \tag{8}$$

Тогда $\ddot{V}_{1p} = -\mathrm{V}_{1p} k^2 \sin(kt+\delta)$, $\ddot{V}_{2p} = -\mathrm{V}_{2p} k^2 \sin(kt+\delta)$. Подставив эти равенства в уравнение (3) с правой частью (7), получим

$$\begin{cases}(r_{11} - M_1 k^2)\mathrm{V}_{1p} + r_{12}\mathrm{V}_{2p} = P_{1,}\\ r_{21}\mathrm{V}_{1p} + (r_{22} - M_1 k^2)\mathrm{V}_{2p} = P_{2,}\end{cases} \text{откуда} \begin{cases}\mathrm{V}_{1p} = \dfrac{P_1(r_{22} - M_2 k^2) - P_2 r_{12}}{(r_{11} - M_1 k^2)(r_{22} - M_2 k^2) - r_{12}^2},\\ \mathrm{V}_{2p} = \dfrac{P_2(r_{11} - M_1 k^2) - P_1 r_{12}}{(r_{11} - M_1 k^2)(r_{22} - M_2 k^2) - r_{12}^2},\end{cases}$$

Подставив V_{ip} в (8), устанавливаем: вынужденные колебания являются гармоническими и имеют частоту и фазу возбуждающих сил. Полное решение задачи будет таким

$$V_1 = \mathrm{V}_1^{(1)} \sin(\omega_1 t + \beta_1) + \mathrm{V}_1^{(2)} \sin(\omega_2 t + \beta_2) + \mathrm{V}_{1p} \sin(kt+\delta),$$

$$V_2 = \mu_1 \mathrm{V}_1^{(1)} \sin(\omega_1 t + \beta_1) + \mu_2 \mathrm{V}_1^{(2)} \sin(\omega_2 t + \beta_2) + \mathrm{V}_{2p} \sin(kt+\delta).$$

2.3. Вынужденные колебания при нагрузке общего вида

Рассматривается решение уравнений (3) с силами, представляющими ее правую часть, $P_1(t)$ и $P_2(t)$. Имеем систему уравнений

$$\begin{cases}M_1\ddot{V}_1(t) + r_{11}V_1(t) + r_{12}V_2(t) = P_1(t),\\ M_2\ddot{V}_2(t) + r_{21}V_1(t) + r_{22}V_2(t) = P_2(t)\end{cases} \tag{9}$$

Представим решение однородной части уравнений (9) в виде

$$V_1^{(i)}(t) = \mathrm{V}_1^{(i)} \sin(\omega_i t + \beta_i),$$

$$V_2^{(i)}(t) = \mathrm{V}_2^{(i)} \sin(\omega_i t + \beta_i),$$

где i – номер формы колебания, i=1,2.

Подставим их в однородную часть уравнения (9). Тогда амплитудные значения смещений V определятся из уравнений

$$\begin{cases}r_{11}\mathrm{V}_1^{(i)} + r_{12}\mathrm{V}_2^{(i)} = M_1\omega_i^2\mathrm{V}_1^{(i)},\\ r_{21}\mathrm{V}_1^{(i)} + r_{22}\mathrm{V}_2^{(i)} = M_2\omega_i^2\mathrm{V}_2^{(i)}\end{cases} \tag{10}$$

Если умножить каждое уравнение (10) соответственно на $\mathrm{V}_1^{(K)}$ и $\mathrm{V}_2^{(K)}$ и сложить результаты, придавая затем индексам i и K конкретные значения (i,K=1;2) и вычитая равенства с различными индексами, получим следующее условие ортогональности:

$$M_1\mathrm{V}_1^{(i)}\mathrm{V}_1^{(K)} + M_2\mathrm{V}_2^{(i)}\mathrm{V}_2^{(K)} = 0, \quad i \neq K \tag{11}$$

Условие (11) позволяет построить общее решение системы уравнений (9), для чего ее грузовые члены (силы) представим в виде линейной