

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ВИСЯЧИХ ПОКРЫТИЙ

Мамажанов Р.К., Раззаков Н.С.

Самаркандский государственный архитектурно-строительный институт
г. Самарканд, Узбекистан

АННОТАЦИЯ: Розглянуто динамічні коливання великопролітних висячих покриттів, для яких довжини сейсмічних хвиль сумірні з розмірами споруди в плані. Отримано розрахункові вирази для визначення динамічних параметрів.

АННОТАЦИЯ: Рассмотрены динамические колебания большепролетных висячих покрытий, для которых длины сейсмических волн соизмеримы с размерами сооружения в плане. Получены расчетные выражения для определения динамических параметров.

ABSTRACT: The dynamic vibrations of long-span suspended roof are considered in the present paper for which the lengths of seismic waves are commensurable with the sizes of structures in a plan. Calculated expressions to determine dynamic parameters are received.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: исследование, динамические параметры, предварительное напряжение, висячие покрытия.

В результате физического моделирования напряженно-деформированного состояния круглого предварительно-напряженного двухпоясного висячего покрытия пролетом 120 м в масштабе 1:100 на различные схемы статического и динамического нагружения, а также анализа результатов исследований и расчета натурной конструкции, разработаны конструктивные решения исследованного покрытия для сейсмических районов приме-

нительно к общественным зданиям различного назначения (рис.1). В середине пролета конструкции предусмотрены малые и большие проемы функционального назначения.

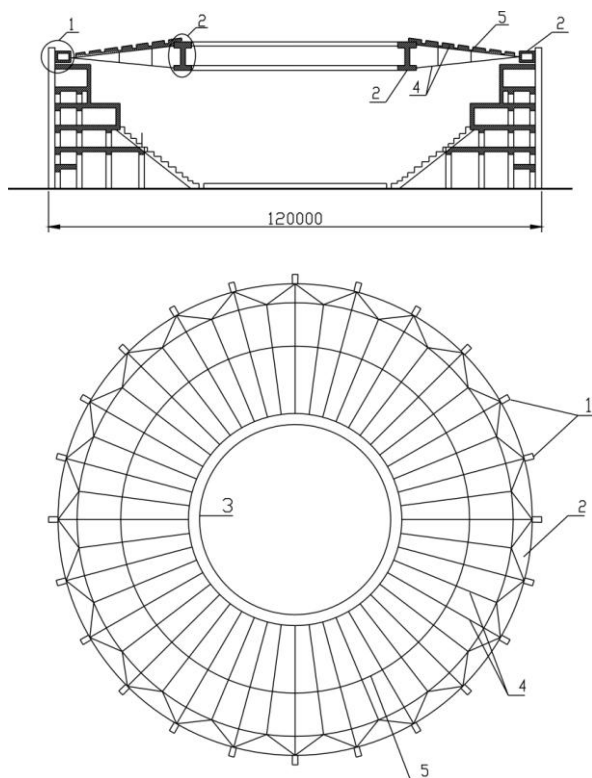


Рис. 1. Конструктивное решение двухпоясного предварительно-напряженного висячего покрытия с большим проёмом для сейсмических районов: 1 - колонны; 2, 3 - наружные и внутренние опорные кольца; 4 – нижние и верхние пояса вант; 5 – связи

В разработанном конструктивном решении наружное опорное кольцо покрытия диаметром 120 м и с размерами сечения 2,4x0,96 м запроектировано в виде решетчатого коробчатого элемента, состоящего из 4 поясов, выполненных из уголков 250x250x18 мм, решеток и стоек из уголков 100x100x50 мм. Все элементы выполнены из стали класса С 375-3. Наружное кольцо опирается на стойки с шагом 8,02 (или 6,28 и 4,71) м.

Внутренний контур системы запроектирован из двух круговых колец, распертых стойками с шарнирным примыканием с помощью стоек и

решеток, обеспечивающих независимые горизонтальные перемещения колец при деформировании покрытия. В разработанной конструкции покрытия концевые крепления, допускающие изменение длины вант, предусмотрены со стороны внутреннего барабана (кольца).

Внутреннее двухпоясное кольцо, состоящее из нижнего и верхнего поясов, подвешенных на несущие ванты покрытия, запроектировано из двух широкополочных двутавров 35Ш2-350x250 мм и 35Ш* 350x250 мм соответственно из стали класса С375-3.

В поясах параллельно расположенные широкополочные двутавры соединены между собой стальными пластинами на расстоянии, равном шагу вант (4,01, 3,14 или 2,35 м). Верхний и нижний пояса внутреннего кольца покрытия шарнирно соединены между собой с помощью раздвижной трубчатой стойки диаметром 127 мм и высотой 4,6 м, выполненной из стали марки С 345-3.

Несущие (нижние) ванты запроектированы из каната закрытого типа диаметром 40,5 мм марки ТК 40,5-1-Н-1670, стабилизирующие (верхние) ванты - из каната закрытого типа диаметром 33,5 мм марки ТК 33,5-1-Н-1670. Канаты предварительно подвергаются вытяжке усилием, превышающем максимальное рабочее усилие на 20%.

Для страховки от возможных резонансных колебаний покрытия при землетрясениях уровень преднапряжения верхнего пояса вант следует принимать на 15...20% ниже, чем нижнего пояса вант.

В нормах пространственные конструкции обычно считают жесткими и предполагается, что при землетрясениях всё здание колеблется в одной фазе, т.е. принимается

$$\lambda = CT_0 \gg L, \quad (1)$$

где λ - длина сейсмической волны;

C - скорость её распространения,

T_0 - период колебания грунта, соответствующий периоду основного тона колебаний здания;

L - длина здания.

Однако результаты исследований [1, 2, 3] моделей и натуральных пространственных конструкций показали, что с увеличением пролета (протяженности) пространственных конструкций, особенно возведенных на неплотных грунтах, для которых скорость распространения волн невелика, может оказаться так, что $L = \lambda$ или $L = \lambda/2$. В этом случае эффект бегущей волны приводит к тому, что движение основания в различных точках сдвинуто во времени. Поэтому значение ускорения переносного движения может отличаться от ускорения движения опор. В этом случае может проявиться противофазное или сдвинутое по фазе колебание опор (рис. 2.)

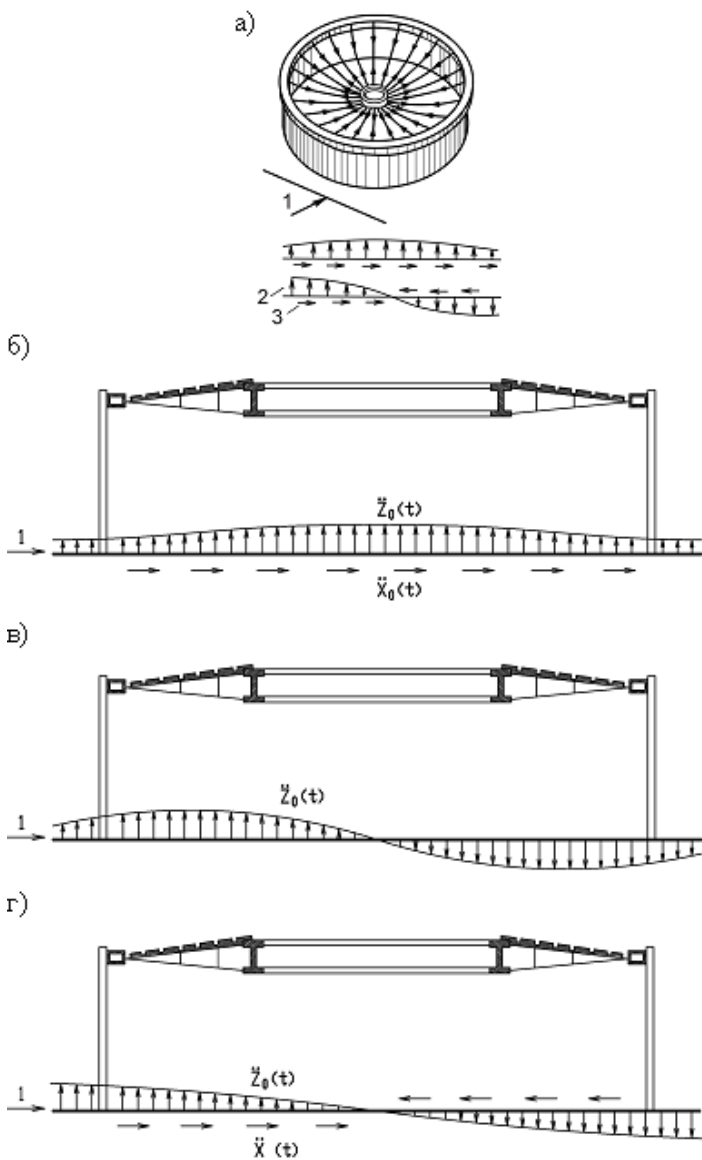


Рис. 2. Схемы воздействия бегущей волны на висячее покрытие: а – схема действия бегущей волны; б, в, г – вертикальное движение опор в одной фазе и противофазах; 1- направления движения волны; 2, 3 – направление ускорений в вертикальной и горизонтальной плоскостях

Рассмотрим двухмерную систему. Произведение распределения масс $m(x,y)$ и ускорений $\ddot{Z}_0(x,y,t)$ принимаем по площади всячего покрытия. В работах [2, 3] предполагается, что из общего колебательного движения грунта основное внимание необходимо уделять той его частоте, которая совпадает с частотой собственных колебаний сооружения. Исходя из этого, в расчетах рекомендуется принимать движение покрытия, которое вызывает максимальные усилия в конструкции.

Длина сейсмических волн превышает размеры всячего покрытия в плане (симметричное загрузке силами инерции) - вся конструкция может получать одинаковое перемещение и ускорение (рис. 2б).

Длина сейсмических волн соизмерима с пролетом покрытия (кососимметричное загрузке силами инерции). В этом случае конструкция получает неодинаковые по величине и направлению перемещения и ускорения (рис. 2в). Учет этих особенностей для всячих покрытий различных геометрических форм производим на основе исследований [2, 3].

Значение внешней сейсмической нагрузки для двумерной системы запишем в виде:

$$r(x,y,t) = m(x,y)\ddot{Z}_0(x,y,t), \quad \text{или} \\ r(x,y,t) = m(x,y)\mu(x,y)\ddot{Z}_0(t), \quad (2)$$

где $m(x,y)$ - масса покрытия, имеющая произвольное распределение, $\mu(x,y)$ - функция распределения переносного (инерционного) движения по площади покрытия, $\ddot{Z}_0(t)$ - ускорение основания. Выражение (2) может быть разложено на ряд составляющих $r_{ij}(x,y,t)$ - вызывающих колебания $X_i(x)$, $Y_j(y)$. Поэтому для всячего покрытия с любыми граничными условиями

$$r(x,y,t) = \sum_i^{\infty} \sum_j^{\infty} r_{ij}(x,y,t). \quad (3)$$

Учитывая, что каждый член разложения соответствующих сейсмических нагрузок $r_{ij}(x,y,t)$ пропорционален соответствующим формам собственных колебаний $X_i(x)$, $Y_j(y)$, запишем

$$r_{ij}(x,y,t) = \alpha_{ij}m(x,y)X_i(x)Y_j(y), \quad (4)$$

где α_{ij} - коэффициент, зависящий от пространственной формы колебаний системы.

$$\alpha_{ij} = \ddot{Z}_0(t) \frac{\int \int q(x,y)\mu(x,y)\Phi_{ij}(x,y)dx dy}{\int \int q(x,y)\Phi_{ij}^2(x,y)dx dy}. \quad (5)$$

Используя (5), и с учетом (3-4), определим в общем виде коэффициент пространственной формы колебаний.

Для круглых в плане висячих покрытий, принимая полярную систему координат, полученное аналогично (7) выражение будет иметь вид:

$$\eta_{ij}(\rho, \varphi) = \frac{\Phi_{ij}(\rho, \varphi) \int_0^{2\pi} \int_0^a m(\rho, \varphi) \mu(\rho, \varphi) \Phi_{ij}(\rho, \varphi) d\varphi d\rho}{\mu(\rho, \varphi) \int_0^{2\pi} \int_0^a m(\rho, \varphi) \Phi_{ij}^2(\rho, \varphi) d\varphi d\rho}. \quad (6)$$

Аналогичным образом определяются эти коэффициенты для других геометрических форм висячих покрытий как при симметричном, так и косимметричном нагружениях.

Рассмотрим задачу определения частот и форм свободных колебаний конструкций для определения сейсмической нагрузки с учетом отмеченных выше особенностей работы пространственных систем. Уравнение колебаний висячих двухпоясных покрытий представим в виде [4]

$$(N_1 + N_2) \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} - \left[\frac{EA_1}{R} K_1 \int_0^R K_1 w dr + \frac{E_2 A_2}{R} K_2 \int_0^R K_2 w dr \right] = \frac{qr}{g} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \quad (7)$$

где N_1, N_2 - натяжение вант нижнего и верхнего поясов;

EA_1, EA_2 - жесткость вант на растяжение;

K_1, K_2 - кривизны вант в положение равновесия;

R - радиус покрытия.

Подставив $K_1 = \frac{6r}{R^3} (-f_1 - w_0)$; $K_2 = \frac{6r}{R^3} (f_2 - w_0)$ в (7), получим

$$(N_1 + N_2) \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} - \left[\frac{36(f_1 + w_0)^2}{R^7} E_1 A_1 + \frac{36(f_2 - w_0)^2}{R^7} E_2 A_2 \right] \times \\ \times r \int_0^R r w dr = \frac{qr \partial^2 w}{g \partial t^2}. \quad (8)$$

Граничные условия для осесимметричных колебаний

$$\left. \frac{\partial w}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad w(R) = 0. \quad (9)$$

Собственные формы осесимметричных колебаний представим в виде

$$F_i(\rho) = I_{-1/3} \left(\frac{2}{3} \gamma_i \right) - \rho^{1/2} I_{-1/3} \left(\frac{2}{3} \gamma_i \rho^{3/2} \right), \quad (10)$$

где γ_i - i -й корень уравнения, $\rho = r/R$.

Частота собственных колебаний с учетом γ_i выражается формулой

$$\omega_i = \gamma_i \left[\frac{(N_1 + N_2)g}{qR^3} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

Сейсмостойкость висячих покрытий основывается на теориях расчета оболочек и сейсмостойкости сооружений с широким привлечением результатов экспериментально-теоретических исследований. В соответствии с этим принимается концепция двойного расчета, ввиду чего расчет производится при двух уровнях сейсмических нагрузок:

- на воздействие частых, но слабых землетрясений;
- на воздействие редких, но сильных землетрясений, принимая при этом максимальные ускорения при сейсмичности 7,8 и 9 баллов соответственно 100, 200 и 400 см/с².

При расчете висячего покрытия внешние воздействия рекомендуется также задавать по акселерограммам землетрясений, предварительно нормируя максимальные значения ускорений в соответствии с интенсивностями различных землетрясений. При этом определяется предварительное относительное значение ординат акселерограммы:

$$\bar{A}(t_i) = \frac{A_0(t_i)}{A_{\max}}, \quad (12)$$

где $A_0(t_i)$ - ордината инструментальной акселерограммы;

A_{\max} - максимальное значение ординаты инструментальной акселерограммы.

Разделив инструментальную акселерограмму на интервалы через 0,02 с, определяем ординаты соответствующих акселерограмм

$$A(t_i) = \bar{A}(t_i) \beta(T_j) Ag, \quad (13)$$

где $A = 0,025, 0,05, 0,10$ и $0,10, 0,20, 0,40$ соответственно для 7, 8 и 9 балльной зоны сейсмичности, слабых и сильных землетрясений, g - ускорение земного тяготения.

Акселерограмма землетрясения принимается по записям колебаний грунта в районе строительства или в районах с близкими грунтовыми условиями. При отсутствии этих акселерограмм рекомендуется принимать записи любого землетрясения, имеющего диапазон частот, перекрывающих диапазон частот висячего покрытия.

С учетом отмеченных особенностей расчет висячих покрытий может производиться на вертикальные и горизонтальные сейсмические воздей-

ствия в отдельности. Для расчета может приниматься только один (низший) тон колебаний, если период низкого тона колебаний пространственных систем $T_{11} \leq 0,4$ с. При несоблюдении этих условий следует учесть не менее трех тонов колебаний.

Для иллюстрации результатов исследований определялись 5 форм и частот собственных колебаний экспериментально исследованных моделей и натуральных конструкций двухпоясных предварительно напряженных висячих покрытий диаметром 120 м. Усилия предварительного напряжения в нижних и верхних поясах вант для натуральных конструкций составили 281 и 242 кН соответственно. Прогиб покрытия в центре составил 0,692 м от суммарных статических и сейсмических составляющих нагрузок при интенсивности 8 баллов. Частоты колебаний при 5 формах собственных колебаний составили 4,425...14,63 с.

Сравнение опытных и теоретических данных показало хорошее соответствие с учетом особенностей поведения висячих систем при статическом и динамическом воздействиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобров Ф.В. Сейсмические нагрузки на оболочки и висячие покрытия / Бобров Ф.В., Быховский В.А., Гасанов А.Н. - М.: Стройиздат, 1974. – 159 с.
2. Корчинский И.Л. Расчет висячих покрытий на динамические воздействия / Корчинский И.Л., Гриль А.А. - М.: Стройиздат, 1978. – 220 с.
3. О проблеме сейсмостойкости большепролетных пространственных конструкций / [Раззаков С.Р., Фридман Г.С., Раззаков Х.С. и др.] // Промышленное и гражданское строительство в современных условиях. - М.: МГСУ, 2011. - С.15-18.
4. Ивович В.А. Определение собственных частот и форм колебаний висячих систем / Ивович В.А., Покровский Л.Н. // Строительная механика и расчет сооружений, 1983. - №4. – С. 54-57.
5. Шимановский В.Н. Висячие системы / Шимановский В.Н. – К.: Будівельник, 1984. - 208 с.
6. Рекомендации по проектированию висячих покрытий. – М.: ЦНИИСК, 1974. – 176 с.

Статья поступила в редакцию 12.01.2013 г.