

УДК 699.8

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Проф. Достанова Сауле Хажигумаровна¹, проф. Токпанова Камиля Еркиновна², ассистент проф. Касымова Гульсум Темирхановна³

Казахский научно-исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева¹,
 Университет Туран², Казахская головная архитектурно-строительная академия³, (Казахстан)
 E-mail: dostanova0109@mail.ru, kamila1907@mail.ru, kasimova_63@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрено влияние конструктивных особенностей пространственных конструкций на сейсмические воздействия. Представлены алгоритмы, модели и формулы для определения динамических характеристик пологих железобетонных оболочек с разрывными параметрами. Рассмотрен численный расчет гладких, ребристых и сборных оболочек покрытий. С использованием Еврокод РК проведена оценка сейсмостойкости.

Ключевые слова: пологие железобетонные оболочки покрытий, колебания, частоты, периоды собственных колебаний, оценка сейсмостойкости.

Актуальность исследования. Разрушительные и частые землетрясения во многих частях планеты выдвинули глобальные проблемы сейсмостойкости зданий и сооружений на первый план [1-3]. Риск появления новых очагов землетрясений высокой интенсивности постоянно возрастает, поэтому вопросы сейсмостойкости зданий являются актуальными и насущными. Строительство новых зданий со сложной структурой и геометрией вызвало множество проблем и противоречий в теории и практике сейсмостойкого строительства. Все это требует дальнейшего совершенствования принятых моделей поведения зданий и сооружений в процессе землетрясений.

Рассмотрим вопрос разработки новых моделей для определения динамических характеристик пространственных конструкций типа пологих железобетонных оболочек покрытий. Принятая в нормах расчетная модель зданий и сооружений в виде консольного стержня для всех без исключения конструкций, независимо от их размеров является несовершенной, т.к. не учитывает пространственную работу оболочки.

Для совершенствования методов динамического расчета железобетонных пологих оболочечных покрытий производственных зданий с использованием Евростандартов РК был разработан уточненный алгоритм по определению динамических характеристик оболочечных конструкций и проведена оценка сейсмостойкости оболочечной конструкции с использованием Еврокод РК.

Алгоритм и метод исследований динамических характеристик оболочечных конструкций.

На рис.1,а представлена срединная поверхность оболочки покрытия с ребрами жесткости в двух направлениях и возможными переломами кривизны на стыке смежных панелей для сборных конструкций. На рис.1,б показаны внутренние усилия, возникающие в поперечных сечениях в двух направлениях.

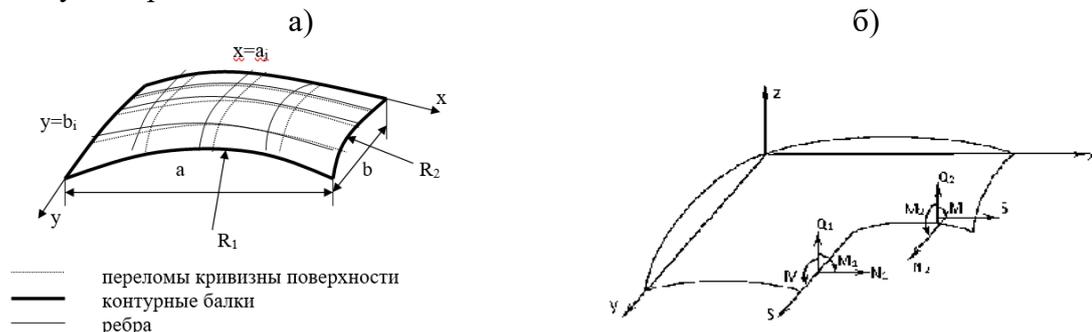


Рис. 1, а – срединная поверхность оболочки покрытия; **б** – внутренние усилия.

Практические расчеты оболочек чаще всего связаны с нормальной составляющей внешней нагрузки P_3 (собственный вес, полезная нагрузка, снег, и т.п.), поэтому, если положить $P_1=P_2=0$, то после преобразований получаем следующие основные уравнения теории пологих оболочек [4-5]:

$$\Delta_k^2 \varphi + D \Delta^2 \Delta^2 w - (P_3 + \frac{\partial m_x}{\partial x} + \frac{\partial m_y}{\partial y}) = 0, \quad \frac{1}{Eh} \Delta^2 \Delta^2 \varphi - \Delta_k^2 w = 0 \quad (1)$$

где φ – функция напряжения; w – прогиб; D – цилиндрическая жесткость; m_x, m_y – моменты вдоль осей x, y ; k_1, k_2 – главные кривизны.

С учетом взаимодействия оболочки с ребрами при рассмотрении свободных поперечных колебаний внешнюю нагрузку можно представить в виде:

$$P_1 = P_2 = 0, \tilde{P}_3 = P_3 + \sum_{i=1}^m q_i + \sum_{j=1}^n q_j, \quad (2)$$

где P_1, P_2 – тангенциальные составляющие инерционных сил; P_3 – нормальная составляющая инерционных сил; \tilde{P}_3 – полная нормальная составляющая внешней нагрузки; m, n – количество ребер соответственно вдоль i -го и j -го направлений; q_i, q_j – реактивные силы, заменяющие действие ребер, которые приложены по линии контакта с оболочкой.

Нормальная составляющая инерционных сил имеет вид:

$$P_3 = -\frac{1}{g} \left[\gamma h^0 + \sum_{j=1}^k \gamma_j h_j \delta(x - a_j) + \sum_{i=1}^l \gamma_i h_i \delta(y - b_i) \right] \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}. \quad (3)$$

В (3) g – ускорение свободно падающего тела (9,81 м/сек²); γ – удельный вес материала оболочки; $\gamma_i (\gamma_j)$ – удельный вес материала ребер; h_i, h_j – высота поперечного сечения ребер; h^0 – толщина оболочки.

Дискретное расположение ребер жесткости учитывается с помощью функции Дирака. Для решения уравнений (1) используется энергетический метод Галеркина с применением двойных тригонометрических функций для выражений прогибов и функции напряжений. В результате получена система линейных однородных уравнений относительно неизвестных параметров φ_{mn}, w_{mn} . Приравняв детерминант системы нулю, получают следующие формулы для собственных частот.

Гладкая и ребристая оболочка.

$$\omega_{mn}^2 = \frac{b_{11} b_{22}^* - b_{12} b_{21}}{b_{11} b_{22}^{**}}. \quad (4)$$

$$b_{11} = \frac{\pi^4}{4Ehab} \left(\frac{b}{a} m^2 + \frac{a}{b} n^2 \right)^2,$$

$$b_{12} = \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{k_2 b}{a} m^2 + \frac{k_1 a}{b} n^2 \right),$$

$$b_{21} = -\frac{\pi^2}{4} \left(\frac{k_2 b}{a} m^2 + \frac{k_1 a}{b} n^2 \right) + \frac{\pi^4}{2ab} \left[m^4 \left(\frac{b}{a} \right)^2 - \mu m^2 n^2 \right] \frac{I_i k_1}{h} \frac{k}{2} +$$

$$+ \frac{\pi^4}{2a^2 b} \left[n^4 \left(\frac{a}{b} \right)^2 - \mu m^2 n^2 \right] \frac{I_j k_2}{h} \frac{t}{2},$$

$$b_{22}^{**} = \frac{ab}{4g} \left[\gamma h + \frac{\gamma_i F_i t}{a} + \frac{\gamma_j F_j k}{b} \right]. \quad (5)$$

В выражениях (5) введены следующие обозначения: a, b – размеры оболочки в плане; k_1, k_2 – главные кривизны; EI_i, EI_j – жесткости контурных балок на изгиб; η_i, η_j – эксцентриситеты сечения контурной балки; k_{1i}, k_{2j} – жесткости контурных балок на кручение; E, h – модуль упругости и толщина оболочки; μ – коэффициент Пуассона; γ_i, γ_j – удельные веса материалов бортовых балок; F_i, F_j – площади сечений балок.

Сборная оболочка. Для сборных оболочек, по аналогии, используя вариационный метод, получаются следующие формулы (6-7) для определения собственных частот:

$$\omega_{mn} = \frac{b_{11}b_{22}^* + b_{21}b_{12}}{b_{11}b_{22}^{**}} \quad (6)$$

$$b_{21} = -b_{12} - \frac{(n\pi)^2}{(2b)^2} \left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \mu\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \right] N_{mr} \delta_{nq} - \frac{(n\pi)^2}{b^2} \left[\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - \mu\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 \right] N_{nq} \delta_{mr},$$

$$b_{22}^* = \frac{th^3\pi^4}{48(1-\mu^2)ab} \left(\frac{b}{a} m^2 + \frac{a}{b} n^2 \right)^2 \delta_{m_r} \delta_{n_q} + \frac{\pi^4}{2} \left[\frac{E_j I_j n^4 \delta_{nq} K_{mr}}{b^3} + \frac{E_i I_i m^4 \delta_{mr} K_{nq}}{a^3} \right],$$

$$b_{22}^{**} = \frac{ab}{2g} \left[\frac{\gamma \delta_{mr} \delta_{nq}}{2} + \frac{\gamma_j F_j F_{mr} \delta_{nq}}{a} + \frac{\gamma_i F_i F_{nq} \delta_{mr}}{b} \right],$$

$$b_{11} = \frac{\pi^4}{4Ehab} \left(\frac{b}{a} m^2 + \frac{a}{b} n^2 \right)^2 \delta_{m_r} \delta_{n_q},$$

$$b_{12} = \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{bk_y}{a} m^2 + \frac{ak_x}{b} n^2 \right) \delta_{m_r} \delta_{n_q} + \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{\theta_j n^2}{b} \delta_{nq} S_{mr} + \frac{\theta_i m^2}{a} \delta_{mr} S_{nq} \right),$$

δ_{mr}, δ_{nq} – символы Кронекера. В (7) введены следующие обозначения: a, b – размеры оболочки в плане; E, E_i, E_j – соответственно модули упругости оболочки, ребра в i, j – направлениях; h – толщина оболочки; F_i, F_j – площади поперечных сечений ребер в i, j – направлениях; γ_i, γ_j – удельные веса материала ребер в i, j – направлениях; θ_i, θ_j – углы перелома срединной поверхности соответственно в направлениях осей x, y ; x_i, x_j – координаты главных линий, где имеются переломы кривизны поверхности; d, c – соответственно количество переломов поверхности в направлениях осей x, y ; t, k – количество ребер жесткости в направлениях осей x, y ; I_i, I_j – моменты инерции поперечных сечений ребер в i, j – направлениях; S_i, S_j – величины, равные соответственно произведению момента инерции сечения ребра на его кривизну, т.е. $I_i k_y$ или $I_j k_x$, где k_x, k_y – кривизны главной оболочки. Величины S_i, S_j являются коэффициентами при слагаемых, которые учитывают деформацию растяжения (сжатия) в ребрах.

$$S_{mm}=d/2, S_{nn}=c/2, K_{mm}=k/2, K_{nn}=t/2, N_{mm}=k/2, N_{nn}=t/2.$$

Результаты исследований. Численный динамический расчет проведен с использованием программы Лира.

Данные: пологая оболочка, квадратная в плане $18 \times 18 \text{ м}$, имеет следующие характеристики: $\gamma=2500 \text{ кг/м}^3$ – удельный вес материала оболочки; $E=26 \times 10^8 \text{ кг/м}^2$; $a=b=18 \text{ м}$; $\mu=0,2$ – коэффициент Пуассона; $R_1=R_2=32,069 \text{ м}$ – радиус кривизны; $h=0,03-0,04 \text{ м}$ – толщина.

Оболочка подкреплена перекрестными ребрами жесткости трапециевидального поперечного сечения со следующими характеристиками:

$I_x=0,0014 \text{ м}^4$ – момент инерции сечения ребра; $F=0,0462 \text{ м}^2$ – площадь сечения ребра; $\eta=0,115 \text{ м}$ – эксцентриситет центра тяжести сечения; $\gamma_p=2500 \text{ кг/м}^3$ – удельный вес материала ребер; $S_x=F\eta=0,00531 \text{ м}^3$ – статический момент сечения ребра.

В таблицах 1-2 представлены частоты собственных колебаний ($\Gamma_{ц}$) и время T в (сек.) для ребристой и сборной оболочек 18×18 м в плане с учетом и без учета деформации кручения в ребрах жесткости (ω/T). M, N – количество полуоволн в двух направлениях.

Таблица 1. Частоты собственных колебаний ($\Gamma_{ц}$) и время T в (сек.) оболочки 18×18 м в плане с учетом и без учета деформации кручения в ребрах жесткости (ω/T).

M	N	h = 0,03м			h = 0,04м	
		гладкая	1 ребро	1 ребро	гладкая	1 ребро
			с кручением	без кручения		с кручением
1	1	16,38/0,38	15,90/0,39	16,35/0,38	15,91/0,39	15,90/0,39
2	2	16,01/0,39	15,54/0,40	19,97/0,31	15,58/0,40	15,58/0,40
3	3	20,00/0,314	19,46/0,32	20,00/0,314	19,52/0,32	19,52/0,32
3	4	11,23/0,56	10,92/0,57	11,20/0,56	10,72/0,58	10,72/0,58

Таблица 2. Частоты собственных колебаний ($\Gamma_{ц}$) и время T в (сек.) для сборной оболочки 18×18 м в плане (ω/T).

Количество панелей вдоль оси x	Количество панелей вдоль оси y	Ребристая, толщина 0,03м	Ребристая, толщина 0,04м
1	1	17,3/0,36	16,2/0,39
2	2	18,4/0,34	17,3/0,36
3	3	19,5/0,322	18,6/0,338
4	4	24,7/0,254	23,6/0,266

Используя таблицы и формулы для определения сейсмических нагрузок, представленные в рекомендациях по определению сейсмических нагрузок, соответствующих инженерно-геологическим и сейсмологическим условиям РК (б), в таблице 3 представлены значения горизонтальных и вертикальных сейсмических нагрузок, соответствующие полученным максимальным значениям периодов собственных колебаний.

Таблица 3. Значения сейсмических нагрузок, Кн.

Колво переломов вдоль оси x	Колво переломов вдоль оси y	Колво ребер вдоль оси x	Колво ребер вдоль оси y	Значения сейсмической нагрузки в 2-х направлениях, кН	
				горизонтальное	вертикальное
Гладкая оболочка					
0	0	0	0	106,5	85,7
Ребристая оболочка					
0	0	0	2	104	82,13
0	0	0	6	94,4	78,5
Оболочка с переломами кривизны					
0	2	0	0		78,5
2	2	0	0	90,8	
0	2	0	2		75,3
0	2	3	1		73,8
0	2	3	2		72,4

Максимальные сейсмические нагрузки возникают в гладкой оболочечной конструкции. Наличие ребер жесткости снижают значения сейсмической нагрузки в вертикальном (от 3-8,5%) и горизонтальном (от 2-7,4%) направлениях. Для сборной оболочечной конструкции сейсмическая нагрузка значительно снижается (от 4-15%).

Список литературы:

1. Конструктивная сейсмобезопасность зданий и сооружений в сложных грунтовых условиях: препринт/под ред. Н.П. Абовского. –Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2009. -186с.

2. Саркисов Д.Ю. Сейсмостойкость зданий и сооружений. Изд. ТГСУ. -Томск, 2015. -156с.
3. Немчинов Ю.И. Сейсмостойкость зданий и сооружений. НИИСК Минрегионстрой Украины. –Киев, 2008. -480с.
4. Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика. М.: Санкт-Петербург, Москва-Краснодар, Лань, 2012, 656с.
5. Кусаинов А.А., Достанова С.Х., Полякова И.М. Динамика и устойчивость сооружений. Учебное пособие. –Алматы, 2016. -265с.
6. Рекомендации по определению сейсмических нагрузок, соответствующих инженерно-геологическим и сейсмологическим условиям Республики Казахстан. -Государственные нормативы в области архитектуры, градостроительства и строительства. Методический документ Республики Казахстан, Астана. 2015. -118с.