

УДК.:539.3

СЕЙСМОИЗОЛИРУЮЩИЕ ДЕФОРМИРУЕМЫЕ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ОПОРЫ

ОРМОНБЕКОВ Т.О., БЕГАЛИЕВ У.Т.

acort@rambler.ru

begaliev@istc.kg

1 – Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Кыргызская Республика, г. Бишкек;

2 – Международный университет инновационных технологий, Кыргызская Республика, г. Бишкек

ORMONBEKOV T.O., BEGALIEV U.T.

acort@rambler.ru

begaliev@istc.kg

1 – Kyrgyz State Technical University named by I. Razzakov, Kyrgyz Republic, Bishkek,

2 – International University for Innovation Technologies, Kyrgyz Republic, Bishkek

Приводится расчет резинометаллической опоры. Сопоставляются расчетные данные с другими результатами экспериментов. Выводятся формулы, применяемые в расчетах других резинометаллических конструкций.

Резиновый элемент в РМО, как конструктивный материал, обладает рядом ценных свойств: высокой эластичностью, стойкостью к влиянию окружающей среды, хорошими динамическими характеристиками.

Резинометаллические опоры (РМО) – это гибкий подход к изоляции сооружения от грунта, снижая распространение сейсмической силы на здание.

Модуль упругости резины обеспечивает хорошие амортизационные и компенсирующие свойства РМО. Однако это свойство резины создает проблемы при ее применении в сейсмоизолирующих опорах. Такие опоры должны обладать существенной жесткостной анизотропией, поскольку, имея достаточную податливость в горизонтальном направлении, они должны не допускать чрезмерной осадки зданий под нагрузкой от собственного веса. Для этого жесткость РМО на сжатие должна быть на два порядка выше, чем на сдвиг. Чисто резиновые изоляторы не обладают подобными свойствами.

Резиновые элементы несущих конструкций имеют разную геометрическую форму. Изучение деформирования под нагрузкой тел различной формы, расчеты на прочность и жесткость сводятся к решению статических задач теории упругости.

Для расчета РМО цилиндрической формы в виде подшипника считаем, что внутренние металлические слои РМО жесткие и им несвойственны деформации. Это позволяет выполнять расчет РМО по схеме отдельного слоя. По толщине каждый j -й резиновый слой РМО, сжимаемый одной и той же осевой силой P_z , получает осадку δ_j . Для области малых деформаций полная осадка РМО может быть определена суммированием δ_j каждого слоя, что и позволяет рассчитать сжатие РМО по результатам расчетов сжатия отдельного резинового слоя.

Все резиновые слои имеют одинаковую толщину h , и под воздействием осевой

сжимающей силы P_z каждый из них получает одинаковую по толщине осадку $\delta_j = \delta$, поскольку учитываем что металлические пластины равномерно распределяют вертикальную нагрузку. Суммарная осадка РМО из N слоев $\Delta = N\delta$.

Для определения напряженного состояния отдельного резинового слоя РМО используем цилиндрическую систему координат r, φ, z ($a \leq r \leq b$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, $-h/2 \leq z \leq h/2$). На основе следующих гипотез о распределении напряжений:

$$\sigma_{rr} = p(r); \quad \sigma_{zz} = q(r); \quad \sigma_{\varphi\varphi} = 2p - q; \quad \sigma_{r\varphi} = \sigma_{\varphi z} = 0; \quad \sigma_{rz} = -zp'; \quad p' = \frac{dp}{dr}. \quad (1)$$

находим значения инвариантов тензора напряжений:

$$\sigma = \sigma_{ii} / 3 = p; \quad \sigma_{ii}^2 = 3[(q-p)^2 + z^2 p'^2]. \quad (2)$$

Удельная дополнительная энергия, соответствующая инвариантам (2) и подсчитанная для случая $\beta = 1$

$$\bar{\Phi}_{(1)} = \frac{K}{n^2} \left[n \frac{\sigma}{K} + \left(1 - n \frac{\sigma}{K}\right) \ln \left(1 - n \frac{\sigma}{K}\right) \right] + \frac{\sigma_n^2}{6G} \left\{ 1 - \frac{m}{n^2} \left[n \frac{\sigma}{K} + \ln \left(1 - n \frac{\sigma}{K}\right) \right] \right\}^{-1};$$

имеет вид

$$\bar{\Phi}_{(1)} = \frac{K}{n^2} \left[n \frac{p}{K} + \left(1 - n \frac{p}{K}\right) \ln \left(1 - n \frac{p}{K}\right) \right] + \frac{1}{2G} [(q-p)^2 + z^2 p'^2] \left\{ 1 - \frac{m}{n^2} \left[n \frac{p}{K} + \ln \left(1 - n \frac{p}{K}\right) \right] \right\}^{-1}, \quad (3)$$

где

$$g(\hat{p}) = 1 - \frac{m}{n^2} \left\{ \frac{2}{b^2(1-\alpha^2)} \int_a^b \ln \left(1 - n \frac{p}{K}\right) r dr - \exp \left[\frac{2}{b^2(1-\alpha^2)} \int_a^b \ln \left(1 - n \frac{p}{K}\right) r dr \right] + 1 \right\}; \quad \alpha = \frac{a}{b}. \quad (4)$$

На основе (1) и (3) определим функционал принципа минимума дополнительной работы

$$\begin{aligned} \bar{\Pi}_{(1)} = 2\pi h \int_a^b \left\{ \frac{K}{n^2} \left[n \frac{p}{K} + \left(1 - n \frac{p}{K}\right) \ln \left(1 - n \frac{p}{K}\right) \right] + \frac{1}{2G} \left[(q-p)^2 + \frac{h^2}{12} \left(\frac{dp}{dr} \right)^2 \right] \right\} \times \\ \times \left\{ 1 - \frac{m}{n^2} \left[n \frac{p}{K} + \ln \left(1 - n \frac{p}{K}\right) \right] \right\}^{-1} + \frac{\delta}{h} q \Bigg\} r dr, \end{aligned} \quad (5)$$

из минимума которого по q получаем зависимость

$$q = p - G \frac{\delta}{h} \left\{ 1 - \frac{m}{n^2} \left[n \frac{p}{K} + \ln \left(1 - n \frac{p}{K}\right) \right] \right\}. \quad (6)$$

С ее учетом далее из (5) можно рассчитать функционал для функции $p(r)$

$$\begin{aligned} \bar{\Pi}_{(1)} = 2\pi h \int_a^b \left\{ \frac{K}{n^2} \left[n \frac{p}{K} + \left(1 - n \frac{p}{K}\right) \ln \left(1 - n \frac{p}{K}\right) \right] + \frac{1}{2G} \frac{h^2}{12} \left(\frac{dp}{dr} \right)^2 \right\} \times \\ \times \left\{ 1 - \frac{m}{n^2} \left[n \frac{p}{K} + \ln \left(1 - n \frac{p}{K}\right) \right] \right\}^{-1} + \frac{\delta}{h} \left\{ p - \frac{1}{2} G \frac{\delta}{h} \left\{ 1 - \frac{m}{n^2} \left[n \frac{p}{K} + \ln \left(1 - n \frac{p}{K}\right) \right] \right\} \right\} \Bigg\} r dr. \end{aligned} \quad (7)$$

Для определения сжатия рассматриваемого РМО используем при минимизации (7) прямой метод – метод Ритца. Приняв для $p(r)$ аппроксимацию в виде

$$p = -A \frac{K}{n} f(r); \quad f(r) \geq 0; \quad A = const, \quad (8)$$

подстановкой (8) в (7) получим функционал

$$\bar{\Pi}_{(1)} = 2\pi h \frac{K}{n^2} \int_a^b \left\{ -Af + (1 + Af) \ln(1 + Af) + \frac{1}{2} \frac{K}{G} \frac{h^2}{12} f'^2 \left\{ 1 + \frac{m}{n^2} [Af - \ln(1 + Af)] \right\}^{-1} - \right. \\ \left. - n \frac{\delta}{h} \left\{ Af + \frac{n}{2} \frac{G}{K} \frac{\delta}{h} \left\langle 1 + \frac{m}{n^2} [Af - \ln(1 + Af)] \right\rangle \right\} \right\} r dr; \quad f' = \frac{df}{dr},$$

из минимизации которого по параметру A получим алгебраическое уравнение

$$\left(\frac{\delta}{h} \right)^2 \frac{mG}{2K} \int_a^b \frac{Af^2}{1 + Af} r dr + n \frac{\delta}{h} \int_a^b r f dr - \int_a^b \left\{ f \ln(1 + Af) + \right. \\ \left. + A \frac{K}{G} \frac{h^2}{12} \frac{f'^2}{g(Af)} \left[1 - \frac{A^2 f^2}{2g(Af)} \frac{m}{n^2} \frac{1}{1 + Af} \right] \right\} r dr = 0, \quad (9)$$

где

$$g(Af) = 1 + \frac{m}{n^2} [Af - \ln(1 + Af)].$$

Для построения диаграммы сжатия РМО $P_z \sim N\delta$ из условия равновесия

$$P_z = -2\pi \int_a^b q r dr$$

по (6) и (8) получаем зависимость для усилия сжатия

$$P_z = 2\pi \frac{K}{n} \int_a^b \left\{ Af + n \frac{\delta}{h} \frac{G}{K} \left\langle 1 + \frac{m}{n^2} [Af - \ln(1 + Af)] \right\rangle \right\} r dr. \quad (10)$$

В расчетах тонких резиновых слоев РМО можно принять $q \approx p$, то есть пренебречь в (6) вторым слагаемым. При этом в уравнении (9) может быть опущено слагаемое с $(\delta/h)^2$, а в (10) - слагаемое с δ/h , так что диаграмму сжатия отдельного слоя можно рассчитать по зависимостям (как в [1])

$$\frac{\delta}{h} = \left(n \int_a^b r f dr \right)^{-1} \int_a^b \left\{ f \ln(1 + Af) + A \frac{K}{G} \frac{h^2}{12} \frac{f'^2}{g(Af)} \left[1 - \frac{A^2 f^2}{2g(Af)} \frac{m}{n^2} \frac{1}{1 + Af} \right] \right\} r dr; \quad (9')$$

$$A = P_z / \left(2\pi \frac{K}{n} \int_a^b r f dr \right). \quad (10')$$

Диаграмму сжатия РМО вычисляем на основе подсчетов δ/h и P_z по (9) и (10).

Для примера вычисления принимаем следующие значения параметров материала и геометрических размеров резиновых элементов РМО из 12 слоев: $a=0,4$ см; $b=2,85$ см; $h=0,1$ см; $G=1,17$ МПа; $K=2783$ МПа; $n=10,155$; $m=4080$; $N=12$.

Расчеты выполняем: а) в форме решения линейной задачи для полого цилиндра из несжимаемого материала

$$f_{(a)}(r) = 1 - y^2 - \frac{1 - \alpha^2}{\ln \alpha} \ln y; \quad y = \frac{r}{b}; \quad \alpha = \frac{a}{b}; \quad (11)$$

б) в форме решения линейной задачи для полого цилиндра из слабосжимаемого материала

$$f_{(b)}(r) = 1 - y^2 - \frac{1 - \alpha^2}{\ln \alpha} \ln y + c(y-1)(\alpha^{-1}y-1); \quad y = \frac{r}{b}; \quad \alpha = \frac{a}{b}; \quad (12)$$

при значении $c = B/A = 2,7794545 \cdot 10^{-2}$, обеспечиваемом решением линейной задачи.

Результаты отдельных расчетов отражены в табл.1. Расчетные значения δ/h , Δ и P_z на основе функции (11) представлены в первых строках, а на основе функции (12) – во вторых. Диаграммам сжатия РМО, построенным по данным табл.1, соответствуют

кривые 1 и 2 на рис.1. Здесь же для сопоставления точками показаны экспериментальные результаты [2, 3], полученные при сжатии опоры.

Таблица 1

A	$\delta/h, 10^{-2}$	$\frac{\Delta}{h} = N \frac{\delta}{h}, 10^{-1}$	$\Delta = N\delta, \text{ см}, 10^{-2}$	$P_z, \text{ кГс}$
0,2	2,260	2,713	2,713	3575,0
	2,646	3,175	3,175	3910,7
0,3	3,473	4,167	4,167	5362,8
	3,527	4,232	4,232	5865,6
0,4	4,374	5,249	5,249	7158,6
	4,403	5,283	5,283	7821,4
0,5	5,146	6,175	6,175	8940,6
	4,929	5,915	5,915	9518,1
0,6	5,808	6,970	6,970	10729,8
	5,751	6,901	6,901	11734,4
0,7	6,384	7,660	7,660	12519,6
	6,276	7,532	7,532	13691,8

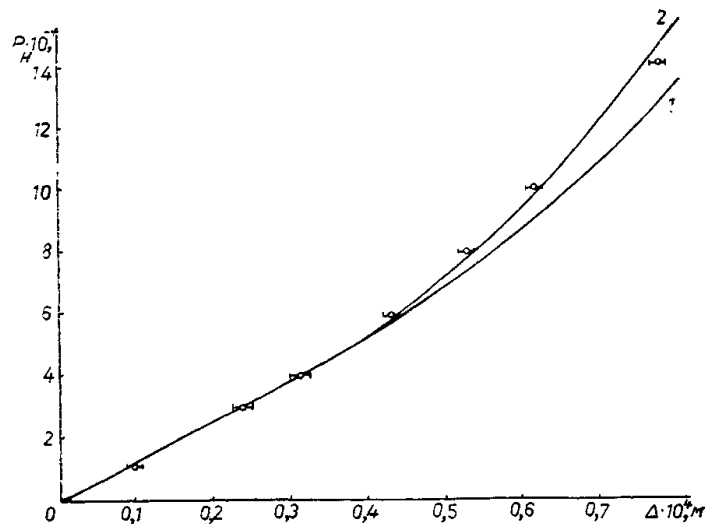


Рис.1 Кривые сжатия цилиндрического элемента.

Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов свидетельствует о том, что аппроксимирующая функция из соответствующего линейного решения задачи для слабосжимаемого резинового слоя обеспечила точность.

В целом можно полагать, что приведенный пример расчета свидетельствует о достоверности результатов, получаемых на основе предложенных моделей физически нелинейных слабосжимаемых сред.

Приведенные формулы можно использовать в расчетах других резинометаллических конструкций цилиндрической формы.

Список литературы

1. Дымников С.И., Воловик А.А., Яковлев В.В. Вариационная постановка физически нелинейных задач расчета тонкослойных эластомерных упругих элементов//Вопросы динамики и прочности. –1987. – Вып.48. – С.72 –86.

2. Лавендел Э.Э., Хричикова В.А., Лейканд М.А. Расчет жесткости сжатия тонкослойных резинометаллических элементов//Вопросы динамики и прочности. – Рига, 1981. –Вып.38. – С.57 – 63.
3. Прикладные методы расчета изделий из высокоэластичных материалов//С.И. Дымников, Э.Э. Лавендел, А.А. Павловскис, М.М. Синегс. – Рига: Зинатне, 1980. – 238 с.
4. Ормонбеков Т., Бегалиев У., Максимов Г. Слоистые эластомерные конструкции, – Б.: МОК, 2004. –154 с.