

УДК.699.841

СЕЙСМОСТОЙКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СЕЙСМОИЗОЛЯТОРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В РА**Тигран Леонидович Дадаян*, Хачатур Григорьевич Варданян***Национальный университет архитектуры и строительства Армении, г.Ереван, РА***tigran.dadayan@yahoo.com*

Рассмотрено изменение горизонтального перемещения сейсмоизолятора, применяемого в РА при различных сочетаниях усилий, действующих на него. Посредством применения существующих гипотез о приближении к предельному состоянию изолятора получены зависимости величин вертикальной нагрузки от максимальных перемещений для сейсмоизоляторов, применяемых в РА. Получены конкретные величины параметров, характеризующих устойчивость для сейсмоизолятора. Предложены зависимости максимально допустимых перемещений от действия вертикальной силы.

Ключевые слова: сейсмоизолятор, устойчивость, перемещение, критическая нагрузка, вертикальная сила, деформация

Введение

Издавна землетрясения были “бичом человечества”, обрекая его на неисчислимые людские и материальные потери. Современное состояние науки и техники не позволяет пока ставить задачу предотвращения разрушительных землетрясений. По этой причине основной проблемой существующей в строительстве зданий является проблема сейсмостойких зданий, обладающих высокими технико-экономическими показателями и способными воспринять землетрясение ожидаемой интенсивности с минимальным ущербом [1]. Одним из таких направлений является применение слоистых резинометаллических опор сейсмоизоляции (СРМОС) в строительстве. Исследование поведения СРМОС при действии различных нагрузок, оценка их напряженно-деформированного состояния, а также уточнение влияния различных параметров и факторов на их работу является одним из основных направлений по уточнению методики расчета зданий с сейсмоизоляцией.

Изготавливаемые и применяемые на сегодняшний день в Республике Армения СРМОС относятся к виду бесфланцевых. Их геометрические и физико-механические характеристики приведены в [2]. Этот тип сейсмоизоляторов может воспринимать многоцикловые усилия сжатия и сдвига. При восприятии собственного веса здания вертикальные перемещения опоры, обычно, не превышают нескольких миллиметров, но при возникновении горизонтальных колебаний системы от сейсмического воздействия [3], деформации сдвига могут достигать нескольких десятков сантиметров.

Одной из важных задач расчета зданий с системой сейсмоизоляции является выявление сочетаний максимальных величин, при которых произойдет потеря устойчивости используемой опоры. В [4] рассматривается задача о влиянии вертикального обжатия сейсмоизолятора, применяемого в РА, на его горизонтальную жесткость. Теория потери устойчивости резиновых изоляторов изучена в [5], где получены механические характеристики спиральных стальных пружин и резиновых стержней, используемых для вибрационных креплений. В данной статье изучено

поведение сейсмоизолятора, применяемого в настоящее время в РА, при сочетании вертикальной нагрузки и максимального горизонтального перемещения.

Постановка задачи

Проведено исследование деформации СРМОС как непрерывной композитной системы. Этот анализ рассматривает опору как балку и предполагается, что деформация такова, что плоские сечения остаются перпендикулярными к недеформированной центральной оси.

Рассмотрим опору, как колонну, длина которой равна h , а площадь поперечного сечения - A , и определим жесткость при сдвиге на единицу длины следующей формулой: $P_S = GA_S$, где A_S - эффективная площадь сдвига, определяемая по формуле

$$A_S = A \frac{h}{t_r}. \quad (1)$$

Здесь h - это общая высота опоры (резина и сталь), а t_r - общая высота резины. Увеличение величины A необходимо для учета того факта, что сталь не деформируется в составной системе. Поскольку жесткость при изгибе аналогичным образом изменяется, то $(EI)_{eff}$ для одного слоя толщиной t становится EI_s , где

$$EI_s = E_c \left(\frac{1}{3} \right) I \frac{h}{t_r}. \quad (2)$$

При этих величинах общая горизонтальная жесткость K_H (которая была GA/t_r) становится

$$K_H = \frac{GA_S}{h}, \quad (3)$$

а эйлерова нагрузка на изгиб для колонны без деформации сдвига равна:

$$P_E = \pi^2 \frac{EI_s}{h^2}. \quad (4)$$

Величина критической нагрузки P_{cr} вычисляется решением следующего уравнения

$$P^2 + PP_S - P_S P_E = 0, \quad (5)$$

откуда величина критической нагрузки P_{cr} получается

$$P_{cr} = \frac{-P_S + \sqrt{P_S^2 + 4P_S P_E}}{2}. \quad (6)$$

Если предположить, что $P_S \approx GA$ и

$$P_E \approx \frac{1}{3} \frac{6GS^2 I \pi^2}{h^2} \approx GA \left(\frac{2\pi^2 S^2 I}{A h^2} \right), \quad (7)$$

то для большинства типов сейсмоизоляторов при условии, что $P_E \gg P_S$, $S > 5$, критическая нагрузка может выглядеть приблизительно таким образом:

$$P_{cr} = \sqrt{P_S P_E} = \sqrt{\left(GA \frac{h}{t_r} \right) x \left(\frac{\pi^2}{h^2} \frac{1}{3} 6GS^2 A r^2 \frac{h}{t_r} \right)} = \frac{\sqrt{2\pi GASr}}{t_r}. \quad (8)$$

Подставив в (7) величины физико-механических параметров сейсмоизоляторов, применяемых в РА [2], получим следующие значения:

$$P_s = GA \frac{h}{t_r} = 970 \times (3,14 \times 0,19^2) \frac{0,2025}{9 \times 0,014} \approx 177 \text{ кН}, \quad (9)$$

$$P_E = \frac{\pi^2}{h^2} \frac{1}{3} E_c I \frac{h}{t_r} = \frac{3,14^2}{0,2025^2} \times \frac{1}{3} \times 400000 \times \frac{3,14 \times 0,19^4}{64} \times \frac{0,2025}{9 \times 0,014} \approx 52705 \text{ кН}, \quad (10)$$

$$S = \sqrt{\frac{E_c}{6G}} = \sqrt{\frac{400000}{6 \times 970}} = 8,3. \quad (11)$$

Поскольку для сейсмоизоляторов, применяемых в РА, условия $P_E = 52705 \text{ кН} \gg P_s = 177 \text{ кН}$, $S = 8,3 > 5$ удовлетворяются, то, используя выражение (8), можем получить величину критической нагрузки

$$P_{cr} = \sqrt{177 \times 52705} \approx 3055 \text{ кН}.$$

Анализ потери устойчивости сейсмоизолятора основан на линейной теории, которая аналогична анализу продольного изгиба колонны и, как в обычной теории, обеспечивает нагрузку на продольный изгиб или напряжение при ее потере устойчивости в недеформированном положении. Это имеет решающее значение в конструкции изолятора, так как максимальная обжимающая нагрузка на него будет возникать одновременно с максимальным горизонтальным перемещением и в комбинации это будет одним из предельных состояний, для которых необходимо будет его рассчитывать.

В принципе, необходим сложный нелинейный анализ для изучения поведения сейсмоизолятора при сочетании вертикальной нагрузки и максимального горизонтального перемещения. Существуют две гипотезы для приближения к предельному состоянию изолятора, когда на него одновременно действуют вертикальная нагрузка и горизонтальная сила [5]. Первая гипотеза заключается в том, что критическое смещение, определяемое как перемещение, при котором изолятор демонстрирует нулевую возрастающую горизонтальную жесткость, представляет собой боковое смещение, при котором сжимающие напряжения уменьшенной зоны определяются из отношения вертикальной силы к площади A_r , где A_r - совпадающая площадь сечения верха и низа сейсмоизолятора. При этом максимальные напряжения сжатия на этом участке могут увеличиваться до P_{cr} . Вторая гипотеза состоит в том, что площадь A_r заменяется $(A \cdot A_r)^{1/2}$. Этот вариант более достоверный, поскольку концентрация вертикального напряжения, вызванного перемещением, не будет влиять на изгибаемую жесткость, но может уменьшить жесткость сдвига.

Итак, рассмотрим обе гипотезы для опоры, применяемой в РА (рис.1). В обозначениях, показанных на рис.1: θ - половина угла, расположенного между крайними точками площади A_r .

Приведенная площадь A_r выглядит следующим образом:

$$\frac{A_r}{2} = \frac{\pi R^2}{360} 2\theta - \frac{R^2 \sin 2\theta}{2}, \quad A_r = \frac{\pi R^2}{180} \theta - \frac{R^2 \sin 2\theta}{2} = 2R^2 \left(\frac{\pi}{180} \theta - \sin \theta \cos \theta \right). \quad (12)$$

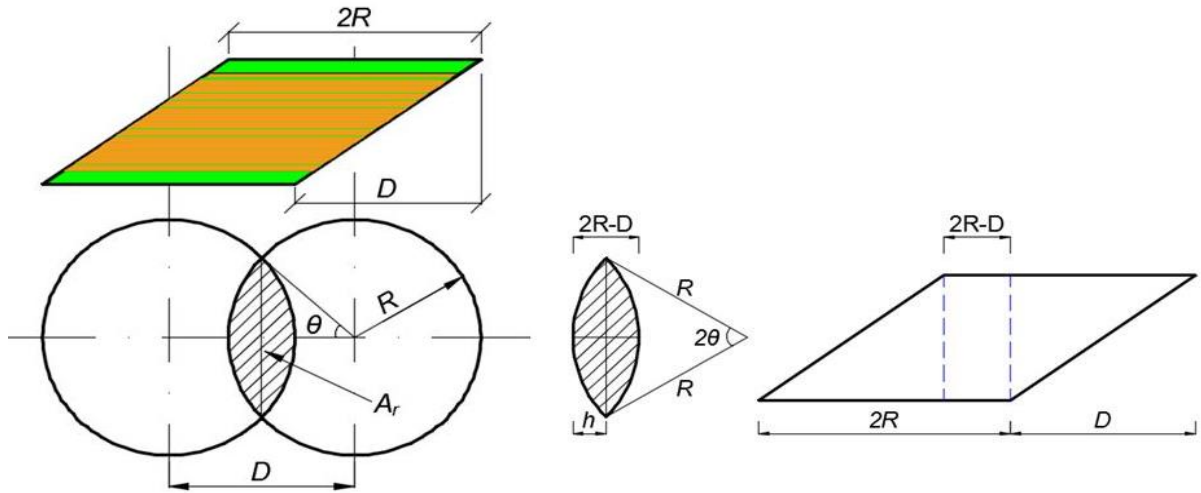


Рис. 1. Совпадающая площадь сечения верха и низа круглого в плане сейсмоизолятора

Найдем отношение величин P и P_{cr} для опоры, имеющей круглое сечение, по первой гипотезе:

$$\frac{P}{P_{cr}} = \frac{A_r}{A} = \frac{2R^2 \left(\frac{\pi}{180} \theta - \sin \theta \cos \theta \right)}{\pi R^2} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\pi}{180} \theta - \sin \theta \cos \theta \right). \quad (13)$$

Из рис.1 определим зависимость D от θ :

$$\begin{cases} h = R(1 - \cos \theta), \\ h = \frac{2R - D}{2}. \end{cases} \quad (14)$$

Приравнявая, получим следующее:

$$R(1 - \cos \theta) = \frac{2R - D}{2}, \quad D = 2R \cos \theta \Rightarrow \theta = \arccos \frac{D}{2R}. \quad (15)$$

Подставляя полученное выражение в формулу (13) получим отношение величин P и P_{cr} по первой гипотезе:

$$\frac{P}{P_{cr}} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\pi}{180} \arccos \frac{D}{2R} - \frac{D}{2R} \sin \left(\arccos \frac{D}{2R} \right) \right). \quad (16)$$

Найдем отношение величин P и P_{cr} для той же опоры, по второй гипотезе:

$$\frac{P}{P_{cr}} = \sqrt{\frac{A_r}{A}} = \frac{\sqrt{2R^2 \left(\frac{\pi}{180} \theta - \sin \theta \cos \theta \right)}}{\sqrt{\pi R^2}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \times \sqrt{\left(\frac{\pi}{180} \theta - \sin \theta \cos \theta \right)}. \quad (17)$$

Подставляя формулу (15) в (17), получим отношение величин P и P_{cr} по второй гипотезе:

$$\frac{P}{P_{cr}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \times \sqrt{\frac{\pi}{180} \arccos \frac{D}{2R} - \frac{D}{2R} \sin \left(\arccos \frac{D}{2R} \right)}. \quad (18)$$

Проведем расчеты по формулам обеих гипотез (16) и (18) применительно для параметров сейсмоизолятора, применяемого в Армении [2]. Результаты этих вычислений в зависимости от угла θ в диапазоне от 0 до 90° и перемещения D , отображены на рис. 2 и приведены в таблице.

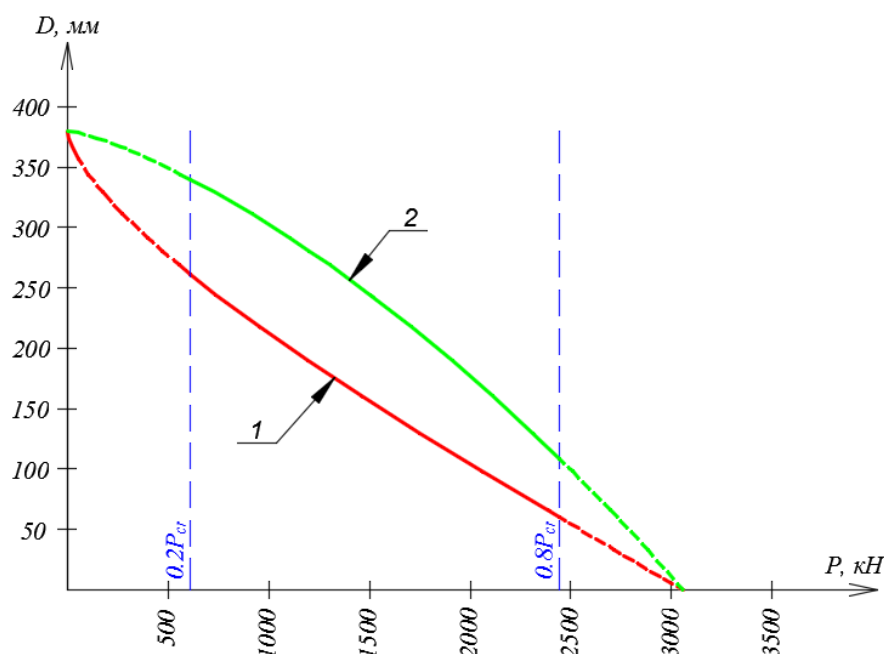


Рис. 2. Зависимость максимального перемещения сейсмоизолятора, применяемого в РА, от вертикальной силы:

1- при расчете по первой гипотезе, 2- при расчете по второй гипотезе

Следует отметить, что эту зависимость можно рассматривать при предельных перемещениях и нагрузках в промежутке $(0, 2...0,8)P_{cr} = (0, 2...0,8)3055 = (611...2444)\text{кН}$.

Таблица

Результаты расчета сейсмоизолятора, применяемого в РА, по двум гипотезам

$\theta(^{\circ})$	$\cos\theta$	$\sin\theta$	$R, \text{ м}$	$P_{cr}, \text{ кН}$	$2/\pi$	$(\pi x^0)/180$	P/P_{cr}	$P, \text{ кН}$	P/P_{cr}	$P, \text{ кН}$	$D, \text{ мм}$
							<i>первая гипотеза</i>		<i>вторая гипотеза</i>		
0	1,000	0,000	0,19	3055	0,637	0,000	0,000	0,0	0,000	0,0	380
10	0,985	0,174	0,19	3055	0,637	0,175	0,002	6,9	0,047	144,7	374
20	0,940	0,342	0,19	3055	0,637	0,349	0,018	53,8	0,133	405,5	357
30	0,866	0,500	0,19	3055	0,637	0,524	0,058	176,2	0,240	733,6	329
40	0,766	0,643	0,19	3055	0,637	0,698	0,131	400,1	0,362	1105,6	291
42,5	0,737	0,676	0,19	3055	0,637	0,742	0,155	473,9	0,394	1203,2	280
50	0,643	0,766	0,19	3055	0,637	0,873	0,242	739,5	0,492	1503,1	244
60	0,500	0,866	0,19	3055	0,637	1,047	0,391	1194,5	0,625	1910,3	190
70	0,342	0,940	0,19	3055	0,637	1,222	0,573	1751,0	0,757	2312,8	130
80	0,174	0,985	0,19	3055	0,637	1,396	0,780	2382,9	0,883	2698,1	66
90	0,000	1,000	0,19	3055	0,637	1,571	1,000	3054,9	1,000	3055,0	0

Анализируя полученные данные, следует отметить, что сейсмоизоляторы демонстрируют разные показатели величин горизонтального перемещения при различной вертикальной нагрузке, то

есть, ограничивая горизонтальное перемещение, следует указывать соответствующую величину вертикальной нагрузки.

Выводы

Для применяемых в РА сейсмоизоляторов получена зависимость максимально допускаемых горизонтальных перемещений от действия вертикальной силы при сейсмических воздействиях. Показана необходимость совместного учета максимального горизонтального перемещения и вертикальной силы, действующей на СРМОС, для оценки ее несущей способности при сейсмическом воздействии.

Согласно результатам расчета по второй гипотезе, сейсмоизолятор, применяемый в РА, при величине вертикальной нагрузки 1500 кН, перемещаясь в горизонтальном направлении 244 мм, остается устойчивым, однако при перемещении 280 мм величина вертикальной нагрузки не должна превышать 1200 кН.

Предлагаемые зависимости и полученные численные данные для СРМОС позволят более точно оценить возможные максимально допустимые горизонтальные перемещения сейсмоизолятора от вертикально действующих суммарных статических и сейсмических нагрузок.

ՀՀ-ՈՒՄ ԿԻՐԱՌՎՈՂ ՍԵՅՍՄԱՄԵԿՈՒՄԻՉՆԵՐԻ ԿՐՈՂՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ ՀՈՐԻԶՈՆԱԿԱՆ ԴԵՖՈՐՄԱՅԻԱՆԵՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ

Տիգրան Լեոնիդի Դադայան*, Խաչատուր Գրիգորիի Վարդանյան

*Ճարտարապետության և շինարարության Հայաստանի ազգային համալսարան, ք. Երևան, ՀՀ
tigran.dadayan@yahoo.com

Դիտարկված է ՀՀ-ում ներկայումս կիրառվող սեյսմամեկուսիչի հորիզոնական տեղափոխության փոփոխությունը դրա վրա ազդող ճիգերի տարբեր զուգակցումների դեպքում: Սեյսմամեկուսիչը սահմանային վիճակին հասցնելու վերաբերյալ գոյություն ունեցող վարկածների միջոցով ստացվել են ուղղաձիգ բեռնվածքի մեծությունների կախվածությունը առավելագույն տեղափոխություններից ՀՀ-ում կիրառվող սեյսմամեկուսիչների համար: Սեյսմամեկուսիչի համար ստացված են կայունությունը բնութագրող պարամետրերի հստակ մեծություններ: Առաջարկված են առավելագույն թույլատրելի տեղափոխությունների կախվածությունները ուղղաձիգ ուժի ազդեցությունից:

***Առանցքային բառեր.** սեյսմամեկուսիչ, կայունություն, տեղափոխություն, կրիտիկական բեռնվածք, ուղղաձիգ ուժ, դեֆորմացիա*

THE EVALUATION OF INFLUENCE OF HORIZONTAL DEFORMATIONS OF SEISMIC ISOLATORS ON THEIR LOAD-BEARING CAPACITY APPLIED IN RA

Tigran Dadayan*, Khachatur Vardanyan

*National University of Architecture and Construction of Armenia, Yerevan, RA
tigran.dadayan@yahoo.com

The change of the horizontal displacement of a seismic isolator applied in RA in case of various combinations of forces acting on it are considered. By applying existing hypotheses about reaching the yield state of the isolator, the dependences of the vertical load values upon the maximum displacements for

seismic isolators used in RA were obtained. Exact values of the parameters characterizing the stability of a seismic isolator are obtained. Dependences of the maximum permissible displacements upon the action of the vertical force are implied.

Keywords: seismic isolator, stability, displacement, critical load, vertical force, deformation

Литература

1. **Хачиян Э.Е.** Сейсмические воздействия и прогноз поведения сооружений. - Ереван: Гитутюн НАН РА, 2015. - 555 с.
2. **АСТ 261 – 2007.** Слоистая резинометаллическая опора сейсмоизоляции, технические условия. – Ереван: Мин. торг. и экон. разв. РА, 2007. - 17 с.
3. **СНРА II-6.02-2006.** Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования. - Ереван, 2006.
4. **Варданян Х.Г.** Исследование поведения слоисто резинометаллических опор сейсмоизоляции при сейсмических воздействиях: дис. ... канд. техн. наук / НУАСА. - Ереван, 2017.
5. **Kelly J.M., Konstantinidis D.A.** Mechanics of rubber bearings for seismic and vibration isolation - Wiley, 2011. - 222 p.

References

1. Khachiyani, E.E. (2015), *Seysmicheskiye vozdeystviya i prognoz povedeniya sooruzheniy* [Seismic effects and forecast of structures' behavior]. Yerevan, Gitutyun Publ. NAS of RA, 555 p. (in Russian)
2. AST 261-2007. *Seysmamekusatsman shertavor retinametaghakan henaran. Tekhnikakan paymanner* [Seismic Isolation Laminated Rubber Steel Bearing. Specification]. Ministry of Trade and Economic Development of RA, Yerevan, 2007, 17 p. (in Armenian)
3. RABC II-6.02-2006. *Seysmakayun shinararutyun, Nakhagcman normer* [Earthquake Resistant Construction. Design Codes]. Yerevan, 2006. (in Armenian)
4. Vardanyan, Kh.G. (2017), *Issledovaniye povedeniya sloisto rezinometallicheskikh opor seysmoizolyatsii pri seysmicheskikh vozdeystviyakh* [The Investigation of the Behavior of Seismic Isolation Layered Steel-rubber Bearings in Case of Seismic Impacts]. PhD dissertation, NUACA, Yerevan. (in Russian)
5. Kelly, J.M., Konstantinidis, D.A. (2011), *Mechanics of rubber bearings for seismic and vibration isolation*, Wiley, 222 p.

Ղաղայան Տիգրան Լեոնիդի, տ.գ.ղ., պրոֆ. (ՀՀ, ք.Երևան) - ՃՀՀԱՀ, «Շինարարական կոնստրուկցիաներ» ամբիոնի վարիչ (+374) 93543911, tigran.dadayan@yahoo.com, **Վարդանյան Խաչատուր Գրիգորիի, տ.գ.թ.** (ՀՀ, ք.Երևան) - ՃՀՀԱՀ, «Շինարարական կոնստրուկցիաներ» ամբիոն, ասիստենտ, (+374) 91697060, xavar@mail.ru
Дадаян Тигран Леонидович., д.т.н., проф. (РА, г.Ереван) - НУАСА, заведующий кафедрой “Строительные конструкции”, (+374)93543911, tigran.dadayan@yahoo.com, **Варданян Хачатур Григорьевич., к.т.н.** (РА, г.Ереван) – НУАСА, кафедра “Строительные конструкции”, ассистент, (+374) 91697060, xavar@mail.ru
Dadayan Tigran, Doctor of Sciences (engineering), prof. (RA, Yerevan) - NUACA, Head of Chair “Building structures”, (+374) 93543911, tigran.dadayan@yahoo.com; **Vardanyan Khachatur doctor of philosophy (PhD) in engineering** (RA, Yerevan) - NUACA, Chair “Building structures”, assistant, (+374) 91697060, xavar@mail.ru

Ներկայացվել է՝ 31.05.2018թ.

Ընդունվել է տպագրության՝ 05.06.2018թ.