УДК 624.04:[624.042.7+699.841]

© Д. Е. Бондарев, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: 89523684328@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-90-94

© D. E. Bondarev, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: 89523684328@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА МЕЖДУ ЦЕНТРОМ ЖЕСТКОСТИ И ЦЕНТРОМ МАСС СЕЙСМОИЗОЛИРОВАННОГО СООРУЖЕНИЯ НА ЕГО КРУТИЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

THE INFLUENCE OF THE ECCENTRICITY BETWEEN THE CENTER OF RIGIDITY AND THE CENTER OF MASS OF THE SEISMIC ISOLATED STRUCTURE ON ITS TORSIONAL OSCILLATIONS SUBJECTED TO SEISMIC IMPACTS

В случаях, когда центр масс и центр жесткости сооружения не совпадают, при сейсмическом воздействии возникают дополнительные сейсмические силы, которые вызывают крутильные колебания сооружения. Данные эффекты ведут к увеличению ускорений в угловых элементах сооружения [1] и, как следствие, снижают эффективность сейсмоизоляции [11], вызывая дополнительные напряжения в конструкциях. Представлены результаты исследования влияния эксцентриситета на величину возникающих ускорений в угловых точках в сейсмоизолированном сооружении на маятниковых опорах.

Ключевые слова: маятниковая система сейсмоизоляции, случайный эксцентриситет, центр жесткости, центр масс, крутильные колебания, сейсмоопоры.

Whenever the center of rigidity does not coincide with the center of mass of the structure, at seismic impact, there may emerge additional oscillation forces in the structure which cause torsional oscillation. Such effects increase accelerations in angular elements of the structure [1] and, consequently, decrease the effectiveness of seismic isolation system [11], causing additional stresses in the structure. The author presents the research results of the influence of eccentricity on value of the arising acceleration in angular points in the structure protected by pendulum seismic isolation system.

Keywords: pendulum seismic isolation system, accidental eccentricity, center of rigidity, center of mass, torsional oscillations, seismic bearings.

Введение

Результаты обследований зданий и сооружений после свершившихся землетрясений нередко свидетельствуют о том, что в крайних элементах, наиболее удаленных от центра масс зданий, обнаруживаются повреждения [8]. Это могут быть трещины в периферийных стенах либо крайние колонны здания, выключенные из работы с оголенной рабочей арматурой. Данные наблюдения свидетельствуют о том, что такие разрушения вызваны крутильными колебаниями. Крутиль-

ные колебания зданий могут быть вызваны вращательной компонентой сейсмического воздействия грунта [2, 5, 10], а также эксцентриситетом между центром жесткостей и центром масс здания [6, 7]. Эксцентриситет может быть *проектным*, который возникает из-за конструктивно-планировочных решений, например, здания асимметричные с неравномерным распределением жесткостей, сложной формой в плане, или *случайным* в симметричных зданиях, который не поддается точному определению, так как вызван

неравномерностью эксплуатационной нагрузки, отклонением от проектного решения при бетонировании элементов либо при перераспределении жесткостей элементов при сильном землетрясении, когда один из элементов начинает работать в неупругой стадии. Так или иначе, при наличии эксцентриситета в здании при поступательном сейсмическом воздействии возникает сейсмический момент, который и вызывает крутильную форму колебаний и увеличивает ускорение в угловых элементах сооружения [9].

В данной статье приведены результаты анализа сейсмоизолированного сооружения размерами в плане $25,5 \times 25,5$ м, расположенного на маятниковых сейсмоопорах. Приведены результаты численного анализа математической модели при различных сейсмических воздействиях, эксцентриситетах и массы защищаемого объекта.

1. Постановка задачи

В данном исследовании была использована математическая модель сейсмоизолированного сооружения, подробно описанная в [4], расположенного на маятниковых сейсмоопорах. Данная модель учитывает геометрическую нелинейность системы, когда силовая характеристика принимает нелинейный вид при больших поступательных перемещениях и углах закручивания. Конструкция и динамическая модель данного типа маятниковой сейсмоизоляции подробно описаны в [3] и показаны на рис. 1.

Исследовался сейсмоизолированный объект со следующими характеристиками:

- размеры защищаемого объекта (ЗО) в плане $A = B = 25,5$ м;
- длина маятниковой тяги $l = 1,5$ м;

- масса ЗО $M = 11\,800$ т;
- момент инерции ЗО $I_z = 1\,275\,000$ т · м²;
- период собственных поступательных колебаний $T_{x,y} = 2,46$ с;
- период собственных крутильных колебаний $T_\varphi = 1,86$ с;
- число маятниковых опор $n = 184$.

При определении собственных периодов колебаний системы руководствовались следующими положениями:

1. Период собственных поступательных колебаний системы не зависит от массы сооружения и определяется по известной формуле математического маятника при малых линейных смещениях:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (1)$$

2. По данным численного анализа данная система может считаться линейной и период — постоянным при перемещениях $u \leq 0,3$ м.

3. Период собственных крутильных колебаний определялся при малых углах закручивания. По данным численного анализа данная система имеет линейную крутильную жесткость при углах закручивания $\varphi \leq 0,007$ рад.

Данная система при расчете на воздействия, заданные акселерограммами, имеет перемещения и углы закручивания, соответствующие линейной силовой характеристике.

Защищаемый объект симметричный в плане. Маятниковые опоры расположены симметрично, т. е. центр жесткости расположен в центре симметрии. Эксцентриситет, или смещение центра масс относительно центра жесткости, обозначается через e и вычисляется в процентах от

Рис. 1. Динамическая модель маятниковой системы сейсмоизоляции с одной степенью свободы. Конструкция опоры

величины B . Центр масс может быть смещен относительно центра жесткости.

Расчеты проводились на пять воздействий, заданных акселерограммами. Исследовалось влияние эксцентриситета и массы защищаемого объекта на абсолютные ускорения наиболее удаленных периферийных точек защищаемого объекта при различных сейсмических воздействиях. Наряду с графиком, полученным при анализе объекта с заданной массой M , также для сравнения получены результаты того же объекта при его массе, уменьшенной и увеличенной в 10 раз (графики $0,1M$ и $10M$ соответственно). Графики ускорений периферийных точек в зависимости от массы и эксцентриситета, заданного в долях размера ЗО в плане, представлены на рис. 2–6.

2. Анализ российских норм

Любопытно отметить тот факт, что в проекте СП «Здания сейсмостойкие и сейсмоизолированные. Правила проектирования» даются рекомендации относительно оценки регулярности сооружения в плане, а именно: сейсмоизолированное сооружение является регулярным и должно быть симметрично в плане с равномерно распределенными жесткостями и массами в двух ортогональных направлениях, если выполняются условия:

$$e_{0x} \leq 0,30r_x; \quad (2)$$

$$r_x \geq l_s, \quad (3)$$

где e_{0x} — расстояние между центром масс и центром жесткостей по оси X , нормальное к анализируемому направлению; r_x — квадратный корень из отношения значений крутильной жесткости к горизонтальной жесткости в направлении Y (радиус кручения); l_s — радиус вращения массы перекрытия в плане (корень квадратный отношения полярного момента инерции массы перекрытия в плане относительно центра масс перекрытия к массе перекрытия).

Применительно к нашему тестовому примеру:

$$r_x = \sqrt{\frac{K_\phi}{K_{x,y}}} = 13,74 \text{ м}, \quad (4)$$

Рис. 2. Зависимость максимальных абсолютных ускорений угловых точек ЗО от эксцентриситета и массы защищаемого объекта. Воздействие № 1

Рис. 3. Зависимость максимальных абсолютных ускорений угловых точек ЗО от эксцентриситета и массы защищаемого объекта. Воздействие № 2

Рис. 4. Зависимость максимальных абсолютных ускорений угловых точек ЗО от эксцентриситета и массы защищаемого объекта. Воздействие № 3

Рис. 5. Зависимость максимальных абсолютных ускорений угловых точек ЗО от эксцентриситета и массы защищаемого объекта. Воздействие № 4

Рис. 6. Зависимость максимальных абсолютных ускорений угловых точек ЗО от эксцентриситета и массы защищаемого объекта. Воздействие № 5

$$l_s = \sqrt{\frac{I}{m}} = 10,41 \text{ м.} \quad (5)$$

По проекту СП критерий регулярности для тестового примера выполняется:

$$r_x \geq l_s.$$

Тогда, согласно проекту СП, в нашем примере критерий регулярности будет выполняться, когда

$$e_{0x} \leq 4,122 \text{ м} = 16 \% (B).$$

Это не коррелирует с результатами, полученными при численном анализе: из графиков, приведенных выше, следует значительное увеличение ускорений периферийных точек здания при эксцентриситетах $e_{0x} \leq 16 \% (B)$. Здание нельзя считать регулярным в плане и игнорировать эксцентриситет при расчете. Данного требования регулярности недостаточно, так как сильное влияние на ускорения оказывает масса защищаемого объекта.

Заключение

Результаты данного исследования показывают, что несовпадение центра жесткости и центра масс приводит к асинхронному движению маятниковых тяг, а именно к их различной продольной деформации, которые приводят к вращению сейсмоизолированного сооружения. Основные результаты решения численного примера:

- масса защищаемого объекта не влияет на абсолютные ускорения при $e = 0$, что подтверждает то, что здание совершает движения, подобные математическому маятнику;
- при отсутствии эксцентриситета маятниковая система сейсмоизоляции доказывает свою эффективность. Ускорения сооружения снижаются в 2 и более раза при $e = 0$;
- происходит значительное увеличение абсолютных ускорений угловых точек при увеличении эксцентриситета, что свидетельствует об увеличении углового ускорения и усилении кручения. Эти результаты коррелируют как с российскими [1], так и с зарубежными [7, 11] исследованиями;
- вариация результатов при различных воздействиях объясняется различным частотным составом воздействий, для которых необходимо проводить отдельный спектральный анализ;
- при анализе требований регулярности сооружения в плане проекта СП «Здания сейсмостойкие и сейсмоизолированные. Правила про-

ектирования» выявлено, что согласно критерию СП анализируемый объект в данной статье можно считать регулярным с равномерно распределенными жесткостями, но из вышеприведенных графиков следует, что данного критерия для оценки регулярности недостаточно, так как при его соблюдении наблюдается значительное увеличение ускорений угловых точек, на которые значительно влияет масса защищаемого объекта.

Библиографический список

1. Ажермачев Г. А. Дополнительные сейсмические силы на колонны рамных каркасов зданий при крутильных колебаниях // Строительство и техногенная безопасность. 2007. № 19–20. С. 17–20.
2. Назаров Ю. П., Позняк Е. В. Оценка ротационных компонент сейсмического движения грунта // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2015. № 6. С. 32–36.
3. Рутман Ю. Л. Маятниковые сейсмоизолирующие опоры. Конструкция. Расчет. Эксперимент // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 1 (27). С. 37–43.
4. Рутман Ю. Л., Симборт Э., Бондарев Д. Е. Анализ динамики сейсмоизолированного сооружения с учетом его крутильных колебаний // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 112–118.
5. Basu D., Whittaker S., Constantinou M. Characterizing rotational components of earthquake ground motion using a surface distribution method and response of sample structures // Engineering Structures. 2015. Vol. 99. Pp. 685–707.
6. Hadjadj A., Benanane A., Ouazir A., Bourahla N. Estimation of the accidental eccentricity due to seismic rotational component // Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia. January 2014. 37(3): Pp. 58–64.
7. Newmark N. Torsion in symmetrical buildings / 4th World Conference on Earthquake Engineering, Chile, 1969.
8. Praveen Kumar. Torsional response of building during earthquake. The Doctor of Philosophy program in Civil and Environmental Engineering. University of Ottawa, The Ottawa-Carleton Institute for Civil Engineering. November 1998. 355 p.
9. Ueng J., Hall W. Torsional effects in structures subjected to strong ground motion / A Technical Report of Research Supported by the NATIONAL SCIENCE FOUNDATION Under Grant Nos. DFR 84-19191, CES 88-03920 and BCS 88-03920. Urbana: Department of Civil Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign, April 1990. 208 p.

10. Yin J., Nigbor R., Chen Q., Steid J. Engineering analysis of measured rotational ground motions at GVDA // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2016. Vol. 87. Pp. 125–137.

11. Zambrana-rojas A., Tena-colunga C. Torsional response of base-isolated structures due to stiffness asymmetries of the isolation system / In: 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004. Pp. 3–8.

References

1. Azhermachev G. A. *Dopolnitel'nye seysmicheskie sily na kolonny ramnykh karkasov zdaniy pri krutil'nykh kolebaniyakh* [Additional seismic forces acting on the columns of frame type frameworks of buildings at torsional oscillations]. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' – Construction and technogenic safety*, 2007, no. 19–20, pp. 17–20.

2. Nazarov Yu. P., Poznyak E. V. *Otsenka rotatsionnykh komponent seysmicheskogo dvizheniya grunta* [Assessment of rotational components of the seismic soil displacement]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, foundations and mechanics of soil*, 2015, no. 6, pp. 32–36.

3. Rutman Yu. L. *Mayatnikovye seysmoizoliruyushchie opory. Konstruktsiya. Raschet. Ehksperiment* [The pendulum seismic isolating support. Design. Calculation. Experiment]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Engineering - Construction Journal*, 2012, no. 1 (27), pp. 37–43.

4. Rutman Yu. L., Simbort Eh., Bondarev D. E. *Analiz dinamiki seysmoizolirovannogo sooruzheniya s uchetom ego krutil'nykh kolebaniy* [Analysis of the dynamics of seismically isolated structure taking into account its torsional oscillations]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 2 (61), pp. 112–118.

5. Basu D., Whittaker S., Constantinou M. Characterizing rotational components of earthquake ground motion using a surface distribution method and response of sample structures. *Engineering Structures*, 2015, vol. 99, pp. 685–707.

6. Hadjadj A., Benanane A., Ouazir A., Bourahla N. Estimation of the accidental eccentricity due to seismic rotational component. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, January 2014, no. 37(3), pp. 58–64.

7. Newmark N. *Torsion in symmetrical buildings*. Proc. 4th World Conference on Earthquake Engineering, Chile, 1969.

8. Praveen Kumar. *Torsional response of building during earthquake*. The Doctor of Philosophy program in Civil and Environmental Engineering. University of Ottawa, Ottawa-Carleton Institute for Civil Engineering, November 1998, 355 p.

9. Ueng J., Hall W. *Torsional effects in structures subjected to strong ground motion*. A Technical Report of Research Supported by the National Science Foundation under Grant Nos. DFR 84-19191, CES 88-03920 and BCS 88-03920. Urbana, Department of Civil Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign, April 1990, 208 p.

10. Yin J., Nigbor R., Chen Q., Steid J. Engineering analysis of measured rotational ground motions at GVDA. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, vol. 87, pp. 125–137.

11. Zambrana-rojas A., Tena-colunga C. *Torsional response of base-isolated structures due to stiffness asymmetries of the isolation system*. Proc. 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004, pp. 3–8.