УДК 624.04:[624.042.7+699.841]

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

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-3-62-65

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

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ РОТАЦИЙ НА ДИНАМИКУ СЕЙСМОИЗОЛИРОВАННОГО СООРУЖЕНИЯ

ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF SEISMIC ROTATIONS ON DYNAMIC RESPONSE OF THE SEISMICALLY ISOLATED STRUCTURE

Сейсмические ротации грунта дают ощутимый вклад в динамическую реакцию сооружений, чувствительных к волновому эффекту сейсмического воздействия и расположенных на мягких грунтах. Данные эффекты приводят к закручиванию и увеличению ускорений в угловых элементах сооружения и уменьшают эффективность сейсмоизоляции, снижая запас прочности несущих элементов. Представлены результаты исследования влияния ротационных движений грунта на величину возникающих ускорений в угловых точках в сейсмоизолированном сооружении, расположенном на маятниковых опорах.

Ключевые слова: сейсмические ротации, ротационная компонента сейсмического воздействия, маятниковая система сейсмоизоляции, сейсмоопоры, интегральная модель волнового поля.

Seismic rotations of soil give a notable contribution in the dynamic response of structures built on soft soils and sensitive to the wave effect of seismic load. These effects lead to torsion and increasing of accelerations in the angular elements of the structure. They reduce the effectiveness of seismic isolation, cutting the strength reserve of the bearing elements. The paper presents the results of research aimed at assessing the influence of soil rotation motions on the value of accelerations emerging in the angular points of the seismically isolated structure positioned on the pendulum bearings.

Keywords: seismic rotations, rotation component of seismic load, pendulum system of seismic isolation, seismic bearings, integrated model of the wave field.

Введение

При обследовании зданий и сооружений, а также грунтов обнаружены дефекты и разрушения, которые почти невозможно объяснить ничем, кроме ротаций грунта: волнообразные искривления рельсов железнодорожных путей, разрушения торцов зданий, повороты конструкций и участков грунта и многие другие [4]. Ротации основания прежде всего связаны с волновым характером землетрясений. Учет ротационных компонент землетрясения при расчете имеет принципиальное значение для зданий с первой крутильной формой колебаний, зданий

с высокой ответственностью, протяженных зданий в плане, а также зданий, расположенных на слабых и мягких грунтах. Сейсмоизолированные здания обладают низкой сдвиговой жесткостью и, как следствие, низкой крутильной жесткостью относительно вертикальной оси здания.

Если повороты участков грунта и искривления рельс можно объяснить *пространственным характером сейсмического воздействия* (ротации грунта), то повороты конструкций, разрушения торцов зданий могут свидетельствовать не только о повлиявших на это ротациях грунта, но и о *пространственной работе самих сооруже-*

ний, которая вызвана их асимметрией и неоднородностью [5]. Результатами пространственной работы конструкций, вызванной их асимметрией, может быть кручение зданий относительно вертикальной оси из-за эксцентриситета между центром жесткости и центром масс здания [11, 12].

В данной статье приведены результаты анализа сейсмоизолированного сооружения с учетом ротаций грунта. Анализ этого сооружения с учетом эксцентриситета между центром масс и центром жесткости (пространственной работы самого сооружения) выполнен в другой статье автора [2].

Постановка задачи

В данном исследовании была использована математическая модель сейсмоизолированного сооружения, подробно описанная в [9], расположенного на маятниковых сейсмоопорах. 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 [8].

Результаты расчетов

Ниже приведены результаты анализа сейсмоизолированного сооружения размерами в плане $25,5 \times 25,5$ м, расположенного на маятниковых сейсмоопорах. Объект симметричный в плане. Маятниковые опоры расположены симметрично, т. е. центр жесткости расположен в центре симметрии. Расчет выполнен во временной области с учетом не только поступательных акселерограмм сейсмического воздействия, но и ротационных акселерограмм. Приведены результаты численного анализа математической модели при различных сейсмических воздействиях. Расчет выполнен с учетом ротационных акселерограмм, полученных по интегральной модели волнового поля по методике Ю. П. Назарова с помощью программного комплекса «Одиссей» [7].

Интегральная модель сейсмического движения предполагает согласованное движение грунта в некоторой области земной поверхности. Грунт в этом случае подобен твердому телу с шестью степенями свободы — тремя поступательными и тремя угловыми (ротационными) [3].

Правомочность применения интегральной модели:

- известны лишь три функции от времени в одной точке записывающей аппаратуры;
- жесткий фундамент с компактными размерами в плане;
- твердые породы в основании, для которых характерны большие скорости распространения сейсмических волн [3].

С помощью указанной модели [9] и вышеприведенных положений исследовался сейсмоизолированный объект со следующими характеристиками [2]:

- 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 $n = 184$.

Расчеты проводились на три воздействия, заданные тремя поступательными акселерограммами и одной ротационной относительно вертикальной оси здания. Исследовалось влияние добавленной ротационной акселерограммы на абсолютные ускорения наиболее удаленных периферийных точек защищаемого объекта при различных сейсмических воздействиях. Ротационная акселерограмма генерировалась каждый раз при задании различной скорости поперечной волны в слое грунта, находящегося непосредственно под подошвой фундамента. Динамика сейсмоизолированного объекта исследовалась на воздействие различных ротационных акселерограмм, сгенерированных в зависимости от скорости распространения поперечной волны в грунте $v_s = 10\,000$ м/с как грунта очень жесткого (скального) и до $v_s = 250$ м/с как грунта мягкого (суглинок, глина) [1]. Графики ускорений периферийных точек сооружения в зависимости от скорости поперечной волны в грунте представлены на рис. 1–3.

Заключение

Результаты исследования показывают, что ротационная компонента воздействия, при-

Рис. 1. Зависимость максимальных абсолютных ускорений угловых точек объекта от скорости распространения поперечной волны под подошвой фундамента. Воздействие № 1

Рис. 2. Зависимость максимальных абсолютных ускорений угловых точек объекта от скорости распространения поперечной волны под подошвой фундамента. Воздействие № 2

Рис. 3. Зависимость максимальных абсолютных ускорений угловых точек объекта от скорости распространения поперечной волны под подошвой фундамента. Воздействие № 3

водящая к вращению сейсмоизолированного объекта, значительно влияет на его динамику. На жестких грунтах (при приближении v_s к 1000 м/с) ускорение угловых точек возрастает на 20–30 %, при приближении v_s к 250 м/с наблюдаются увеличения ускорений в 1,5–2 раза.

Библиографический список

1. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.: Наука, 1998. 255 с.
2. Бондарев Д. Е. Влияние эксцентриситета между центром жесткости и центром масс сейсмоизолированного сооружения на его крутильные колебания при сейсмическом воздействии // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6 (65). С. 90–94.
3. Назаров Ю. П., Позняк Е. В. Оценка ротационных компонент сейсмического движения грунта // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2015. № 6. С. 32–36.
4. Назаров Ю. П. Аналитические основы расчета сооружений на сейсмические воздействия. М.: Наука, 2010. 468 с.
5. Назаров Ю. П. Расчетные модели сейсмических воздействий. М.: Наука, 2012. 414 с.
6. Николаенко Н. А., Назаров Ю. П. Динамика и сейсмостойкость сооружений. М.: Стройиздат, 1988. 308 с.
7. Позняк Е. В. О расчетах на сейсмостойкость с программным обеспечением «Еврософт Одиссей» // Приложение к журналу «Справочник. Инженерный журнал». 2013. № 5. С. 22–24.
8. Рутман Ю. Л. Маятниковые сейсмоизолирующие опоры. Конструкция. Расчет. Эксперимент // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 1 (27). С. 37–43.
9. 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.
10. 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. № 99. Pp. 685–707.
11. 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. Vol. 37, № 3. Pp. 58–64.
12. Newmark N. M. Torsion in symmetrical buildings // Proceedings of the 4th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago de Chile, 1969.

References

1. Birbraer A. N. *Raschet konstruktsey na seysmoustoykost'* [Calculation of designs on seismic stability]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1998, 255 p.
2. Bondarev D. E. *Vliyaniye ehktsentrisiteta mezhdu tsentrom zhestkosti i tsentrom mass seysmoizolirovannogo*

sooruzheniya na ego krutil'nye kolebaniya pri seismicheskom vozdeystvii [The influence of the eccentricity between the rigidity center and the mass center of the seismic isolated structure on its torsional oscillations under seismic impact]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 6 (65), pp. 90–94.

3. Nazarov Yu. P., Poznyak E. V. *Otsenka rotatsionnykh komponent seismicheskogo dvizheniya grunta* [Assessment rotational component of the seismic movement of soil]. *Osnovaniya, fundamente i mekhanika gruntov – Bases, foundations and soil mechanics*, 2015, no. 6, pp. 32–36.

4. Nazarov Yu. P. *Analiticheskie osnovy rascheta sooruzheniy na seismicheskie vozdeystviya* [Analytical bases of calculating constructions on seismic loads]. Moscow, Nauka Publ., 2010, 468 p.

5. Nazarov Yu. P. *Raschetnye modeli seismicheskikh vozdeystviy* [Calculation models of seismic loads]. Moscow, Nauka Publ., 2012, 414 p.

6. Nikolaenko N. A., Nazarov Yu. P. *Dinamika i seysmostoykost' sooruzheniy* [Dynamics and seismic stability of structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988, 308 p.

7. Poznyak E. V. *O raschetakh na seysmostoykost' s programnym obespecheniem «Evrosoft Odissey»* [About calculations on seismic stability with the software of “Evrosoft Odissey”]. *Prilozhenie k zhurnalu «Spravochnik.*

Inzhenernyy zhurnal» – Supplement to “Reference book. Engineering journal”, 2013, no. 5, pp. 22–24.

8. Rutman Yu. L. *Mayatnikovye seysmoizoliruyushchie opory. Konstruktsiya. Raschet. Eksperiment* [The pendulum seismic isolating supports. Design. Calculation. Experiment]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Engineering-construction journal*, 2012, no. 1 (27), pp. 37–43.

9. 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.

10. 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, no. 99, pp. 685–707.

11. 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, vol. 37, no. 3, pp. 58–64.

12. Newmark N. M. *Torsion in symmetrical buildings*. Proc. of the 4th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago de Chile, 1969.