



Бондарев Д.Е.

аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Симборт Э.

кандидат технических наук, директор школы ПГС, Университет Сан Пабло, Арекипе, Перу

УДК 624.04:[624.042.7+699.841]

Кручение симметричных сооружений, расположенных на различных системах сейсмоизоляции, вызванное волновым эффектом землетрясения

Аннотация: Рассматривается математическая модель сооружения, расположенного на различных системах сейсмоизоляции: резинометаллических и маятниковых опорах. Данная модель учитывает кручение изолированной части сооружения, вызванное ротационной компонентой сейсмиче-

ского воздействия. Ротационная компонента сейсмического воздействия отражает волновую природу землетрясения. В данной статье проиллюстрированы результаты влияния данной компоненты на динамику сейсмоизолированного сооружения.

Ключевые слова: кручение, сейсмические ротации, ротационная компонента сейсмического воздействия, маятниковая система сейсмоизоляции, резинометаллические опоры.

Bondarev D.E., Post-graduate Student, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russian Federation

Simbort E., PhD in Sci. Tech., Structural Engineer, Director Esc. Prof. Ing. Civil. Arequipa, Perú

Torsion of Symmetric Structures Located on the Various Systems of Seismic Isolation Subjected to Wave Passage Effect of Earthquake

Abstract: Mathematical model of structure located on various systems of seismic isolation such as laminated rubber bearings and pendulum bearings are considered. This model takes into account torsion of

superstructure caused by rotational component of seismic excitation. Rotational component of seismic excitation reflects the wave nature of earthquake. This paper illustrates the torsional response of isolated structure.

Keywords: torsion, seismic rotations, rotation component of seismic excitation, pendulum bearings, rubber bearings.

ВВЕДЕНИЕ

Один из самых важных факторов кручения зданий и сооружений – это сейсмические ротации. Это эффекты пространственного характера сейсмического воздействия, определённые его волновой природой и вызывающие пространственную работу сооружений. Данные ротации определяются параметрами волнового поля, которое соответствует сейсмическому воздействию. Данный фактор вызывает кручение в *симметричных зданиях* (здания, где совпадает центр масс и центр жёсткости). Как известно, самыми разрушительными являются поверхностные сейсмические волны: волны Лява и волны Рэлея. И именно эти волны, наряду с S-волнами, вызывают наибольшие ротации зданий и сооружений. На рисунке 1 можно видеть наглядное изображение волн Лява и Рэлея, результатом действия которых являются повороты зданий относительно вертикальных и горизонтальных осей:

ИСХОДНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Хронограммы сейсмических ротаций можно получить как косвенным, так и инструментальным методом. В настоящий момент инструментальные методы недостаточно развиты. В данной работе предлагается ротационное воздействие генерировать по имеющимся поступательным акселерограммам, измеренным в одной точке. Согласно многим отечественным и зарубежным исследователям, ротационные компоненты можно получить по следующим формулам [2-5]:

$$\ddot{\varphi}_x = \frac{1}{2v_s} \left(\frac{d\ddot{Z}_0(t)}{dt} - \frac{d\ddot{Y}_0(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

$$\ddot{\varphi}_y = \frac{1}{2v_s} \left(\frac{d\ddot{X}_0(t)}{dt} - \frac{d\ddot{Z}_0(t)}{dt} \right) \quad (2)$$

$$\ddot{\varphi}_z = \frac{1}{2v_s} \left(\frac{d\ddot{Y}_0(t)}{dt} - \frac{d\ddot{X}_0(t)}{dt} \right) \quad (3)$$

где $\ddot{X}_0(t)$, $\ddot{Y}_0(t)$, $\ddot{Z}_0(t)$ – акселерограммы поступательных компонент сейсмического воздействия, записанных в одной точке регистрации; v_s – скорость поперечной волны под подошвой фундамента.

Следует указать границы применимости данных ротационных акселерограмм:

1. Данные акселерограммы получены для интегральной модели сейсмического воздействия, а имен-

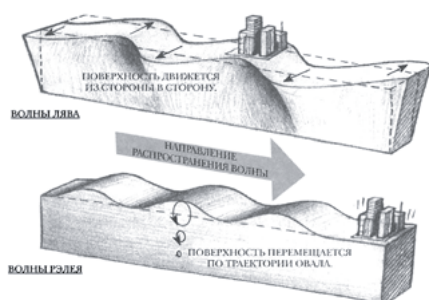


Рисунок 1 — Изображение поверхностных сейсмических волн. Рисунок из [1]

Figure 1 — Common view of surface waves. Picture from [1]

но: в данном предположении грунтовое основание в виде некоторого выделенного объёма имеет все 6 степеней свободы: 3 поступательных и 3 вращательных [2];

2. Приведённые соотношения (1)-(3) между параметрами векторов поступательного движения и вращения основания определены по линейной теории. То есть данные соотношения получены из решения теории упругости, а, значит, применимы только при ротациях, которые вызваны упругими деформациями грунта при прохождении сейсмической волны. Данные ротационные воздействия соответствуют слабой и средней интенсивности движения грунта (7, 8 баллов). При большей интенсивности движений грунта между векторами поступательных движений и вращений появляются погрешности, которые увеличиваются по мере роста интенсивности. Такие искажения наблюдаются при интенсивности землетрясений 9 баллов в отдельные моменты времени [6];
3. Движение грунта на поверхности является *согласованным*. Такое движение означает, что в заданную точку сейсмического поля каждая составляющая спектра с линейной частотой доходит без изменения амплитуды и с соответствующим фазовым сдвигом [7];
4. Монохроматические волны P-, SH- и SV-волны, из которых состоит воздействие вдоль каждой из трёх взаимно перпендикулярных осей имеют плоский фронт и не изменяются по глубине [2];
5. Фундамент здания, сейсмостойкость которого оценивается с помощью как поступательных, так и ротационных акселерограмм сейсмического воздействия, сплошной и жёсткий [2].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЕЙСМОИЗОЛИРОВАННОГО СООРУЖЕНИЯ, УЧИТЫВАЮЩАЯ КРУЧЕНИЕ

Считая, что изолированная часть сооружения при землетрясении ведёт себя как твёрдое тело, то для анализа можно использовать модель, приведённую ниже, которая будет учитывать кручение (рисунок 2).

Следует указать границы применимости данной математической модели:

1. Моделируемое здание ниже 12-15 этажей и с жесткой конструктивной схемой. Влияние высших форм колебаний незначительно, и вследствие этого здание совершает колебания как твёрдое тело [8];
2. Изолируемая часть здания имеет основной тон колебаний больше 3 Гц [9];
3. Учитывается кручение только относительно вертикальной оси (torsion), кручение относительно горизонтальных осей, т.н. качение (rocking), не учитывается.

УРАВНЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ КРУЧЕНИЕ ИЗОЛИРОВАННОГО ОБЪЕКТА, РАСПОЛОЖЕННОГО НА МАЯТНИКОВЫХ И РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОПОРАХ

В анализе сейсмоизолированного здания на кручение использовались два типа опор: кинематические опоры маятникового типа и резинометаллические опоры (РМО).

Популярными изоляторами являются кинематические опоры маятникового типа. При горизонтальных перемещениях строения часть кинетической энергии переходит

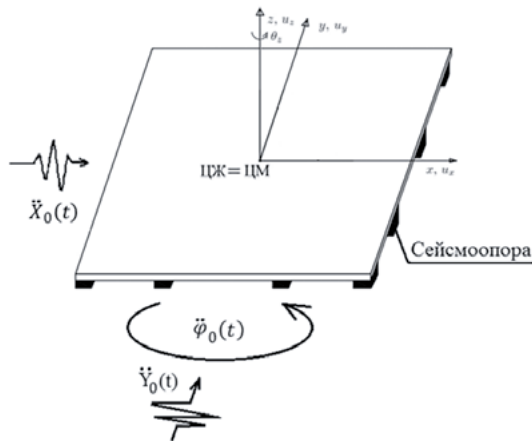


Рисунок 2 — Вид математической модели, учитывающей кручение объекта, расположенного на сейсмоопорах

Figure 2 — Mathematical model considering torsion of base isolated object

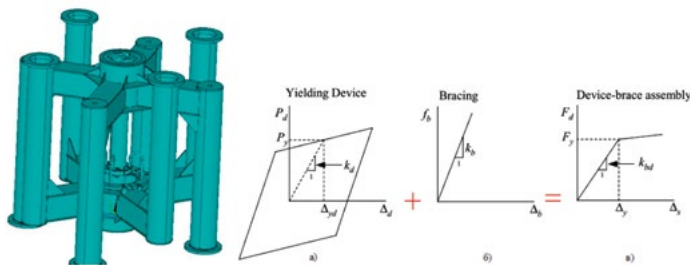


Рисунок 3 — Вид маятниковых опор, оснащённых пластическими демпферами, выполненных в виде криволинейных стержней, прикреплённых к маятниковой тяге (слева), силовая диаграмма данного вида опор (справа)

Figure 3 — Pendular bearings with plastic dampers realized in curved-shape bars (on the left), idealized diagram «force - displacement» (on the right)

рами, которые работают по билинейной силовой характеристике. На рисунке 3 можно видеть общий вид опор и их силовую характеристику.

В работе автора и др. [11] были выведены уравнения, описывающие динамику изолированного объекта, расположенного на маятниковых опорах, при кручении. Пренебрегая ускорениями Кориолиса и вертикальной компонентой реакции пластических демпферов, получаем следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{x} + 2\xi\omega\dot{x} + \frac{P_x(x, \dot{x})}{m} - \frac{R_x}{m} = -\ddot{x}_0(t) \\ \ddot{y} + 2\xi\omega\dot{y} + \frac{P_y(y, \dot{y})}{m} - \frac{R_y}{m} = -\ddot{y}_0(t) \\ \ddot{z} + 2\xi\omega\dot{z} - g - \frac{R_z}{m} = -\ddot{z}_0(t) \\ \ddot{\varphi} + 2\xi\omega_\varphi\dot{\varphi} + \frac{M}{I_z} = -\ddot{\varphi}_0(t) \end{cases} \quad (4)$$

где $P_x(x, \dot{x})$ – реакция пластических демпферов, R_x – реакция маятниковой тяги, ω – частота поступательных колебаний системы, ω_φ – частота крутильных колебаний системы, M – момент от реакций пластических демпферов и маятниковых тяг.

Также распространёнными системами сейсмоизоляции являются резинометаллические опоры (РМО). Опоры данного типа сейсмоизоляции обладают податливостью в горизонтальном направлении и достаточной жесткостью в вертикальном. Работают данные опоры по билинейной силовой диаграмме (рисунок 4).

Пренебрегая ускорениями Кориолиса и вертикальной компонентой сейсмического воздействия, получаем следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{x} + 2\xi\omega_x\dot{x} + R_x(x, \dot{x})/m = -\ddot{x}_0(t) \\ \ddot{y} + 2\xi\omega_y\dot{y} + R_y(y, \dot{y})/m = -\ddot{y}_0(t) \\ \ddot{\varphi} + 2\xi\omega_\varphi\dot{\varphi} + \frac{M}{I_z} = -\ddot{\varphi}_0(t) \end{cases} \quad (5)$$

Данные модели позволяют учесть кручение изолированного сооружения, расположенного на n опорах с произвольными координатами в плане.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА

Исследовалось три типа здания с различным количеством сейсмоопор и различным расположением их в плане. На рисунке 5 представлены планы расположения опор.

Изолированный объект обладает следующими характеристиками:

$$\begin{aligned} A &= B = 25.5 \text{ м}; \\ M &= 11800 \text{ т}; \\ I_z &= 1275000 \text{ т}\cdot\text{м}^2; \\ \Omega &= \frac{\omega_\varphi}{\omega_x}. \end{aligned}$$

где A, B – размеры защищаемого объекта (ЗО) в плане, L – длина маятниковой тяги, M – масса ЗО, I_z – момент инерции ЗО, n – количество опор, ω_x – собственная частота поступательных колебаний, ω_φ – собственная частота крутильных колебаний, $T_{x,y}$ – период собственных поступательных колебаний, T_φ – период собственных крутильных колебаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ТЕСТОВОГО ПРИМЕРА

Системы уравнений (4) и (5) решались численным интегрированием методом Рунге-Кутты 4-го порядка в ПК Mathcad.

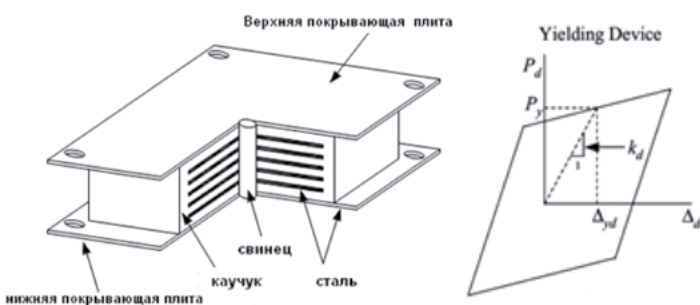


Рисунок 4 — Вид резинометаллических опор со свинцовым сердечником (слева), силовая диаграмма (справа)

Figure 4 — Elastomeric bearings with lead (on the left), idealized diagram «force - displacement» (on the right)

в потенциальную, которая создаёт возвращающую силу. Таким образом, при горизонтальных колебаниях земной коры, изолируемая часть здания совершает колебания как горизонтальные, так и вертикальные.

В данной работе рассматривались опоры, разработанные в ОАО «КБСМ» [10]. Данные опоры за счёт маятниковой тяги перестраивают здание на основной период порядка 2 секунд, тем самым фильтруя высокие частоты воздействия. Но также опоры оснащены пластическими демпфе-

$n = 56$ $\Omega = 0.7$	$n = 100$ $\Omega = 1.0$	$n = 184$ $\Omega = 1.25$
Характеристики объектов, расположенных на РМО		
Опоры типа GZY500V5A $T_{x,y} = 0,891$ секунд; $T_{\varphi} = 1,013$ секунд;	Опоры типа GZY350V5A $T_{x,y} = 0,831$ секунд; $T_{\varphi} = 0,692$ секунд;	Опоры типа GZY300V5A $T_{x,y} = 0,648$ секунд; $T_{\varphi} = 0,526$ секунд;
Характеристики объектов, расположенных на маятниковых опорах		
$L = 1.5$ м; $T_{x,y} = 2,43$ секунд; $T_{\varphi} = 1,86$ секунд;	$L = 1.5$ м; $T_{x,y} = 2,43$ секунд; $T_{\varphi} = 1,86$ секунд;	$L = 1.5$ м; $T_{x,y} = 2,43$ секунд; $T_{\varphi} = 1,86$ секунд;

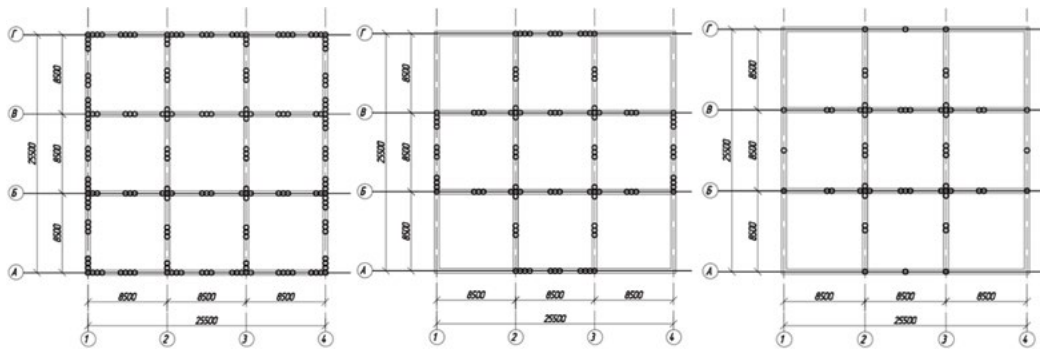


Рисунок 5 — Схемы расположения опор изолированного сооружения. Слева направо: 184, 100 и 56 опор
Figure 5 — Scheme of location of bearings of isolated structure in plan. From left to right: 184, 100 and 56 bearings

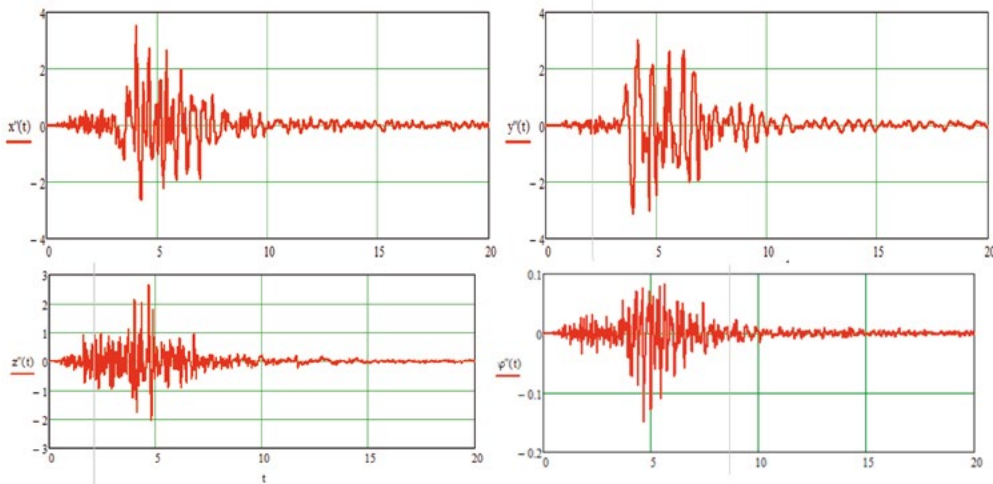


Рисунок 6 — Компоненты воздействия $X, Y, Z, \varphi_2(t)$: Фриули, Италия, 1976 г. $PGA=3.88 \text{ m/s}^2$
Figure 6 — Components of seismic excitations $X, Y, Z, \varphi_2(t)$: Friuli, Italy, 1976 г. $PGA=3.88 \text{ m/s}^2$

Ротационная компонента воздействия (формула (3)) генерировалась каждый раз в зависимости от типа грунта. Исследовался диапазон ротационных акселерограмм от $v_s=10000 \text{ м/с}$ как грунта гипотетически очень жёсткого (скального) и до $v_s=250 \text{ м/с}$ как грунта мягкого (суглинок, глина).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе численного анализа модели изолируемого здания, расположенного на маятниковых опорах и резинометаллических опорах (РМО), можно сделать

выводы относительно кручения, вызванного наличием ротационной акселерограммы сейсмического воздействия наряду с тремя линейными поступательными (рисунки 6-11):

1. Значительно увеличиваются ускорения угловых точек здания. При отдельных воздействиях ускорения увеличиваются в 3,5 раза по отношению к ускорению ЦМ суперструктуры;
2. Влияние на крутильный отклик изолированного объекта оказывает параметр Ω , который равен отноше-

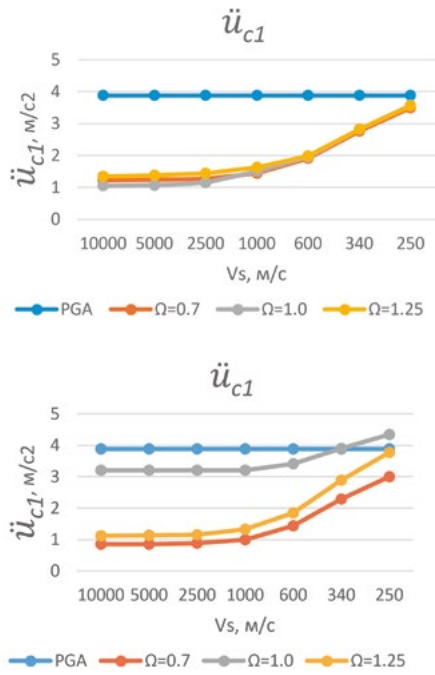


Рисунок 7 — Ускорение угловой точки здания. Слева для маятниковых опор. Справа для РМО. Воздействие: Фриули

Figure 7 — Accelerations of angular point of isolated building. On the left for pendular bearings. On the right for elastomeric bearings. Excitation: Friuli.

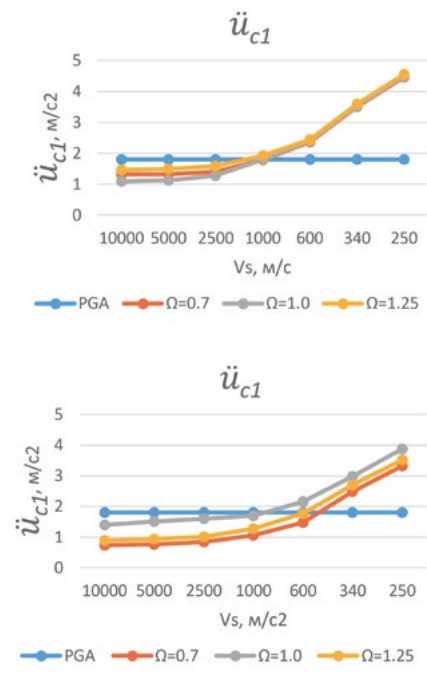


Рисунок 9 — Ускорение угловой точки здания. Слева для маятниковых опор. Справа для РМО. Воздействие: Вальпараисо

Figure 9 — Accelerations of angular point of isolated building. On the left for pendular bearings. On the right for elastomeric bearings. Excitation: Valparaiso

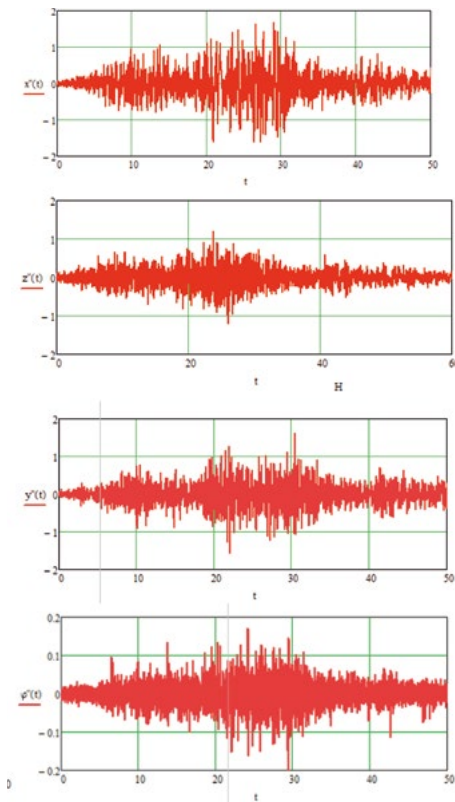


Рисунок 8 — Компоненты воздействия $X, Y, Z, \varphi_z(t)$: Вальпараисо, Чили, 1985 г. PGA=1.8 м/с²

Figure 8 — Components of seismic excitations $X, Y, Z, \varphi_z(t)$: Valparaiso, Chile, 1985 г. PGA=1.8 m/s²

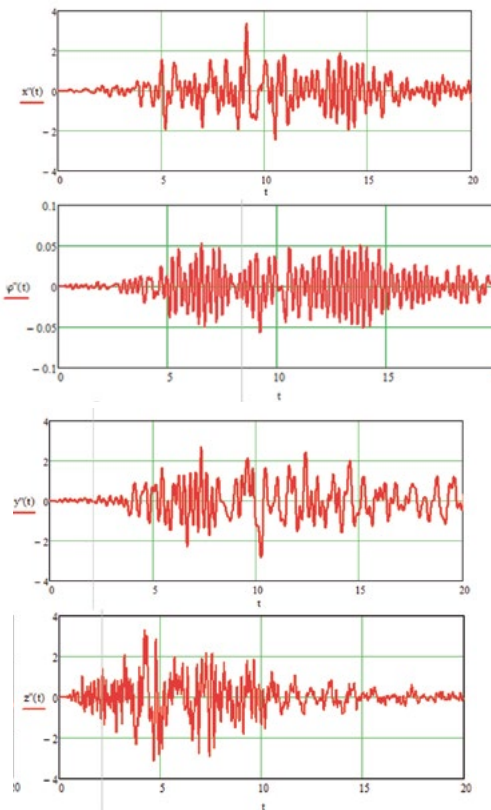


Рисунок 10 — Компоненты воздействия $X, Y, Z, \varphi_z(t)$: Нортридж, США, 1994 г. PGA=3.37 м/с²

Figure 10 — Components of seismic excitations $X, Y, Z, \varphi_z(t)$: Northridge, USA, 1994 г. PGA=3.37 m/s²

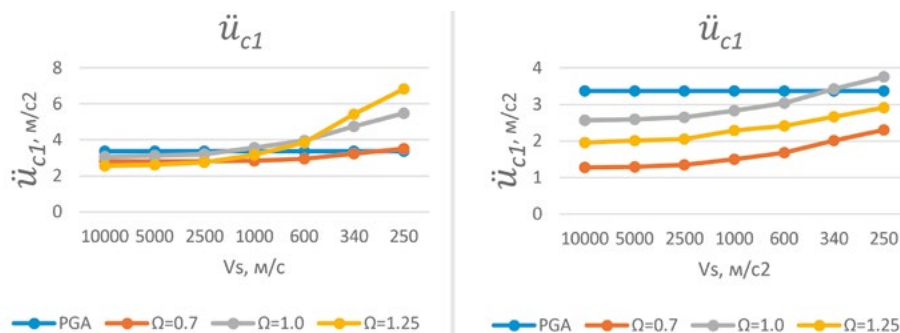


Рисунок 10 — Ускорение угловой точки здания. Слева для маятниковых опор. Справа для РМО. Воздействие: Нортридж

Figure 10 — Accelerations of angular point of isolated building. On the left for pendular bearings. On the right for elastomeric bearings. Excitation: Northridge

нию собственных частот крутильных и поступательных колебаний;

3. Период собственных крутильных колебаний для сооружения на маятниковых опорах определялся при малых углах закручивания. Но математическая модель

для маятниковых опор учитывает геометрическую нелинейность, то есть жёсткость на кручение перестаёт быть линейной при больших углах закручивания, что объясняет неустойчивость некоторых результатов (Воздействие: Нортридж).

Литература

1. Претор-Пинни. Занимательное волноведение. Волнения и колебания вокруг нас. М.: Лайвбук. 2012. 416 с.
2. Назаров Ю.П., Позняк Е.В. Оценка ротационных компонент сейсмического движения грунта // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2015. №6. С. 32-36.
3. Basu D., Whittaker A., Constantinou M. C. Estimating rotational components of ground motion using data recorded at a single station. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE* 138(9), 2012, pp. 1141–1156.
4. Hao H. Characteristics of torsional ground

- motions. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 1996, 25(6), pp. 599-610.
5. Newmark N. Torsion in symmetrical buildings. 4th World Conference on Earthquake Engineering. Chile, 1969.
6. Николаенко Н.А., Назаров Ю.П. Динамика и сейсмостойкость сооружений. М.: Стройиздат. 1988. 308 с.
7. Назаров Ю.П. Расчётные параметры волновых полей сейсмических движений грунта. М.: Наука. 2015. 376 с.
8. Чылбак А.А. Расчётные модели для сейсмоизолированных сооружений // Вестник Тувинского государственного университета.

2014. №3 (22). С. 54-57.

9. Чылбак А.А. Влияние высших форм собственных колебаний сейсмоизолированных зданий // Вестник Тувинского государственного университета. 2011. №3 (10). С. 28-31.
10. Рутман Ю.Л. Маятниковые сейсмоизолирующие опоры. Конструкция. Расчет. Эксперимент // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 1(27). С. 37-43.
11. Рутман Ю.Л., Симборт Э., Бондарев Д.Е. Анализ динамики сейсмоизолированного сооружения с учётом его крутильных колебаний // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2(61). С. 112-118.

References

1. Pretor-Pinni. Zanimatel'noe volnovedenie. Volneniya i kolebaniya vokrug nas. M.: Lajvbuk. 2012. 416 s. [In Russian]
2. Nazarov Yu.P., Poznyak E.V. Ocenka rotacionnyh komponent sejsmicheskogo dvizheniya grunta. *Osnovaniia, fundamenty i mekhanika gruntov [Soil Mechanics and Foundation Engineering]*, 2015, no. 6, pp. 32-36. [In Russian]
3. Basu D., Whittaker A., Constantinou M. C. Estimating rotational components of ground motion using data recorded at a single station. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE* 138(9), 2012, pp. 1141–1156.
4. Hao H. Characteristics of torsional ground

- motions. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 1996, 25(6), pp. 599-610.
5. Newmark N. Torsion in symmetrical buildings. 4th World Conference on Earthquake Engineering. Chile, 1969.
6. Nikolaenko N.A., Nazarov Yu.P. *Dinamika i seismostojkost' sooruzhenii*. M.: Stroizdat. 1988. 308 s. [In Russian]
7. Nazarov Yu.P. *Raschetnye parametry volnovyh polei seismicheskikh dvizhenii grunta*. M.: Nauka. 2015. 376 s. [In Russian]
8. Chylbak A.A. *Raschetnye modeli dlya seismoizolirovannyh sooruzhenii*. *Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014, no. 3 (22),

pp. 54-57. [In Russian]

9. Chylbak A.A. Vliianie vysshih form sobstvennyh kolebanii seismoizolirovannyh zdaniy. *Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011, no. 3(10), pp. 28-31. [In Russian]
10. Rutman Yu.L. *Maiatnikovye seismoizoliruyushchie opory. Konstruktsiia. Raschet. Eksperiment*. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2012, no. 1(27), pp. 37-43. [In Russian]
11. Rutman Yu.L., Simbort E., Bondarev D.E. *Analiz dinamiki seismoizolirovannogo sooruzheniia s uchetom ego krutit'nyh kolebanii*. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*. 2017, no. 2(61), pp. 112-118. [In Russian].

Для цитирования: Бондарев Д.Е., Симборт Э. Кручение симметричных сооружений, расположенных на различных системах сейсмоизоляции, вызванное волновым эффектом землетрясения // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. №6. С. 28-33.

For citation: Bondarev D.E., Simbort E. Torsion of Symmetric Structures Located on the Various Systems of Seismic Isolation Subjected to Wave Passage Effect of Earthquake. *Seismostoiokoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii [Earthquake engineering. Constructions safety]*, 2019, no. 6, pp. 28-33. (In Russian)