УДК 624.042.7

© О. П. Нестерова, ассистент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: neona975@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-2-48-53

© O. P. Nesterova, assistant lecturer
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: neona975@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СООРУЖЕНИЙ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ГАСИТЕЛЯМИ КОЛЕБАНИЙ ПО АКСЕЛЕРОГРАММАМ ПРОЕКТНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

SOME FEATURES OF CALCULATING STRUCTURES WITH TUNED MASS DAMPERS USING ACCELEROGRAMS OF DESIGN-BASIS EARTHQUAKES

Рассматривается расчет сооружения с динамическим гасителем колебаний по акселерограммам проектных землетрясений. Для расчета сооружения с гасителем сгенерированы три воздействия: опасное для незащищенного сооружения, опасное для сооружения с гасителем по первой преобладающей частоте, опасное для сооружения с гасителем по второй преобладающей частоте. Приведены рекомендации по расчету систем с гасителем на воздействие проектных землетрясений. Даны некоторые пояснения явления снижения эффективности использования гасителя при действии акселерограмм в сравнении с воздействием гармоник.

Ключевые слова: проектное землетрясение, динамический гаситель колебаний, акселерограммы.

The paper considers the calculation of a structure with a tuned mass damper using accelerograms of design-basis earthquakes. To calculate the structure with a damper, there were generated three artificial seismic inputs, namely, a dangerous one for an unprotected structure, a dangerous one for a structure with a mass damper for the first prevailing frequency, and a dangerous one for a structure with the mass damper for the second prevailing frequency. Some recommendations are given for calculating systems with mass dampers under the seismic input of the design-basis earthquakes. Explanations are offered regarding the efficiency decrease phenomenon in case of using the damper under the accelerogram actions as compared to the actions of harmonics.

Keywords: design-basis earthquake, tuned mass damper, accelerograms.

Введение

Эффект динамического гасителя колебаний (ДГК) впервые упоминается в конце XIX века [1, 2]. С тех пор исследованием системы с ДГК занимались многие ученые [3–6]. В строительстве зданий и сооружений ДГК в условиях сейсмически опасных районов применяется с конца 70-х гг. прошлого века. Встает вопрос о динамическом расчете таких систем и оценке эффективности систем с ДГК с помощью расчета по акселерограммам.

При динамическом расчете сооружения можно использовать записи прошедших землетрясений или сгенерированные акселерограммы. При использовании акселерограмм прошедших землетрясений необходимо производить расчет на пакет записей, так как неизвестно, какая из

акселерограмм окажется наиболее опасной. Как правило, используется пакет из 60–100 записей, каждый расчет рассматривается как реализация случайного процесса, а результат осредняют по выборке [7].

При генерации акселерограмм существует два принципиальных подхода: генерация под площадку строительства и под сооружение [8].

Первый подход предлагается сейсмологами [9–11] и должен учитывать все сейсмологические особенности площадки строительства: глубину и расположение возможных очагов землетрясений (ВОЗ), рельеф местности, грунтовые условия и т. п. Основными недостатками данного подхода являются ограниченность исходной сейсмологической информации и отсутствие учета динамических свойств рассчитываемого сооруже-

ния при генерации воздействия. Необходимость учета свойств сооружения обусловлена тем, что даже при возможности получения полной сейсмологической информации данные сейсмологов имеют погрешности, а даже небольшие изменения спектрального состава воздействия могут существенно повлиять на реакцию сооружения.

При отсутствии исходной сейсмологической информации существует возможность сгенерировать воздействие под сооружение. При генерации акселерограммы, опасной для сооружения [12, 13], задается модель воздействия с опасной (резонансной) для сооружения частотой. Как известно, для линейного осциллятора наиболее опасным является воздействие в виде прямоугольного синуса [14] с опасной (резонансной) для сооружения частотой. Однако удорожание строительства сооружения оказывается достаточно значительным, что приводит к необходимости дальнейшего уточнения модели воздействия. Для этого задаются многопараметрической функцией, состоящей из набора затухающих синусоид или подобных осциллирующих функций. Частота осцилляций подбирается опасной для сооружения. Для линейных систем это собственные частоты колебаний сооружения. Простейшим синтетическим воздействием является затухающая синусоида, использованная И. Л. Корчинским в 1954 г. [15]. Обобщение этого воздействия предложено А. А. Долгой [16]. Ею для описания велосиграммы использовано следующее представление:

$$\dot{y}_0 = \sum_{i=1}^3 A_i e^{-\varepsilon_i t} \sin \omega_i t, \quad (1)$$

где ω_i — частоты, опасные для сооружения; A_i и ε_i — неопределенные параметры воздействия.

Частоты ω_i назначаются опасными (резонансными) для сооружения. Шесть параметров (три амплитуды A_i и три затухания ε_i) являются неопределенными. Дополнительный седьмой параметр — продолжительность воздействия. Неопределенные параметры в выражении (1) подбираются так, чтобы свойства сгенерированного воздействия соответствовали свойствам реальных акселерограмм. Эти свойства, хотя и рассматривались в литературе [17], до настоящего времени однозначно не определены.

Также важно отметить, что при проектировании зданий на сейсмическое воздействие про-

изводят расчет на несколько уровней воздействия [18], минимум на два уровня: проектное землетрясение (ПЗ) и максимальное расчетное землетрясение (МРЗ). Для каждого из уровней воздействия определяющие характеристики землетрясения различны. При ПЗ сооружение работает в упругой стадии, усилия и перемещения в элементах конструкции пропорциональны уровню ускорений. Чем больше ускорения, тем больше соответствующие факторы. Поэтому основной характеристикой ПЗ является пиковое ускорение, или PGA (peak ground acceleration). При проектировании на МРЗ необходимо исключить малоцикловую усталость и прогрессирующее обрушение основных несущих конструкций [19, 20]. Критерий этих повреждений — работа сил пластического деформирования. Для разрушения конструкции необходимо совершить работу, для чего землетрясение должно обладать достаточной энергией. Большие кратковременные пиковые ускорения могут быть совершенно безопасными. В связи с этим при генерации воздействия нужно обращать внимание на энергетические характеристики воздействия.

Расчет сооружения с ДГК по акселерограммам землетрясений

Рассмотрим пример расчета сооружения с ДГК. Для такого расчета были сгенерированы в соответствии с рекомендациями¹ акселерограммы, опасные для сооружения, для расчета на проектное землетрясение. Были сгенерированы три акселерограммы: опасная для сооружения и опасные для сооружения с ДГК (по частотам первой и второй формы колебаний), так как у этих двух систем различные резонансные частоты колебаний и, следовательно, различные опасные (резонансные) воздействия. Параметры генерируемых акселерограмм приведены в табл. 1. Для анализа работы ДГК выбрана реальная система мостовой опоры с пролетным строением в качестве гасителя, расчетная схема которой представлена на рис. 1. Опора задается пятью массами и пролет (ДГК) — одной массой, данная система имеет шесть форм колебаний. Результаты расчета данной системы на сгенерированные воздействия сведены в табл. 2.

¹ Рекомендации по заданию сейсмических воздействий для расчета зданий разной степени ответственности. СПб.; Петропавловск-Камчатский: КамЦентр, 1996. 12 с.

Рис. 1. Расчетная схема системы с ДГК

По данным табл. 2 видно, что расчет только на акселерограмму, опасную для сооружения без ДГК (рис. 2), завышает эффективность ДГК. Для расчета сооружения с ДГК следует использовать акселерограммы, сгенерированные опасными для сооружения с ДГК. Акселерограмма, сгенерированная по частоте первой формы колебаний (рис. 3), в результате дает наибольший момент по подошве, а по второй (рис. 4) — наибольшее усилие в пружине гасителя. Эффективность применения ДГК по уменьшению момента составила в рассмотренном примере 20 %. Параметры ДГК, настройка, относительная масса и затуха-

Рис. 2. Акселерограмма, опасная для сооружения без ДГК (a — ускорение сооружения)

Рис. 3. Акселерограмма, опасная для сооружения с ДГК по первой частоте

Рис. 4. Акселерограмма, опасная для сооружения с ДГК по второй частоте

Таблица 1

Исходные данные для генерации акселерограмм

Название задаваемой характеристики	Акселерограмма, опасная для сооружения без ДГК (рис. 2)	Акселерограмма, опасная для сооружения с ДГК, 1-я частота (рис. 3)	Акселерограмма, опасная для сооружения с ДГК, 2-я частота (рис. 4)
Ускорение сооружения, м/с^2	4,02	3,49	4,14
Преобладающий период, с	0,099	0,178	0,083

Таблица 2

Результаты расчета

Название сравниваемой характеристики	Сооружения без ДГК	Сооружения с ДГК		
	Акселерограмма, опасная для сооружения без ДГК	Акселерограмма, опасная для сооружения без ДГК	Акселерограмма, опасная для сооружения с ДГК, 1-я частота	Акселерограмма, опасная для сооружения с ДГК, 2-я частота
Ускорение сооружения, м/с ²	11,5	9	6,5	9
Ускорение ДГК, м/с ²	–	5,5	9	8
Смещение опоры, м	0,0029	0,0012	0,002	0,002
Смещение ДГК, м	–	0,0025	0,007	0,004
Момент по подошве фундамента, кН · м	320	180	260	259
Перерезывающие силы по подошве фундамента, кН	136	110	130	130
Перерезывающие силы по верху сооружения, кН	35	26	36	26
Усилие в пружине	–	84	94	104

ние в пружине подобраны при гармоническом воздействии и данные величины принимались для расчета по акселерограммам. По результатам расчета видно, что ДГК при такой настройке гасит колебания защищаемого сооружения, но эффект меньше, чем при гармоническом воздействии. Это связано с тем, что в акселерограмме присутствует несколько синусоид, и на каждую приходится часть энергии. Эффективность ДГК будет тем выше, чем больше энергии будет приходиться на опасную для системы синусоиду. На эффективность гасителя влияет количество значимых форм. ДГК гасит колебания только по одной форме. И на эффективность влияет характер акселерограммы. Для жестких сооружений, как в выбранном примере для расчета, опасными являются короткие высокочастотные воздействия с большой амплитудой, похожие на импульс. Для таких воздействий эффективность ДГК составляет примерно 15–30 %.

Заключение

При расчете систем с ДГК по акселерограммам проектных землетрясений необходимо учитывать следующие особенности:

1. При расчете сооружения с ДГК по синтетическим акселерограммам необходимо генерировать воздействие, опасное для сооруже-

ния без ДГК, опасное для сооружения с ДГК по 1-й частоте и опасное для сооружения с ДГК по 2-й частоте, так как более разрушительными могут оказаться последние воздействия.

2. Необходимо генерировать опасное воздействие для сооружения с ДГК по первой частоте и по второй, так как первая акселерограмма определяет наибольший момент по подошве фундамента, а вторая — наибольшее усилие в пружине гасителя.

3. Эффективность ДГК, оцененная на основе динамических расчетов по акселерограммам землетрясений, оказывается заметно ниже, чем в расчетах на гармонику. Это связано с тем, что акселерограммы имеют полигармонический состав. Только одна из гармоник является резонансной и снижается часть усилий, вызываемая именно этой гармоникой. Для жестких сооружений опасными являются короткие высокочастотные воздействия с большой амплитудой, похожие на импульс. Для таких воздействий эффективность ДГК ограничена величиной 15–30 %. Наиболее эффективным следует ожидать применение ДГК для гашения длиннопериодных воздействий. В этом случае показатель гармоничности относительно мал и воздействие похоже на гармонику.

Библиографический список

1. Watts P. On a method of reducing the rolling of ships at sea // *Transactions of the Institute of Naval Architects*. 1883. Vol. 24. Pp. 165–190.
2. Макаров С. О. Разбор элементов, составляющих боевую силу судов // *Морской сборник*. 1894. № 6. С. 33–106.
3. Frahm H. Neuartige Schlingertanks zur Abdämpfung von Schiffsrollbewegungen und ihre erfolgreiche Anwendung in der Praxis // *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft*. 1911. Bd. 12. Pp. 283–365.
4. Корнев Б. Г., Резников Л. М. Динамические гасители колебаний: Теория и технические приложения. М.: Наука, 1988. 304 с.
5. Корнев Б. Г., Поляков В. С. Оптимальные параметры динамического гасителя колебаний при воздействиях типа сейсмического // *Науч.-техн. реф. сб. ЦНИИС Госстроя СССР. Сер. 14: Сейсмостойкое строительство*. 1997. Вып. 3. С. 37–44.
6. Савинов О. А. О применении динамического гасителя колебаний // *Труды науч.-исслед. сектора Ленинградского отделения треста глубинных работ*. Л.: Стройиздат Наркомстроя, 1940. Вып. 1. С. 30–35.
7. Болотин В. В. Статистические методы в строительной механике. М.: Госстройиздат, 1961. 202 с.
8. Уздин А. М. Задание сейсмического воздействия. Взгляд инженера-строителя // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2005. № 1. С. 27–31.
9. Антикаев Ф. Ф., Эртелева О. О. Проектные и реальные спектры реакции: проблема точности задания сейсмических воздействий // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2005. № 1. С. 43–45.
10. Антикаев Ф. Ф. Прогноз параметров сейсмических колебаний, построение локального спектра и синтетической акселерограммы // *Сейсмостойкое строительство в эпоху могущества и счастья*. Ашхабад: Ылым, 2013. С. 285–304.
11. Вахрина Г. Н., Смирнов В. И. Развитие моделей расчетных акселерограмм сейсмических воздействий // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2013. № 1. С. 29–39.
12. Салганик М. П. О моделировании сейсмических воздействий на строительные сооружения // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 1967. Вып. 2. С. 157–173.
13. Ильясов Б. И., Аннаев Г., Жеутова Т. В., Сахаров О. А., Уздин А. М. Простая модель сейсмического воздействия для динамического расчета сооружений // *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*. 2014. № 1. С. 24–27.
14. Уздин А. М., Сандович Т. А., Аль-Насер-Мохомад Самих Амин. Основы теории сейсмостойкости и сейс-

мостойкого строительства зданий и сооружений. СПб.: Изд-во ВНИИГ, 1993. 175 с.

15. Корчинский И. Л. Расчет сооружений на сейсмические воздействия. М.: Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1954. 76 с.

16. Долгая А. А. Моделирование сейсмического воздействия коротким временным процессом // *Э.-И. ВНИИГПИ. Сер.: Сейсмостойкое строительство*. 1994. Вып. 5–6. С. 56–63.

17. Уздин А. М., Нестерова О. П., Прокопович С. В., Долгая А. А., Чанг Ю., Гуань Ю., Ван Х. Моделирование сейсмических воздействий для динамического расчета зданий и сооружений // *Российско-китайский научный журнал «Содружество»*. Ежемесячный научный журнал научно-практической конференции. 2017. № 20, ч. 1. С. 59–66.

18. Fardis M. N. Code developments in earthquake engineering // *12th European Conference on Earthquake Engineering*. London: Elsevier Science, 2002. Paper Reference 845.

19. Гольденблат И. И., Николаенко Н. А., Поляков С. В., Ульянов С. В. Модели сейсмостойкости сооружений / отв. ред. В. Я. Иванин. М.: Наука, 1979. 252 с.

20. Москвитин В. В. Циклические нагружения элементов конструкций. М.: Наука, 1981. 344 с.

References

1. Watts P. On a method of reducing the rolling of ships at sea. *Transactions of the Institute of Naval Architects*, 1883, vol. 24, pp. 165–190.
2. Makarov S. O. *Razborehlementov, sostavlyayushchikh boevuyu silu sudov* [Analysis of the elements that make up the fighting force of ships]. *Morskoy sbornik – Marine collection*, 1894, no. 6, pp. 33–106.
3. Frahm H. Neuartige Schlingertanks zur Abdämpfung von Schiffsrollbewegungen und ihre erfolgreiche Anwendung in der Praxis. *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft*, 1911, Bd. 12, pp. 283–365.
4. Korenev B. G., Reznikov L. M. *Dinamicheskie gasiteli kolebaniy: Teoriya i tekhnicheskie prilozheniya* [Dynamic vibration absorbers. Theory and technical applications]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 304 p.
5. Korenev B. G., Polyakov V. S. *Optimal'nye parametry dinamicheskogo gasitelya kolebaniy pri vozdeystviyakh tipa seysmicheskogo* [Optimal parameters of dynamic vibration dampener under the impact of seismic type]. *Nauch.-tekhn. ref. sb. TsNIIS Gosstroya SSSR. Ser. 14: Seysmostoykoe stroitel'stvo* [Sci.-tech. coll. of works Gosstroy of the USSR. Ser. 14. Earthquake resistant construction]. 1997, iss. 3, pp. 37–44.
6. Savinov O. A. *O primenenii dinamicheskogo gasitelya kolebaniy* [On the use of dynamic vibration damper].

Trudy nauch.-issled. sektora Leningradskogo otdeleniya tresta glubinnyykh rabot [Proc. of the sci.-research sector of the Leningrad branch of the deep works trust]. Leningrad, Stroyizdat Narkomstroya Publ., 1940, iss. 1, pp. 30–35.

7. Bolotin V. V. *Statisticheskie metody v stroitel'noy mekhanike* [Statistical methods in construction mechanics]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1961, 202 p.

8. Uzdin A. M. *Zadanie seysmicheskogo vozdeystviya. Vzgl'yad inzhenera-stroitel'ya* [Assignment of the seismic impact. View of the civil engineer]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy – Earthquake-resistant construction. Safety of structures*, 2005, no. 1, pp. 27–31.

9. Aptikaev F. F., Ehrteleva O. O. *Proektnye i real'nye spektry reaksii: problema tochnosti zadaniya seysmicheskikh vozdeystviy* [Design and real spectra of reactions: the problem of precision of the task of seismic effects]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy – Earthquake-resistant construction. Safety of structures*, 2005, no. 1, pp. 43–45.

10. Aptikaev F. F. *Prognoz parametrov seysmicheskikh kolebaniy, postroyeniye lokal'nogo spektra i sinteticheskoy akselerogrammy* [Forecast of parameters of seismic oscillations, construction of local spectrum and synthetic accelerogram]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo v ehpokhu mogushchestva i schast'ya* [Earthquake-resistant construction in the era of power and happiness]. Ashkhabad, Ylym Publ., 2013, pp. 285–304.

11. Vakhrina G. N., Smirnov V. I. *Razvitie modeley raschetnykh akselerogramm seysmicheskikh vozdeystviy* [Development of models of calculated accelerograms of seismic effects]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy – Earthquake-resistant construction. Safety of structures*, 2013, no. 1, pp. 29–39.

12. Salganik M. P. *O modelirovani seysmicheskikh vozdeystviy na stroitel'nye sooruzheniya* [On modeling of seismic inputs on building structures]. *Voprosy inzhenernoy seysmologii – Issues of engineering seismology*, 1967, iss. 2, pp. 157–173.

13. Il'yasov B. I., et al. *Prostaya model' seysmicheskogo vozdeystviya dlya dinamicheskogo rascheta sooruzheniy*

[Simple model of seismic impact for dynamic calculation of structures]. *Prirodnye i tekhnogennye riski. Bezopasnost' sooruzheniy – Natural and man-made risks. Safety of structures*, 2014, no. 1, pp. 24–27.

14. Uzdin A. M., Sandovich T. A., Al'-Naser-Mokhomad Samikh Amin. *Osnovy teorii seysmostoykosti i seysmostoykogo stroitel'stva zdaniy i sooruzheniy* [Fundamentals of the theory of seismic resistance and earthquake-resistant construction of buildings and structures]. St. Petersburg, VNIIG Publ., 1993, 175 p.

15. Korchinskiy I. L. *Raschet sooruzheniy na seysmicheskie vozdeystviya* [Calculation of structures for seismic inputs]. Moscow, Gos. izd-vo lit. po stroitel'stvu i arkhitekture Publ., 1954, 76 p.

16. Dolgaya A. A. *Modelirovaniye seysmicheskogo vozdeystviya korotkim vremennym protsessom* [Modeling of seismic impact of the short temporal process]. *VNIINTPI. Ser. Seysmostoykoe stroitel'stvo – VNIINTPI. Ser. Earthquake engineering*, 1994, iss. 5–6, pp. 56–63.

17. Uzdin A. M., et al. *Modelirovaniye seysmicheskikh vozdeystviy dlya dinamicheskogo rascheta zdaniy i sooruzheniy* [Simulation of seismic loads for dynamic analysis of buildings and structures]. *Rossiysko-kitayskiy nauchnyy zhurnal «Sodruzhestvo». Ezhemesyachnyy nauchnyy zhurnal nauchno-prakticheskoy konferentsii – Russian-Chinese scientific journal “Commonwealth”. Monthly scientific journal of scientific-practical conference*, 2017, no. 20, pt. 1, pp. 59–66.

18. Fardis M. N. *Code developments in earthquake engineering. Proc. of the 12th European Conference on Earthquake Engineering*. London: Elsevier Science, 2002, paper reference 845.

19. Gol'denblat I. I., Nikolaenko N. A., Polyakov S. V., Ul'yanov S. V. *Modeli seysmostoykosti sooruzheniy* [Models of earthquake resistance of structures]. Ed. Ivanin V. Ya. Moscow, Nauka Publ., 1979, 252 p.

20. Moskvitin V. V. *Tsiklicheskie nagruzheniya ehlementov konstruktsey* [Cyclic loading of structural elements]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 344 p.