УДК 624.058

© С. Н. Савин, д-р техн. наук, профессор
© Е. Э. Смирнова, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: esmirnovae@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-3-14-19

© S. N. Savin, Dr. Sci. Tech., Professor
© E. E. Smirnova, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: esmirnovae@yandex.ru

ПРОБЛЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА РЕСУРСА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ЧС

THE PROBLEM OF DETERMINING THE DYNAMIC PARAMETERS FOR FORECASTING THE SERVICE LIFE OF BUILDINGS AND FACILITIES UNDER CONDITIONS OF NATURAL AND MAN-MADE EMERGENCIES

Рассматривается решение задачи прогноза последствий разрушительных землетрясений для эксплуатируемых зданий и сооружений. Предлагается использовать в качестве основных параметров для верификации расчетных моделей собственные частоты, формы колебаний и декременты объектов, подвергшихся действию сейсмических нагрузок. Приведен пример оценки последствий аварии для здания в Санкт-Петербурге, частично обрушившегося в результате неравномерной осадки грунтов основания. Сделан вывод о том, что использование динамических параметров позволяет решать самые различные задачи как в области превентивной диагностики технического состояния зданий и сооружений, так и для текущего прогноза остаточного ресурса поврежденных объектов.

Ключевые слова: динамические параметры строительных конструкций зданий и сооружений, верификация расчетных моделей, формы и декременты колебаний.

The article discusses the solution to the task of forecasting the consequences of catastrophic earthquakes for operated buildings and facilities. We suggest using such basic parameters for verifying the calculation models as natural frequencies, oscillation forms and decrements of objects under earthquake loads. An example of the accident consequences assessment of the building in St. Petersburg, which was partially collapsed as a result of uneven subsidence of the soil base, is given. It is substantiated that the use of dynamic parameters allows solving a variety of problems both in the field of preventive diagnostics of the technical condition of buildings and structures, and for the current forecast of the residual life of damaged objects.

Keywords: dynamic parameters of building structures, verification of design models, the shape and logarithmic decrement of vibrations.

В современном мире в значительной степени возросли риски природных стихийных бедствий и катастроф. На этом фоне повышение сейсмической активности кажется не слишком очевидным, поскольку не связано с глобальным потеплением и его последствиями. Однако факты свидетельствуют об обратном. По данным EMSC (European Mediterranean Seismological Centre) ко-

личество землетрясений с магнитудой больше 7,5 увеличилось за последние 50 лет почти в два с половиной раза. Все это изменяет подход к защите населения от ЧС природного и техногенного характера, а именно придает первостепенное значение развитию методов прогноза и превентивных мер борьбы за безопасность.

Таким образом, стоит задача превентивного прогноза последствий землетрясения. Прогноз самого события практически невозможен. Поэтому прогнозируем возможные последствия, в данном контексте — это реакция зданий на сейсмическую нагрузку. С одной стороны, можно отметить существенное развитие методов расчета, в той или иной степени конкретизирующих возможную сейсмическую нагрузку, например использование синтетических акселерограмм. С другой стороны, есть возможность с высокой степенью точности моделировать поведение самого здания. Однако учесть все нюансы его технического состояния (без проведения детального обследования) практически невозможно, ибо имеют место скрытые дефекты и повреждения, отступления от проектных характеристик и т. п., которые не проявляются при эксплуатационных нагрузках, но могут стать причиной разрушения при сейсмических. Поэтому задача экспресс-оценки технического состояния здания, эксплуатируемого в течение какого-то периода времени, безусловно, должна быть решена для ответа на вопрос о последствиях ЧС.

Анализ методов диагностики показал, что наиболее надежными критериями технического состояния объекта являются его динамические параметры — частота колебаний, форма колебаний и декремент колебаний как свойства любой упругой системы. Естественно, что реально раскачать здание до заметных амплитуд непросто, да и опасно. Поэтому в настоящее время используются его микроколебания (от ветра, транспорта и т. п.), которые удалось уверенно измерять вместе с появлением высокочувствительных датчиков и программ обработки записей колебаний. При этом совершенно независимо выяснилось, что для математических моделей зданий также предусмотрена возможность определения параметров их собственных колебаний автоматически, в виде определенной процедуры — модального анализа. Все это позволило решить поставленную задачу и создать модель здания, которая имеет совпадающие с существующим объектом динамические параметры. Исходные данные для такой модели, как правило, дают измерения параметров колебаний здания, которые гораздо менее трудоемки, чем детальное обследование, и могут быть заранее определены

и использованы для прогноза. Для снижения риска материальных и человеческих потерь в условиях дефицита данных о самом явлении (землетрясениях) именно этот подход к оценке надежности, устойчивости и эксплуатационного ресурса зданий и сооружений является наиболее перспективным.

В настоящее время наиболее часто применяемый метод определения динамических параметров здания носит название «Метод свободных колебаний» (МСК) [1–5, 8–9]. В рамках МСК реализуются следующие операции:

- регистрация откликов колебаний на внешнее воздействие;
- разложение откликов на отдельные мономодальные колебания путем преобразования Фурье;
- построение спектра откликов колебаний;
- построение форм колебаний по каждой из выделенных резонансных частот;
- графическое представление форм колебаний.

Практика использования МСК позволила разработать универсальный механизм для уточнения динамических параметров расчетных моделей зданий, созданных в различных пакетах программных продуктов (Scad, Abacus, Ansys, Lira).

В настоящее время разработаны два методических подхода к проведению измерений. С одной стороны, при испытаниях массивных и высотных объектов используется так называемый пассивный метод регистрации колебаний. С другой стороны, в большинстве случаев применяется активный метод регистрации колебаний. Процедура при пассивном методе регистрации ведется запись откликов объекта на внешние микросейсмические воздействия. Естественно, что при этом регистрируются вынужденные колебания. Для построения форм рассчитываются так называемые кросс-спектры. При активном же методе регистрации колебания возбуждаются ударом по конструкции (зачастую многократным), а для построения форм рассчитываются спектры Фурье.

Очевидно, что возбуждение колебаний ударом должно производиться с учетом выбора точки удара (как правило, это узел жесткости на верхних этажах здания), длительности воздействия (не короче периода собственных колебаний по выделяемой форме) и массы «ударника»

(способной вызвать отклик конструкции, годный для регистрации измерительными датчиками).

Современные возможности измерительных комплексов [6, 7] позволяют использовать ударники массой от 30 кг в виде емкостей, заполненных сыпучим материалом. Возбуждение колебаний осуществляется, как правило, вручную, последовательными ударами, выполняемыми по команде оператора.

Поскольку предполагается, что колебания объекта упругие (пренебрегаем демпфированием), для увеличения динамического диапазона регистрирующей аппаратуры можно использовать принцип суперпозиции, складывая и вычитая колебания, возбужденные ударом в различных точках конструкции. Таким образом можно имитировать одновременное точечное воздействие, добиваясь уверенного выделения требуемых форм колебаний путем использования стандартных методов обработки сигнала. Такой подход наиболее эффективен при оценке динамических параметров конструкций больших пролетов и оболочек покрытия.

Очевидно, что при сильном демпфировании использовать микроколебания для оценки динамических параметров не представляется возможным. В этом случае не удастся разделить колебания и построить их формы. На практике обычно возможность или невозможность использования микроколебаний для определения динамических параметров объекта определяется при полной обработке откликов и построении спектров колебаний. Малая амплитуда спектральных пиков и их растянутость по частотной оси свидетельствуют о невозможности получения надежного результата. При этом, однако, можно однозначно утверждать, что исследуемая конструкция не является упругой.

Рассмотрим на примере пятиэтажного панельного жилого здания возможности использования микроколебаний для оценки его фактических динамических параметров с целью построения расчетной модели, использование которой позволит делать надежный прогноз последствий воздействия на объект любой статической и динамической нагрузки. Фасад здания представлен на рис. 1.

Определение динамических параметров для объекта проводилось с использованием стандартного измерительного комплекса, включаю-

щего высокочувствительные акселерометры, цифровой преобразователь, персональный компьютер, программу ввода и обработки и средство возбуждения колебаний в виде мешка с песком (рис. 2).

Измерительная схема представляла собой датчики, установленные в вертикальном створе на различных этажах здания (от подвала до кровли) и соединенные со станцией регистрации. Колебания возбуждались в верхней и средней части здания путем нанесения многократных ударов с задержкой на время затухания собственных колебаний здания.

Результаты испытаний представлены графически в виде форм колебаний здания в продольном и поперечном направлениях (рис. 3, 4). На рисунках по вертикальной оси отложена высота здания в метрах, а по горизонтальной — относительное перемещение, зафиксированное датчиками (точки на схеме), установленными по высоте здания, при колебаниях по различным формам:

Рис. 1. Главный фасад обследуемого здания

Рис. 2. Возбуждение микроколебаний на кровле здания путем воздействия ударом на несущие конструкции

- изгибные по высоте, поперечное направление (первый тон) — 1,25 Гц;
- изгибные по высоте, поперечное направление (второй тон) — 5,96 Гц;
- изгибные по высоте, поперечное направление (третий тон) — 14,89 Гц;
- изгибные по высоте, продольное направление (первый тон) — 1,92 Гц;
- изгибные по высоте, продольное направление (второй тон) — 6,98 Гц;
- изгибные по высоте, продольное направление (третий тон) — 18,99 Гц;

- изгибные по фронту (первый тон) — 1,94 Гц;
- изгибные по фронту (второй тон) — 7,812 Гц.

Для удобства максимальному перемещению датчика при колебаниях по каждой из форм присвоено значение, равное единице. Показания остальных датчиков представлены в долях от максимального перемещения.

Очевидно, что вторая и третья формы колебаний построены с использованием возможностей принципа суперпозиции колебаний и являются достаточно редким результатом для жилого зда-

Рис. 3. Формы колебаний. Вертикальный створ, поперечное направление

Рис. 4. Формы колебаний. Вертикальный створ, продольное направление

Рис. 5. Фрагмент конечно-элементной модели здания, выполненной в программном комплексе Ansys

ния (зафиксировать высшие формы колебания чрезвычайно сложно ввиду их маленькой амплитуды). При этом полученные формы позволяют уточнить характер деформации здания и рассматривать ее без учета влияния условий «защемления» в грунте, которые во многом определяют частоту колебаний по первой форме.

Полученные динамические параметры были использованы для создания расчетной модели здания в программном комплексе Ansys. Общий вид расчетной модели здания показан на рис. 5.

В дальнейшем процедура корректировки параметров расчетной модели проводилась следующим образом. На первом этапе был выполнен модальный анализ и определены низшие частоты и соответствующие им формы собственных

колебаний. Эти значения подвергались анализу и сравнивались с аналогичными данными, полученными при испытаниях. Учитывая, что геометрические размеры, масса и конструктивные особенности здания в модели выполнены без искажений, изменениям подвергались параметры, отвечающие за обобщенную жесткость материала конструкций. В результате последовательных корректировок значений обобщенной жесткости удалось добиться удовлетворительного совпадения расчетных собственных частот колебаний и их значений, полученных по данным натурных испытаний. Итоговые результаты адаптации модели (достижения совпадения динамических параметров с фактически измеренными) приведены в таблице.

Как свидетельствуют данные таблицы, фактически измеренные значения собственных частот колебаний, зафиксированные при динамических испытаниях, хорошо согласуются между собой. Это позволяет утверждать, что удалось создать адекватную расчетную модель, которую можно использовать для надежного прогноза результата аварийных воздействий, в том числе и сейсмических.

Библиографический список

1. Ларионов В. И., Нигметов Г. М., Сотин В. Н., Суцев С. П., Шахраманьян М. А. Мобильные диагностические комплексы для оценки сейсмостойкости зданий и сооружений // Сейсмостойкое строительство. 1999. № 2. С. 41–44.
2. Савин С. Н., Демишин С. В., Ситников И. В. Мониторинг уникальных объектов с использованием

Сравнительные данные о частотах колебаний обследуемого здания

Форма колебаний по расчетной модели	Частота колебаний, зафиксированная при проведении испытаний, Гц	Частота колебаний по расчетной модели, адаптированной по динамическим характеристикам, Гц	Несовпадение измеренной частоты колебаний по отношению к расчетной, %
1	1,25	1,291	3,1
2	1,92	1,944	1,2
3	1,94	2,045	5,1
4	5,96	5,604	5,9
5	6,98	6,832	2,1
6	7,812	7,456	4,5
7	–	11,716	–
8	–	12,587	–
9	14,89	–	–
10	18,99	–	–

динамических параметров по ГОСТ Р 53778–2010 // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 7. С. 33–39.

3. Шахраманьян А. М., Колотовичев Ю. А. Опыт использования автоматизированных систем мониторинга деформационного состояния несущих конструкций на Олимпийских объектах Сочи-2014 // Вестник МГСУ. 2015. № 12. С. 92–105.

4. Патрикеев А. В. Система динамического мониторинга инженерного сооружения как ключевой элемент его технической безопасности // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 133–140.

5. Савин С. Н. Использование упругих колебаний различных длин волн для оценки динамических параметров зданий и сооружений и прочности каменной кладки // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 4. С. 43–54.

6. Савин С. Н., Данилов И. Л. Сейсмобезопасность зданий и территорий. СПб.: Лань, 2015. 240 с. ISBN: 9785811418800.

7. Суцев С. Л., Ларионов В. А., Галиуллин Р. Р., Нугметов Г. М., Савин С. Н., Самарин В. В. О практическом применении метода динамических испытаний для оценки категории технического состояния и сейсмостойкости зданий и сооружений при слабых и сильных импульсных воздействиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2014. № 3. С. 5–59.

8. Savin S., Tsakalidis V. The use of elastic oscillations of different wavelengths to evaluate the dynamic parameters of buildings and structures and assess the strength of materials of the building construction // COMPDYN 2015. 5th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. 25–27 May 2015. Crete Island, Greece / M. Papadrakakis, V. Papadopoulos, V. Plevris (eds.). Hersonissos, Crete: National Technical University of Athens, 2015. Pp. 706–720.

9. Savin S., Smirnova E. Evaluation of mechanical safety of building structures using elastic vibrations varying in wavelength // World Applied Sciences Journal. 2013. Vol. 23(11). Pp. 1448–1454. 10.5829/idosi.wasj.2013.23.11.13161.

References

1. Larionov V. I., et al. *Mobil'nye diagnosticheskie komplekсы dlya otsenki seysmostoykosti zdaniy i sooruzheniy* [Mobile diagnostic systems for assessing the seismic resistance of buildings and structures]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo – Earthquake resistant engineering*, 1999, no. 2, pp. 41–44.

2. Savin S. N., Demishin S. V., Sitnikov I. V. *Monitoring unikal'nykh ob'ektov s ispol'zovaniem dinamicheskikh parametrov po GOST R 53778–2010* [Monitoring of unique objects using dynamic parameters according to

GOST R 53778–2010]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Engineering and construction journal*, 2011, no. 7, pp. 33–39.

3. Shakhraman'yan A. M., Kolotovichev Yu. A. *Opyt ispol'zovaniya avtomatizirovannykh sistem monitoringa deformatsionnogo sostoyaniya nesushchikh konstruktсий na Olimpiyskikh ob'ektakh Sochi–2014* [Experience in the use of automated systems of monitoring the stress-strain state of load-bearing structures at the Olympic objects of Sochi–2014]. *Vestnik MGSU*, 2015, no. 12, pp. 92–105.

4. Patrikeev A. V. *Sistema dinamicheskogo monitoringa inzhenernogo sooruzheniya kak klyuchevoy ehlement ego tekhnicheskoy bezopasnosti* [The system of dynamic monitoring of engineering structures as a key element of their technical safety]. *Vestnik MGSU*, 2014, no. 3, pp. 133–140.

5. Savin S. N. *Ispol'zovanie uprugikh kolebaniy razlichnykh dlin voln dlya otsenki dinamicheskikh parametrov zdaniy i sooruzheniy i prochnosti kamennoy kladki* [The use of elastic vibrations of different wavelengths to assess the dynamic parameters of buildings and structures and the strength of masonry]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy – Earthquake resistant construction. Safety of structures*, 2017, no. 4, pp. 43–54.

6. Savin S. N., Danilov I. L. *Seysmobezopasnost' zdaniy i territoriy* [Seismic safety of buildings and territories]. St. Petersburg, Lan Publ., 2015, 240 p. ISBN: 9785811418800.

7. Sushchev S. L., et al. *O prakticheskom primenenii metoda dinamicheskikh ispytaniy dlya otsenki kategorii tekhnicheskogo sostoyaniya i seysmostoykosti zdaniy i sooruzheniy pri slabykh i sil'nykh impul'snykh vozdeystviyakh* [On practical application of the dynamic test method for assessing the category of technical condition and seismic resistance of buildings and structures under weak and strong impulse influences]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy – Earthquake resistant construction. Safety of structures*, 2014, no. 3, pp. 5–59.

8. Savin S., Tsakalidis V. The use of elastic oscillations of different wavelengths to evaluate the dynamic parameters of buildings and structures and assess the strength of materials of the building construction. *COMPDYN 2015, 5th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, 25–27 May 2015, Crete Island, Greece. Papadrakakis M., Papadopoulos V., Plevris V. (eds.). Hersonissos, Crete, National Technical University of Athens Publ., 2015, pp. 706–720.

9. Savin S., Smirnova E. Evaluation of mechanical safety of building structures using elastic vibrations varying in wavelength. *World Applied Sciences Journal*, 2013, vol. 23(11), pp. 1448–1454. 10.5829/idosi.wasj.2013.23.11.13161.