УДК 624.058

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-2-24-28

© С. Н. Савин, д-р техн. наук, профессор

© S. N. Savin, Dr. Sci. Tech., Professor

© Е. Э. Смирнова, канд. техн. наук, доцент

© E. E. Smirnova, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© В. М. Попов, канд. техн. наук, доцент

© V. M. Popov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

(Санкт-Петербургский государственный

(Saint Petersburg State University of Architecture

архитектурно-строительный университет)

and Civil Engineering)

E-mail: esmirnovae@yandex.ru

E-mail: esmirnovae@yandex.ru

АНАЛИЗ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ЗДАНИЙ, ПОВРЕЖДЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

ANALYSIS OF THE FINITE ELEMENT MODEL OF BUILDINGS DAMAGED AS A RESULT OF EMERGENCY SITUATIONS

Обосновывается возможность использования микроколебаний для верификации расчетных моделей, хотя здания и сооружения сами по себе являются демпфированными системами. Полученные результаты проанализированы и сопоставлены с данными модального анализа конечно-элементной модели здания, выполненной в программном комплексе Ansys. После уточнения прочностных характеристик элементов модели получено удовлетворительное соответствие измеренных и теоретических значений динамических параметров. Это свидетельствует об адекватности расчетной модели и возможности ее использования для надежного прогноза последствий воздействия на здание аварийных (в том числе сейсмических) нагрузок.

Ключевые слова: динамические параметры строительных конструкций зданий и сооружений, конечно-элементные модели, микроколебания, оценка остаточного ресурса, чрезвычайная ситуация.

The article presents a substantiation of the possibility of using micro-oscillations for verification of design models, although buildings and facilities themselves are damped systems. The obtained results were analyzed and compared with the data from the modal analysis of the finite-element model of the building compiled with the use of the ANSYS software complex. After elaborating the strength characteristics of the model elements, there was obtained a satisfactory matching of the measured and theoretical values of the dynamic parameters. This indicates the adequacy of the design model and confirms a possibility of using it for reliable forecasting of the consequences resulting from the action of emergency loads (including seismic ones) on the building.

Keywords: dynamic parameters of buildings' and structures' designs, finite-element models, micro-oscillation, assessment of residual operation life, emergency situations.

Специалистам экстренных служб часто приходится прогнозировать ресурс частично поврежденных или разрушенных зданий для принятия решений о возможности восстановления или усиления поврежденных конструкций [1–4]. Примером таких исследований может служить частично разрушенное здание в Санкт-Петербурге. Авария на Двинской улице в Санкт-Петербурге произошла 4 июля 2002 года, когда

внезапно обрушилась южная 17-метровая часть девятиэтажного дома № 8, корп. 3. При этом погибло четыре человека. На рис. 1 запечатлен момент обрушения части здания, а на рис. 2 — здание после расселения.

Сразу после аварии были проведены исследования по оценке динамических параметров оставшихся блоков здания. В результате испыта-

Рис. 1. Обрушение здания на Двинской ул. в Санкт-Петербурге в 2002 году

ний выделены собственные колебания здания на следующих частотах:

1,8 Гц — изгибные колебания в поперечном направлении (вертикальный створ);

2,18 Гц — качание на фундаменте в поперечном направлении;

2,25 Гц — изгибные колебания в продольном направлении (вертикальный створ);

5,4 Гц — изгибные колебания, вторая форма, поперечное направление (горизонтальный створ).

Анализ полученных динамических параметров показал, что здание имело стандартную для данного типа объектов частоту собственных

Рис. 2. Расселенное здание на Двинской ул. в Санкт-Петербурге в 2009 году

колебаний по первому тону [5], свидетельствующую о достаточной пространственной жесткости всей конструкции. Относительные перемещения фундамента при колебаниях составляют более 10 %, т. е. фундамент имеет высокую подвижность.

В качестве главной особенности следует отметить малую жесткость связей между секциями на частотах от 6 Гц (обычно для зданий с деформационными швами эта частота составляет 15 Гц и выше) и большой (до 55 %) вклад в изгибную форму колебаний качаний здания на фундаменте (обычно это значение не превышает 15 %).

Следует отметить, что полученное при испытаниях значение периода собственных колебаний по той или иной форме может быть использовано непосредственно для оценки ресурса несущей способности здания без построения его теоретической модели [6]. В этом случае автоматически отпадает проблема адаптации расчетной модели, а требуется лишь точное знание, какой форме колебаний соответствует зафиксированная частота [7–8].

Следует отметить, что получаемые динамические параметры соответствуют неким «интегральным значениям» условной жесткости [1] материала расчетной модели, а следовательно, нельзя исключать факта существенных локальных повреждений, которые могут быть критичными при относительно небольшом изменении частоты собственных колебаний. Если принимать коэффициент запаса прочности материала ≤ 2 , то можно утверждать, что снижение частоты собственных колебаний по первому тону не должно превышать 20 % от ее нормативного значения [9]. Кроме того, не следует забывать, что определяющее влияние на значение собственной частоты колебаний по первому тону оказывает степень податливости грунтов основания. На основании большого количества исследований нами была принята предельная величина относительной податливости в уровне фундамента, равная 10 %. Мы полагаем, что до этого уровня податливости нет смысла учитывать ее влияние на значение первой частоты колебаний. При более высоком значении перемещения в уровне фундамента при колебаниях по первой форме имеет смысл анализировать вторую и третью формы колебаний.

Опыт авторов [6] показывает, что «предельным» с точки зрения прочности материала является рубеж снижения частоты колебаний по первому тону, равный 10 %. При этом дополнительной характеристикой неоднородности прочности конструкции вдоль измерительного створа служит такой параметр, как «отношение частот колебаний низших форм», нормативные значения которого можно либо получить теоретически — расчетом, либо использовать имеющиеся у авторов базы данных [10–11].

Как объяснялось ранее [12], в каждом конкретном случае при оценке остаточного ресурса зданий и сооружений различных конструктивных схем имеют место различные факторы, влияющие на их динамические характеристики. Очевидно, что при отсутствии явных повреждений бетона в панелях обследованных зданий, снижение частоты свидетельствует об ослаблении общей жесткости конструкции, которая определяется жесткостью связей сварных соединений. При этом наряду со снижением частоты должны также регистрироваться высокие затухание колебаний и плохое разделение частот в их спектре [12].

Таким образом, возможность использования микроколебаний для верификации расчетных моделей приводит нас к ряду важных выводов. Использование динамических параметров в расчетах позволяет не только выбрать наиболее приемлемую для каждого случая модель сооружения, но и уточнять ее параметры, добиваясь адекватности по прочности несущих конструкций. Полученные в результате использования предложенного метода испытаний частоты и формы собственных колебаний по своей полноте и составу позволяют провести оценку безопасности (в смысле запаса по несущей способности и устойчивости) здания без построения его теоретической модели [5].

Основным теоретическим положением, которое позволяет надежно оценивать динамические параметры метода свободных колебаний (МСК), является предположение о линейности рассматриваемых систем. В этом случае используемый способ решения систем дифференциальных уравнений движения — это способ разложения по собственным формам, с помощью которого вместо связной системы дифференци-

альных уравнений мы получаем n независимых уравнений, в которых с помощью постоянных коэффициентов определяется вклад каждой j -й собственной формы в общий отклик системы на внешнее воздействие. При известных частоте и форме колебаний однозначно определяются свойства всех элементов системы. Линейность же рассматриваемых систем позволяет использовать при измерениях принцип частотной суперпозиции, который в значительной степени влияет на динамический диапазон аппаратуры и позволяет искусственно «усиливать» колебания исследуемых форм для массивных и высотных объектов [13–14].

Результаты исследований позволяют утверждать, что использование МСК как для превентивной диагностики технического состояния зданий и сооружений, так и для текущего прогноза остаточного ресурса поврежденных объектов вполне обоснованно и дает надежные результаты.

Библиографический список

1. Ларионов В. И., Нигметов Г. М., Сотин В. Н., Суцев С. П., Шахрамьян 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 динамических параметров по ГОСТ Р 53778–2010 // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 7. С. 33–39.
3. Шахрамьян М. А., Нигметов Г. М., Гайфуллин З. Г., Бабусенко М. С. Методика оценки и сертификации инженерной безопасности зданий и сооружений. М.: Госстрой России, 2003. 85 с.
4. ВСП 22-01-95. Правила паспортизации и оценки фактической сейсмостойкости воинских зданий и сооружений / под общ. ред. С. Н. Савина. М.: Министерство обороны России, 1996. 43 с.
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. Сейсmobезопасность зданий и территорий. СПб.: Лань, 2015. 240 с.
7. Шахрамьян 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.

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

9. Суцев С. Л., Ларионов В. А., Галиуллин Р. Р., Нигметов 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.

10. 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 Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 5. 25–27 May 2015, Crete Island, Greece. M. Papadrakakis, V. Papadopoulos, V. Plevris (eds.). Hersionissos, Crete: National Technical University of Athens, 2015. Pp. 706–720.

11. Мкртычев О. В., Джинчелашвили Г. А. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения). 2-е изд. М.: МГСУ, 2014. 192 с.

12. Савин С. Н. Охрана труда и техника безопасности при проведении стендовых испытаний строительных конструкций // Экономика и экологический менеджмент. 2013. № 3. С. 17.

13. Белостоцкий А. М., Каличава Д. К., Нагибович А. И., Петряшев Н. О., Петряшев С. О. Адаптируемые конечноэлементные модели в основе динамического мониторинга несущих конструкций высотных зданий. Ч. 2. Верификация методики на стендовых моделях // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2012. Vol. 8. № 4. Pp. 28–42.

14. 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 evaluation of seismic resistance of buildings and structures]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo – Earthquake-resistant construction*, 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 – Civil Engineering Journal*, 2011, no. 7, pp. 33–39.

3. Shakhraman'yan M. A., Nigmatov G. M., Gayfullin Z. G., Babusenko M. S. *Metodika otsenki i sertifikatsii inzhenernoy bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy* [Method of assessment and certification of engineering safety of buildings and structures]. Moscow, Gosstroy Rossii Publ., 2003, 85 p.

4. VSP 22-01–95. *Pravila pasportizatsii i otsenki fakticheskoy seysmostoykosti voinskikh zdaniy i sooruzheniy* [VSP 22-01-95. The rules of certification and evaluation of actual seismic stability of military buildings and structures]. Ed. by Savin S. N. Moscow, Ministerstvo oborony Rossii Publ., 1996, 43 p.

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 for assessing the dynamic parameters of buildings and structures and the strength of masonry]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo – Earthquake-resistant construction*, 2017, no. 4, pp. 43–54.

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

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

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

9. Sushchev S. L., et al. *O prakticheskom primenении metoda dinamicheskikh ispytaniy dlya otsenki kategorii tekhnicheskogo sostoyaniya i seysmostoykosti zdaniy i sooruzheniy pri slabyykh i sil'nykh impul'snykh vozdeystviyakh* [About the practical application of the method of dynamic testing for evaluating the technical condition category and seismic stability of buildings and structures under weak and strong pulse effects]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo – Earthquake-resistant construction*, 2014, no.3, pp. 5–59.

10. 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. Proc. of the 5-th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 25–27 May 2015, Crete Island, Greece. Hersonissos, Crete: National Technical University of Athens Publ., 2015, pp. 706–720.

11. Mkrtichev O. V., Dzhinchvelashvili G. A. *Problemy ucheta nelineynostey v teorii seysmostoykosti (gipotezy i zabluzhdeniya)* [Problems of accounting for nonlinearities in the theory of seismic stability (hypotheses and misconceptions)]. 2-nd ed. Moscow, MGSU Publ., 2014, 192 p.

12. Savin S. N. *Okhrana truda i tekhnika bezopasnosti pri provedenii stendovykh ispytaniy stroitel'nykh konstruktsiy* [Safety and health protection when carrying out bench testing of construction designs]. *Ehkonomika*

i ehkologicheskiy menedzhment – Economy and ecology management, 2013, no. 3, p. 17.

13. Belostotskiy A. M., et al. *Adaptiruemye konechnoelementnye modeli v osnove dinamicheskogo monitoringa nesushchikh konstruktsiy vysotnykh zdaniy. Ch. 2. Verifikatsiya metodiki na stendovykh modelyakh* [Adapted finite element models based on dynamic monitoring of high-rise buildings' load-bearing structures. Pt. 2. Verification of the method on bench models]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2012, vol. 8, no. 4, pp. 28–42.

14. 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.