

УДК 624.04

DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-369-378

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Сравнение результатов расчета сооружений на заданные акселерограммы нелинейным статическим и нелинейным динамическим методами

С.В. Булушев

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
Ярославское шоссе, 26, Москва, Российская Федерация, 129337

(поступила в редакцию: 21 августа 2018 г.; доработана: 17.09.2018 г.; принята к публикации: 28 сентября 2018 г.)

Актуальность. Современные нормы проектирования зданий и сооружений с учетом сейсмических воздействий предполагают расчет конструкций в нелинейной постановке. Одною линейно-спектрального метода, который применялся и применяется до сих пор, для расчета уже недостаточно. Это связано с тем, что он не позволяет напрямую учесть нелинейную работу конструкций. Для решения поставленной задачи могут быть использованы нелинейные динамические методы расчета во временной области. На данный момент такие методы реализованы лишь в специализированных программных комплексах и в большинстве случаев не могут быть использованы обычными проектировщиками. Таким образом, появилась необходимость в применении более простых методов нелинейного расчета. В зарубежных нормах для расчета сейсмостойкости зданий и сооружений уже давно применяются нелинейные статические методы, или «пушвер анализ» (pushover analysis). Но в отечественной практике проектирования до недавнего времени этим методам не уделялось должного внимания. Тем самым актуальность исследования возможности применения этих методов в инженерной практике не вызывает сомнения.

Цель. Целью данной статьи является оценка точности нелинейного статического метода по сравнению с нелинейным динамическим методом при расчете сооружений на заданные акселерограммы.

Методы. В статье рассмотрены три стальные рамы: одно-, трех- и семизэтажная. Подбор сечений выполнен в соответствии с требованиями норм по сейсмостойкому строительству на сейсмические нагрузки уровня ПЗ. Также рамы рассчитаны на сейсмическое воздействие уровня МРЗ на набор акселерограмм различного частотного состава. Расчет производился нелинейным динамическим методом в программном комплексе LS-DYNA и нелинейным статическим методом в программных комплексах «ЛИРА 10.6» и MATLAB.

Выводы. Расчеты показали, что во всех рассмотренных случаях, кроме одного, нелинейный статический метод показал консервативную оценку реакции системы по сравнению с нелинейным динамическим методом. Но в некоторых случаях получилась слишком большая погрешность.

Ключевые слова: сейсмостойкость, нелинейный метод расчета, нелинейный статический метод расчета, нелинейный динамический метод расчета, пушвер анализ, акселерограмма

Введение

В современных российских нормах по сейсмостойкому строительству¹ при проектировании зданий и сооружений необходимо выполнять расчет на два уровня сейсмических нагрузок: уровень ПЗ (проектное землетрясение) и уровень МРЗ (максимальное расчетное землетрясение). С расчетом на ПЗ все достаточно понятно и просто. В этом случае используется линейно-спектральный метод (ЛСМ), который является нормативным и применяется в

СП 14.13330.2014¹. Однако при расчете на МРЗ для более адекватной оценки требуется напрямую учитывать нелинейную работу конструкций. Наиболее точно это можно сделать с помощью нелинейных динамических методов (НДМ). В этом случае проектировщику, как правило, приходится обращаться в специализированные организации для расчета зданий и сооружений на МРЗ. Это связано с тем, что нелинейные динамические методы расчета во временной области реализованы лишь в сложных программных комплексах. В то же время нелинейные статические методы (НСМ), которые достаточно давно разработаны и применяются за рубежом [1–7], а также включены в иностранные нормы проекти-

¹ СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. М., 2014.

рования², не получили должного развития. Лишь в последнее время нелинейные статические методы стали активно исследоваться [8–20].

Цель исследования

Ранее в работе [7] была предложена методика нелинейного статического анализа зданий и сооружений на сейсмические воздействия на основе FEMA 440. В работах [8–9] была проведена оценка точности нелинейного статического метода при расчете на проектный спектр землетрясения в соответствии с СП 14.13330.2014.

Целью данной работы является оценка точности нелинейного статического метода по сравнению с нелинейным динамическим методом при расчете сооружений на заданные акселерограммы.

Материалы и методы

В работе рассмотрены три однопролетные жесткие рамы из стальных двутавров: одно-, трех- и семиэтажная. На рис. 1 приведена расчетная схема трехэтажной рамы. Размеры остальных приняты по аналогии. Материал колонн – сталь С345, балок – С255 в соответствии с СП 16.13330.2011³. Диаграммы работы стали приняты упруго-пластическими (рис. 2).

Сечения рам подобраны в соответствии с СП 14.13330.2014 при расчете на сейсмическое воздействие уровня ПЗ интенсивностью 8 баллов в ПК «ЛИРА 10.6». Частоты первой формы колебаний рам равны 1,521, 0,702 и 0,375 Гц соответственно. Параметр затухания для конструкций $\xi = 3\%$ от критического.

Расчет рам на сейсмические воздействия уровня МРЗ производился в нелинейной постановке с применением синтезированных акселерограмм. Для расчета было синтезировано 5 акселерограмм с

доминантными частотами 0,25, 0,5, 1,0, 1,5 и 2 Гц (рис. 3–7 соответственно). Все акселерограммы нормированы на ускорение 2 м/с^2 .

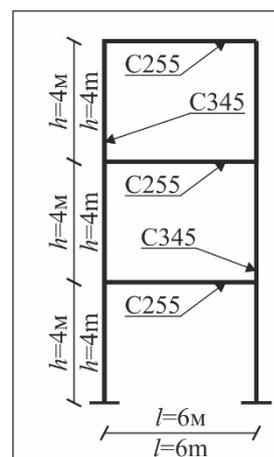


Рис. 1. Расчетная схема трехэтажной рамы
[Figure 1. The design scheme of the three-storey frame]

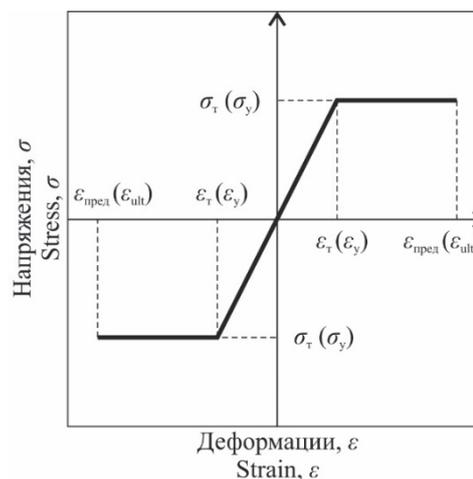


Рис. 2. Общий вид диаграммы деформирования стали
[Figure 2. General view of steel deformation diagram]

Расчет нелинейным динамическим методом (НДМ) проводился в программном комплексе LS-DYNA путем непосредственного решения уравнений движения во временной области с помощью явных схем интегрирования. Во всех расчетах учитывались физическая и геометрическая нелинейности. Одноэтажная рама рассчитывалась на акселерограммы № 3–5. Трехэтажная и семиэтажная на акселерограммы № 1–3.

Аналогичные расчеты проводились нелинейным статическим методом на основании методики, предложенной ранее в [7], в программных комплексах «ЛИРА 10.6» и MATLAB. Расчеты выполнены как с учетом физической и геометрической нелинейностей (ГН), так и с учетом только физической нелинейности.

² Applied Technology Council (ATC). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Rep. No. ATC-40, Volumes 1 and 2, Redwood City, CA, 1996.

European Standard. Eurocode-Basis of Structural Design: EN 1990: 2002(E). April, 2002. 87 p.

FEMA 273. Federal Emergency Management Agency. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, D.C. October, 1997.

FEMA-274. Federal Emergency Management Agency. NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, D.C. October, 1997.

FEMA 356. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. American Society of Civil Engineers (ASCE), Washington, D.C. November, 2000.

FEMA 440. Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. Rep. No. ATC-55, Redwood City, CA, 2005.

³ СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. М., 2011.

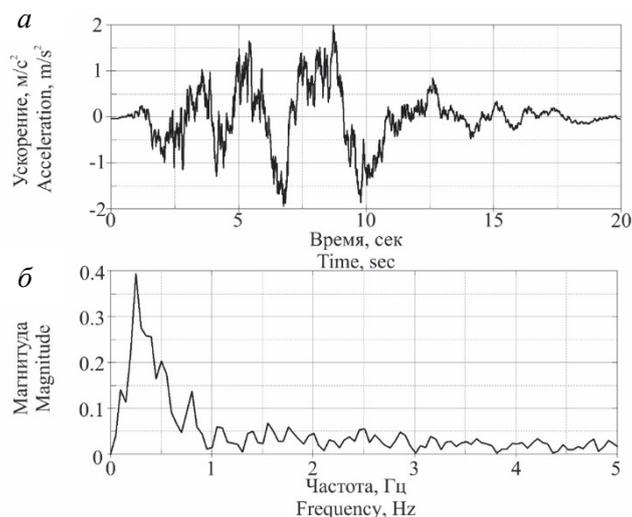


Рис. 3. Акселерограмма № 1: а – акселерограмма; б – спектральный состав
[Figure 3. Accelerogram № 1: a – accelerogram; б – spectral composition]

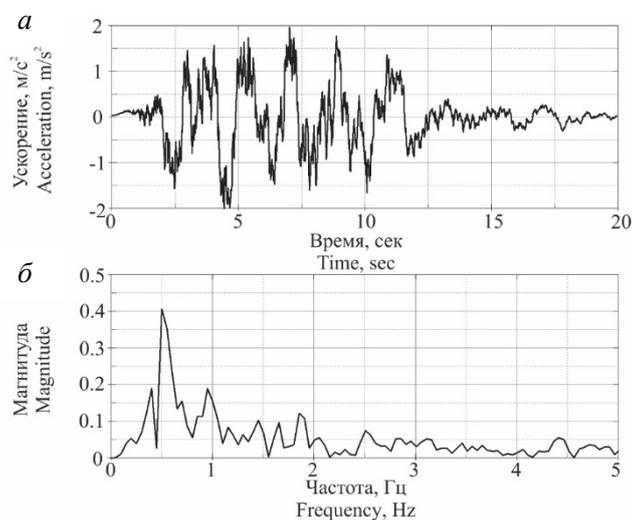


Рис. 4. Акселерограмма № 2: а – акселерограмма; б – спектральный состав
[Figure 4. Accelerogram № 2: a – accelerogram; б – spectral composition]

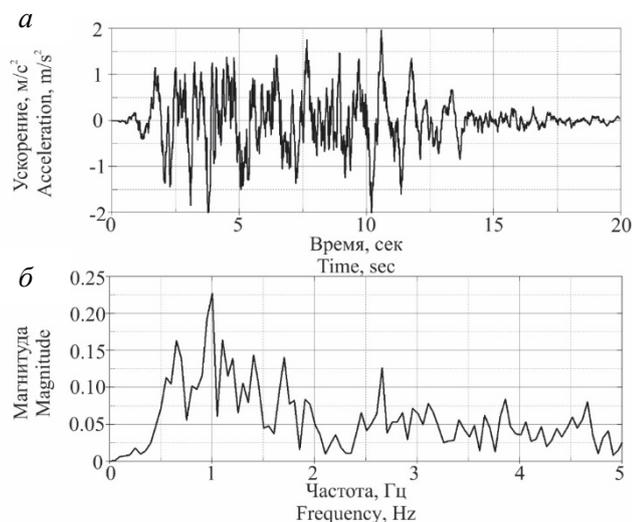


Рис. 5. Акселерограмма № 3: а – акселерограмма; б – спектральный состав
[Figure 5. Accelerogram № 3: a – accelerogram; б – spectral composition]

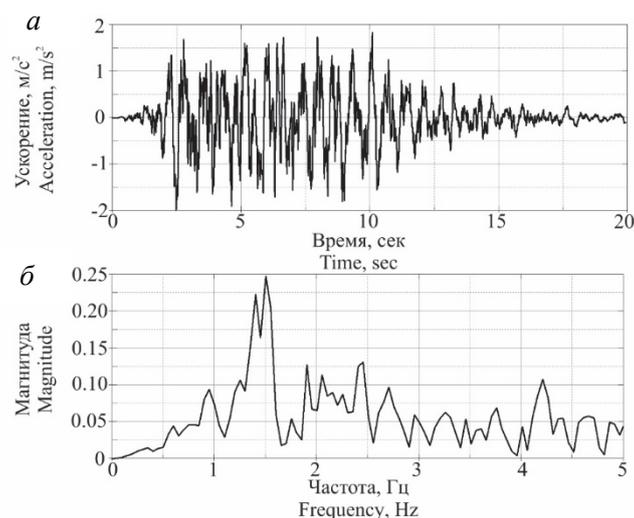


Рис. 6. Акселерограмма № 4: *a* – акселерограмма; *б* – спектральный состав
[Figure 6. Accelerogram № 4: *a* – accelerogram; *б* – spectral composition]

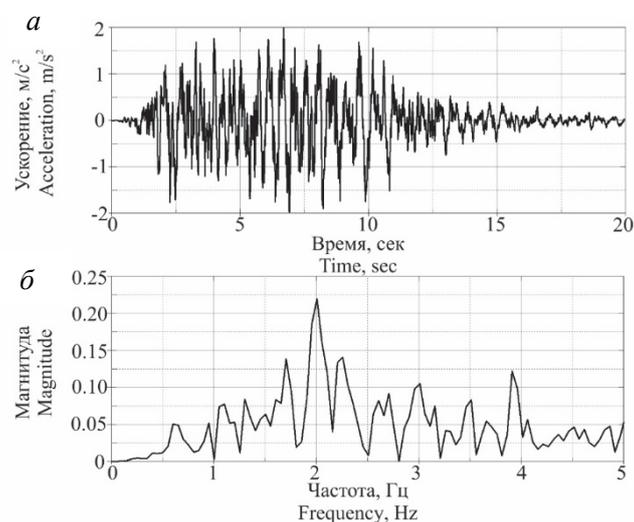


Рис. 7. Акселерограмма № 5: *a* – акселерограмма; *б* – спектральный состав
[Figure 7. Accelerogram № 5: *a* – accelerogram; *б* – spectral composition]

Результаты

Результаты показали, что при расчете на МРЗ ни одна рама не обрушилась, за исключением случая расчета нелинейным статическим методом одноэтажной рамы на акселерограмму № 1. В качестве сравнения нелинейного статического и нелинейного динамического методов использовалась величина максимального перемещения верха конструкции. На рис. 8–10 приведены результаты расчета трех рам. Остальные результаты сведены в табл. 1–3.

Обсуждение

В работах [8–9] при расчете нелинейным статическим методом на проектный спектр в соответствии с СП 14.13330.2014 были получены значи-

тельные расхождения с нелинейным динамическим методом как в большую, так и в меньшую сторону. В проведенном исследовании нелинейный статический метод показал консервативные результаты во всех случаях, кроме одного – при расчете одноэтажной рамы на акселерограмму № 1. Разница в перемещениях по сравнению с нелинейным динамическим методом составляет до 50 %, за исключением случая расчета трехэтажной рамы на акселерограмму № 1.

В работах [1; 2; 7] исследовались различные модификации нелинейного статического метода. Было показано, что при расчете только по одной форме собственных колебаний в определенных случаях результаты могут достаточно сильно расходиться по сравнению с нелинейным динамиче-

ским методом. При этом в целом метод оценивается как достаточно эффективный при оценке реакции сооружений на сейсмические воздействия. Для по-

лучения более точных результатов предлагается использовать модальный «пушOVER анализ», который позволяет учитывать высшие формы колебаний.

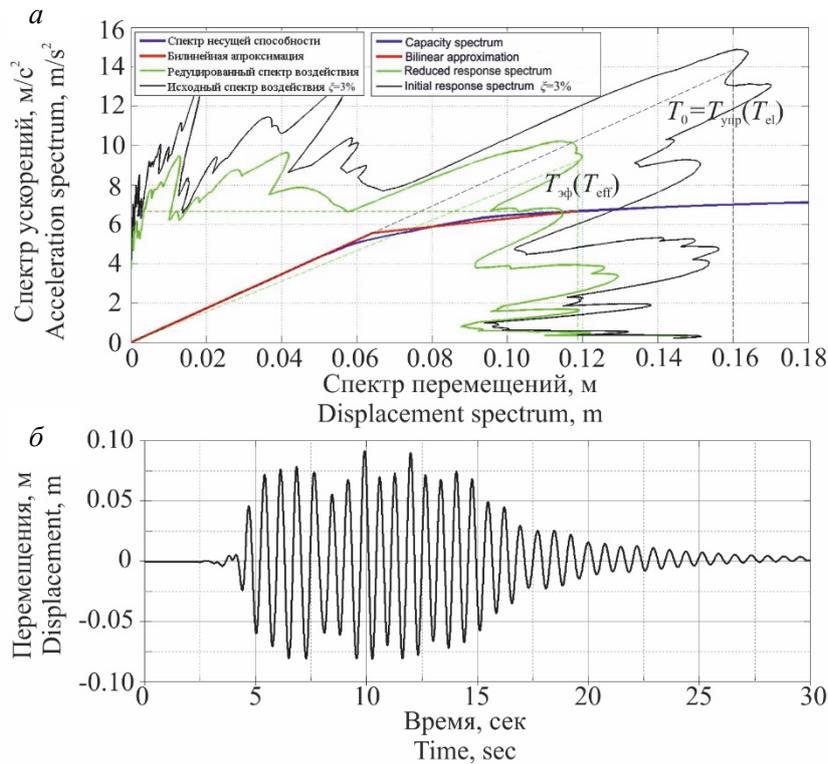


Рис. 8. Перемещения верха одноэтажной рамы при расчете на акселерограмму № 4: *a* – НСМ с ГН; *б* – НДМ [Figure 8. Displacement of the top of a single-story frame when calculating for an accelerogram № 4: *a* – nonlinear static method with accounting geometric nonlinearity; *б* – nonlinear dynamic method]

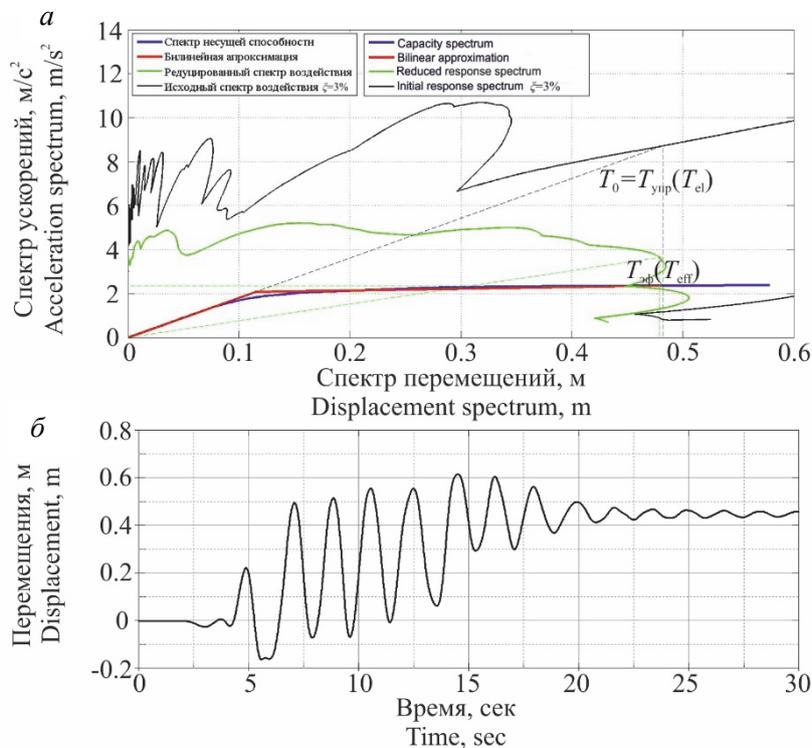


Рис. 9. Перемещения верха трехэтажной рамы при расчете на акселерограмму № 2: *a* – НСМ с ГН; *б* – НДМ [Figure 9. Displacements of the top of the three-story frame when calculating the accelerogram № 2: *a* – nonlinear static method with accounting geometric nonlinearity; *б* – nonlinear dynamic method]

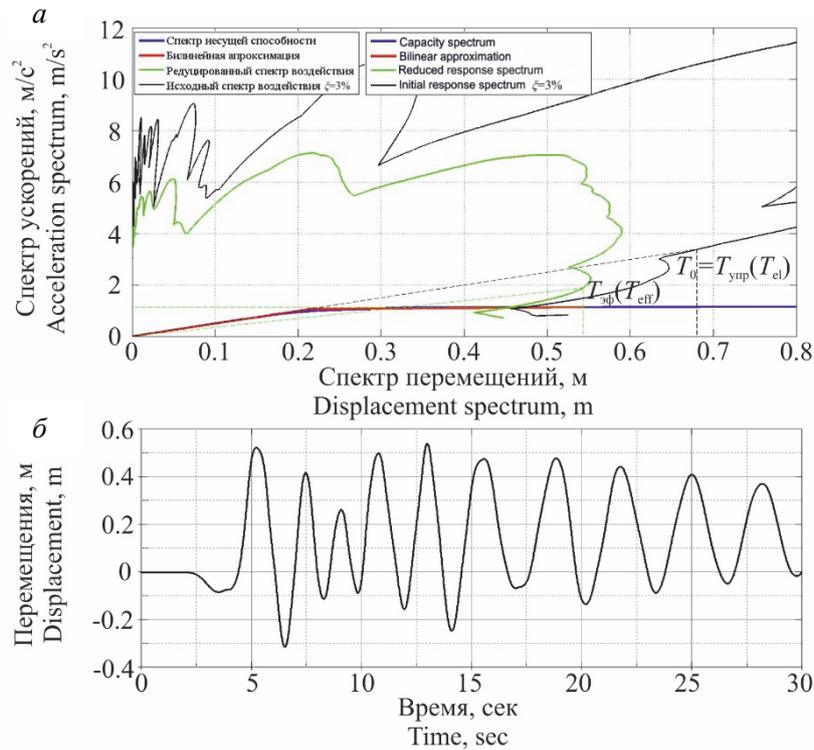


Рис. 10. Перемещения верха семиэтажной рамы при расчете на акселерограмму № 2: а – НСМ с ГН; б – НДМ
 [Figure 10. Displacements of the top of a seven-story frame when calculating for an accelerogram № 2: а – nonlinear static method with accounting geometric nonlinearity; б – nonlinear dynamic method]

Таблица 1

Результаты для одноэтажной рамы
 [Table 1. Results of calculation for one-story frame]

Воздействие [Impact]	Доминирующая частота воздействия, Гц [Dominant frequency of impacts, Hz]	Разница с основной собственной частотой конструкции, % [The difference with the basic natural frequency of the design, %]	Максимальное перемещение верха рамы, м [Maximum displacement of the top of the frame, m]		Разница, % [The difference, %]	Максимальное перемещение верха рамы, м [Maximum displacement of the top of the frame, m]		Разница, % [The difference, %]
			НДМ	НСМ без ГН		НДМ	НСМ с ГН	
Акселерограмма № 3 [Accelerogram № 3]	1,00	-34,25	0,099	0,071	-28,28	0,099	0,073	-26,26
Акселерограмма № 4 [Accelerogram № 4]	1,50	-1,38	0,092	0,119	29,35	0,092	0,118	28,26
Акселерограмма № 5 [Accelerogram № 5]	2,00	31,49	0,055	0,058	5,45	0,055	0,058	5,45

Таблица 2

Результаты для трехэтажной рамы
 [Table 2. Results of calculation for three-story frame]

Воздействие [Impact]	Доминирующая частота воздействия, Гц [Dominant frequency of impacts, Hz]	Разница с основной собственной частотой конструкции, % [The difference with the basic natural frequency of the design, %]	Максимальное перемещение верха рамы, м [Maximum displacement of the top of the frame, m]		Разница, % [The difference, %]	Максимальное перемещение верха рамы, м [Maximum displacement of the top of the frame, m]		Разница, % [The difference, %]
			НДМ	НСМ без ГН		НДМ	НСМ с ГН	
Акселерограмма № 1 [Accelerogram № 1]	0,25	-64,39	0,392	0,844 (разр.)	115,31	0,392	3,161 (разр.)	706,38
Акселерограмма № 2 [Accelerogram № 2]	0,50	-28,77	0,617	0,626	1,46	0,617	0,667	8,10
Акселерограмма № 3 [Accelerogram № 3]	1,00	42,45	0,249	0,332	33,33	0,249	0,344	38,15

Результаты для семиэтажной рамы
[Table 3. Results of calculation for seven-story frame]

Воздействие [Impact]	Доминирующая частота воздействия, Гц [Dominant frequency of impacts, Hz]	Разница с основной собственной частотой конструкции, % [The difference with the basic natural frequency of the design, %]	Максимальное перемещение верха рамы, м [Maximum displacement of the top of the frame, m]		Разница, % [The diffe- rence, %]	Максимальное перемещение верха рамы, м [Maximum displacement of the top of the frame, m]		Разница, % [The diffe- rence, %]
			НДМ	НСМ без ГН		НДМ	НСМ с ГН	
Акселерограмма №1 [Accelerogram № 1]	0,25	-33,33	1,780	2,429	36,46	1,780	2,393	34,44
Акселерограмма №2 [Accelerogram № 2]	0,50	33,33	0,541	0,766	41,59	0,541	0,772	42,70
Акселерограмма №3 [Accelerogram № 3]	1,00	166,67	0,251	0,266	5,98	0,251	0,256	1,99

В работах [17; 18] предлагается использовать нелинейный статический метод для расчетов зданий и сооружений в соответствии с СП 14.13330.2014. Несмотря на существенные допущения, применяемые в нелинейном статическом методе в отличие от линейно-спектрального метода, он напрямую учитывает повреждения конструкций. Тем самым позволяя отказаться от коэффициента K_1 . Утверждается, что метод является достаточно простым и наглядным, и может применяться при проектировании зданий и сооружений с прогнозируемым уровнем повреждений их несущих конструкций. Однако автор не приводит оценку погрешности нелинейного статического метода на основе более точных аналитических или численных методов (например, с применением нелинейного динамического метода).

Заключение

Нелинейный статический метод не противоречит требованиям российских норм и может применяться при расчетах зданий и сооружений на сейсмические воздействия. Так или иначе, этот подход уже начал использоваться в инженерной практике. Однако на данный момент единая методика расчета отсутствует.

В настоящей работе произведена оценка точности предложенной ранее методики нелинейного статического анализа по отношению к нелинейному динамическому методу при расчете на синтезированные акселерограммы. Для рассмотренных задач в большинстве случаев методика дала консервативную оценку реакции системы. Однако в некоторых случаях расхождения имеют существенную величину даже для простых расчетных схем.

Таким образом, необходимо проведение дальнейших исследований и совершенствование нели-

нейного статического метода, в том числе развитие модального «пушвер анализа». Требуется верификация этого метода для зданий и сооружений разных конструктивных схем и этажности, а также для различных материалов конструкций. Необходимо определить область применения нелинейного статического метода, в которой он будет давать практически приемлемые результаты.

© Булушев С.В., 2018



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Благодарности. Статья посвящается светлой памяти Гурама Автандиловича Джинчвелашвили. Он был отличным учителем и прекрасным человеком. Автор безгранично ценит полученные от него знания и опыт.

Список литературы

1. Chopra A.K., Goel R.K. Capacity-demand diagram methods based on inelastic design spectrum // Proceedings of 12 World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand, 2000. Paper № 1612.
2. Chopra A.K., Goel R.K. A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings // Earthquake engineering and structural dynamics. 2002. No. 31. Pp. 561–582.
3. Datta T.K. Seismic Analysis of Structures. John Wiley & Sons (Asia) Pte. Ltd., 2010. 464 p.
4. Fajfar P., Krawinkler H. Performance-Based Seismic Design Concepts and Implementation // Proceedings of the International Workshop Bled. Slovenia, June 28 – July 1, 2004. PEER Report 2004/05. College of Engineering, University of California, Berkeley.
5. Gupta B. Enhanced pushover procedure and inelastic demand estimation for performance-based seismic evaluation of buildings: Ph.D. Dissertation. Orlando, Florida, University of Central Florida, 1998.
6. Paz M., Leigh W. Structural Dynamics: Theory and Computation. 5th ed. 2004. 844 p.

7. *Themelis S.* Pushover analysis for seismic assessment and design of structures: Ph.D. Dissertation. Heriot-Watt University, School of Built Environment, 2008.

8. *Джинчвелашвили Г.А., Булушев С.В., Колесников А.В.* Нелинейный статический метод анализа сейсмостойкости зданий и сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2016. № 5. С. 39–47.

9. *Джинчвелашвили Г.А., Булушев С.В.* Оценка точности нелинейного статического метода анализа сейсмостойкости сооружений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 2. С. 41–48.

10. *Джинчвелашвили Г.А., Булушев С.В.* Расчетное обоснование заданного уровня сейсмостойкости сооружений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 1. С. 70–79.

11. *Джинчвелашвили Г.А.* Нелинейные динамические методы расчета зданий и сооружений с заданной обеспеченностью сейсмостойкости: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: МГСУ, 2015. 46 с.

12. *Соснин А.В.* Особенности оценки дефицита сейсмостойкости железобетонных каркасных зданий методом нелинейного статического анализа в SAP2000 // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2015. Т. 14. № 6. С. 97–110.

13. *Мкртычев О.В., Джинчвелашвили Г.А.* Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения). М.: МГСУ, 2012. 192 с.

14. *Мкртычев О.В., Джинчвелашвили Г.А., Дзержинский Р.И.* Философия многоуровневого проектирования в свете обеспечения сейсмостойкости сооружений // Геология и геофизика Юга России. 2016. № 1. С. 71–81.

15. *Мкртычев О.В., Джинчвелашвили Г.А.* Оценка работы зданий и сооружений за пределами упругости при сейсмических воздействиях // Theoretical Foundation of Civil Engineering: XXI Russian-Slovak-Polish Seminar. Moscow – Archangelsk July 3–6 2012. Pp. 177–186.

16. *Немчинов Ю.И., Марьенков Н.Г., Хавкин А.К., Бабик К.Н.* Проектирование зданий с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости (с учетом рекомендаций Еврокода 8, международных стандартов и требований ДБН). Киев: Минрегион Украины; ГП НИИСК, 2012. 53 с.

17. *Соснин А.В.* Об особенностях методологии нелинейного статического анализа и его согласованности с базовой нормативной методикой расчета зданий и сооружений на действие сейсмических сил // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Т. 16. № 1. С. 12–19.

18. *Соснин А.В.* Об уточнении коэффициента допускаемых повреждений K1 и его согласованности с концепцией редукации сейсмических сил в постановке спектрального метода (в порядке обсуждения) // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 1(60). С. 92–116.

19. *Чхиквадзе К.Т., Цискрели Ц.Г., Члаидзе Н.Ш., Каджая Л.Д.* Применение нелинейного статического (Pushover) метода для оценки поведения конструкций при сейсмическом воздействии // Строительная механика и расчёт сооружений. 2010. № 2. С. 48–52.

20. *Чхиквадзе К.Т., Цискрели Ц.Г., Члаидзе Н.Ш., Каджая Л.Д.* Построение кривой «Pushover» для оценки поведения конструкции при сейсмическом воздействии за пределом упругости // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2010. № 2. С. 31–33.

Об авторе

Булушев Сергей Валерьевич – инженер, Научно-исследовательская лаборатория «Надежность и сейсмостойкость сооружений» (НИЛ НСС), Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Москва, Россия). *Область научных интересов:* теория надежности строительных конструкций, теория сейсмостойкости сооружений, нелинейные динамические методы расчета. *Контактная информация:* e-mail – sergey.bulushev@gmail.com. eLIBRARY SPIN-код: 9165-7831. ORCID iD: 0000-0001-7239-4668.

Для цитирования

Булушев С.В. Сравнение результатов расчета сооружений на заданные акселерограммы нелинейным статическим и нелинейным динамическим методами // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 5. С. 369–378. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-369-378.

RESEARCH PAPER

Comparison of the calculation results of structures for specified accelerograms by nonlinear static and nonlinear dynamic methods

Sergey V. Bulushev

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)
26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

(received: August 21, 2018; revised: September 17, 2018; accepted: September 28, 2018)

Abstract. Relevance. Modern national standards for the design of buildings and structures for seismic impacts suggest the calculation of structures in a nonlinear setting. Only linear-spectral method, which has been used and is still used, is not enough for calculation. This is due to the fact that it does not allow directly taking into account the nonlinear work of

the structures. To solve the problem, nonlinear dynamic methods of calculation in the time domain can be used. At the moment, such methods are implemented only in specialized software complexes, and in most cases cannot be used by ordinary designers. Thus, it became necessary to apply simpler nonlinear calculation methods. In foreign standards for calculation of seismic resistance of buildings and structures, nonlinear static methods, or pushover analysis, have long been used. But in the national design practice until recently, these methods have not received due attention. Thus, the relevance of the study of the possibility of using these methods in engineering practice is beyond doubt.

The aim of work. The purpose of this article is to estimate the accuracy of a nonlinear static method in comparison with a nonlinear dynamic method when calculating structures for given accelerograms.

Solution technique. In the article three steel frames are considered: one-, three- and seven-story. The selection of sections was made in accordance with the requirements of the national standards on earthquake-resistant construction for seismic loads of the basic safety earthquake (BSE) level. Next, frames are designed for the seismic loads of the maximum considered earthquake (MCE) level on a set of accelerograms of different frequency composition. The calculation was performed by a nonlinear dynamic method in the LS-DYNA software package and a nonlinear static method in the LIRA 10.6 and MATLAB software complexes.

Results. Calculations showed that in all the cases considered, except for one, a nonlinear static method showed a conservative estimate of the response of the system, in comparison with the nonlinear dynamic method. But in some cases the reaction was greatly overestimated.

Keywords: seismic resilience, nonlinear calculation technique, nonlinear dynamic calculation technique, nonlinear static calculation technique, pushover analysis, accelerogram

References

1. Chopra A.K., Goel R.K. (2000). Capacity-demand diagram methods based on inelastic design spectrum. *Proceedings of 12 World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand*. Paper № 1612.
2. Chopra A.K., Goel R.K. (2002). A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake engineering and structural dynamics*, (31), 561–582.
3. Datta T.K. (2010). *Seismic Analysis of Structures*. John Wiley & Sons (Asia) Pte. Ltd, 464.
4. Fajfar P., Krawinkler H. (2004). Performance-Based Seismic Design Concepts and Implementation. *Proceedings of the International Workshop Bled, Slovenia, June 28 – July 1, 2004*. PEER Report 2004/05. College of Engineering, University of California, Berkeley.
5. Gupta B. (1998). *Enhanced pushover procedure and inelastic demand estimation for performance-based seismic evaluation of buildings* (PhD Thesis). Orlando, Florida, University of Central Florida.
6. Paz M., Leigh W. (2004). *Structural Dynamics: Theory and Computation*. 5th ed. 844.
7. Themelis S. (2008). *Pushover analysis for seismic assessment and design of structures* (PhD Thesis). Heriot-Watt University, School of Built Environment.
8. Dzhinchvelashvili G.A., Bulushev S.V., Kolesnikov A.V. (2016). Nonlinear static method of analysis of seismic resistance of buildings and structures. *Earthquake engineering. Constructions safety*, (5), 39–47. (In Russ.)
9. Dzhinchvelashvili G.A., Bulushev S.V. (2017). Accuracy evaluation of the nonlinear static analysis method of the structures seismic resistance. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, (2), 41–48. (In Russ.)
10. Dzhinchvelashvili G.A., Bulushev S.V. (2018). Accuracy evaluation of the nonlinear static analysis method of the structures seismic resistance. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 14(1), 70–79. (In Russ.)
11. Dzhinchvelashvili G.A. (2015). *Nelineinye dinamicheskie metody rascheta zdaniy i sooruzheniy s zadannoi obespechennost'yu seismostoikosti [Nonlinear dynamic methods of calculation of buildings and structures with a given security seismic stability]* (Abstract of Dr Dissertation). Moscow: MGSU Publ., 46. (In Russ.)
12. Sosnin A.V. (2015). The features of evaluation of deficit of seismic resistance of reinforced concrete frame buildings by the method of nonlinear static analysis in SAP2000. *Technical Regulation in Transport Construction*, 14(6), 97–110. (In Russ.)
13. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A. (2012). *Problemy ucheta nelineynostey v teorii seysmostoykosti (gipotezy i zabluzhdeniya) [Accounting problems of nonlinear seismic stability in the theory (hypothesis and error)]*. Moscow: MGSU Publ, 192. (In Russ.)
14. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A., Dzerzhinskij R.I. (2016). The philosophy of multi-level design in light of the provision of seismic stability of buildings. *Geology and Geophysics of the South of Russia*, (1), 71–81. (In Russ.)
15. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A. (2012). Ocenka raboty zdaniy i sooruzheniy za predelami uprugosti pri sejsmicheskikh vozdeystviyah [Assessment of buildings and structures beyond the elastic limit at the seismic influences]. *Theoretical Foundation of Civil Engineering, XXI Russian-Slovak-Polish Seminar*, Moscow – Archangelsk, July 3–6, 177 – 186. (In Russ.)
16. Nemchinov Ju.I., Mar'enkov N.G., Havkin A.K., Babik K.N. (2012). Proektirovanie zdaniy s zadannym urovnem obespecheniya seismostoikosti (s uchedom rekomendatsii Evrokoda 8, mezhdunarodnykh standartov i trebovaniy DBN) [Designing buildings with a given level of seismic resistance (taking into account the recommendations of Euro-

code 8, international standards and DBN requirements)]. Kiev: Minregion Ukrainy, GP NIISK Publ., 53. (In Russ.)

17. Sosnin A.V. (2016). On the peculiarities of the methodology of nonlinear static analysis and its consistency with the basic normative methodology for calculating buildings and structures for the action of seismic forces. *Bulletin of the South Ural University. Serie: Construction Engineering and Architecture*, 16(1), 12–19. (In Russ.)

18. Sosnin A.V. (2017). About refinement of the seismic-force-reduction factor (K1) and its coherence with the concept of seismic response modification in formulation of the spectrum method (in order of discussion). *Bulletin of Civil Engineers*, 60(1), 92–116. (In Russ.)

19. Chkhikvadze K.T., Tsiskreli Ts.G., Chlaidze N.Sh., Kadzhaya L.D. (2010). The application of nonlinear static (Pushover) methods for estimating the behavior of structures under seismic excitation. *Structural Mechanics and Analysis of Construction*, (2), 48–52. (In Russ.)

20. Chkhikvadze K.T., Tsiskreli Ts.G., Chlaidze N.Sh., Kadzhaya L.D. (2010). Pushover Curve Plotting to Assess Nonlinear Behavior of Plane Frame under Earthquake Effect.

Earthquake engineering. Constructions safety, (2), 31–33. (In Russ.)

About the author

Sergey V. Bulushev – Engineer, the Research Laboratory “Reliability and Seismic Stability of Structures”, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (Moscow, Russia). *Research interests*: the theory of reliability of building structures, the theory of seismic stability of structures, nonlinear dynamic methods of calculation. *Contact*: e-mail – sergey.bulushev@gmail.com. eLIBRARY SPIN-code: 9165-7831. ORCID iD: 0000-0001-7239-4668.

For citation

Bulushev S.V. (2018). Comparison of the calculation results of structures for specified accelerograms by nonlinear static and nonlinear dynamic methods. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 14(5), 369–378. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-369-378. (In Russ.)