УДК 699.841:624.012

О.В. Мкртычев, В.Б. Дорожинский, Д.С. Сидоров
НИУ МГСУ

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЗДАНИЙ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ

Приведены результаты расчетов зданий с полным рамным и рамно-связевым каркасом на эксплуатационные и сейсмические воздействия. Проанализировано армирование и усилия в элементах для различных вариантов.

Ключевые слова: железобетонное здание, напряженно-деформированное состояние, динамика, сейсмическое воздействие, землетрясение, расчет конструкций

Землетрясение обладает огромной силой и может приводить к значительным разрушениям [1—3]. Для зданий и сооружений последствия землетрясения зависят от характеристик сейсмического воздействия (интенсивность, спектральный состав и т.д.), свойств грунтов основания района строительства, качества проектирования и строительства [4—8]. В действующих нормах проектирования при расчете строительных конструкций в сейсмически опасных зонах используется коэффициент K_1 , учитывающий нелинейную работу материалов конструкций и допускаемые повреждения в конструкциях. Значения K_1 варьируются от 1 (повреждения не допускаются) до 0,12 (возможны значительные деформации и повреждения). Таким образом, воздействие сейсмической нагрузки на конструкции занижается в несколько раз. Подходить к назначению K_1 необходимо ответственно, опираясь на современные научные исследования, что не всегда позволяют сделать действующие нормы проектирования [9—20].

В качестве примера рассмотрим расчет на сейсмическое воздействие здания с полным рамным каркасом. Здание — пятиэтажное, высота этажа — 3,2 м. Толщина перекрытия — 0,18 м. Колонны — квадратного сечения 0,4×0,4 м. Шаг сетки колонн в продольном и поперечном направлениях составляет 6 м. Балки перекрытий прямоугольного сечения 0,4×0,3 м. Все конструкции выполнены из бетона класса В25, рабочая арматура — класса А400.

Рассмотрим два варианта конструкций здания: с пролетами 2 на 2 (рис. 1, а) и 2 на 4 (рис. 1, б).

Рис. 1. Здание с полным рамным каркасом

К зданию приложены постоянные (собственный вес конструкций, нагрузка от полов и перегородок) и временные нагрузки. Сейсмическое воздействие рассматривалось по ортогональным горизонтальным направлениям в четырех вариантах — интенсивностью 7, 8 баллов, 9 баллов при $K_1 = 0,25$ и 9 баллов при $K_1 = 1$. Расчеты выполнялись в ПК ЛИРА 10.4, анализировались усилия и армирование в колоннах.

На рис. 2 приведены продольные усилия и армирование колонн при расчете на сейсмическое воздействие интенсивностью 9 баллов для здания 2 на 2 пролета.

Рис. 2. Результаты расчета при сейсмическом воздействии 9 баллов при $K_1 = 0,25$ (слева) и $K_1 = 1$ (справа) для здания 2 на 2 пролета: а — продольные усилия; б — армирование, %

На рис. 3 приведены продольные усилия и армирование колонн при расчете на сейсмическое воздействие интенсивностью 9 баллов для здания 2 на 4 пролета.

В табл. 1—4 приведены полные значения усилий и результаты армирования в различных колоннах для всех рассматриваемых вариантов.

Рассмотрим здание с теми же параметрами, но с рамно-связевым каркасом. Ядро жесткости толщиной 0,18 м располагается в центре здания (рис. 4).

На рис. 5 и 6 приведены продольные усилия и результаты армирования колонн и ядра жесткости при расчете на сейсмическое воздействие интенсивностью 9 баллов.

Рис. 4. Здание с рамно-связевым каркасом

Рис. 3. Результаты расчета при сейсмическом воздействии 9 баллов при $K_1 = 0,25$ (слева) и $K_1 = 1$ (справа) для здания 2 на 4 пролета: *a* — продольные усилия при воздействии по оси *X*; *b* — продольные усилия при воздействии по оси *Y*; *v* — армирование, %

Табл. 1. Усилия (максимальные) в колоннах, кН, для здания 2 на 2 пролета

Номер	Элемент (колонна)	Эксплуатационные нагрузки	Интенсивность сейсмического воздействия, балл			
			7	8	9, $K_1 = 0,25$	9, $K_1 = 1$
1	Средняя	–229,4	–192,1	–192,1	–192,1	–192,1
2	Крайняя	–146,4	–133,8	–142,2	–159,1	–260,7
3	Угловая	–89,3	–84,5	–91,5	–105,6	–190,1

Табл. 2. Армирование (расчетное) в колоннах, %, для здания 2 на 2 пролета

Номер	Элемент (колонна)	Эксплуатационные нагрузки	Интенсивность сейсмического воздействия, балл			
			7	8	9, $K_1 = 0,25$	9, $K_1 = 1$
1	Средняя	0,23	0,23	1,08	3,13	15,06
2	Крайняя	0	0	0,43	2,65	11,06
3	Угловая	0	0	0,27	1,77	12,71

Табл. 3. Усилия (максимальные) в колоннах, кН, для здания 2 на 4 пролета

Номер	Элемент (колонна)	Эксплуатационные нагрузки	Интенсивность сейсмического воздействия, балл			
			7	8	9, $K_1 = 0,25$	9, $K_1 = 1$
1	Центральная	-215,3	-180,1	-180,1	-180,1	-180,1
2	Средняя	-222,6	-186,3	-186,3	-186,3	-207,2
3	Крайняя	-146,6	-133,9	-142,3	-159,2	-260,6
4	Угловая	-89,4	-84,9	-92,2	-106,9	-194,7

Табл. 4. Армирование (расчетное) в колоннах, %, для здания 2 на 4 пролета

Номер	Элемент (колонна)	Эксплуатационные нагрузки	Интенсивность сейсмического воздействия, балл			
			7	8	9, $K_1 = 0,25$	9, $K_1 = 1$
1	Центральная	0,03	0,03	1,08	3,13	15,81
2	Средняя	0,02	0,06	1,17	3,19	16,12
3	Крайняя	0	0	0,57	2,85	11,92
4	Угловая	0	0	0,35	1,92	14,75

Рис. 5. Результаты расчета колонн при сейсмическом воздействии 9 баллов при $K_1 = 0,25$ (слева) и $K_1 = 1$ (справа): а — продольные усилия при воздействии по оси X; б — продольные усилия при воздействии по оси Y; в — армирование, %

Рис. 6. Результаты расчета ядра жесткости при сейсмическом воздействии 9 баллов при $K_1 = 0,25$ (слева) и $K_1 = 1$ (справа): а — вертикальные усилия при воздействии по оси X; б — вертикальные усилия при воздействии по оси Y; в — армирование, %

В табл. 5—7 приведены полные значения усилий и результаты армирования ядра жесткости и различных колонн для всех рассматриваемых вариантов.

Табл. 5. Усилия (максимальные) в колоннах, кН

Номер	Элемент (колонна)	Эксплуатационные нагрузки	Интенсивность сейсмического воздействия, балл			
			7	8	9, $K_1 = 0,25$	9, $K_1 = 1$
1	Средняя	−142,9	−128,1	−131,1	−137,1	−173,1
2	Крайняя	−150,5	−129,8	−131,0	−133,3	−147,1
3	Угловая	−91,3	−80,1	−81,0	−82,8	−93,7

Табл. 6. Армирование (расчетное) в колоннах 1-го яруса, %

Номер	Элемент (колонна)	Эксплуатационные нагрузки	Интенсивность сейсмического воздействия, балл			
			7	8	9, $K_1 = 0,25$	9, $K_1 = 1$
1	Средняя	0	0	0	0	0,22
2	Крайняя	0	0	0	0	0,11
3	Угловая	0	0	0	0	0,16

Табл. 7. Усилия (максимальные) в ядре жесткости, МПа

Номер	Элемент (ядро жесткости)	Эксплуатационные нагрузки	Интенсивность сейсмического воздействия, балл			
			7	8	9, $K_1 = 0,25$	9, $K_1 = 1$
1	В основании	-1,85/0	-2,96/0	-3,95/1,09	-6,47/3,61	-21,60/18,74

Табл. 8. Армирование (расчетное) ядра жесткости, см²/м

Номер	Элемент (ядро жесткости)	Эксплуатационные нагрузки	Интенсивность сейсмического воздействия, балл			
			7	8	9, $K_1 = 0,25$	9, $K_1 = 1$
1	В основании	2	2	5	15	80

Вывод. В процессе интенсивного землетрясения при рассмотрении процесса во времени в запроектированном по действующим нормам рассматриваемом здании каркасно-связевой конструктивной схемы происходит отказ основания ядра жесткости. При этом в начале процесса не успевают возникнуть и развиваться пластические деформации в несущих элементах, поэтому понижающий коэффициент K_1 учитываться не должен. Так как ядро жесткости запроектировано с учетом понижающего коэффициента K_1 , то существующего армирования недостаточно для восприятия возникающих усилий, в результате чего происходит его отказ с последующим перераспределением усилий на колонны каркаса. Колонны, также запроектированные с учетом понижающего коэффициента K_1 , не способны воспринять такое запроектное увеличение усилий. Происходит разрушение колон каркаса и полное обрушение здания.

Из полученных результатов также следует:

в ряде случаев усилия в колоннах при сейсмическом воздействии меньше, чем при эксплуатационных нагрузках;

при 9-балльном воздействии при проектировании по действующим нормам при $K_1 = 0,25$ процент армирования имеет приемлемые значения, указанные в рекомендациях по проектированию;

при 9-балльном воздействии при значении $K_1 = 1$, т.е. повышении сейсмической нагрузки в 4 раза, процент армирования увеличивается в 5...8 раз. Принятого армирования сечений конструкций уже недостаточно для восприятия сейсмической нагрузки.

Исходя из проведенных исследований, можно сделать вывод, что применение необоснованного значения коэффициента K_1 приводит к занижению сейсмостойкости строительных конструкций и возможности обрушения зданий и сооружений в целом при интенсивных сейсмических воздействиях.

Библиографический список

1. Антикаев Ф.Ф. Меры по снижению ущерба от землетрясений // Природные опасности России. М. : Крук, 2000. Гл. 7. С. 165—195.
2. Бедняков В.Г., Нефедов С.С. Оценка повреждаемости высотных и протяженных зданий и сооружений железнодорожного транспорта при сейсмических воздействиях // Транспорт: наука, техника, управление. 2003. № 12. С. 24—32.
3. Поляков С.В. Последствия сильных землетрясений. М. : Стройиздат, 1978. 311 с.
4. Пиеничкина В.А., Золина Т.В., Дроздов В.В., Харланов В.Л. Методика оценки сейсмической надежности зданий повышенной этажности // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2011. № 25. С. 50—56.
5. Хачатрян С.О. Спектрально-волновая теория сейсмостойкости // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2004. № 3. С. 58—61.
6. Радин В.П., Трифонов О.В., Чирков В.П. Модель многоэтажного каркасного здания для расчетов на интенсивные сейсмические воздействия // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2001. № 1. С. 23—26.
7. Тяпин А.Г. Расчет сооружений на сейсмические воздействия с учетом взаимодействия с грунтовым основанием. М. : Изд-во АСВ, 2013. 399 с.
8. Chopra Anil K. Elastic response spectrum: a historical note // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2007. Vol. 36. No. 1. Pp. 3—12.
9. Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Нелинейная сейсмология: некоторые фундаментальные и прикладные проблемы развития // Фундаментальные науки — народному хозяйству : сб. / под ред. Г.И. Макаруча. М. : Наука, 1990. С. 363—367.
10. Стефанишин Д.В. К вопросу оценки и учета сейсмического риска при принятии решений // Предотвращение аварий зданий и сооружений : сб. науч. тр. 10.12.2012. Режим доступа: http://www.pamag.ru/pressa/calculation_seismic-risk.
11. Симборт Э.Х.С. Методика выбора коэффициента редукции сейсмических нагрузок K_1 при заданном уровне коэффициента пластичности m // Инженерно-строительный журнал. 2012. Т. 27. № 1. С. 44—52.
12. Мкртычев О.В., Джинчелашивили Г.А. Анализ устойчивости здания при аварийных воздействиях // Наука и техника транспорта. 2002. № 2. С. 34—41.
13. Мкртычев О.В., Юрьев Р.В. Расчет конструкций на сейсмические воздействия с использованием синтезированных акселерограмм // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 6. С. 52—54.
14. Джинчелашивили Г.А., Мкртычев О.В. Эффективность применения сейсмоизолирующих опор при строительстве зданий и сооружений // Транспортное строительство. 2003. № 9. С. 15—19.
15. Мкртычев О.В. Безопасность зданий и сооружений при сейсмических и аварийных воздействиях. М. : МГСУ, 2010. 152 с.
16. Datta T.K. Seismic analysis of structures. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2010. 464 p.
17. Dr. Sudhir K. Jain, Dr. C.V.R. Murty. Proposed draft provisions and commentary on indian seismic code IS 1893 (Part 1). Kanpur : Indian Institute of Technology Kanpur, 2002. 158 p.
18. Guo Shu-xiang, Lü Zhen-zhou. Procedure for computing the possibility and fuzzy probability of failure of structures // Applied Mathematics and Mechanics. 2003. Vol. 24. No. 3. Pp. 338—343.
19. Housner G.W. The plastic failure of frames during earthquakes // Proceedings of the 2nd WCEE, Tokyo&Kyoto. Japan, 1960. Vol. II. Pp. 997—1012.
20. Pinto P.E., Giannini R., Franchin P. Seismic reliability analysis of structures. Pavia, Italy : IUSS Press, 2004. 370 p.

Поступила в редакцию в сентябре 2015 г.

Об авторах: **Мкртычев Олег Варганович** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сопротивления материалов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, mkrtychev@yandex.ru;

Дорожинский Владимир Богданович — кандидат технических наук, ассистент кафедры сопротивления материалов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, dorozhinski@mail.ru;

Сидоров Дмитрий Сергеевич — кандидат технических наук, ассистент кафедры сопротивления материалов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, dimacolts@yandex.ru.

Для цитирования: *Мкртычев О.В., Дорожинский В.Б., Сидоров Д.С.* Исследование сейсмостойкости железобетонных зданий различных конструктивных схем // Вестник МГСУ. 2015. № 12. С. 66—75.

O.V. Mkrtychev, V.B. Dorozhinskiy, D.S. Sidorov

SEISMIC RESISTANCE CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS OF DIFFERENT STRUCTURAL SCHEMES

Earthquakes can be very strong and can lead to significant damages. Effect of earthquakes depend on seismic action characteristics (intensity, spectral composition, etc.), foundation soil properties in region of construction, design and construction quality. In seismically dangerous regions structural calculations the current design standards suppose the use of the coefficient K_1 , which takes account the non-linear work of construction material and the allowable damages of structures.

Our research shows that a stiffening core fails in case of intensive earthquake if the walls are designed according to current design standards. Thus, plastic deformations do not occur and develop in the supporting elements at the beginning of the process, so the lowering coefficient K_1 should be disregarded. As stiffening core is projected with account for the reduction factor K_1 , the existing reinforcement is not enough for standing the emerging stress and its failure happens followed by a redistribution of the stress to frame columns. The columns are also projected with account for the reduction factor K_1 and are not able to take such an increase stress beyond design. There is destruction of column frame and complete collapse of the building.

So seismic resistance of bearing structures is reduced several times. The approach to estimating K_1 must be responsible, based on the latest scientific research, which sometimes could not be done according to the acting design standards.

Key words: reinforced concrete building, stress-strain state, dynamics, seismic action, earthquake, structural analysis

References

1. Aptikaev F.F. Mery po snizheniyu ushcherba ot zemletryaseniy [Measures to Reduce Earthquake Damage]. *Prirodnye opasnosti Rossii* [Natural Hazards of Russia]. Moscow, Kruk Publ., 2000, chapter 7, pp. 165—195. (In Russian)
2. Bednyakov V.G., Nefedov S.S. Otsenka povrezhdaemosti vysotnykh i protyazhennykh zdaniy i sooruzheniy zheleznodorozhnogo transporta pri seysmicheskikh vozdeystviyakh [Evaluation of Seismic Damage to High and Extended Buildings and Structures of Railway Transport]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: Science, Technology, Management]. 2003, no. 12, pp. 24—32. (In Russian)
3. Polyakov S.V. *Posledstviya sil'nykh zemletryaseniy* [Consequences of Strong Earthquakes]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978, 311 p. (In Russian)

4. Pshenichkina V.A., Zolina T.V., Drozdov V.V., Kharlanov V.L. Metodika otsenki seysmi-cheskoy nadezhnosti zdaniy povyshennoy etazhnosti [Methods of Estimating Seismic Re-liability of High-Rise Buildings]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State Uni-versity of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture]. 2011, no. 25, pp. 50—56. (In Russian).
5. Khachatryan S.O. Spektral'no-volnovaya teoriya seysmostoykosti [Spectral-Wave Theory of Seismic Stability]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy* [Anti-seismic Construction. Structures Safety]. 2004, no. 3, pp. 58—61. (In Russian)
6. Radin V.P., Trifonov O.V., Chirkov V.P. Model' mnogoetazhnogo karkasnogo zdaniya dlya raschetov na intensivnye seysmicheskie vozdeystviya [A Model of Multi-Storey Frame Buildings for Calculations on Intensive Seismic Effects]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy* [Antiseismic Construction. Safety of Structures]. 2001, no. 1, pp. 23—26. (In Russian)
7. Tyapin A.G. *Raschet sooruzheniy na seysmicheskie vozdeystviya s uchetom vzaimodeystviya s gruntovym osnovaniem* [Structural Analysis on Seismic Effects With Ac-count for Interaction with Soil Foundation]. Moscow, ASV Publ., 2013, 399 p. (In Russian)
8. Chopra Anil K. Elastic Response Spectrum: A Historical Note. *Earthquake Engineer-ing and Structural Dynamics*. 2007, vol. 36, no. 1, pp. 3—12. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.609>.
9. Khavroshkin O.B., Tsyplakov V.V. Nelineynaya seysmologiya: nekotorye fundamental'nye i prikladnye problemy razvitiya [Nonlinear Seismology: Some Fundamental and Applied Problems of Development]. *Fundamental'nye nauki — narodnomu khozyaystvu : sbornik* [Fundamental Sciences to National Economy : Collection]. Moscow, Nauka Publ., 1990, pp. 363—367. (In Russian)
10. Stefanishin D.V. K voprosu otsenki i ucheta seysmicheskogo riska pri prinyatii resh-eniy [Assessment and Consideration of Seismic Risk in Decision-Making]. *Predotvrashchenie avariyy zdaniy i sooruzheniy : sbornik nauchnykh trudov* [Preventing Accidents of Buildings and Structures: Collection of Scientific Works]. 10.12.2012. Available at: http://www.pamag.ru/pressa/calculation_seismic-risk. (In Russian)
11. Simbort E.Kh.S. Metodika vybora koeffitsienta reduktsii seysmicheskikh nagruzok K_1 pri zadannom urovne koeffitsienta plastichnosti m [Methodology of Selecting Seismic Loads Gear Ratio of Reduction K_1 with Given Plastic Ratio m]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Engi-neering and Construction Journal]. 2012, vol. 27, no. 1, pp. 44—52. (In Russian)
12. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A. Analiz ustoychivosti zdaniya pri avariynykh vozdeystviyakh [Analysis of Building Sustainability during Emergency Actions]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology on Transport]. 2002, no. 2, pp. 34—41. (In Russian)
13. Mkrtychev O.V., Yur'ev R.V. Raschet konstruktsey na seysmicheskie vozdeystviya s ispol'zovaniem sintezirovannykh akselerogramm [Structural Analysis on Seismic Effects Us-ing Synthesized Accelerograms]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2010, no. 6, pp. 52—54. (In Russian)
14. Dzhinchvelashvili G.A., Mkrtychev O.V. Effektivnost' primeneniya seysmoizoliruyushchikh opor pri stroitel'stve zdaniy i sooruzheniy [Effectiveness of Seismic Isolation Bear-ings during the Construction of Buildings and Structures]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport Construction]. 2003, no. 9, pp. 15—19. (In Russian)
15. Mkrtychev O.V. *Bezopasnost' zdaniy i sooruzheniy pri seysmicheskikh i avariynykh vozdeystviyakh* [Safety of Buildings and Structures in Case of Seismic and Emergency Loads]. Moscow, MGSU Publ., 2010, 152 p. (In Russian)
16. Datta T.K. *Seismic Analysis of Structures*. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2010, 464 p.
17. Dr. Sudhir K. Jain, Dr. C.V.R. Murty. Proposed Draft Provisions and Commentary on Indian Seismic Code IS 1893 (Part 1). Kanpur, Indian Institute of Technology Kanpur, 2002, 158 p.

18. Guo Shu-xiang, Lü Zhen-zhou. Procedure for Computing the Possibility and Fuzzy Probability of Failure of Structures. *Applied Mathematics and Mechanics*. 2003, vol. 24, no. 3, pp. 338—343. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02438271>.

19. Housner G.W. The Plastic Failure of Frames during Earthquakes. *Proceedings of the 2nd WCEE, Tokyo&Kyoto, Japan, 1960*, vol. II, pp. 997—1012

20. Pintoa P.E., Giannini R., Franchin P. *Seismic Reliability Analysis of Structures*. Pavia, Italy, IUSS Press, 2004, 370 p.

About the authors: **Mkrtychev Oleg Vartanovich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Strength of Materials, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; mkrtychev@yandex.ru;

Dorozhinskiy Vladimir Bogdanovich — Candidate of Technical Sciences, Assistant Lecturer, Department of Strength of Materials, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; dorozhinski@mail.ru;

Sidorov Dmitriy Sergeevich — Candidate of Technical Sciences, Assistant Lecturer, Department of Strength of Materials, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; dimacol@yandex.ru.

For citation: Mkrtychev O.V., Dorozhinskiy V.B., Sidorov D.S. Issledovanie seysmoustoykosti zhelezobetonnykh zdaniy razlichnykh konstruktivnykh skhem [Seismic Resistance Calculation of Reinforced Concrete Buildings of Different Structural Schemes]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, no. 12, pp. 66—75. (In Russian)