Методика выбора коэффициента редукции сейсмических нагрузок K_1 при заданном уровне коэффициента пластичности μ

Аспирант Э. Симборт*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Ключевые слова: сейсмостойкое проектирование; нелинейная модель с одной степенью свободы; коэффициент редукции K_1; коэффициент пластичности μ

Введение

В настоящее время для обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений в мировой практике применяется подход многоуровневого проектирования [1]. Такой подход применяется в нормах Европы (EuroCode 8), а с 2011 года и в нормах Российской Федерации. В соответствии с данным подходом здания и сооружения должны противостоять без потери эксплуатационных свойств сейсмическим нагрузкам, соответствующим уровню ПЗ, а сейсмические нагрузки, соответствующие уровню МРЗ должны восприниматься за счет пластического ресурса конструкций, при этом должно обеспечиваться предотвращение полного обрушения сооружения или его частей. В нормах зарубежных стран работа конструкций за пределами упругости учитывается коэффициентом редукции [2]. В российских же нормах (СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах) – путем введения коэффициента K_1. Однако, несмотря на то, что от принятого значения коэффициента K_1 зависит уровень расчетных сейсмических нагрузок, при его назначении не учитывается ряд важных факторов, имеющих прямую связь с его значением, таких как период собственных колебаний системы T, характер землетрясения и т.д. [3]. Во многих публикациях представлены различного рода обоснования коэффициентов, аналогичных K_1. Огромное количество таких работ объясняется важностью и актуальностью изучения данного коэффициента [4, 5]. Подбор коэффициента редукции нагрузок – достаточно сложный и трудоемкий процесс, который состоит в снижении сейсмических нагрузок в зависимости от уровня максимальных (допустимых) остаточных деформаций в строительных конструкциях в результате землетрясений. Максимальные остаточные деформации учитываются посредством коэффициента пластичности μ.

Используя нелинейную модель с одной степенью свободы, автор настоящей работы вывел связь между коэффициентом пластичности и уровнем «пластического срабатывания» системы, характеризуемым коэффициентом редукции K_1. Также была проведена статистическая обработка полученных данных с целью оценочного определения коэффициентов редукции K_1. Уместно отметить, что для простых нагружений такие подходы уже практиковались, и имеется ряд публикаций [6]. Тем не менее, в [6] такие зависимости получены только для простых нагружений. В настоящей работе такие зависимости получены и для нагружений в виде землетрясений.

Методика анализа

Модель с одной степенью свободы. Связь между коэффициентом K_1, коэффициентом пластичности μ и предельной нагрузкой F_T.

Как было указано в работе [3], при назначении коэффициента K_1, не зависящего от периода собственных колебаний системы, от частотного состава воздействия и т.д., получаемые значения коэффициентов пластичности в ряде случаев превышают допустимые. В связи с этим представляется целесообразным создать методику по подбору коэффициента K_1, зависящего от вышеупомянутых факторов, и, в то же время, такого, чтобы при принятых его значениях не превышались допустимые значения коэффициента пластичности $\mu_{тр}$.

В данном исследовании для анализа поведения конструкций в условиях упругопластического деформирования используется нелинейная модель с одной степенью свободы [7]. Адекватность применения данной модели анализируется в работе [8]. Характер разгрузки модели описывается гипотезой кинематического упрочнения Мазинга [9]. Данная модель, представленная на рис. 1, описывается дифференциальным уравнением (1):

$$m\ddot{x} + \alpha\dot{x} + F(x,\dot{x}) = -m\ddot{y}_g(t)\,, \tag{1}$$

где $\ddot{y}_g(t)$ – ускорение основания системы с одной степенью свободы.

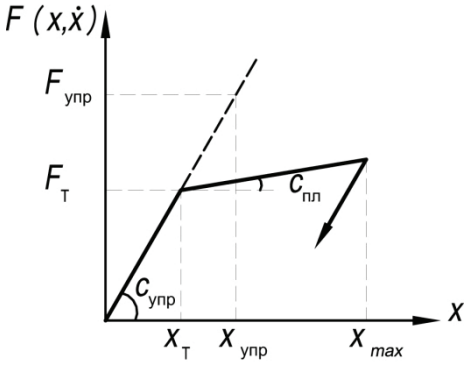

Рисунок 12. Билинейная диаграмма с упругой разгрузкой

Исходя из рис. 1, коэффициент K_1 можно трактовать как отношение расчетной сейсмической нагрузки $F_{расч} = F_т$ к значению сейсмической нагрузки, определяемому в предположении упругого деформирования конструкций $F_{упр}$. Таким образом,

$$K_1 = \frac{F_т}{F_{упр}} = \frac{x_т}{x_{упр}}\,, \tag{2}$$

где F_T – предельная нагрузка системы с одной степенью свободы, которая может быть найдена исходя из решения задачи предельного равновесия при горизонтальной нагрузке, пропорциональной распределенной массе системы.

В настоящей работе для решения задачи о предельном равновесии жесткопластических конструкций предлагается применить метод псевдожесткостей [10].

Использование численных методов динамического расчета конструкций с учетом упругопластических деформаций материалов представлено также в [11-14].

Коэффициент пластичности представляет собой отношение максимального динамического прогиба к прогибу, соответствующему превращению системы в механизм:

$$\mu = \frac{x_{max}}{x_т}\,. \tag{3}$$

Отношение максимальных динамических прогибов упругопластической системы x_{max} и соответствующей упругой системы $x_{упр}$:

$$\frac{x_{max}}{x_{упр}} = \mu K_1\,. \tag{4}$$

Методика построения зависимостей $K_1(T;\ \mu)$ с постоянными значениями коэффициентов пластичности. Предельная нагрузка для заданного коэффициента пластичности μ

Методика построения кривых с постоянными значениями коэффициентов пластичности состоит из следующих этапов.

1. Выбор значения коэффициента пластичности μ из принятого набора исследуемых значений $\mu_{пр}$: 1,5; 2; 4 и 8.
2. Назначение границ изучаемого диапазона периодов. В данной работе принимается диапазон периодов от 0 до 2 с.

3. Определение, исходя из решения дифференциального уравнения (1), линейного динамического отклика системы с одной степенью свободы, с периодом T_i и параметром затухания ξ =0,05, на воздействие землетрясения, заданного в виде акселерограммы.
4. Нахождение максимального значения динамического упругого перемещения $x_{упр}$ и соответствующей ему упругой силы $F_{упр}$.
5. Задание начального значения коэффициента K_1<1. Интервал изменения коэффициента K_1 был принят от 1 до 0,1 с шагом 0,0001.
6. Вычисление по формуле (2) значений $F_т$ и $x_т$.
7. Определение, исходя из решения дифференциального уравнения (1), нелинейного динамического отклика системы с одной степенью свободы с теми же значениями T_i и $\xi = 0{,}05$ на воздействие землетрясения, заданного в виде акселерограммы.
8. Нахождение максимального значения динамического перемещения x_{max} и соответствующей ему величины коэффициента пластичности $\mu = x_{max} / x_т$.
9. Сравнение значений вычисленного μ и принятого $\mu_{пр}$ коэффициентов пластичности. Критерием сравнения являлось условие $\mu_{пр} - \mu < 0.0001$.
10. Повторение процедуры для всего диапазона значений T_i.
11. Повторение процедуры для всех исследуемых значений $\mu_{пр}$.

Подобная процедура приведена в [15]. В упомянутой работе [15] автором предлагается найти величину K_1 (в [15] вместо K_1 используется обозначение $\overline{f}_y$) путем применения интерполяционной процедуры, предполагающей линейную зависимость между $\log(K_1)$ и $\log(\mu)$. В [16, 17] процедура, предложенная в [15] наряду с так называемым спектром несущей способности используется для определения максимальных перемещений неупругих систем с одной степенью свободы.

Соотношение A_{max}/V_{max}

Анализ большого количества записей землетрясений показывает, что характеристики движения грунта значительно варьируются от одной записи к другой. Частотный состав воздействия во многом зависит от эпицентрального расстояния (d), сейсмогеологических и грунтовых условий площадки строительства и т.д.

Применение одного параметра A_{max} (пиковое ускорение) для адекватного описания сейсмического воздействия недостаточно. Два землетрясения, имеющие одинаковые пиковые ускорения, могут вызвать совершенно разные динамические отклики в зданиях и сооружениях. Одной из основных причин этого является различный частотный состав воздействия.

Важным фактором, характеризующим движение грунта (частотный состав воздействия), является соотношение $\frac{\max|a(t)|}{\max|v(t)|}$ [18]. Можно выделить три группы, в зависимости от величины этого соотношения:

- большие значения – A_{max}/V_{max}>1,2 g/(м/с);
- средние значения – 0,8<A_{max}/V_{max}<1,2 g/(м/с);
- малые значения – A_{max}/V_{max}<0,8 g/(м/с).

Статистически, большие значения соотношения имеют место в районах, расположенных близко к очагу землетрясения (d<25-30 км). Малые же – в районах, далеких от очага землетрясения (d>150 км), где d – эпицентральное расстояние.

С учетом вышеизложенного, ниже приведены результаты анализа нелинейной системы с одной степенью свободы на воздействия двухсот акскелерограмм по данным Center for Engineering Strong Motion Data (CESMD) и The European Strong Motion Database (ESD) [19, 20]. В зависимости от значения A_{max}/V_{max} все записи землетрясений были разделены на три группы.

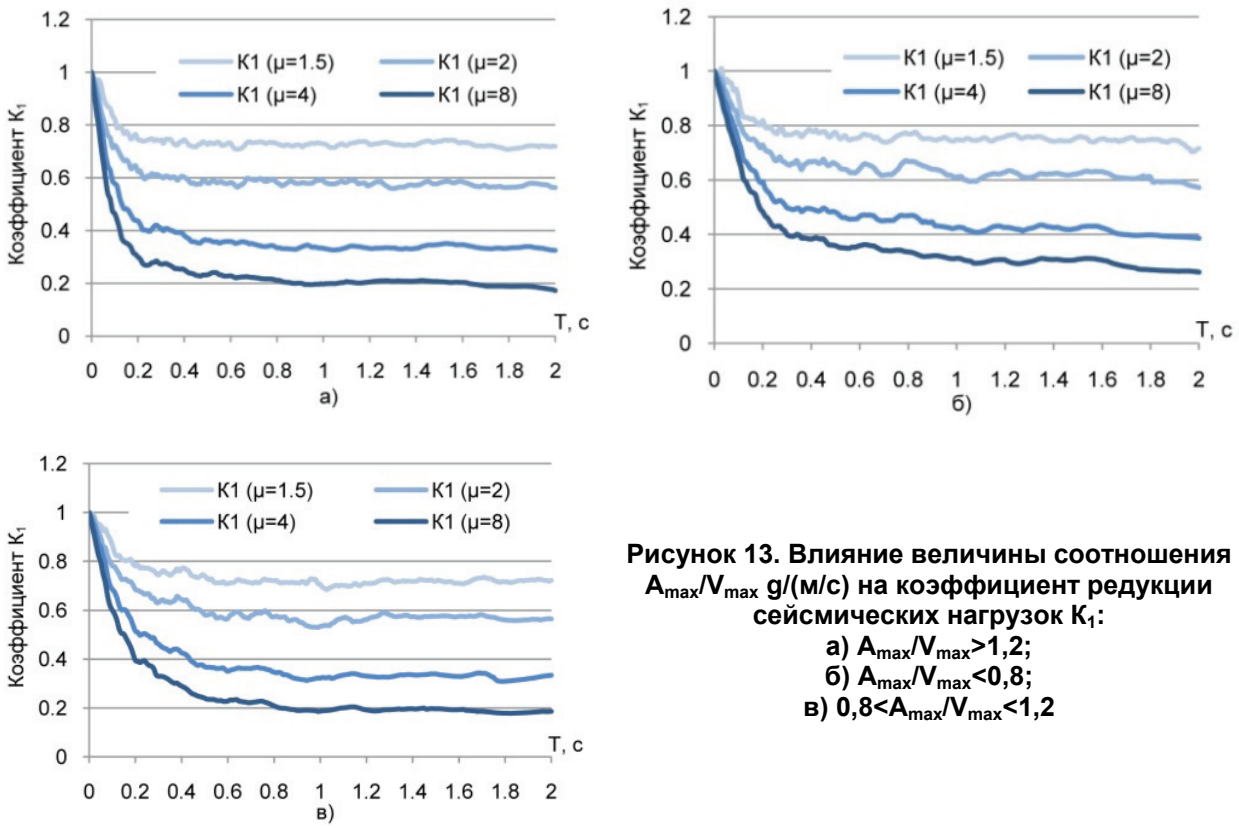

Рисунок 13. Влияние величины соотношения A_{max}/V_{max} g/(м/с) на коэффициент редукции сейсмических нагрузок K_1:
а) $A_{max}/V_{max}>1,2$;
б) $A_{max}/V_{max}<0,8$;
в) $0,8<A_{max}/V_{max}<1,2$

На рис. 2 показаны диаграммы коэффициентов редукции K_1 для заданных уровней коэффициентов пластичности в зависимости от периода собственных колебаний системы. Данные диаграммы были получены после статистической обработки и представляют собой среднее значение плюс одно стандартное отклонение.

Как видно из графиков на рис. 2, отношение A_{max}/V_{max} оказывает существенное влияние на величину коэффициента K_1 и на вид диаграмм. На основе анализа диаграмм можно увидеть некоторые закономерности.

Все диаграммы K_1-Т состоят из двух участков. Первый из них имеет гиперболический характер; второй – постоянный. Период $T_{гр}$, служащий границей между обеими зонами диаграмм, зависит от величины коэффициента пластичности μ, а также от значения параметра A_{max}/V_{max}. При малых значениях μ (1,5; 2), период $T_{гр}$ колеблется от 0,4 с – при $A_{max}/V_{max}>1,2$, до 0,6 с – при $A_{max}/V_{max}<0,8$ и $0,8<A_{max}/V_{max}<1,2$. С увеличением величины μ и снижением значения A_{max}/V_{max} возрастает период $T_{гр}$. Таким образом, при μ = 4-8 и $A_{max}/V_{max}>1,2$ период $T_{гр}$ ≈ 0,8с; при μ = 4-8 и $0,8<A_{max}/V_{max}<1,2$ период $T_{гр}$ ≈ 0,8-1с; при μ = 4 и $A_{max}/V_{max}<0,8$ период $T_{гр}$ ≈ 1с, при μ = 8 и $A_{max}/V_{max}<0,8$ участок с постоянными значениями коэффициента K_1 полностью вырождается (рис.2.б).

На рис. 3а, б, в, г представлены сравнения зависимостей K_1 от Т, соответствующих заданным значениям соотношения A_{max}/V_{max} g/(м/с) при: μ=1,5; μ=2; μ=4; μ=8 соответственно. Как видно из рис. 3 большими значениями периодов $T_{гр}$ и коэффициентов K_1 обладают кривые, соответствующие значениям параметра $A_{max}/V_{max}<0,8$.

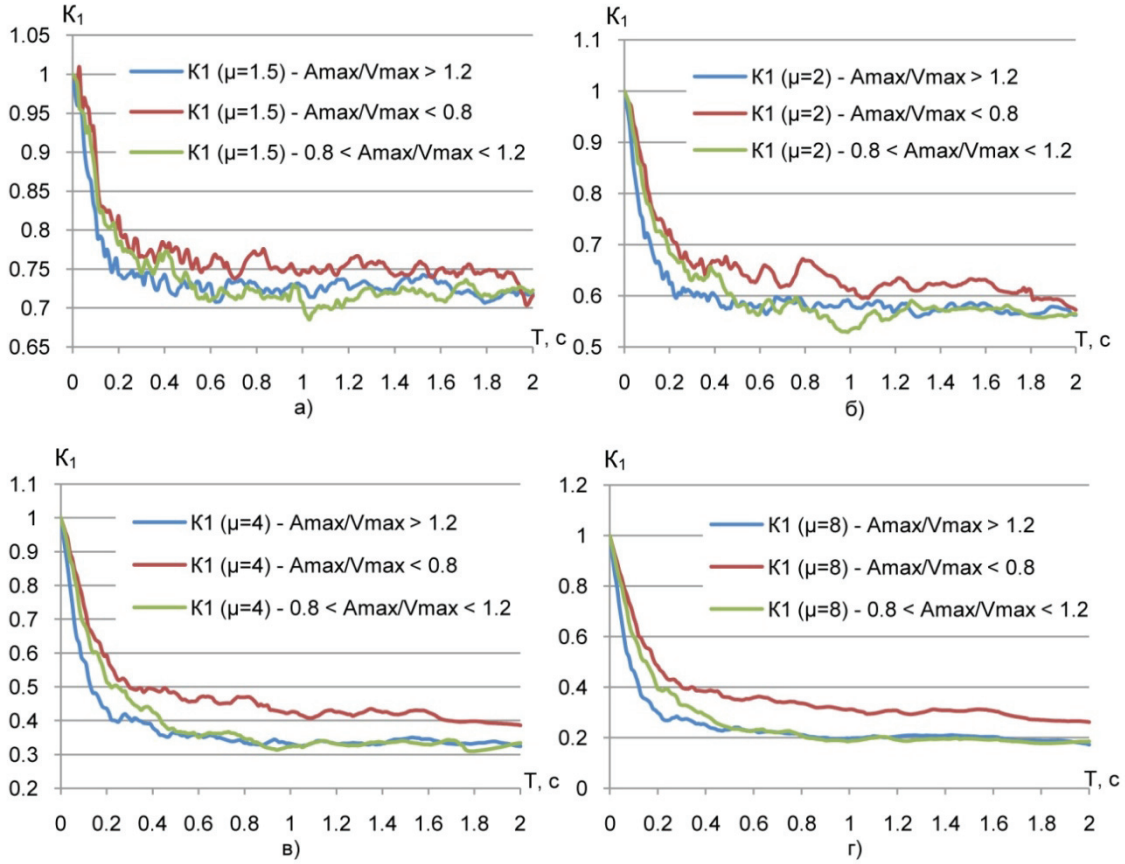

Рисунок 14. Сравнение зависимостей «K_1 от T», соответствующих заданным значениям соотношения A_{max}/V_{max} g/(м/с) при: а) μ=1,5; б) μ=2; в) μ=4; г) μ=8

Предлагаемая зависимость между коэффициентом редукции сейсмических нагрузок K_1 и коэффициентом пластичности μ

С учетом вышеизложенного представляется целесообразным создание единых кривых для определения значений коэффициентов редукции K_1 в зависимости от T и от заданного уровня коэффициента пластичности μ. Функции K_1-T-μ получены в результате статистической обработки с последующим сглаживанием кривых, построенных после анализа реакции нелинейной модели с одной степенью свободы на воздействия двухсот акселерограмм.

На рис. 4 приведены предлагаемые зависимости K_1-T-μ. Данные зависимости есть результат вышеуказанной статистической обработки и представляют собой среднее значение плюс одно стандартное отклонение коэффициентов K_1.

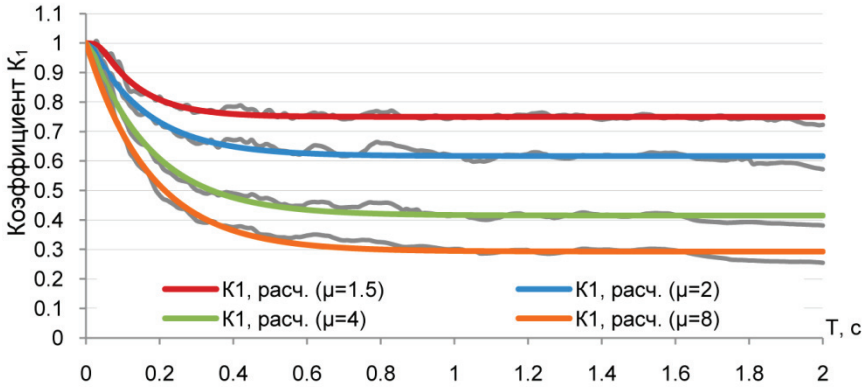

Рисунок 15. Предлагаемая зависимость коэффициента редукции сейсмических нагрузок K_1 от периода собственных колебаний T для заданных уровней коэффициента пластичности μ

Функции K_1-T-μ описываются формулой (5), связывающей коэффициент K_1 и период собственных колебаний системы в зависимости от выбранного коэффициента пластичности.

$$K_1 = A + B\left\{1 - \left[1 + \exp\left(\frac{\left(T + D\ln\left(2^{\frac{1}{E}} - 1\right) - C\right)}{D}\right)\right]^{-E}\right\}. \quad (5)$$

В этом выражении коэффициенты A, B, C, D, E зависят от заданного уровня коэффициента пластичности. В таблице 1 приведены значения данных коэффициентов.

Таблица 1. Значения коэффициентов A, B, C, D, E

μ	1.5	2	4	8
A	1.0008	1.0000	1.0000	1.0123
B	-0.2509	-0.3829	-0.5855	-0.7190
C	0.1150	0.1199	0.1280	0.1183
D	0.0106	0.0005	0.0005	0.0024
E	0.0947	0.0029	0.0031	0.0136

О критериях равенства максимальных перемещений и равенства энергий

Как уже отмечалось ранее, во многих зарубежных публикациях представлены обоснования коэффициентов, аналогичных K_1. Большинство таких работ опираются на гипотезу профессора Н. Ньюмарка [21], основывающуюся на предположении о равенстве максимальных сейсмических перемещений упругих и упругопластических систем (рис. 5а) в диапазоне периодов T>0,5 с при одном и том же сейсмическом воздействии и при равных начальных собственных частотах. В диапазоне периодов 0,1-0,5 с, предлагается использовать правило равенства энергий упругой и упругопластической систем (рис.5 б). При T<0,1 с рекомендуется принимать коэффициент редукции равным 1. Таким образом, по Ньюмарку:

$$R_y = \begin{cases} 1 & T < 0{,}1\text{c} \\ \sqrt{(2\mu - 1)} & T = 0{,}1\text{-}0{,}5\text{c} \\ \mu & T > 0{,}5\text{c} \end{cases}. \quad (6)$$

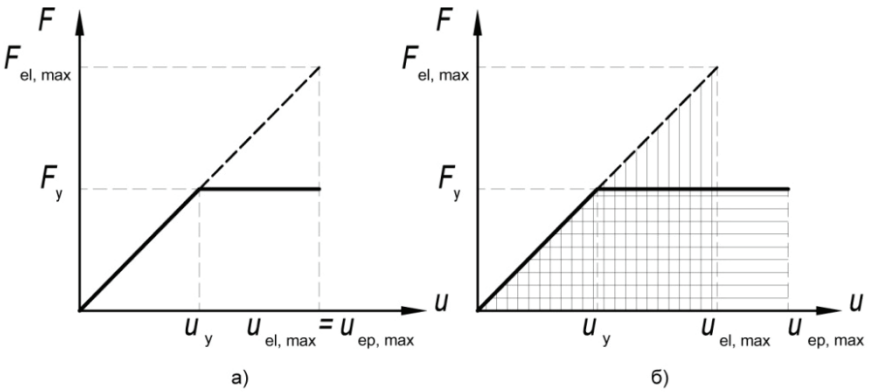

Рисунок 16. Зависимость между горизонтальной сейсмической силой *F* и горизонтальным перемещением *u* системы: а) критерий равенства максимальных перемещений; б) критерий равенства энергий

Ниже показаны результаты анализа вышеизложенных критериев. На рис. 6-8 приведены отношения: а) энергии упругопластической системы к энергии упругой системы «$E_{упр-пл}/E_{упр}$» и

б) максимальных сейсмических перемещений упругих и упругопластических систем «$x_{упр-пл}/x_{упр}$» в зависимости от T и A_{max}/V_{max}.

Как видно из диаграмм (рис.6-8), на величины $E_{упр-пл}/E_{упр}$ и $x_{упр-пл}/x_{упр}$ оказывает большое влияние значение коэффициента пластичности μ. Таким образом при малых его значениях, μ=1,5; 2, в периодом диапазоне от 0,2 до 2 с значения таких отношений можно принять равным 1 независимо от параметра A_{max}/V_{max}. В интервале от 0,03 до 0,2 с, $E_{упр-пл}/E_{упр} \approx 3$, $x_{упр-пл}/x_{упр} \approx 2$.

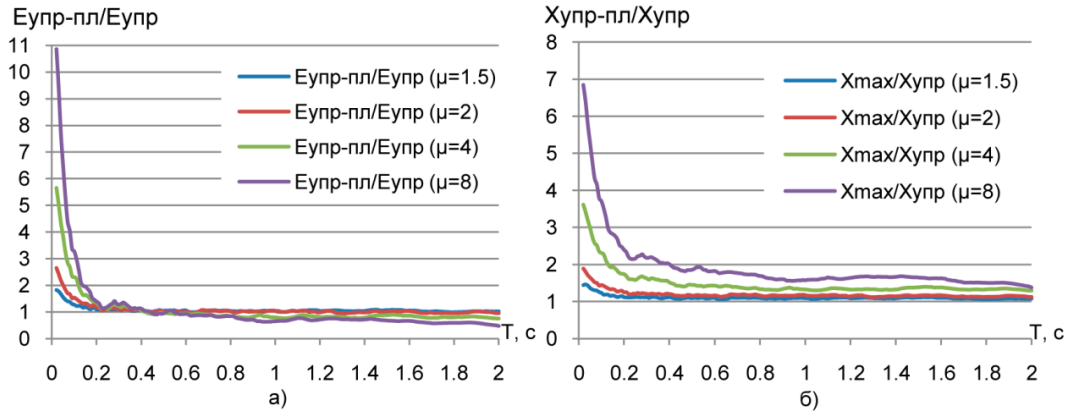

Рисунок 17. Отношения: а) энергии упругопластической системы к энергии упругой системы; б) максимального перемещения упругопластической системы к максимальному перемещению упругой системы при A_{max}/V_{max}>1,2

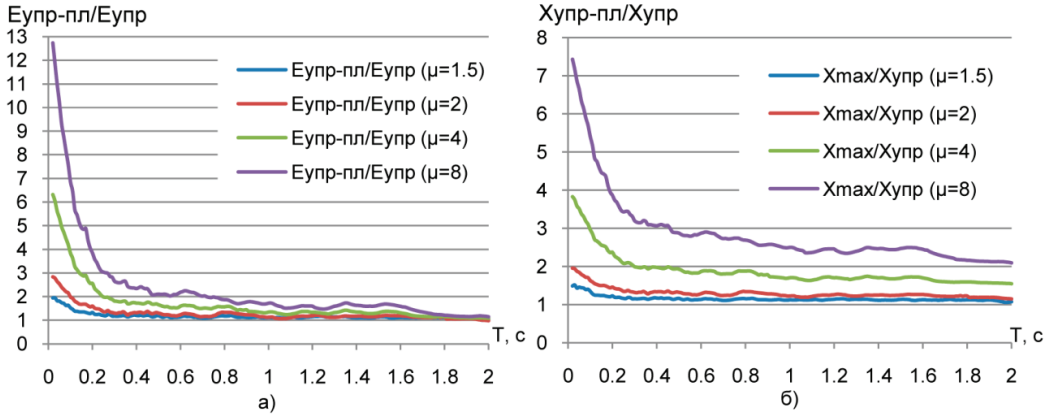

Рисунок 18. Отношения: а) энергии упругопластической системы к энергии упругой системы; б) максимального перемещения упругопластической системы к максимальному перемещению упругой системы при A_{max}/V_{max}<0,8

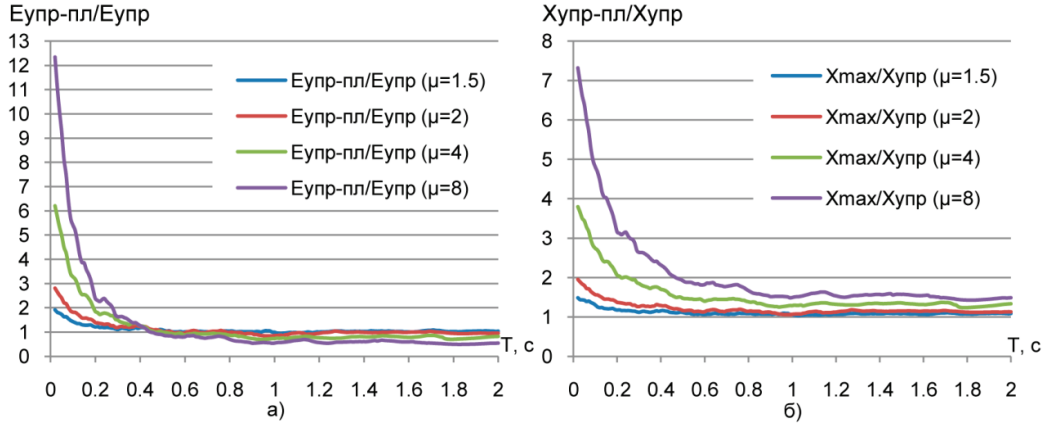

Рисунок 19. Отношения: а) энергии упругопластической системы к энергии упругой системы; б) максимального перемещения упругопластической системы к максимальному перемещению упругой системы при 0,8<A_{max}/V_{max}<1,2

С увеличением значения коэффициента пластичности «μ» отношения $E_{упр-пл}/E_{упр}$, $x_{упр-пл}/x_{упр}$ очень сильно зависят от параметра A_{max}/V_{max}. При $A_{max}/V_{max}>1,2$, в интервале от 0,2 до 2с, $E_{упр-пл}/E_{упр} \approx 1$. При T<0,2с, $E_{упр-пл}/E_{упр}$ растет до 6 (μ=4) и 11 (μ=8). При μ=4 отношение $x_{упр-пл}/x_{упр} \approx 1,5$ в интервале от 0,2 до 2с. При T<0,2с, $x_{упр-пл}/x_{упр}$ увеличивается до 3,5. При μ=8 отношение $x_{упр-пл}/x_{упр} \approx 1,75$ в интервале от 0,6 до 2с. При 0,2<T<0,6с, $x_{упр-пл}/x_{упр} \approx 2$. При T<0,2с, $x_{упр-пл}/x_{упр}$ увеличивается до 7.

Примерно же такие значения достигают $E_{упр-пл}/E_{упр}$, $x_{упр-пл}/x_{упр}$ при $0,8<A_{max}/V_{max}<1,2$ и $E_{упр-пл}/E_{упр}$ при $A_{max}/V_{max}<0,8$ (рис.8 и 7а). При $A_{max}/V_{max}<0,8$ и μ=4 отношение $x_{упр-пл}/x_{упр} \approx 1,5$ в интервале от 0,8 до 2 с; $x_{упр-пл}/x_{упр} \approx 2$ в интервале от 0,2 до 0,8 с. При $A_{max}/V_{max}<0,8$ и μ=8 отношение $x_{упр-пл}/x_{упр} \approx 2,5$ в интервале от 0,8 до 2 с; $x_{упр-пл}/x_{упр} \approx 3$ в интервале от 0,2 до 0,8 с.

Анализ диаграмм показывает, что в ряде случаев указанные критерии не оправдываются. Предложения по вычислению K_1 не соответствуют предлагаемым критериям равенства энергий и равенства максимальных перемещений (табл. 2).

Таблица 2. Соответствие критериев

$A_{max}/V_{max}>1,2$	**$E_{упр-пл}/E_{упр}$**			**$x_{упр-пл}/x_{упр}$**		
T, с / μ	0-0.2	0.2-0.4	0.4-2	0-0.2	0.2-0.4	0.4-2
1.5	Не соот.	соот.	соот.	Не соот.	соот.	соот.
2	Не соот.	соот.	соот.	Не соот.	соот.	соот.
4	Не соот.	соот.	соот.	Не соот.	Не соот.	Не соот.
8	Не соот.	соот.	соот.	Не соот.	Не соот.	Не соот.
$0,8<A_{max}/V_{max}<1,2$	**$E_{упр-пл}/E_{упр}$**			**$x_{упр-пл}/x_{упр}$**		
T, с / μ	0-0.2	0.2-0.4	0.4-2	0-0.2	0.2-0.4	0.4-2
1.5	Не соот.	Не соот.	соот.	Не соот.	соот.	соот.
2	Не соот.	Не соот.	соот.	Не соот.	соот.	соот.
4	Не соот.	Не соот.	соот.	Не соот.	Не соот.	Не соот.
8	Не соот.	Не соот.	соот.	Не соот.	Не соот.	Не соот.
$A_{max}/V_{max}<0,8$	**$E_{упр-пл}/E_{упр}$**			**$x_{упр-пл}/x_{упр}$**		
T, с / μ	0-0.2	0.2-0.4	0.4-2	0-0.2	0.2-0.4	0.4-2
1.5	Не соот.	соот.	соот.	Не соот.	соот.	соот.
2	Не соот.	соот.	соот.	Не соот.	соот.	соот.
4	Не соот.	Не соот.	Не соот.	Не соот.	Не соот.	Не соот.
8	Не соот.	Не соот.	Не соот.	Не соот.	Не соот.	Не соот.

Заключение

На основе анализа полученных результатов можно сделать вывод о том, что предлагаемая выше формула (5) позволяет выбрать K_1 таким образом, чтобы обеспечились заданные значения коэффициента пластичности μ.

Формулы (6), предложенные проф. Ньюмарком Н., при больших значениях коэффициента μ не обеспечивают выполнения критериев равенства энергий и равенства максимальных перемещений (табл. 2).

Литература

1. Fardis M. N. Code developments in earthquake engineering. 12th European Conference on Earthquake. London: Elsevier Science, 2002. Paper reference 845.
2. Mazzolani F. M., Piluso V. Theory and Design of Seismic Resistant Steel Frames. London: E & FN Spon Press, 1996. 498 p.
3. Рутман Ю. Л., Симборт Э. Анализ коэффициента пластичности с целью рационального выбора коэффициента редукции нагрузок K_1 // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2011. №4. С. 21-25.
4. Scarlat A. S. Approximate Methods in Structural Seismic Design. India, Madras: Thompson Press, 1996. 293 p.
5. Daza-Duarte L. G. Nuevo enfoque para determinar el factor de modificacion de respuesta // Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. 2003. Vol 3, № 1. С. 33-48.
6. Дикович И. Л. Динамика упруго-пластических балок. Л. : Судпромгиз, 1962. 292 с.
7. Рутман Ю. Л., Симборт Э. Выбор коэффициента редукции сейсмических нагрузок на основе анализа пластического ресурса конструкции // Вестник гражданских инженеров. 2011. № (2)27. С. 78-81.
8. Симборт Э. Сравнение динамических упругопластических расчетов, выполненных по одностепенной модели и по модели со многими степенями свободы // Инженерно-строительный журнал. 2011. №6(24). С. 23-27.
9. Москвитин В. В. Пластичность при переменных нагружениях. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1965. 263 с.
10. Рутман Ю. Л. Метод псевдожесткостей для решения задач о предельном равновесии жесткопластических конструкций. СПб.: 1998. 51 с.
11. Жарницкий В. И., Голда Ю. Л., Курнавина С. О. Оценка сейсмостойкости здания и повреждений его конструкций на основе динамического расчета с учетом упругопластических деформаций материалов // Сейсмостойкое строительство. 1999. № 4. С. 7–8.
12. Мирсаяпов И. Т., Нуриева Д. М. Расчет многоэтажных каркасных зданий на сейсмические воздействия с учетом физически нелинейного поведения // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2003. №1. С. 7–14.
13. Болотин В. В., Радин В. П., Чирков В. П. Исследование поведения зданий и сооружений со снижением жесткости при сейсмических воздействиях // Изв. Вузов. 2003. №7. С. 6–10.
14. Немчинов Ю. И., Марьенков Н. Г., Бабик К. Н. Применение метода спектра несущей способности при расчетах сооружений на сейсмические воздействия с учетом нелинейного деформирования // Будівельні конструкції: зб. наук. праць. К.: ДП НДІБК, 2005. Вип. 63. С. 11-19.
15. Chopra A. K. Dynamic of structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering. New Jersey: Prentice-Hall, 2006. 794 p.
16. Chopra A. K., Goel R. K. Capacity-Demand-Diagram Methods Based on Inelastic Design Spectrum // Earthquake Spectra. 1999. Vol. 15. №4. 637-656 p.
17. Немчинов Ю. И., Марьенков Н. Г., Хавкин А. К., Бабик К. Н. К Обоснованию нормативной методики проектирования сейсмостойких конструкций заданной категории пластичности с учетом требования Еврокода 8 [Электронный ресурс] // IX Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием). Доклады. 2011. URL: http://www.9rncee.ru (Дата обращения: 03.02.2012).
18. Naumoski N., Tso W. K., Heidebrecht A. C. A selection of representative strong motion earthquake records having different A/V ratios. Hamilton: McMaster University, 1988. 60 p.
19. Center for Engineering Strong Motion Data (CESMD). [Электронный ресурс]. URL: http://www.strongmotioncenter.org. (Дата обращения 15.01.2012).
20. The European Strong Motion Database (ESD). [Электронный ресурс]. URL: http://www.isesd.hi.is/ESD_Local/frameset.htm. (Дата обращения 17.11.2010).
21. Ньюмрак Н., Розенблюэт Э. Основы сейсмостойкого строительства. М. : Стройиздат, 1980. 173 с.

** Энрике Херардо Симборт Себальос, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: +7(906)275-33-17; эл. почта: e-simbort@mail.ru

Selection procedure of seismic-load reduction factor K_1 at a given level of ductility factor μ

E. Simbort
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russia
+7(906)275-33-17; e-mail: e-simbort@mail.ru

Key words

seismic-resistant design; nonlinear single degree of freedom model; reduction factor K_1; ductility factor

Abstract

At the present time for providing earthquake resistance of buildings and structures, the multilevel design approach is applied. According to this approach seismic loads corresponding to the level of the maximum design earthquake must be perceived by building through the plastic resource of structures, and at the same time the complete collapse of buildings or parts of it must be prevented. In the standards of foreign countries the work of the construction outside the elasticity limit is taken into account by the reduction factor. The load reduction factor selection consists in reducing the seismic loads, depending on the maximum (allowed) level of residual deformations in structures due to earthquakes. The maximum residual deformations are taken into account by ductility factor μ.

In the present research a nonlinear system with single degree of freedom is used for analyzing the behavior of structures under elastoplastic deformation. The author obtained the relationship between plasticity factor and yield strength of structure characterized by the reduction factor K_1. The statistical analysis of data was also carried out in order to estimate the values of the reduction factor K_1. Such approaches have already been practiced, but such relations were obtained only for simple loadings. In this paper, these dependences were obtained for more complicated, earthquake loadings.

References

1. Fardis M. N. Code developments in earthquake engineering. *12th European Conference on Earthquake*. London: Elsevier Science, 2002. Paper reference 845.
2. Mazzolani F. M., Piluso V. *Theory and Design of Seismic Resistant Steel Frames*. London: E & FN Spon Press, 1996. 498 p.
3. Rutman Yu. L., Simbort E. *Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy* [Earthquake engineering. Security of constructions]. 2011. No.4. Pp. 21-25.
4. Scarlat A. S. *Approximate Methods in Structural Seismic Design*. India, Madras: Thompson Press, 1996. 293 p.
5. Daza-Duarte L. G. Nuevo enfoque para determinar el factor de modificacion de respuesta. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil.* 2003. Vol 3, No. 1. Pp. 33-48.
6. Dikovich I. L. *Dinamika uprugo-plasticheskikh balok* [Dynamics of elastic-plastic beams]. Leningrad: Sudpromgiz, 1962. 292 p. (rus)
7. Rutman Yu. L., Simbort E. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of civil engineers]. 2011. No. (2)27. Pp. 78-81. (rus)
8. Simbort E. *Magazine of civil engineering*. 2011. No. 6(24). Pp. 23-27. (rus)
9. Moskvitin V. V. *Plastichnost pri peremennykh nagruzheniyakh* [Plasticity at variable loadings]. Moscow: Izd-vo Mosk. Un-ta, 1965. 263 p. (rus)
10. Rutman Yu. L. *Metod psevdozhestkostey dlya resheniya zadach o predelnom ravnovesii zhestkoplasticheskikh konstruktsiy* [Pseudotaut method for solving the rigid structures limiting equilibrium problems]. Saint-Petersburg: 1998. 51 p. (rus)
11. Zharnitskiy V. I., Golda Yu. L., Kurnavina S. O. *Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy* [Earthquake engineering. Security of constructions] 1999. No. 4. Pp. 7–8. (rus)
12. Mirsayapov I. T., Nuriyeva D. M. *Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy* [Earthquake engineering. Security of constructions]. 2003. No. 1. Pp. 7–14. (rus)
13. Bolotin V. V., Radin V. P., Chirkov V. P. *Izvestiya Vuzov* [Proceedings of universities]. 2003. No. 7. Pp. 6-10. (rus)

14. Nemchinov Yu. I., Maryenkov N. G., Babik K. N. *Budivelni konstruktsiї: zb. nauk. prats.* Kiev: DP NDIBK, 2005. Vip. 63. Pp. 11-19. (rus)

15. Chopra A. K. Dynamic of structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering. New Jersey: Prentice-Hall, 2006. 794 p.

16. Chopra A. K., Goel R. K. Capacity-Demand-Diagram Methods Based on Inelastic Design Spectrum. Earthquake Spectra. 1999. Vol. 15. No. 4. Pp. 637-656.

17. Nemchinov Yu. I., Maryenkov N. G., Khavkin A. K., Babik K. N. Doklady IX Rossiyskaya natsionalnaya konferentsiya po seysmostoykomu stroitelstvu i seysmicheskomu rayonirovaniyu (s mezhdunarodnym uchastiyem) [Reports of the IX Russian National Conference on earthquake engineering and seismic zoning (with international participation)]. 2011. [Electronic recourse]. URL: http://www.9rncee.ru (rus)

18. Naumoski N., Tso W. K., Heidebrecht A. C. *A selection of representative strong motion earthquake records having different A/V ratios*. Hamilton: McMaster University, 1988. 60 p.

19. *Center for Engineering Strong Motion Data* (CESMD). [Electronic recourse]. URL: http://www.strongmotioncenter.org. (Date of request: 15.01.2011).

20. *The European Strong Motion Database* (ESD). [Electronic recourse]. URL: http://www.isesd.hi.is/ESD_Local/frameset.htm. (Date of request: 17.11.2010).

21. Nyumrak N., Rozenblyuet E. *Osnovy seysmostoykogo stroitelstva* [Fundamentals of Earthquake Engineering]. Moscow: Stroyizdat, 1980. 173 p.

Full text of this article in Russian: pp. 44-52