

Оценка эффективности параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции

Аспирант Н.В. Ковалева*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;
д.т.н., профессор Ю.Л. Рутман,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет

Ключевые слова: демпфирование; пластические демпферы; силовая характеристика; динамический анализ; сейсмоизоляция

Введение

При проектировании систем сейсмоизоляции одним из ключевых и сложнейших вопросов является выбор оптимальных параметров демпфирования [1], [2], [3], [4]. Часто этот выбор связан со сравнением большого числа параметров демпфирующих элементов. Если демпфирование незначительно, то возможно (при определенном частотном составе внешнего воздействия) появление квазирезонансных процессов, которые приводят к исчезновению сейсмоизоляционного эффекта. Если силы демпфирования велики, это влечет за собой заметное увеличение нагрузок на защищаемый объект, что также приводит к снижению сейсмоизоляционного эффекта.

Часто в качестве демпфирующих элементов используют пластические демпферы, например, пластически деформируемые стержни [5], [6], [7], [8]. В этом случае для подбора параметров демпфирования весьма эффективной была бы методика аналитического расчета силовых характеристик пластических демпферов. Ниже изложена такая методика и показано ее применение для расчета пластических демпферов, выполненных в виде криволинейных стержней круглого сечения. Такие демпферы применены в конструкции маятниковой сейсмоизолирующей опоры – рис. 1.

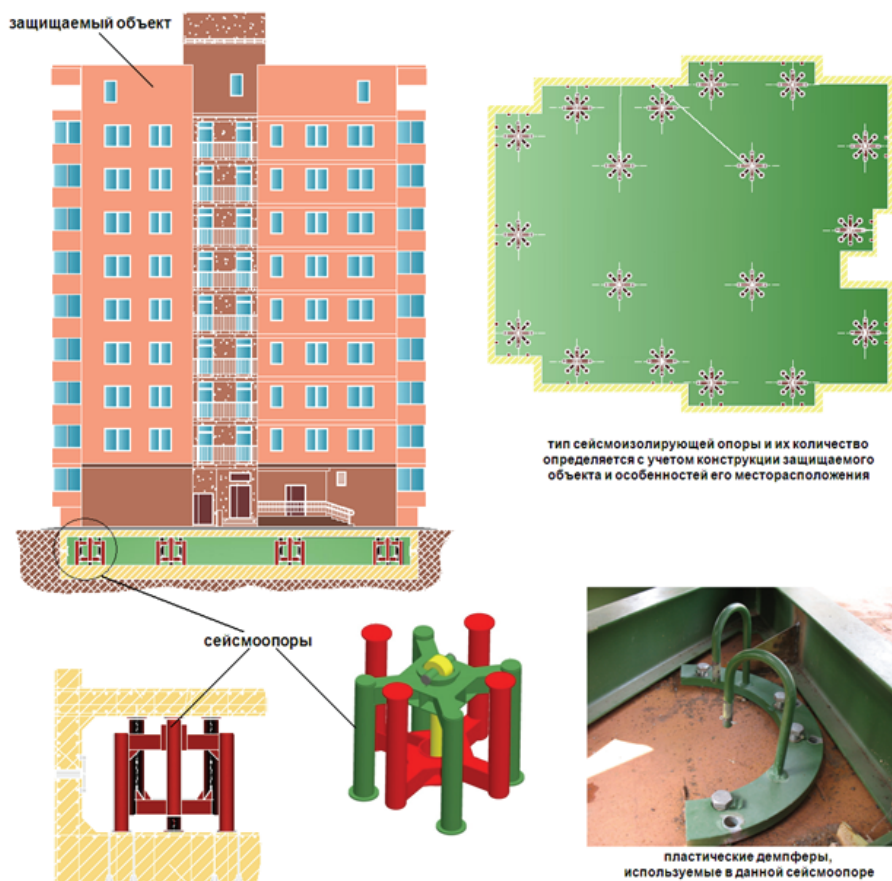


Рисунок 1. Система сейсмоизоляции маятникового типа

Аналитическое определение силовых характеристик пластического демпфера

Для динамического анализа сейсмоопор, в составе которых имеются пластические демпферы, необходимо определить их нелинейную силовую характеристику.

Общая постановка задачи

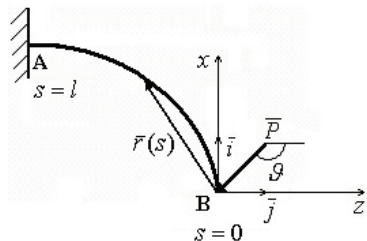


Рисунок 2. Криволинейный балочный элемент

Рассмотрим пластически деформируемый криволинейный балочный элемент, находящийся в условиях плоского изгиба – рис. 2:

s – текущая длина оси балки;

$\bar{\chi}(s)$ – вектор изменения кривизны в сечении с координатой s ;

$\bar{r} = x(s)\bar{i} + z(s)\bar{k}$ – радиус-векторы точек на оси балки.

Как показано в [9], силовая характеристика модели, представленной на рис. 2, может быть задана в параметрической форме следующим образом:

$$\bar{U}_B = \int_0^{\chi_A} \bar{r}[\phi(f(\chi))] \times \bar{\chi} \cdot \frac{f'_{\chi}}{g'_s[\phi(f(\chi))]} d\chi. \quad (1)$$

$$P = \frac{f(\chi_A)}{g(s_A)}. \quad (2)$$

Параметром является величина χ_A . Для вычисления силовой диаграммы надо задать очертания балки $x(s)$, $z(s)$, направление силы $\bar{P}$ (угол θ) и зависимость момента от изменения кривизны $f(\chi)$. Ряд таких зависимостей дан в [10]. В случае прямолинейной балки все вышеприведенные выкладки можно довести до конца в аналитическом виде, что было сделано в [9]. Ниже в пункте 2.2 и 2.3 приведены окончательные результаты [9].

Прямолинейная балка

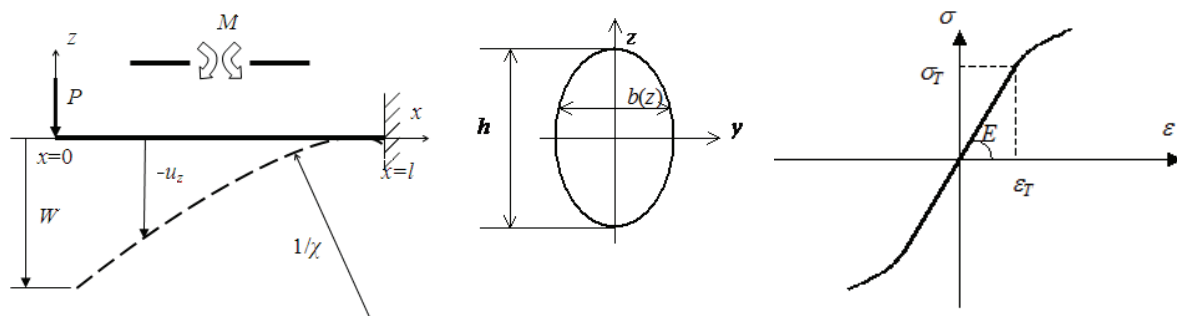


Рисунок 3. Нагруженная консоль и ее двояко-симметричное сечение:

x – продольная координата ($0 \leq x \leq l$); z – поперечная

координата ($-\frac{h}{2} \leq z \leq \frac{h}{2}$); y – боковая координата

($-\frac{b(z)}{2} \leq y \leq \frac{b(z)}{2}$); l – длина консоли; h – высота

сечения; $b(z)$ – ширина сечения; P – краевая сила;

$M(x)$ – изгибающий момент; $\chi(x)$ – кривизна в деформированном состоянии; $u_z(x)$ – поперечное

перемещение; $W \equiv -u_z(0)$ – прогиб под силой

Рисунок 4. Упруго-пластическая диаграмма материала:

E – модуль упругости;

σ_T – предел текучести;

$\epsilon_T \equiv \frac{\sigma_T}{E}$ – деформация

текучести. Диаграмма считается строго нечетной, $\sigma(-\epsilon) = -\sigma(\epsilon)$

Введем безразмерные параметры:

$$p \equiv \frac{2Pl}{\sigma_T b_0 h^2}, \quad w \equiv \frac{Wh}{\varepsilon_T l^2}, \quad \frac{\chi z}{\varepsilon_T} = \tau_1, \quad \frac{\chi h}{2\varepsilon_T} = \tau, \quad \tau|_{x=l} = t,$$

а также интегральную функцию закона состояния с учетом изменения ширины:

$$\Phi(t) \equiv \frac{1}{t^2} \int_0^t f(\tau) \beta\left(\frac{\tau}{t}\right) t d\tau.$$

В результате решение задачи определения силовой диаграммы сводится к вычислению параметрических зависимостей $p(t)$, $w(t)$:

$$p(t) = \Phi(t), \quad w(t) = t - \frac{1}{\Phi^2(t)} \int_0^t \Phi^2(\tau) d\tau. \quad (3)$$

Параметрические зависимости (3) в любом стандартном вычислительном математическом пакете легко переводятся в явные графические зависимости $p(w)$ или $w(p)$.

Аналитическое определение силовой диаграммы для прямолинейной балки

Соотношения (3) годятся для любого описания диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ ». Для билинейной аппроксимации этой диаграммы в случае прямолинейной балки параметрические интегралы (3) дают безразмерные зависимости силы $p(t)$ и прогиба $w(t)$ от некоторого параметра t в алгебраической форме (рис. 5):

$$p(t) = \frac{(3t^2 - 1) + a(2t + 1)(t - 1)^2}{6t^2}, \quad a = \frac{H}{E},$$

$$w(t) = \frac{2t(4a^2t^6 + 9a(1-a)t^5 + (20 - 21a + 6a \ln t)(1-a)t^3 - (1-a)^2(18t^2 - 2))}{3(4a^2t^6 + 12a(1-a)t^5 + (1-a)^2(9t^4 - 6t^2 + 1) - 4a(1-a)t^3)}. \quad (4)$$

При $a = 0$ параметрические выражения соответствуют упруго-пластической диаграмме без упрочнения (диаграмме Прандтля).

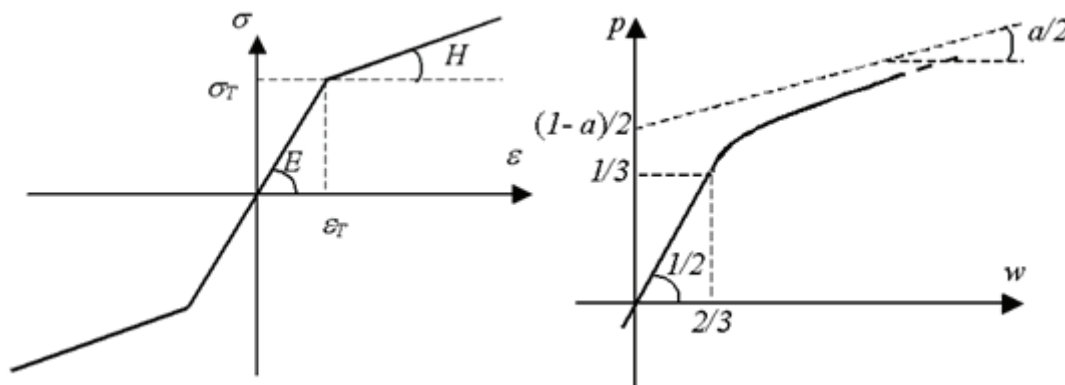


Рисунок 5. Характеристика материала и консоли для упруго-пластической диаграммы с линейным упрочнением

Аналитическое определение силовой диаграммы в случае криволинейной балки в форме четверти окружности

Далее сделано обобщение аналитических формул (1), (2) для криволинейных стержней, имеющих конфигурацию четверти окружности (рис. 6). Именно такие элементы совместно с прямолинейными конструктивно используются при проектировании пластических демпферов.

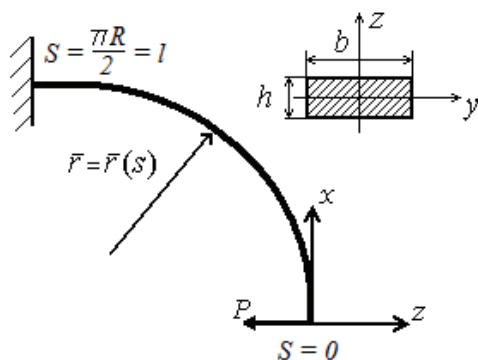


Рисунок 6. Нагруженная консоль прямоугольного сечения в форме четверти окружности

Для таких элементов перемещения будут происходить по двум направлениям:

w – прогиб под силой;

v – продольное перемещение под силой.

Для прямолинейной балки определение силовой диаграммы возможно свести к алгебраическому вычислению параметрических зависимостей силы $p(t)$ и прогиба $w(t)$. В случае непрямолинейной балки сведение уравнений для силы и прогиба к параметрическим зависимостям в общем виде достаточно громоздко и сложно. Поэтому ограничимся переходом для всех уравнений к безразмерному виду и составим выражение для силы в алгебраическом виде, а выражения для прогибов в интегральной форме.

$$\begin{aligned}
 p(t) &= \frac{at}{3} + \frac{1-a}{2} \left(1 - \frac{1}{3t^2} \right), \\
 w(t) &= \frac{2}{p^2} \int_1^t \frac{\left(\frac{a\tau}{3} + \frac{1-a}{2} \left(1 - \frac{1}{3\tau^2} \right) \right) \left(\frac{a\tau}{3} + \frac{1-a}{3\tau^2} \right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{\frac{a\tau}{3} + \frac{1-a}{2} \left(1 - \frac{1}{3\tau^2} \right)}{\frac{p}{\sin \theta_0}} \right)^2}} d\tau + w_p, \\
 w_p &\equiv \frac{3p}{\sin^3 \theta_0} \left(\arcsin \left(\frac{\sin \theta_0}{3p} \right) - \frac{1}{2} \sin 2 \left(\arcsin \left(\frac{\sin \theta_0}{3p} \right) \right) \right), \\
 u(t) &= \frac{2}{p \sin \theta_0} \left[\int_1^t \frac{\left(\frac{a\tau}{3} + \frac{1-a}{3\tau^2} \right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{\frac{a\tau}{3} + \frac{1-a}{2} \left(1 - \frac{1}{3\tau^2} \right)}{\frac{p}{\sin \theta_0}} \right)^2}} d\tau - \int_1^t \left(\frac{a\tau}{3} + \frac{1-a}{3\tau^2} \right) d\tau \right] + u_p, \\
 u_p &\equiv \frac{3p}{\sin^3 \theta_0} \left(\cos \left(\arcsin \left(\frac{\sin \theta_0}{3p} \right) \right) - 1 \right)^2.
 \end{aligned} \tag{5}$$

При предельном переходе ($\theta_0 \rightarrow \pi \Rightarrow \sin \theta_0 \rightarrow 0$) выражения для силы и прогиба (5) дают решение для прямолинейной консольной балки (3), а выражение для продольного перемещения $u(t) \rightarrow 0$.

Использование этих зависимостей позволяет варьировать параметры силовой характеристики и вычислять ее для различных значений длины, поперечных сечений и материалов стержней, входящих в состав пластического демпфера.

Применение полученных результатов к исследованию движения сейсмоизолируемого объекта

В модели с одной степенью свободы поведение системы, расположенной на маятниковых опорах, описывается уравнением [11]:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + (g - \ddot{y}_B(t)) \cdot \frac{x}{l} + f(x, \dot{x}) = -\ddot{y}_T(t), \quad (6)$$

где x – горизонтальное смещение защищаемого объекта относительно движущегося фундамента;

$g = 9.801 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

$l = 1.5 \text{ м}$ – длина маятника в опоре;

где $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$; $\zeta = \frac{\alpha}{2m\omega}$;

α – параметр внутреннего конструкционного демпфирования;

$\ddot{y}_T(t)$ – горизонтальное ускорение фундамента защищаемого объекта при землетрясении;

$\ddot{y}_B(t)$ – вертикальное ускорение фундамента защищаемого объекта при землетрясении;

$f(x, \dot{x}) = \frac{P(x, \dot{x})}{M}$ – приведенное к единичной массе усилие сопротивления пластического демпфера;

M – масса защищаемого объекта;

$P(x, \dot{x})$ – силовая характеристика «сила – перемещение».

Как правило, эта характеристика аппроксимируется билинейной диаграммой с упругой разгрузкой (рис. 7). Существенной проблемой является определение $C_{нл}$. Приведенная выше методика определения силовых характеристик полностью описывает поведение кривой «сила-перемещение» как в упругой, так и в упруго-пластической зоне.

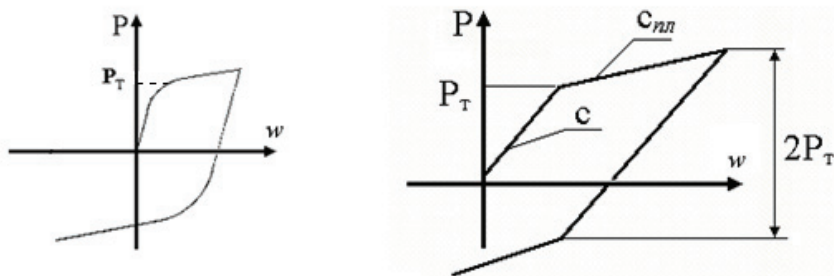


Рисунок 7. Нелинейная силовая характеристика пластического демпфера и ее билинейная аппроксимация

Параметры билинейной аппроксимации силовой характеристики пластического демпфера:

$$f_T = \frac{P_T}{m_0}, \quad \omega = \sqrt{\frac{C}{m_0}}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{C_{нл}}{m_0}}, \quad m_0 \text{ – грузоподъемность сейсмоизолирующей опоры.}$$

Выбор рациональных значений демпфирования для различных воздействий можно производить по минимаксному критерию: искать минимальные нагрузки на сооружение при наихудшем сейсмическом воздействии. Такой подход был применен для выбора параметров пластического демпфера в сейсмоизолирующей опоре маятникового типа [10]. Был проведен спектральный анализ 100 различных воздействий, соответствующих 9-балльному землетрясению. После чего были выбраны два воздействия, наиболее опасные по амплитудному составу в полосе 0.25 – 0.5 Гц. Их акселерограммы показаны на рис. 8.

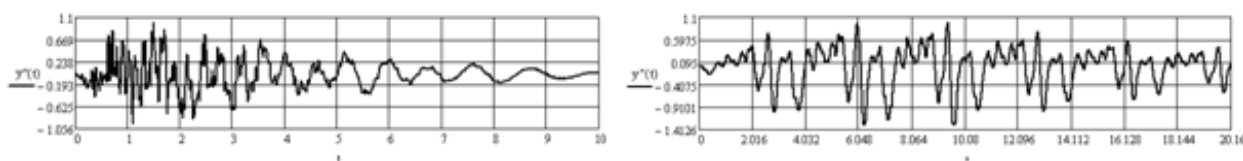


Рисунок 8. Сейсмические воздействия № 1 и 2

Далее при поиске параметров демпфирования этих опор воздействия считались заданными, также заданной считалась длина маятника сейсмоизолирующей опоры. Ограничениями являлись конструктивные соображения: максимальное относительное смещение не должно было превосходить 350 мм. Варьировались различные значения диаметров стержней, входящих в

Ковалева Н.В., Рутман Ю.Л. Оценка эффективности параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции

сейсмоизолирующую опору, и их количество при заданной длине стержней и выбранном материале для поиска параметров соответствующих минимизации нагрузок на защищаемом объекте. Для опор маятникового типа было рассмотрено более 30 вариантов силовых характеристик. Наиболее приемлемыми оказались 3 варианта силовых характеристик пластического демпфера, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Параметры силовых характеристик пластического демпфера

№ п/п	Кол-во стержней	P_T , кН	C , кН/м	$C_{пл}$, кН/м	Грузо-подъемность, тс	f_T , м/с ²	ω , 1/с	ω_0 , 1/с
1	38	1000	$84 \cdot 10^3$	1980	1500	0.670	7.8	1.15
2	30	790	$66 \cdot 10^3$	1563	1000	0.790	8.1	1.25
3	24	630	$53 \cdot 10^3$	1250	700	0.905	8.7	1.35

Результаты решения уравнения (1) приведены в таблице 2. На рис. 9 представлен пример работы сейсмоизолирующей опоры.

Таблица 2. Параметры движения защищаемого объекта с учетом вертикального ускорения фундамента

№ силовой характеристики	воздействие № 1		воздействия № 2	
	$x_{\max}$, м	$\ddot{x}_{\max}$, м/с ²	$x_{\max}$, м	$\ddot{x}_{\max}$, м/с ²
1	0.17	2.1	0.264	2.84
2	0.15	2.0	0.195	2.49
3	0.14	1.9	0.182	2.37

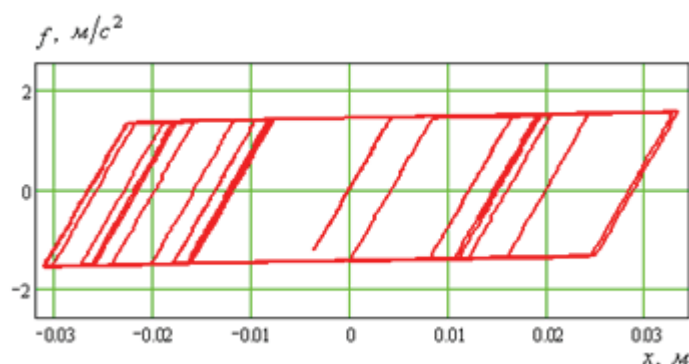


Рисунок 9. Силовая характеристика сейсмоизолирующей опоры при сейсмическом воздействии

Анализ результатов показал эффективность работы выбранных пластических демпферов. Однако, помимо динамических параметров, представленных в таблице 2, также большое значение имеют параметры, определяющие работоспособность пластических демпферов. Таковыми являются максимальные деформации в стержнях и число циклов их нагружения – рис. 9. Деформации не должны превосходить ε_B (деформаций соответствующих σ_B). Определив перемещение из динамической задачи для одного цикла, из диаграммы рис. 8 находится размах во время цикла, далее определяется изменение кривизны, что является изменением деформации. Число циклов нагружения и размахи циклов должны быть таковы, чтобы не возникло разрушения от малоциклового усталости. Методика проверки на малоцикловую усталость применительно к рассматриваемой задаче изложена в [12], [13].

Другие применения полученных результатов

Предлагаемая в п. 2 методика была применена также для выбора параметров упруго-пластических вставок в галерейных переходах зданий сложной макроструктуры [14]. Методика позволила подобрать параметры упруго-пластических вставок, обеспечивающих необходимое демпфирование в условиях сейсмического воздействия. При этом вставки сохраняют упругую работу зданий сложной макроструктуры при воздействии ветровых и весовых нагрузок.

Заключение

Применение в качестве демпфирующих элементов пластических демпферов значительно повышает эффективность работы сейсмоизолирующих опор. Использование методики, представленной в статье, позволяет определить наиболее рациональное демпфирование для тех сейсмоизолирующих опор, в которых демпфирующими элементами являются пластически деформируемые стержни. Получение силовых характеристик таких элементов возможно в виде безразмерных зависимостей. Следует отметить удобство использования безразмерного графика для определения этих характеристик, так как применение мощных программных комплексов типа ANSYS требует в качестве исходных данных конкретных размеров стержней, и получение характеристики оказывается чрезвычайно трудоемкой задачей. Применение предложенных зависимостей существенно сокращает трудоемкость анализа.

Литература

1. Смирнов В. И. Демпфирование как элемент сейсмозащиты сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2007. № 4. С. 44-47.
2. Уздин А. М., Пейчев М. М. К вопросу учета демпфирования в рамках СНиП «Строительство в сейсмических районах» // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. № 3. 2001. С. 37-39.
3. Давыдова Г. В. Статистический метод расчета систем сейсмоизоляции зданий и сооружений. Диссертация на соискание учений степени кандидата технических наук. СПб. : СПбГПИС, 2010.
4. Арутюнян А. Р. Современные методы сейсмоизоляции зданий и сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 3(13). С. 56-60.
5. Infanti S., Castelliano M. G., Colato G. P., Chiarotto R. Seismic devices. Steel Hysteretic Dampers. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: http://www.fip-group.it/fip_ind_eng/prodotti.html (дата обращения 22.01.12)
6. Skinner R. I., Robinson W. H., McVerry G. H. An introduction to seismic isolation. New York: Wiley, 2003. 398 p.
7. Masahiko Higashino, Shin Okamoto. Response Control and Seismic Isolation of Buildings. New York: Taylor & Francis, 2006. 484 p.
8. Беляев В. С., Гуськов В. Д., Долбенков В. Г., Рутман Ю. Л. Устройства для сейсмоизоляции зданий, промышленных объектов и их оборудования // Вестник ИНЖЭКОНА. 2007. № 6(19). С. 114-121.
9. Ковалева Н. В., Скворцов В. Р., Рутман Ю. Л. Определение параметров силовой диаграммы пластически деформируемых элементов конструкции // Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов. Труды Двадцать второй международной конференции. СПб. : Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ. 2007. С. 220-225.
10. Дикович И. Л. Динамика упруго-пластических балок. Л. : Судпромгиз, 1962. 292 с.
11. 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.
12. Симборт С. Э., Рутман Ю. Л. Выбор коэффициента редукции сейсмических нагрузок на основе анализа пластического ресурса конструкции с учетом малоциклового усталости // Сейсмостойкое строительство и безопасность сооружений. 2011. № 5. С. 23-26.
13. Писаренко Г. С., Можаровский Н. С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. Справочное пособие. Киев : Наукова Думка, 1981. 496 с.
14. Голых О. В., Плетнев В. И., Рутман Ю. Л. Здания сложной макроструктуры с нелинейными сдвиговыми связями при экстремальных воздействиях. СПб. : Lap Lambert Academic Publishing, 2011. 101 с.

**Надежда Владимировна Ковалева, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: +7(911)835-55-52; эл. почта: Balloun@yandex.ru

Estimation of efficiency of damping parameters in seismic insulation systems

N.V. Kovaleva

State Marine Technical University of Saint-Petersburg, Saint-Petersburg, Russia

Yu.L. Rutman

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russia

+7(911)835-55-52; e-mail: Balloun@yandex.ru

Key words

damping; plastic dampers; force characteristic; dynamic analysis; seismic insulation

Abstract

In the design of seismic isolation systems, one of the key and most difficult issues is the damping optimal parameters choice. If the damping is negligible, it is possible (at a certain frequency of external influence) that quasi-resonant processes, which lead to the disappearance of seismic insulation effect, will emerge. If the damping forces are large, it entails a significant load increase on the protected object, which also reduces the effect of seismic insulation.

Development technique of plastic dampers analytic dependence «force-displacement» executed as linear or nonlinear quarter circle cores is presented in the research. These dependences are applied to choose rational parameters of pendular type of seismic insulation system damping.

References

1. Smirnov V. I. *Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy* [Earthquake engineering. Security of constructions]. 2007. No. 4. Pp. 44-47. (rus)
2. Uzdin A. M., Peychev M. M. *Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy* [Earthquake engineering. Security of constructions]. No. 3. 2001. Pp. 37-39. (rus)
3. Davydova G. V. *Statisticheskii metod rascheta sistem seysmoizolyatsii zdaniy i sooruzheniy*. Dissertatsiya na soiskaniye ucheniy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Statistical method for calculating seismic isolation systems of buildings. Thesis for the candidate of technical sciences degree]. Saint-Petersburg: SPbGPIS, 2010. (rus)
4. Arutyunyan A. R. *Magazine of civil engineering*. 2010. No. 3(13). Pp. 56-60. (rus)
5. Infanti S., Castelliano M. G., Colato G. P., Chiarotto R. *Seismic devices. Steel Hysteretic Dampers*. [Electronic resource]. System requirements: AdobeAcrobatReader. URL: http://www.fip-group.it/fip_ind_eng/prodotti.html (date of request: 22.01.12)
6. Skinner R. I., Robinson W. H., McVerry G. H. *An introduction to seismic isolation*. New York: Wiley, 2003. 398 p.
7. Masahiko Higashino, Shin Okamoto. *Response Control and Seismic Isolation of Buildings*. New York: Taylor & Francis, 2006. 484 p.
8. Belyayev V. S., Guskov V. D., Dolbenkov V. G., Rutman Yu. L. *Vestnik INZhEKONA* [Bulletin of INZhEKON]. 2007. No. 6(19). Pp. 114-121. (rus)
9. Kovaleva N. V., Skvortsov V. R., Rutman Yu. L. *Sbornik "Trudy Dvadsat vtoroy mezhdunarodnoy konferentsii"*. Matematicheskoye modelirovaniye v mekhanike sploshnykh sred. Metody granichnykh i konechnykh elementov [Proceedings of twenty second international conference. Mathematical modeling in continuum mechanics. Methods of boundary and finite elements]. Saint-Petersburg: NITs MORINTEKh. 2007. Pp. 220-225. (rus)
10. Dikovich I. L. *Dinamika uprugoplasticheskikh balok*. Leningrad: Sudpromgiz, 1962. 292 p. (rus)
11. Simbort E. *Magazine of civil engineering*. 2011. No. 6(24). Pp. 23-27. (rus)
12. Simbort S. E., Rutman Yu. L. *Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy* [Earthquake engineering. Security of constructions]. 2011. No. 5. Pp. 23-26. (rus)
13. Pisarenko G. S., Mozharovskiy N. S. *Uravneniya i krayevyye zadachi teorii plastichnosti i polzuchesti. Spravochnoye posobiye* [Equations and boundary problems of the plasticity and creep theory. Handbook]. Kiyev: Izd-vo Naukova Dumka, 1981. 496 p. (rus)
14. Golykh O. V., Pletnev V. I., Rutman Yu. L. *Zdaniya slozhnoy makrostruktury s nelineynymi sdvigovymi svyazami pri ekstremalnykh vozdeystviyakh* [Building with complex macrostructure with nonlinear shear connections under extreme conditions]. Saint-Petersburg: Lap Lambert Academic Publishing, 2011. 101 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 37-43

Kovaleva N.V., Rutman Yu.L. Estimation of efficiency of damping parameters in seismic insulation systems