

Учет малоциклового усталости при оптимизации параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции

Старший преподаватель Н.В. Ковалева,

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

Аннотация. В статье предложен алгоритм проектирования оптимальных параметров пластического демпфирования в системах сейсмоизоляции с учетом малоциклового усталости. Приведены все этапы определения пластического ресурса демпферных стержней, входящих в состав пластического демпфирования систем сейсмоизоляции маятникового типа.

Этапы расчета включают в себя: решение динамической задачи на нестационарные сейсмические воздействия различной балльности и продолжительности; определение числа циклов нагружения; распределение числа циклов нагружения с различным уровнем перемещений; переход от перемещений к максимальным деформациям; установление допускаемого числа циклов и пластического ресурса стержня по имеющимся критериям (формула Коффина – Менсона и правило Палмгрема – Майнера).

Также показано, что обеспечение оптимальных параметров пластического демпфирования осуществляется за счет изменения количества стержней в демпфере либо изменения геометрии стержня (длины, размеров сечения).

Ключевые слова: системы сейсмоизоляции маятникового типа; пластическое демпфирование; сейсмические воздействия; циклическое нагружение; малоцикловая усталость; пластический ресурс

Введение

Основной принцип защиты объектов от сейсмических воздействий основан на стремлении превратить систему защищаемый объект – сейсмоизоляция в низкочастотную. Вместе с тем необходимо обеспечить достаточно высокий уровень демпфирования, чтобы исключить резонансные явления при совпадении какой-либо частотной составляющей воздействия с частотой системы сейсмоизоляции. В качестве демпфирующих элементов могут быть использованы пластически деформируемые устройства. Например, в конструкции маятниковой опоры, разработанной ОАО «КБСМ» (Санкт-Петербург), пластические демпферы представляют собой консольные стержни [1–3] (рис. 1).

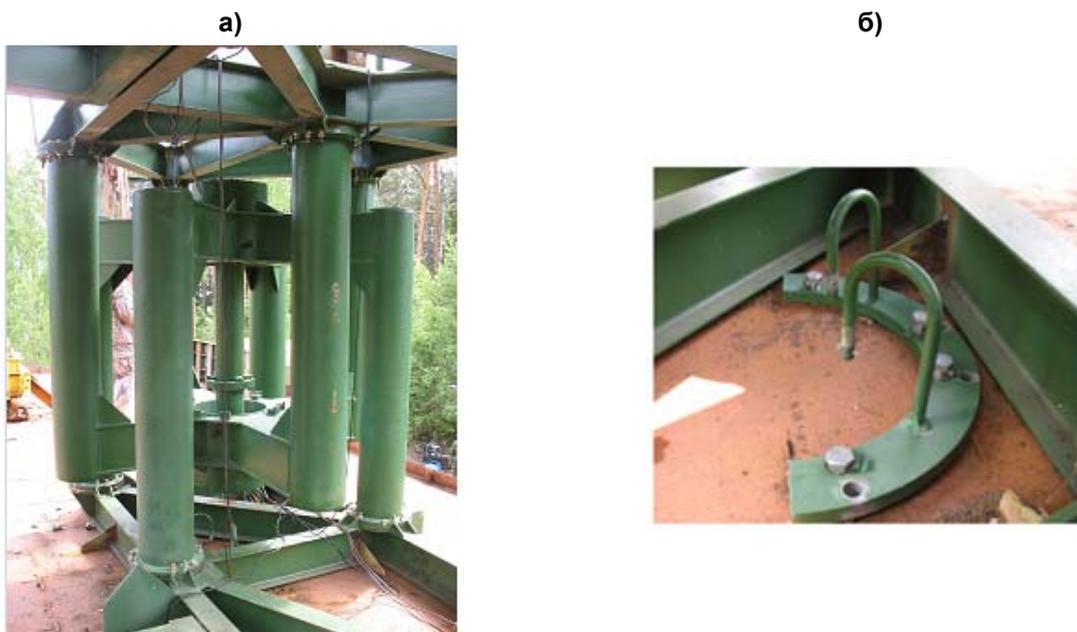


Рисунок 1. Конструкция сейсмоопоры, разработанной ОАО «КБСМ»: а) сейсмоопора маятникового типа; б) пластические демпферы, используемые в данной сейсмоопоре

Оптимальные параметры пластического демпфирования обеспечиваются за счет изменения количества стержней в демпфере либо изменения геометрии стрежня (длины, размеров сечения). Однако, помимо динамических параметров, необходимо обеспечить достаточную работоспособность пластического демпфера в условиях циклических нагружений, которые сопровождают сейсмические воздействия. Основные сведения о поведении и свойствах металлов при циклических нагружениях отражены в работах В.В. Москвитина [4], В.П. Когаева [5], Ю.А. Окопного [6]. Необходимость учета малоциклового усталости при сейсмостойком проектировании отражена в работах E. Simbort [7], S. Cambell [8], P. Fajfar [9], E. Cosenza [10, 11], R. Perera [12], A. Teran-Gilmer [13, 14]. Однако данные исследования проводились применительно к сейсмостойким зданиям. В настоящей статье рассмотрена проблема возникновения малоциклового усталости у демпфирующих элементов, входящих в состав пластического демпфирования систем сейсмоизоляции маятникового типа. Для определения пластического ресурса элементов необходимо знать величины деформаций, возникающих при сейсмическом воздействии, поэтому отдельно разработан алгоритм их определения. Показано, что можно не только рассчитать проектируемую систему на малоцикловую усталость, но и предложить методику подбора конструктивных параметров демпфирования, чтобы обеспечить требуемый пластический ресурс демпфирующих элементов.

Методика определения пластического ресурса

При сейсмическом воздействии на конструкцию возникает циклическое нагружение демпферных стержней, при этом они работают в упругопластической зоне, то есть становится актуальной проблема малоциклового усталости стержней. Иначе говоря, необходимо определить число циклов, при котором произойдет разрушение. Если в процессе сейсмического воздействия число циклов нагружения демпферных стержней не превзойдет допустимого, то система сейсмоизоляции работоспособна и у нее имеется требуемый пластический ресурс. Таким образом, методика определения пластического ресурса должна состоять из следующих этапов:

- решение динамической задачи и определение числа циклов нагружения;
- распределение числа циклов нагружения с различным уровнем перемещений;
- переход от перемещений к максимальным деформациям;
- по имеющимся критериям (формула Коффина – Менсона [5] и правило Палмгрема – Майнера [15]) установление допускаемого числа циклов и пластического ресурса стержня.

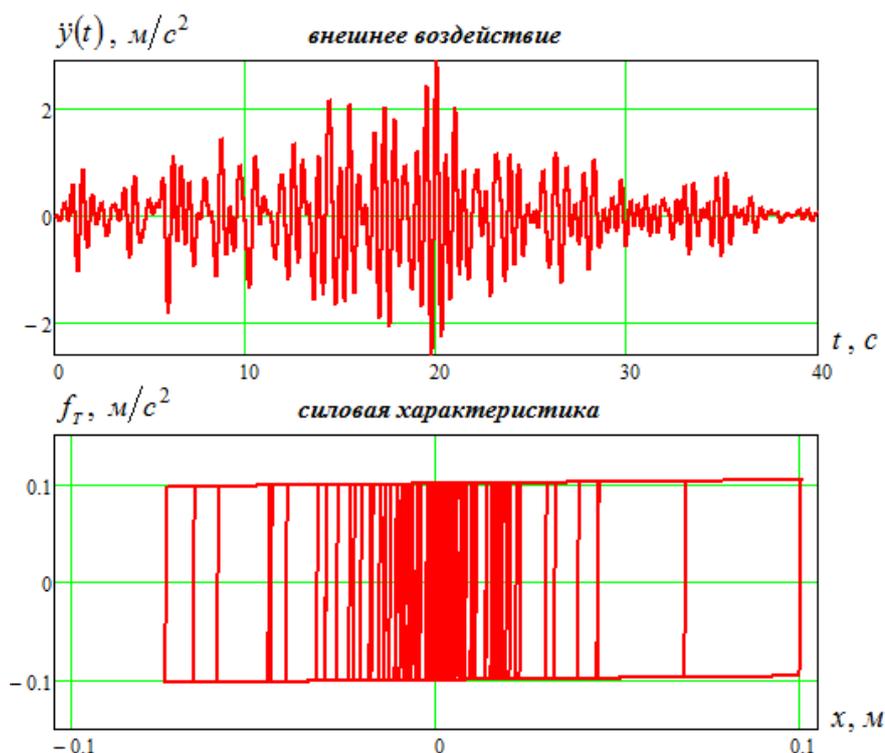


Рисунок 2. Пример динамического расчета системы с одной степенью свободы с нелинейным демпфированием на реальную акселерограмму

Ковалева Н.В. Учет малоциклового усталости при оптимизации параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции

Решение динамической задачи описано в [2, 16] (рис. 2). Как видно из рисунка 2, в динамическом процессе происходит циклическое нагружение стержней с различной амплитудой. Если рассмотреть колебания за относительно небольшой промежуток времени, то картина циклов нагружения становится достаточно ясной (рис. 3). Из решения динамической задачи определяется число циклов с различной амплитудой по перемещению.

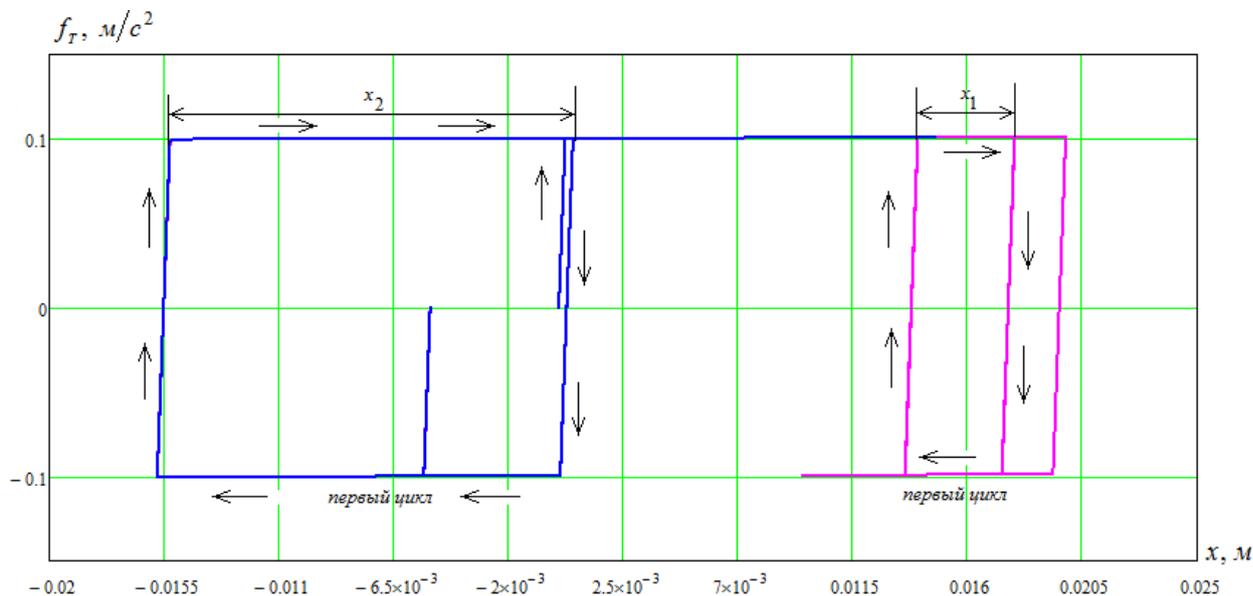


Рисунок 3. Пример определения циклов нагружения с различной амплитудой по перемещению

Переход от перемещений к максимальным деформациям описан в работе [17], где была получена методика определения зависимости усилие – перемещение для консольных стержней различной конфигурации и поперечных сечений в виде параметрических зависимостей $p(t)$ и $w(t)$. Для каждого перемещения x_i (считаем его равным прогибу консольного конца стержня w_i) определяем параметр t_i , который связан с деформацией стержня в крайних волокнах сечения следующим соотношением:

$$\varepsilon = t \cdot \varepsilon_T,$$

где $\varepsilon_T \equiv \frac{\sigma_T}{E}$ – деформация текучести.

Допускаемое число циклов и пластический ресурс стержня можно определить по методике, описанной в работе [18], где используется критерий малоциклового прочност, основанный на линейном суммировании усталостных d_c (циклические деформации) и квазистатических d_s (односторонне накопленные деформации) повреждений [6].

Чтобы пластический ресурс не был превзойден, должно выполняться неравенство:

$$d_c + d_s \leq 1, \quad (1)$$

где доля усталостного повреждения определяется по формуле:

$$d_c = \int_1^{N_k} \frac{dN}{N_{ci}}, \quad (2)$$

где N – число циклов нагружения; N_k – число циклов до разрушения; N_{ci} – число циклов, определяемое для заданной в цикле деформации по формуле Коффина – Менсона [5]:

$$\varepsilon_c \cdot N_c^{0.5} = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1-\psi}, \quad (3)$$

где ε_c – величина пластической деформации;
 ψ – относительное остаточное сужение материала.

Односторонне накопленная деформация определяется по формуле:

$$d_s = \int_0^{\varepsilon_{\max}} \frac{d\varepsilon}{\varepsilon_\varepsilon}, \quad (4)$$

где ε – односторонне накопленная деформация;
 ε_{\max} – односторонне накопленная деформация к моменту разрушения;
 ε_ε – величина пластической деформации, соответствующей временному сопротивлению.

Если после расчетов неравенство (1) не выполняется, нехватку пластического ресурса можно устранить, варьируя геометрию и материал стержней.

Числовой пример

Как показано в статье [19], оптимальным уровнем демпфирования для системы сейсмоизоляции маятникового типа с использованием пластических демпферов с частотой 0,4 Гц будет $f_T = 0.1 \text{ м/с}^2$ – приведенное к единичной массе усилие, соответствующее переходу от первого участка билинейной силовой характеристики пластического демпфера ко второму. Поэтому в качестве примера была рассмотрена схема демпфирования со следующими параметрами:

- защищаемый объект – 9-этажное здание массой $M = 6000 \text{ т}$;
- система сейсмоизоляции состоит из 30 маятниковых опор грузоподъемностью $q = 200 \text{ т}$;
- в составе каждой опоры – пластический демпфер, состоящий из 20 стержней, $p_T = 1 \text{ т}$ для каждого стержня.

Исходя из данного параметра $p_T = 1 \text{ т}$, для каждого стержня с помощью методики, изложенной в работе [14], были подобраны:

- высота стержня – 1,1 м;
- сечение стержня – круглое, диаметром 60 мм;
- материал стержней – 01Х18Н9Т со следующими механическими характеристиками:

$$\sigma_T = 288 \text{ МПа}, \quad \sigma_B = 646 \text{ МПа}, \quad \delta = 64,5\%, \quad \psi = 75,2\%, \quad E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

Билинейная аппроксимация реальной силовой характеристики пластического демпфера характеризуется тремя параметрами (рис. 4). Для динамических расчетов удобнее пользоваться следующими величинами:

$$f_T = \frac{P_T}{m_0}, \quad \omega = \sqrt{\frac{c}{m_0}}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{c_{nl}}{m_0}},$$

где $m_0 = \frac{q}{g}$, q – грузоподъемность (рабочая нагрузка) сейсмоопоры.

Характеристики пластического демпфирования одной сейсмоопоры приведены в таблице 1. Расчеты производились для воздействий разной балльности и продолжительности по времени. Результаты динамического расчета приведены в таблице 2.

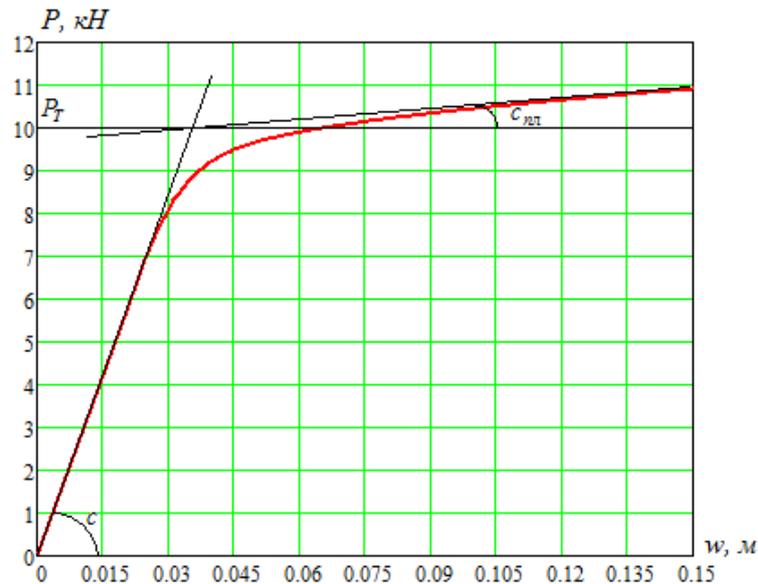


Рисунок 4. Силовая характеристика пластического демпфера и ее билинейная аппроксимация

Таблица 1. Параметры силовой характеристики пластического демпфирования одной маятниковой сейсмоопоры

Кол-во стержней	P_T , кН	c , кН/м	$c_{пл}$, кН/м	Грузоподъемность, тс	f_T , м/с ²	ω , 1/с	ω_0 , 1/с
20	10	330	10	100	0,1	18	3

Таблица 2. Результаты динамического расчета

№ воздействия	Максимальные ускорения сейсмического воздействия	Время воздействия	Максимальные значения абсолютных ускорений системы	Максимальные значения относительных перемещений системы
1	2,9 м/с ²	40 с	0,76 м/с ²	100 мм
2	6,3 м/с ²	70 с	1,48 м/с ²	210 мм

Для стержня круглого сечения были использованы параметрические зависимости $p(t)$ и $w(t)$:

$$p(t) = \frac{\pi}{16} at + \frac{1-a}{24} \left(3t \arcsin\left(\frac{1}{t}\right) + \frac{(5t^2 - 2)\sqrt{t^2 - 1}}{t^3} \right);$$

$$w(t) = t - \frac{1}{\left[\frac{\pi}{16} at + \frac{1-a}{24} \left(3t \arcsin\left(\frac{1}{t}\right) + \frac{(5t^2 - 2)\sqrt{t^2 - 1}}{t^3} \right) \right]^2} \times$$

$$\times \left[\int_0^1 \left(\frac{\pi}{16} \tau \right)^2 d\tau + \int_1^t \left[\frac{\pi}{16} a\tau + \frac{1-a}{24} \left(3\tau \arcsin\left(\frac{1}{\tau}\right) + \frac{(5\tau^2 - 2)\sqrt{\tau^2 - 1}}{\tau^3} \right) \right]^2 d\tau \right]; \quad (5)$$

Ковалева Н.В. Учет малоциклового усталости при оптимизации параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции

где $a = \frac{E_{nl}}{E}$ – коэффициент упрочнения, принят $a = 0,01$; E_{nl} – модуль упрочнения.

Далее была определена одностороннее накопленная деформация по формуле (5), а также величины различных уровней циклических деформаций и соответствующее им количество циклов по формуле (4). Поскольку ε_e на несколько процентов меньше величины δ , определяемой по ГОСТу для каждого материала, принимаем для стали 01X18H9T [20] $\varepsilon_e = 50\%$.

Результаты расчета малоциклового усталости приведены в таблице 3. Результаты варьирования диаметра и количества стержней представлены в таблице 4.

Таблица 3. Результаты расчета малоциклового усталости

№	Уровень перемещений	Одностороннее накопленные деформации	Циклическая деформация	Число циклов	Число циклов до разрушения	Усталостное повреждение d_c	Квазистатическое повреждение d_s
	x_{\max}	ε_{\max}	ε_{ci}	N_i	N_{ci}	N_i/N_{ci}	$\varepsilon_{\max}/\varepsilon_e$
1	0,1	0,029	0,041	1	290	0,005	
			0,029	4	575	0,008	
			0,011	9	4400	0,004	
			0,002	26	138700	0,0008	
						0,018	0,021
	Утрачиваемый пластический ресурс			4%	Остаточный		96%
2	0,21	0,052	0,074	3	90	0,034	
			0,029	5	575	0,009	
			0,011	7	4400	0,003	
			0,002	22	138700	0,0008	
						0,046	0,104
	Утрачиваемый пластический ресурс			15%	Остаточный		85%

Таблица 4. Результаты варьирования параметров пластического демпфирования

Кол-во стержней	$f_T, м/с^2$	$d, мм$	Утрачиваемый пластический ресурс	
			Воздействие №1	Воздействие №2
20	0.1	60	4%	15%
30	0,75	55	3%	14%
40	0,5	50	2%	13%

Из таблицы 4 видно, что уменьшение диаметра стержней с 60 до 50 мм приводит к уменьшению утрачиваемого пластического ресурса на 1–2%. Однако, чтобы сохранить оптимальное значение силы P_T , при уменьшении толщины стержней необходимо увеличить их количество.

Заключение

Разработана методика определения пластического ресурса демпферных стержней, входящих в состав пластического демпфирования систем сейсмоизоляции, в условиях циклического нагружения при сейсмическом воздействии. Также показано, что необходимый пластический ресурс можно обеспечить варьированием геометрии и количества стержней.

Литература

1. Belyaev V., Guskov V., Routman Y. NPP seismic protection against shok and vibration loads // 20nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology – SMiRT20, Finland, 2009. Reference paper: 2479.
2. Рутман Ю.Л. Маятниковые сейсмоизолирующие опоры. Конструкция. Расчет. Эксперимент // Инженерно-строительный журнал. 2012. №1(27). С. 37–43.
3. Belyaev V., Routman Y., Kovaleva N. Studing support-pendulum seismic isolation system for large NPP equipment // 22nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology – SMiRT22, USA, 2013. Reference paper: 423.
4. Москвитин В.В. Циклические нагружения элементов конструкций. М.: Наука, 1981. 344 с.
5. Когаев В.П., Матухов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.
6. Окопный Ю.А., Радин В.П., Чирков В.П. Механика материалов и конструкций: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2001. 409 с.
7. Simbort E., Rutman Y. L. The Choice of the Seismic-Load Reduction Coefficient Based on the Analysis of the Plastic Resource of Structure taking into account the Low-Cycle fatigue // 15th World Conference on Earthquake Engineering. Portugal, 2012. Reference paper: 1392.
8. Cambell S.D., Richard R.M., Partige J.E. Steel moment frame damage prediction using low-cycle fatigue // XIV World Conference on Earthquake Engineering. China, 2008. Vol. V. Pp. 225–232.
9. Cosenza E., Manfredi G. Low Cycle Fatigue: Characterization of the Plastic Cycle due to Earthquake Ground Motion // Testing of metals for structures: proceedings of the International Workshop “Needs in Testing Metals”. London, 1992. Pp. 116–131.
10. Cosenza E., Manfredi G. Seismic design based on low cycle fatigue criteria // XI World Conference of Earthquake Engineering. Mexico, 1996. Reference paper: 1141.
11. Fajfar P. Equivalent ductility factors, taking into account Low-Cycle Fatigue // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 1992. Vol. 21. Pp. 837–848.
12. Perera R., Alarcon E., Carnicero A. Modelization of low cycle fatigue damage in frames // XII World Conference on Earthquake Engineering. New Zealand, 2000. Paper reference: 0714.
13. Teran-Gilmor A., Jirsa J.O. A simple low cycle fatigue model and its implications for seismic design // XIII World Conference on Earthquake Engineering. Canada, 2004. Paper reference: 882.
14. Teran-Gilmor A., Jirsa J.O. The use of cumulative ductility strength spectra for seismic design against low cycle fatigue // XIII World Conference on Earthquake Engineering. Canada, 2004. Paper reference: 889.
15. Miner M.A. Cumulative damage in fatigue // Journal of Applied Mechanics. 1945. Vol. 12. Pp. 159–164.
16. Ковалева Н.В., Рутман Ю.Л. Оценка эффективности параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции // Инженерно-строительный журнал. 2012. №1(27). С. 37–43.
17. Симборт С. Э. Определение коэффициента редукции с учетом динамических характеристик сейсмических воздействий: дисс.... канд. техн. наук. Санкт-Петербург. СПбГАСУ, 2012. 168 с.
18. Ковалева Н.В., Скворцов В.Р., Рутман Ю.Л. Определение параметров силовой диаграммы пластически деформируемых элементов конструкции // Сборник «Труды Двадцать второй международной конференции «Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов». СПб.: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2007. С. 220–225.
19. Ковалева Н.В., Давыдова Г.В., Рутман Ю.Л. Определение оптимальных параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции // Инженерно-строительный журнал. 2013. №5(40). С. 107–115.
20. Писаренко Г.С., Можаровский Н.С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. Справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1981. 496 с.

*Надежда Владимировна Ковалева, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(911)835-55-52; эл. почта: balloun@yandex.ru*

© Ковалева Н.В., 2013

doi: 10.5862/MCE.44.6

Low-cyclic fatigue consideration in terms of damping parameters optimization in seismic isolation systems

N.V. Kovaleva,*State Marine Technical University, Saint-Petersburg, Russia
+7(911)835-55-52; balloun@yandex.ru*

Key words

shuttle-type seismic isolation; plastic damping; seismic motions; cyclic loading; low-cyclic fatigue; plastic resource

Abstract

The article touches upon an algorithm of aimed parameters of the plastic damping development in seismic isolation systems taking into account low-cyclic fatigue. All the phases of damper bars plastic resource determination in the shuttle-type plastic damping seismic isolation systems have been considered. They include: solution to a dynamic problem of non-stationary seismic influences of a various level and duration; definition of a number of loading cycles; distribution of number of loading cycles with various level of movements; transition from movements to maximum deformations; establishment of an allowable number of cycles and a plastic resource of a core by Koffina – Menson and Palmgrema – Maynera's criteria.

Also, it has been proved that the required plastic resource can be provided by means of geometry variation (length and section size of core) and number of bars alteration.

References

1. Belyaev V., Guskov V., Routman Y. NPP seismic protection against shok and vibration loads. *20nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology – SMiRT20*, Finland, 2009. Reference paper: 2479.
2. Rutman Yu.L. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 1(27). Pp. 37–43. (rus)
3. Belyaev V., Routman Y., Kovaleva N. Studing support-pendulum seismic isolation system for large NPP equipment. *22nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology – SMiRT22*, USA, 2013. Reference paper: 423.
4. Moskvitin V.V. *Tsiklicheskiye nagruzheniya elementov konstruksii* [Cyclic loading of structure's elements]. Moscow: Nauka, 1981. 344 p. (rus)
5. Kogaev V.P., Matukhov N.A., Gusenkov A.P. *Raschety detaley mashin i konstruksiy na prochnost i dolgovechnost* [Calculation of machine and structures' components for strength and durability]. Moscow: Mashinostroeniye, 1985. 224 p. (rus)
6. Okopnyi Yu.A., Radin V.P., Chirkov V.P. *Mekhanika materialov i konstruksiy: uchebnik dlia vuzov* [Mechanics of materials and structures: tutorial for higher school]. Moscow: Mashinostroenie, 2001. 409 p. (rus)
7. Simbort E., Rutman Y.L. The Choice of the Seismic-Load Reduction Coefficient Based on the Analysis of the Plastic Resource of Structure taking into account the Low-Cycle fatigue. *15th World Conference on Earthquake Engineering*. Portugal, 2012. Reference paper: 1392.
8. Cambell S.D., Richard R.M., Partige J.E. Steel moment frame damage prediction using low-cycle fatigue. *XIV World Conference on Earthquake Engineering*, China, 2008. Vol. V. Pp. 225–232.
9. Cosenza E., Manfredi G. Low Cycle Fatigue: Characterization of the Plastic Cycle due to Earthquake Ground Motion. *Testing of metals for structures: proceedings of the International Workshop "Needs in Testing Metals"*. London, 1992. Pp. 116–131.
10. Cosenza E., Manfredi G. Seismic design based on low cycle fatigue criteria. *XI World Conference of Earthquake Engineering*. Mexico, 1996. Reference paper: 1141.
11. Fajfar P. Equivalent ductility factors, taking into account Low-Cycle Fatigue. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1992. Vol. 21. Pp. 837–848.
12. Perera R., Alarcon E., Carnicero A. Modelization of low cycle fatigue damage in frames. *XII World Conference on Earthquake Engineering*. New Zealand, 2000. Paper reference: 0714.

Kovaleva N.V. Low-cyclic fatigue consideration in terms of damping parameters optimization in seismic isolation systems

13. Teran-Gilmor A., Jirsa J.O. A simple low cycle fatigue model and its implications for seismic design. *XIII World Conference on Earthquake Engineering*. Canada, 2004. Paper reference: 882.
14. Teran-Gilmor A., Jirsa J.O. The use of cumulative ductility strength spectra for seismic design against low cycle fatigue. *XIII World Conference on Earthquake Engineering*. Canada, 2004. Paper reference: 889.
15. Miner M.A. Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics*. 1945. Vol. 12. Pp. 159–164.
16. Kovaleva N.V., Rutman Yu.L. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 1(27). Pp. 37–43. (rus)
17. Simbort S.E. *Opredeleniye koeffitsienta reduksii s uchetom dinamicheskikh kharakteristik seismicheskikh vozdeistvii* [Determination of ratio of reduction with dynamic characteristics of seismic effects]. PhD dissertation. Saint-Petersburg: SPbGASU, 2012. 168 p. (rus)
18. Kovaleva N.V., Skvortsov V.R., Rutman Yu.L. *Sbornik «Trudy Dvadtsa' vtoroi mezhdunarodnoi konferentsii «Matematicheskoe modelirovanie v mekhanike sploshnykh sred. Metody granichnykh i konechnykh elementov»* [Collection “Proceedings of 22th international conference “Mathematic modeling in continuum mechanics. Methods of boundary and finite elements”]. Saint-Petersburg: Izd-vo NITs MORINTEKh. 2007. Pp. 220–225. (rus)
19. Kovaleva N.V., Rutman Y.L. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 5(40). Pp. 107–115. (rus)
20. Pisarenko G.S., Mozharovskiy N.S. *Uravneniya i kraevyye zadachi teorii plastichnosti i polzuchesti. Spravochnoe posobie* [Equations and boundary-value problems of plasticity and creep theory. Reference book]. Kiev: Naukova dumka, 1981. 496 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 49–55