VДК 550.34 DOI: 10.23671/VNC.2015.4.55307

АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯНА ЗАСТРОЙКУ С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ И СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ С ЧАСТОТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ РЕАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ

© 2015К.С. Харебов, к.т.н., И.Д. Музаев, д.т.н., проф., Н.И. Музаев

Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93a, e-mail: cgi_ras@mail.ru.

В статье поставлена и решена многослойная контактная краевая задача сейсмических колебаний системы, состоящей из упруго-вязких слоев под застройкой. Краевая задача состоит из *п*дифференциальных уравнений описывающих поперечные сдвиговые колебания слоев грунта. На каждой поверхности контакта слоев грунта дифференциальные уравнения взаимосвязаны двумя граничными условиями, выражающими равенство перемещений и касательных напряжений в смежных слоях грунта. Последний глубинный слой считается полуограниченным. На бесконечности ставится условие ограниченности перемещения и частных производных перемещения. Поставленная краевая задача решена методом суперпозиции прямых и отраженных волн.Получены расчетные формулы для амплитуд сейсмических колебаний каждого слоя, в том числе и для дневной поверхности. Составлена соответствующая программа расчета на компьютере. Проведена расчетная оценка частотных характеристик грунта при сейсмическом воздействии. Проведено сравнение результатов расчетов с частотными параметрами реальных землетрясений на реальных площадках.

Ключевые слова: контактная краевая задача, прямая и обратная волна, коэффициент затухания, круговая частота, сейсмические колебания, база данных, сильные движения, грунты, застройка.

Сейсмостойкость территориально распределенной застройки существенно зависит от податливости подфундаментного слоистого массива грунта. Для обеспечения сейсмостойкости застройки требуется постановка и решение краевой задачи контактного взаимодействия распределенной массы застройки и подфундаментных слоев грунта с разными физико-механическими и мощностными характеристиками. На рис. 1 представленасхематическая картина расположения распределенной застройки и подфундаментных слоев грунта.

Математической моделью сейсмических колебаний системы представленной на рис. 1 является следующая контактная краевая задача математической физики [Ворович и др., 1999; Заалишвили и др., 2007; Музаев И. и др., 2014; Хачиян, 2009]:

$$\frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} - a_1^2 \frac{\partial^2 U_1}{\partial x_1^2} - \beta a_1^2 \frac{\partial^3 U_1}{\partial t \partial x_1^2} = 0 \quad \text{при } 0 < x_1 < H_1,$$

$$\frac{\partial^2 U_2}{\partial t^2} - a_2^2 \frac{\partial^2 U_2}{\partial x_2^2} - \beta a_2^2 \frac{\partial^3 U_2}{\partial t \partial x_2^2} = 0 \quad \text{при } 0 < x_2 < H_2,$$

.....

$$\begin{split} \frac{\partial^2 U_{n-1}}{\partial t^2} &- a_{n-1}^2 \frac{\partial^2 U_{n-1}}{\partial x_{n-1}^2} - \beta a_{n-1}^2 \frac{\partial^3 U_{n-1}}{\partial t \partial x_{n-1}^2} = 0 \quad \text{при } 0 < x_{n-1} < H_{n-1}, \\ \frac{\partial^2 U_n}{\partial t^2} &- a_n^2 \frac{\partial^2 U_n}{\partial x_n^2} - \beta a_n^2 \frac{\partial^3 U_n}{\partial t \partial x_n^2} = 0 \quad \text{при } 0 < x_n < \infty, \\ m \frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} - G_1 \frac{\partial U_1}{\partial x_1} - \beta G_1 \frac{\partial^2 U_1}{\partial t \partial x_1} = 0 \quad \text{при } x_1 = 0, \\ U_1 \Big|_{x_1 = H_1} = U_2 \Big|_{x_2 = 0}, \\ G_1 \frac{\partial U_1}{\partial x_1} \Big|_{x_1 = H_1} + \beta G_1 \frac{\partial^2 U_1}{\partial t \partial x_1} \Big|_{x_1 = H_1} = G_2 \frac{\partial U_2}{\partial x_2} \Big|_{x_2 = 0} + \beta G_2 \frac{\partial^2 U_2}{\partial t \partial x_2} \Big|_{x_2 = 0}, \\ G_2 \frac{\partial U_2}{\partial x_2} \Big|_{x_2 = H_2} + \beta G_2 \frac{\partial^2 U_2}{\partial t \partial x_2} \Big|_{x_2 = H_2} = G_3 \frac{\partial U_3}{\partial x_3} \Big|_{x_3 = 0} + \beta G_3 \frac{\partial^2 U_3}{\partial t \partial x_3} \Big|_{x_3 = 0}, \\ G_{n-1} \frac{\partial U_{n-1}}{\partial x_{n-1}} \Big|_{x_{n-1} = H_{n-1}} + \beta G_{n-1} \frac{\partial^2 U_{n-1}}{\partial t \partial x_{n-1}} \Big|_{x_{n-1} = H_{n-1}} = G_n \frac{\partial U_n}{\partial x_n} \Big|_{x_n = 0} + \beta G_n \frac{\partial^2 U_n}{\partial t \partial x_n} \Big|_{x_n = 0}, \\ G_i = \rho_i a_i^2, \quad i = 1, 2, ..., n \end{split}$$



Рис. 1. Схема расположения распределенной застройки и подфундаментных слоев грунта.

где приняты следующие обозначения и предположения: t – время, $x_1, x_2, ..., x_n$ – вертикальные координаты, отсчитываемые от точек $o_1, o_2, ..., o_n$. $U_i(x_i, t)$, – величины поперечных сдвиговых перемещений в *i*-том слое грунта, ρ_i , G_i , a_i – плотность, модуль сдвига и скорость распространения поперечной (сдвиговой) волны в *i*-м слое соответственно. $H_1, H_2, ..., H_n$ – мощности слоев, β – коэффициент внутреннего вязкого сопротивления, общий для всех слоев [Kinoshita, 2003], m – интенсивность распределенной массы от застройки на дневной поверхности первого слоя.

Легко заметить, что краевая задача записана в разных координатах x_i . Их начала берутся в точках $o_1, o_2, ..., o_n$. Между координатами x_i имеются следующие зависимости

$$x_i = H_i + x_{i+1}$$

Такой нестандартный подход значительно упрощает путь решения поставленной краевой задачи.

Решения представленных дифференциальных уравнений можно представить в виде сумм прямых и обратных (отраженных) затухающих волн

$$U_{1}(x_{1},t) = e^{-\beta \frac{\omega^{2}}{2}t} \left(A_{1}e^{i\omega\left(\gamma t + \frac{x_{1}}{a_{1}}\right)} + B_{1}e^{i\omega\left(\gamma t - \frac{x_{1}}{a_{1}}\right)} \right)$$

$$U_{2}(x_{2},t) = e^{-\beta \frac{\omega^{2}}{2}t} \left(A_{2}e^{i\omega\left(\gamma t + \frac{x_{2}}{a_{2}}\right)} + B_{2}e^{i\omega\left(\gamma t - \frac{x_{2}}{a_{2}}\right)} \right)$$

$$U_{n}(x_{n},t) = e^{-\beta \frac{\omega^{2}}{2}t} \left(A_{n}e^{i\omega\left(\gamma t + \frac{x_{n}}{a_{n}}\right)} + B_{n}e^{i\omega\left(\gamma t - \frac{x_{n}}{a_{n}}\right)} \right)$$

$$\gamma = \sqrt{1 - \beta^{2} \frac{\omega^{2}}{4}}$$

$$(1)$$

где: A_i , B_i – произвольные постоянные, определяемые в процессе удовлетворения граничных условий на дневной поверхности и на поверхности раздела слоев грунта. Считается, что *n*-ый слой грунта простирается до ∞, где ставится условие ограниченности $U_n(x_w,t)$.

В процессе удовлетворения граничным условиям относительно постоянных A_i и B_i получается следующая система линейных алгебраических уравнений:

$$R_{1}A_{1} + R_{2}B_{1} = 0,$$

$$A_{1}e^{\frac{i\omega H_{1}}{a_{1}}} + B_{1}e^{\frac{-i\omega H_{1}}{a_{1}}} = A_{2} + B_{2},$$

$$k_{1}\left(A_{1}e^{\frac{i\omega H_{1}}{a_{1}}} - B_{1}e^{\frac{-i\omega H_{1}}{a_{1}}}\right) = A_{2} - B_{2},$$

$$A_{2}e^{\frac{i\omega H_{2}}{a_{2}}} + B_{2}e^{\frac{-i\omega H_{2}}{a_{2}}} = A_{3} + B_{3},$$

$$k_{2}\left(A_{2}e^{\frac{i\omega H_{2}}{a_{2}}} - B_{2}e^{\frac{-i\omega H_{2}}{a_{2}}}\right) = A_{3} - B_{3},$$
(2)

$$A_{n-1}e^{\frac{i\omega H_{n-1}}{a_{n-1}}} + B_{n-1}e^{-\frac{i\omega H_{n-1}}{a_{n-1}}} = A_n + B_n,$$

$$k_{n-1}\left(A_{n-1}e^{\frac{i\omega H_{n-1}}{a_{n-1}}} - B_{n-1}e^{-\frac{i\omega H_{n-1}}{a_{n-1}}}\right) = A_n - B_n$$

где:

$$R_{1} = m \left(-\beta \frac{\omega^{2}}{2} + \gamma \omega i\right)^{2} + G_{1} \frac{i\omega}{a_{1}} \left(1 - \beta^{2} \frac{\omega^{2}}{2} + \beta \gamma \omega i\right)$$

$$R_{2} = m \left(-\beta \frac{\omega^{2}}{2} + \gamma \omega i\right)^{2} - G_{1} \frac{i\omega}{a_{1}} \left(1 - \beta^{2} \frac{\omega^{2}}{2} + \beta \gamma \omega i\right)$$

$$k_{i} = \frac{G_{i}a_{i+1}}{G_{i+1}a_{i}} = \frac{\rho_{i}a_{i}}{\rho_{i+1}a_{i+1}}, i = 1, 2, ..., n - 1$$
(3)

В результате сложения и вычитания парных уравнений систему (2) можно привести к следующему компактному виду:

$$\begin{pmatrix} m\omega + G_{1} \frac{i}{a_{1}} \end{pmatrix} A_{1} + \begin{pmatrix} m\omega - G_{1} \frac{i}{a_{1}} \end{pmatrix} B_{1} = 0,$$

$$(1 + k_{1})e^{\frac{i\omega H_{1}}{a_{1}}} A_{1} + (1 - k_{1})e^{\frac{-i\omega H_{1}}{a_{1}}} B_{1} = 2A_{2},$$

$$(1 - k_{1})e^{\frac{i\omega H_{1}}{a_{1}}} A_{1} + (1 + k_{1})e^{\frac{-i\omega H_{1}}{a_{1}}} B_{1} = 2B_{2},$$

$$\dots \dots \dots,$$

$$(1 + k_{n-1})e^{\frac{i\omega H_{n-1}}{a_{n-1}}} A_{n-1} + (1 - k_{n-1})e^{\frac{-i\omega H_{n-1}}{a_{n-1}}} B_{n-1} = 2A_{n},$$

$$(1 - k_{n-1})e^{\frac{i\omega H_{n-1}}{a_{n-1}}} A_{n-1} + (1 + k_{n-1})e^{\frac{-i\omega H_{n-1}}{a_{n-1}}} B_{n-1} = 2B_{n},$$

Отметим, что из полученной системы алгебраических уравнений (4) сократились коэффициенты, связанные с вязким сопротивлением β . В систему (4) входит 2n-1 алгебраических уравнений, а количество неизвестных 2n, т. е. в нашем предположении система не замкнута. Однако система замыкается если считать заданной амплитуду падающей на последний слой сейсмической волны A_n . Тогда количество неизвестных коэффициентов A_i , B_i сравнится с количеством уравнений.

В результате решения системы (4) определяются значения искомых постоянных $A_1, A_2, ..., A_{n-1}, B_1, B_2, ..., B_n$ (A_n считается заданной). Все они прямо пропорциональны амплитуде надающей на нижний слой сейсмической волне (т. е. A_n). Эти коэффициенты подставляются в соответствующие выражения (1). Затем выделяем действительные части, т. е. $ReU_i(x_{ij}t)$.

В результате такой череды математических выкладок получаем последовательность функций $ReU_i(x_{i},t)$, i=1, 2, ..., n, которые описывают процессы сейсмических колебаний каждого слоя грунта в том числе и на дневной поверхности, т.е. $ReU_1(0, t)$.

Для 4-хслойного грунта поперечные (сдвиговые) колебания на дневной поверхности описываются следующими формулами:

$$y(t) = 4G_1 A_4 \frac{\omega}{a_1 \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2}} e^{-\beta \frac{\omega^2}{2}t},$$

$$\varphi_1 = d_1(q_1 - p_1) - d_2(q_2 + p_2),$$

$$\varphi_2 = d_1(q_2 - p_2) + d_2(q_1 + p_1),$$
(5)

где:

$$\begin{split} &d_1 = 2m\omega^2; d_2 = 2G_1\frac{\omega}{a_1}, \\ &p_1 = \frac{1}{8} \Big(z_1 \cos \omega \alpha_1 + z_2 \cos \omega \alpha_2 + z_3 \cos \omega \alpha_3 + z_4 \cos \omega \alpha_4 \Big), \\ &p_2 = \frac{1}{8} \Big(z_1 \sin \omega \alpha_1 + z_2 \sin \omega \alpha_2 + z_3 \sin \omega \alpha_3 + z_4 \sin \omega \alpha_4 \Big), \\ &q_1 = \frac{1}{8} \Big(z_5 \cos \omega \alpha_4 + z_6 \cos \omega \alpha_3 + z_7 \cos \omega \alpha_2 + z_8 \cos \omega \alpha_1 \Big), \\ &q_2 = \frac{1}{8} \Big(z_5 \sin \omega \alpha_4 + z_6 \sin \omega \alpha_3 + z_7 \sin \omega \alpha_2 + z_8 \sin \omega \alpha_1 \Big) \\ &z_1 = \Big(1 + k_3 \Big) \Big(1 + k_2 \Big) \Big(1 + k_1 \Big), \\ &z_2 = \Big(1 + k_3 \Big) \Big(1 - k_2 \Big) \Big(1 + k_1 \Big), \\ &z_4 = \Big(1 - k_3 \Big) \Big(1 - k_2 \Big) \Big(1 + k_1 \Big), \\ &z_7 = \Big(1 - k_3 \Big) \Big(1 - k_2 \Big) \Big(1 - k_1 \Big), \\ &z_8 = \Big(1 - k_3 \Big) \Big(1 - k_2 \Big) \Big(1 - k_1 \Big), \\ &z_8 = \Big(1 - k_3 \Big) \Big(1 + k_2 \Big) \Big(1 - k_1 \Big), \\ &z_8 = \Big(1 - k_3 \Big) \Big(1 + k_2 \Big) \Big(1 - k_1 \Big), \\ &z_8 = \Big(1 - k_3 \Big) \Big(1 + k_2 \Big) \Big(1 - k_1 \Big), \\ &z_8 = \Big(1 - k_3 \Big) \Big(1 + k_2 \Big) \Big(1 - k_1 \Big), \\ &z_8 = \Big(1 - k_3 \Big) \Big(1 + k_2 \Big) \Big(1 + k_1 \Big) \\ &\alpha_1 = \frac{h_3}{a_3} + \frac{h_2}{a_2} + \frac{h_1}{a_1}, \\ &\alpha_2 = \frac{h_3}{a_3} - \frac{h_2}{a_2} + \frac{h_1}{a_1} \\ &\alpha_3 = -\frac{h_3}{a_3} + \frac{h_2}{a_2} + \frac{h_1}{a_1}, \\ &\alpha_4 = -\frac{h_3}{a_3} - \frac{h_2}{a_2} + \frac{h_1}{a_1} \\ &k_1 = \frac{\rho_1 a_1}{\rho_2 a_2}, \\ &k_2 = \frac{\rho_2 a_2}{\rho_3 a_3}, \\ &k_3 = \frac{\rho_3 a_3}{\rho_4 a_4}, \\ &G_1 = \rho_1 a_1^2 \end{split}$$

Для 2-хслойного грунтового масива вышепредставленные формулы сильно упрощаются и для *у* – амплитуды колебания на дневной поверхности получаем следующую формулу:

$$y = 2A_2G_1\frac{\omega}{a_1}e^{-\beta\frac{\omega^2}{2}t}\frac{1}{\sqrt{k_1^2\left(m\omega^2\cos\frac{\omega h}{a_1} + G_1\frac{\omega}{a_1}\sin\frac{\omega h}{a_1}\right)^2 + \left(m\omega^2\sin\frac{\omega h}{a_1} - G_1\frac{\omega}{a_1}\cos\frac{\omega h}{a_1}\right)^2}}{k_1 = \frac{\rho_1a_1}{\rho_2a_2},$$

где A_2 – амплитуда подающей на нижний слой сейсмической волны. При однослойном грунте получаем:

$$y = -2A_2 \frac{G_1}{a_1} \frac{e^{-\beta \frac{\omega^2}{2}t}}{\sqrt{m^2 \omega^2 + \frac{G_1^2}{a_1^2}}},$$

При *m*=0:

$$y = 2A_2 e^{-\beta \frac{\omega^2}{2}t}$$

Последняя формула показывает, что в начальный момент амплитуда выходящей на дневную поверхность волны увеличивается в два раза, а потом убывает во времени по экспоненциальному закону с декрементом затухания, равным – $\beta \frac{\omega^2}{2}$.

34,7807	133,6121 Hight: 60	TAKAHA SHI		OKAYAMAKEN		
	Station OKY007	100	10	430	160	1.85
Soil column		200	3	430	160	1.54
		300		430	160	1.65
100000 XX3 p. 4.+	From To Soil	4m	00	430	160	1.75
××> Surface soil	0 4.6 m FL(Fill soil)	Sm	8	1490	160	1.81
Fl: 理土·盛土		6m	.00	1490	160	1.86
Fill soul	4,0 5,0 m 5 (Sano)	7m	31	1490	330	1.92
**** Gravel	s,o Ti,e m G (Gravel)	Sm	99	1490	330	2,02
8885 GF: 確質土	11,4 13,0 M K (KOCK)	9m	99	1490	330	2,11
c s	13,0 m	10m	99	1490	330	2,27
Sand	m	11m	99	1880	760	2,32
*** SF: 砂質土	m	12m	99	1880	750	2,33
Sandy soil	m	13m	99	1000	750	2,34
a a == Silt	m	14m			-	
- C: 粘性土	m	15m				
Clay	m	16m				
Organic coil	m	17m				
V:火山灰質粘性土	m	18m				
Volcanic ash day	m	19m				
Pt: 高有极質土 Peat	m	20m				
R:岩盘 Rock	m	Mean	77,00	1473,00	489,00	2,10
NIED 独立行政法人防灾科学技術研究	m		N	Vp	Vs	Density

Рис. 2. Параметры грунтов станции ОКҮ007.



Рис. 3. Графики зависимости относительной амплитуды колебаний (Y) на дневной поверхности от частоты падающей сейсмической волны при при различных значениях времени с начала колебаний (t). Данные грунта станции ОКY007. Затухание 2%, масса застройки 0.



Рис. 4. Спектры Фурье для станции ОКҮ007.

Рассмотрим возможности применения полученных формул для конкретных сейсмических событий. Мы будем использовать хорошо документированные сейсмические события японской системы KNET [Kinoshita, 2003], которые были систематизированы нами в базе данных [Заалишвили и др., 2014].

В качестве первого примера рассмотрим сейсмическую станцию ОКY007 [Заалишвили и др., 2014] с четырехслойным грунтом:насыпной грунт – мощностью H=4,5 м, песок – мощностьюH=1,1 м, гравий – H=5,8 м, скала – ниже 11,4 м (рис. 2). На рис. 2 также представлено распределение коэффициента пенетрации N, поперечной V_s и продольной V_p скоростей, и плотности D, по глубине грунта.

Расчеты зависимости относительной амплитуды колебаний (Y) на дневной поверхности от частоты падающей сейсмической волны при при различных значениях времени с начала колебаний по формулам (5) представлены на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что на данном грунте частота наибольшего сейсмического воздействия на застройку составляет около 6 Гц, причем степень воздействия быстро затухает со временем. Для того, чтобы убедится в правильности проведенных расчетов рассмотрим спетры Фурье для конкретных событий на станции ОКY007, которые представлены на рис. 4 для событий с датами 24.03.2001 15:28 (а) и 06.10.2000 13:30 (б) [Заалишвили и др., 2014]. Параметры событий представлены в табл. 1.

Из рис. 4а и 46 следует, что частота максимума спектра Фурье находится вблизи 6 Гц для горизонтальных компонент N-S и E-W, и для вертикальной компоненты около 13 Гц, что хорошо согласуется с данными рис. 3.

В качестве второго примера рассмотрим сейсмическую станцию TCG014 [Заалишвили и др., 2014] с следующим грунтом: глина с вулканическим пеплом – H=5,7 м, $V_s=240$ м/с, D=1400 кг/м³; глина – H=1,0 м, $V_s=290$ м/с, D=1700 кг/м³; гравий – H=7,4 м, $V_s=400$ м/с, D=2000 кг/м³; скала – $V_s=500$ м/с, D=2000 кг/м³. Для данного грунта график зависимости относительной амплитуды колебаний (Y) на дневной поверхности от частоты падающей сейсмической волны представлен на рис. 5.

Из рис. 5 следует, что на данном грунте частота наибольшего сейсмического воздействия на застройку составляет около 5–6 Гц и около 12 Гц, причем степень воздействия быстрее затухает со временем для высокочастотного пика. Для конкретных событий на станции TCG014 соответствующие спектры Фурье приведены на рис. 6 с датами: 15.11.2005 6:39 (а), 01.10.2009 19:43 (б), 11.03.2011 14:46 (в), 23.10.2004 18:03 (г). Параметры событий представлены в табл. 1.



Рис. 5. Графики зависимости относительной амплитуды колебаний (Y) на дневной поверхности от частоты падающей сейсмической волны при при различных значениях времени с начала колебаний (t). Данные грунта станции TCG014. Затухание 2%, масса застройки 0.

Таблица 1

Станция	Дата события	Магни- туда	Интен- сивность, балл	Эпицент- ральное расстояние, км	Макс. гори- зонтальное ускорение, гал
OKY007 (a)	24.03.2001 15:28	6,4	5,58	110,7	88
ОКҮ007 (б)	06.10.2000 13:30	7,3	5,83	60,4	102
TCG014 (a)	15.11.2005 6:39	7,1	5,1	448	45
TCG014 (б)	01.10.2009 19:43	4,2	5,16	44,4	48
TCG014 (в)	11.03.2011 14:46	9	10,7	290	1275
ТСG014 (г)	23.10.2004 18:03	6,3	5,51	139	68

Параметры рассмотренных событий

Из рис. 6 а-г следует, что частота максимума спектра Фурье находится около 5 Гц для горизонтальных компонент N-SuE-W,и для вертикальной компоненты около 9 Гц. Для низкочастотного пика (5 Гц) горизонтальных компонент наблюдается хорошее согласие с данными рис. 5, а для быстро исчезающего высокочастотного пика расчетное значение ниже наблюдаемого в конкретном событии. Отметим, что для всех событий на станции TCG014 с интенсивностью более 5 баллов, а также для событий с эпицентральным расстоянием менее 3 км [Заалишвили и др., 2014], средняя величины частоты максимума спектра Фурье составила около 5 Гц. Исследование гистограммы распределения событий по частотам показало, что распределение – нормальное.



Рис. 6. Спектры Фурье для станции ТСG014.

В качестве третьего примера рассмотрим сейсмическую станцию IBR003 [Заалишвили и др., 2014] со следующими параметрами грунтов: насыпной грунт – H=1,7 м, $V_s=100$ м/с, D=1440 кг/м³; глина с вулканическим пеплом – H=2,1 м, $V_s=100$ м/с, D=1440 кг/м³; песок – H=13,5 м, $V_s=320$ м/с, D=1900 кг/м³; скала – $V_s=530$ м/с, D=2000 кг/м³. Для данного грунта график зависимости относительной



Рис. 7. Графики зависимости относительной амплитуды колебаний (Y) на дневной поверхности от частоты падающей сейсмической волны при при различных значениях времени с начала колебаний (t). Данные грунта станции IBR003. Затухание 2%, масса застройки 0.



Рис. 8. Распределение частот максимума спектра Фурье станции IBR003.

амплитуды колебаний (Y) на дневной поверхности от частоты падающей сейсмической волны представлен на рис. 7.

Из рис. 7 следует, что на данном грунте частота наибольшего сейсмического воздействия на застройку составляет около 5 Гц и около 11 Гц, причем степень воздействия быстрее затухает со временем для высокочастотного пика 11 Гц.

Для всех событий на станции IBR003 записанных системой KNET (126 случаев) с интенсивностью более 5 баллов [Заалишвили и др., 2014], средняя величины частоты максимума спектра Фурье составила около 8 Гц, исследование гистограммы распределения событий по частотам показало, что распределение – нормальное (рис. 8).

Из рис. 8 видно, что частота максимума сектра Фурье имеет два пика: около 5 Гц и около 10 Гц, что соответствует рис. 7, наблюдается четкое соответствие наших расчетов частотных характеристик и реальных параметров конкретных событий.

Аналогичные сопоставления были проделаны и для других станций. Результаты показали соответствие расчетов параметрам реальным событий.

Отметим, что анализ полученных теоретических расчетов позволяет сделать важное заключение о том, что при высоких частотах сейсмического колебания в эпицентре, волна практически не распространяется к поверхности. Например при $\omega = 16\pi - 20\pi$, коэффициент вязкого сопротивления:

$$\beta \frac{\omega^2}{2} = 25,3 \div 39,5$$

В этом случае сейсмическая волна затухает за несколько долей секунды из-за высокого значения коэффициента затухания, причем высокочастотные пики затухают быстрее (рис. 3, 5, 7). Данный эффект подтверждается реальными спектрами Фурье (рис. 4, 6, 8), где наблюдается уменьшение доли высокочастотных колебаний.

Заключение

Поставлена и решена многослойная контактная краевая задача сейсмических колебаний системы, состоящей из упруго-вязких слоев под застройкой. Для расчета на компьютере запрограммированы расчетные формулы для амплитуд сейсмических колебаний каждого слоя. В результате получены зависимости относительной амплитуды колебаний на дневной поверхности от частотыприходящей сейсмической волны для различных времен с начала колебаний. Сравнение результатов расчетных оценок амплитудо-частотных характеристик грунтов конкретных площадок с амплитудно-частотными параметрами реальных сейсмических событий на этих площадкахпоказалоих хорошее совпадение, что подтверждает правильностьрасчетного решения поставленной задачи определения частотных характеристик грунта.

Литература

1. Ворович И.И., Бабешко В.А., Пряхина О.Д. Динамика массивных тел и резонансные явления в деформируемых средах. -М.: Научный Мир, 1999, 246с.

2. Заалишвили В.Б., Музаев И.Д., Туаева Ж.Д. Математическое моделирование сейсмических колебаний грунтовой толщи в основании застройки // Труды международной научно-практической конференции «Опасные природные и техногенные геологические процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа». Владикавказ, 2007. с. 290–298.

3. Музаев И.Д., Музаев Н.И., Харебов К.С. Постановка и решение многослойной краевой задачи сейсмических колебаний высотного сооружения. // Сейсмическое строительство, безопасность сооружений. № 01, 2014, с. 22–25.

4. Хачиян Э.Е. Задача усиления или ослабления эффекта сейсмического воздействия на поверхности земли // Вестник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко «Исследования по теории сооружений» № 1 (XXVI). -М.: 2009. с. 67–80.

5. Kinoshita S. Kyoshin Net (K-NET), Japan. Int. Handbook of Earthquake and Engineering seismology, v. 81B, 2003, pp. 1049–1056.

6. Заалишвили В.Б., Харебов А.К., Харебов К.С. База данных сильных движений «SMDBCGI», Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2014621429 от 10.10.2014

DOI: 10.23671/VNC.2015.4.55307

AMPLITUDE – FREQUENCY CHARACTERISTICS OF SEISMIC IMPACT ON THE BUILDING WITH THE GROUND BASE AND THE COMPARISON OF THEORETICAL ESTIMATION WITH THE REAL EVENTS FROM THE DATA BASE SMDB CGI

© 2015 K.S. Kharebov, Sc. Candidate (Tech.), I.D. Muzaev, Sc. Doctor (Tech.), prof., N.I. Muzaev

GPI VSC RAS, Russia, 362002, Vladikavkaz, Markov str., 93 a, e-mail: cgi_ras@mail.ru.

The multilayer contact boundary-value problem of the seismic vibrations of the system, consisting of the elastic-viscous layers under the building, is set and solved. Boundary-value problem consists of *n* differential equations describing transversalshear vibrations of soil layers. On each contact surface of soil layers differential equations are interconnected by two boundary conditions, which express the equality of displacements and shearing stresses in the adjacent of soil layers. The last deep layer is considered semi-bounded. At infinity the limitedness of displacement and partial derivatives of displacement is stipulated. The presented boundary-value problem is solved by the method of the forward and reflected waves superposition. Calculation formulas for the seismic vibrations amplitudes of each layer, including for the ground surface are obtained. The corresponding program of calculation on the computer is created. The frequency characteristics evaluation of the seismic impact on the building is carried out. The comparison of results with the parameters of real earthquakes from the data base SMDB CGI is carried out.

Key words: contact boundary-value problem, forward and reverse wave, damping factor, circular frequency, seismic vibrations, data base, strong motions, ground, building.