

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, СТРОИТЕЛЬСТВА И РЕКОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

УДК 69.04

ОБЗОР МЕТОДОВ, УЧИТЫВАЮЩИХ МЕСТНЫЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СПЕКТРОВ ФУРЬЕ И СПЕКТРОВ РЕАКЦИЙ

Е. Н. Курбацкий

Российский университет транспорта (МИИТ) (Россия)

В статье представлен обзор методов, учитывающих местные инженерно-геологические условия при построении спектров Фурье и спектров реакций

Ключевые слова: инженерно-геологические условия, спектры Фурье, спектры реакций

The article provides an overview of methods that take into account local engineering and geological conditions when building Fourier spectra and reaction spectra.

Keywords: geotechnical conditions, Fourier spectra, reaction spectra

Учёт местных инженерно-геологических условий

Анализ повреждений сооружений при разрушительных землетрясениях в Каракасе (1967), Манагуа (1972), Мехико (1985) и др. показывает, что наиболее часто разрушения сооружений происходят в результате существенного усиления колебаний слабых грунтов, находящихся на скальных основаниях. Учёт местных инженерно-геологических условий позволяет рассчитывать более сейсмостойкие и безопасные сооружения. Этот факт учитывается во многих строительных нормах и правилах, в которых вводятся поправки на сейсмические воздействия, учитывающие резонансные усиления колебаний верхнего слоя грунта. Эффекты геологического строения площадки можно исследовать более тщательно, учитывая характер распространения волн через слоистую среду, что позволит повысить точность и уменьшить дисперсию параметров возможных предполагаемых колебаний грунта. Воздействия на опоры наземных сооружений, например, мостов, зависят от параметров колебаний слоёв грунтов, на которые они опираются.

Подземные сооружения, в отличие от наземных, не колеблются относительно грунта и не входят в резонанс, поэтому концепция спектров ответов неприемлема при расчётах тоннелей. Если в слоях грунтов возникают резонансные явления, они никак не описываются спектрами ответов. Для расчёта тоннелей на сейсмические воздействия необходимыми параметрами являются зависимости перемещений грунта от времени, а также скорости движения частиц грунта при распространении сейсмических волн. Во

многих случаях грунты имеют многослойную геологию, и поэтому воздействие на тоннели зависит и от строения массива грунта, и от места расположения тоннеля. Обычно известны возможные параметры колебаний грунта или на поверхности, или на уровне коренных пород.

Для определения параметров колебаний грунта на разных уровнях в разных слоях грунта используется преобразование Фурье и передаточные функции. Исходными данными являются функции, описывающие колебания коренной породы. При численной реализации используются алгоритмы прямого и обратного быстрых преобразований Фурье. В настоящей главе приводятся методы определения параметров колебаний слоёв грунта во временной области (акселерограмм, велосиграмм и функций перемещений), а также спектров Фурье и спектров ответов.

*Обзор методов, учитывающих местные условия
при построении спектров Фурье и спектров реакций*

В результате многочисленных исследований реакции грунтовых массивов на сейсмические воздействия в разных странах были разработаны программы для компьютеров: LAYER, SHAKE, DEENSOIL, QUAD4, LUSH2, WAVES, EQTools и др. Эти программы позволяют оценить параметры колебаний слоёв грунтов отложений, используя в качестве исходных данных записи землетрясений на скальном основании. Некоторые программы определяют и распределение энергии землетрясений в слоях грунтового размера.

Существующие программные комплексы позволяют определить колебания слоёв массива грунта, смоделированных конечными элементами, при воздействии землетрясений, заданных в виде набора записей реальных или синтезированных землетрясений. В некоторых программах предусмотрена возможность выполнения нелинейных расчётов.

В качестве примера приведём программный комплекс EQTools, который позволяет определять реакцию слоёв грунта на сейсмическое воздействие, заданное во временной области в виде уравнений движения (перемещений, скоростей или ускорений). Программный комплекс позволяет определить реакцию десятислойного массива грунта на 12 заданных во времени колебаний основания. Результаты расчёта: спектры Фурье, спектры отклика и уравнения движения каждого слоя могут быть представлены в графическом виде для просмотра.

Кроме программного комплекса EQTools, часто используется и комплекс WAVES, в котором в качестве модели грунта используется модель балки, работающая на сдвиг. Имеется возможность выполнять расчёты в нелинейной постановке.

В Московском государственном университете разработан метод, позволяющий определять параметры волн, распространяющихся в слоистых грунтах. В качестве модели используются слоистые сплошные среды. Для определения спектров Фурье и спектров откликов в слоях грунтов использу-

ется метод решения задач теории упругости, основанный на свойствах изображений Фурье финитных функций. Дифференциальные уравнения теории упругости слоистых сред записываются в финитных обобщённых функциях, к которым применяется преобразование Фурье. Для определения неизвестных функций перемещений и напряжений на границах слоёв используется теорема о граничных функциях. Для доказательства теоремы о граничных функциях использована теорема Винера-Пэли-Шварца, характеризующая свойства изображений Фурье финитных функций. Подробное изложение этого метода представлено в работах [1], [2], [3].

Метод определения параметров волн в слоистых средах, основанный на свойствах изображений Фурье финитных функций

Опишем метод определения параметров поперечных волн. Для оценки параметров распространения продольных волн необходимо в уравнениях заменить скорости распространения поперечных волн на скорости продольных.

Дифференциальные уравнения распространения поперечных волн в j – том слое грунта:

$$\mu_j \frac{\partial^2 u_j}{\partial z^2} - \rho_j \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} = 0, \quad (j = 1, \dots, n) \quad (1)$$

где: j – номер слоя;

n – число слоёв грунта, включая нижний полубесконечный;

$u_j(z, t)$ – функция горизонтальных перемещений;

комплексный модуль сдвига [4]; $\mu_j = \eta_{0j}(1 + 2\xi_j)$

$\xi = \frac{\gamma}{2}$ – коэффициент демпфирования грунта;

γ – коэффициент поглощения энергии грунта;

ρ_j – плотность j –го слоя грунта.

Запишем дифференцированное уравнения распространения поперечных волн в каждом слое в обобщённых финитных функциях. Начало координат (оси z) принято на поверхности верхнего слоя. Для этой функции перемещений представим в виде:

$$U_j(z, t) = u_j(z, t) [\theta(z) - \theta(z - h_j)] \quad (2)$$

где $\theta(z)$ – функция единичного скачка (функция Хэвисайда). Финитная функция $U_j(z)$ совпадает с функцией $u_j(z)$ на интервале $0 \leq z \leq h_j$ и тождественно равна нулю вне этого интервала. Продифференцировав дважды уравнение (2) по координате z , получим

$$\frac{\partial^2 U_j(z, t)}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 u_j(z, t)}{\partial z^2} (\theta(z) - \theta(z - h_j)) + \quad (3)$$

$$+u'_j(0,t)\delta(z) - u'_j(h_j,t)\delta(z-h_j) + u_j(0,t)\delta'(z) - u_j(h_j,t)\delta'(z-h_j),$$

где $\delta(z)$; $\delta'(z)$ - дельта-функция Дирака и её производная;

$u_j(0,t)$ и $u_j(h_j,t)$ - функция горизонтальных перемещений частиц грунта на верхней и нижней границе слоя;

$$u'_j(0,t) = \frac{\partial u(0,t)}{\partial z} \quad \text{и} \quad u'_j(h_j,t) = \frac{\partial u(h_j,t)}{\partial z} - \text{относительные деформации}$$

на границах

j -го слоя.

Используя полученное выражение функции перемещений, уравнение (1) можно представить в обобщённых финитных функциях

$$\frac{\partial^2 U_j(z,t)}{\partial z^2} - \frac{1}{b_j^2} \frac{\partial^2 U_j(z,t)}{\partial t^2} =$$

$$= u_j(0,t)\delta'(z) + u'_j(0,t)\delta(z) - u_j(h_j,t)\delta'(z-h_j) - u'_j(h_j,t)\delta'(z-h_j)$$

(4)

где $b_j^2 = \frac{\mu_j}{\rho_j}$ - квадрат скорости распространения волн сдвига в j -м слое.

Применив преобразование Фурье по времени и по пространственной координате к уравнениям (8.4), получим:

$$\tilde{U}_j(v, \omega) \cdot \left(v^2 - \frac{\omega^2}{b_j^2} \right) = iv \cdot \tilde{u}_j(0, \omega) - \tilde{u}_j^y(0, \omega) - iv \cdot \tilde{u}_j(h_j, \omega) \cdot e^{ivh_j} + \tilde{u}_j^y(h_j, \omega) \cdot e^{ivh_j}$$

(5)

Из (5) с учётом, что $t_j(z,t) = \mu_j \frac{\partial u_j(z,t)}{\partial z}$, следует:

$$\tilde{U}_j(v, \omega) = \frac{iv \cdot \tilde{u}_j(0, \omega) - \frac{t_j(0, \omega)}{\mu_j} - iv \cdot \tilde{u}_j(h_j, \omega) \cdot e^{ivh_j} + \frac{t_j(h_j, \omega)}{\mu_j} \cdot e^{ivh_j}}{v^2 - \frac{\omega^2}{b_j^2}}$$

(6)

Так как функция $\tilde{U}_j(v, \omega)$ является изображением Фурье финитной функции, в соответствии с теоремой Винера-Пэли-Шварца [1] она должна быть целой, числитель выражения (8.6) должен делиться без остатка на знаменатель. Из этого следует, что числитель должен быть равен нулю при значениях v , равных корням знаменателя.

Используя эти условия, получим:

$$iv \cdot \tilde{u}_j(0, \omega) - \frac{\tau_j(0, \omega)}{\mu_j} - iv \cdot \tilde{u}_j(h_j, \omega) \cdot e^{ivh_j} + \frac{\tau_j(h_j, \omega)}{\mu_j} \cdot e^{ivh_j} = 0 \quad \text{при} \quad v = \pm \frac{\omega}{\beta_j}$$

(7)

Умножим все члены выражения (7) на модуль сдвига. И, подставив в это выражение значения корней числителя, получим системы уравнений для каждого слоя грунтового массива.

Для первого слоя учтём, что напряжение на верхней границе слоя равны нулю:

$$i\omega p_1 \beta_1 \tilde{u}_1(0, \omega) - i\omega p_1 \beta_1 \tilde{u}_1(h_1, \omega) e^{i \frac{\omega}{\beta_1} h_1} + \tau_1(h_1, \omega) e^{i \frac{\omega}{\beta_1} h_1} = 0 \quad (8)$$

$$-i\omega p_1 \beta_1 \tilde{u}_1(0, \omega) + i\omega p_1 \beta_1 \tilde{u}_1(h_1, \omega) e^{-i \frac{\omega}{\beta_1} h_1} + \tau_1(h_1, \omega) e^{-i \frac{\omega}{\beta_1} h_1} = 0, \quad \text{для } j\text{-го слоя:}$$

$$i\omega p_j \beta_j \tilde{u}_j(0, \omega) - \tau_j(0, \omega) - i\omega p_j \beta_j \tilde{u}_j(h_j, \omega) e^{i \frac{\omega}{\beta_j} h_j} + \tau_j(h_j, \omega) e^{i \frac{\omega}{\beta_j} h_j} = 0 \quad (9)$$

$$-i\omega p_j \beta_j \tilde{u}_j(0, \omega) - \tau_j(0, \omega) + i\omega p_j \beta_j \tilde{u}_j(h_j, \omega) e^{-i \frac{\omega}{\beta_j} h_j} + \tau_j(h_j, \omega) e^{-i \frac{\omega}{\beta_j} h_j} = 0$$

Если n -й слой – упругое полупространство, зависимости между функциями напряжений и функциями перемещений на границе полупространства имеют вид:

$$i\omega p_n \beta_n \tilde{u}_n(0, \omega) - \tau_n(0, \omega) - i\omega p_n \beta_n \tilde{u}_1(\omega) = 0, \quad (10)$$

где $\tilde{u}_1(\omega)$ - преобразование Фурье функции перемещений волны, падающей на границу полупространства.

При записи в обобщённых функциях дифференциального уравнения, описывающего колебания грунта для полупространства, используется функция, тождественно равная нулю при $z < 0$, поэтому для получения уравнения (10) используется только один положительный корень знаменателя выражения (6).

Таким образом, для грунтового массива, состоящего из $n - 1$ слоёв, расположенных на полупространстве, получим $2n - 1$ уравнений с $2n - 1$ неизвестными. При составлении системы уравнений для всего массива учитывается, что на границах слоёв напряжения равны, а перемещения непрерывны.

$$\tau_j(h_j, \omega) = \tau_{j+1}(0, \omega); u_j(h_j, \omega) = u_{j+1}(0, \omega). \quad (11)$$

В качестве первого примера представим в матричной форме систему уравнений для массива, состоящего из n слоёв. Верхняя граница верхнего слоя свободна от напряжений. На нижней границе нижнего слоя заданы перемещения. В этом случае получим систему $2n$ уравнений с $2n$ неизвестными.

Для акустической жёсткости (произведения скорости распространения волны на плотность) каждого слоя введём обозначение $k_j = p_j \beta_j$. (12)

$$D * \bar{X} = \bar{F}. \quad (13)$$

$$D = \begin{bmatrix} i\omega k_1 & -i\omega k_1 e^{i\frac{\omega}{\beta_1} h_1} & e^{i\frac{\omega}{\beta_1} h_1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -i\omega k_1 & i\omega k_1 e^{i\frac{\omega}{\beta_1} h_1} & e^{i\frac{\omega}{\beta_1} h_1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & i\omega k_2 & -1 & -i\omega k_2 e^{i\frac{\omega}{\beta_2} h_2} & e^{i\frac{\omega}{\beta_2} h_2} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -i\omega k_2 & -1 & i\omega k_2 e^{-i\frac{\omega}{\beta_2} h_2} & e^{-i\frac{\omega}{\beta_2} h_2} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & i\omega k_n - 1 & e^{i\frac{\omega}{\beta_n} h_n} & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & i\omega k_n - 1 & e^{-i\frac{\omega}{\beta_n} h_n} & \end{bmatrix}$$

$2n \times 2n$

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_1(0, \omega) \\ \tilde{u}_2(0, \omega) \\ \tilde{\tau}_2(0, \omega) \\ \tilde{u}_3(0, \omega) \\ \tilde{\tau}_3(0, \omega) \\ \cdot \\ \cdot \\ \tilde{u}_n(0, \omega) \\ \tilde{\tau}_n(0, \omega) \\ \tilde{\tau}_n(h_n, \omega) \end{bmatrix}_{2n \times 1} \quad \text{и} \quad \bar{F} = \tilde{u}(h_n, \omega) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \\ -i\omega k_2 e^{i\frac{\omega}{\beta_2} h_2} \\ i\omega k_2 e^{-i\frac{\omega}{\beta_2} h_2} \end{bmatrix}_{2n \times 1} \quad (14)$$

где

Для оценки колебаний слоёв грунта при сейсмических воздействиях более подходящей моделью является модель массива, состоящего из n слоёв, причём нижний слой полубесконечный. Сейсмическое воздействие задаётся параметрами падающей волны на границу полупространства. В таком случае учитываются отражённые волны. Система уравнений может быть представлена в виде:

$$D * \bar{X} = \bar{F}$$

$$D = \begin{bmatrix} i\omega k_1 & -i\omega k_1 e^{i\frac{\omega}{\beta_1} h_1} & e^{i\frac{\omega}{\beta_1} h_1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -i\omega k_1 & i\omega k_1 e^{i\frac{\omega}{\beta_1} h_1} & e^{i\frac{\omega}{\beta_1} h_1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & i\omega k_2 & -1 & -i\omega k_2 e^{i\frac{\omega}{\beta_2} h_2} & e^{i\frac{\omega}{\beta_2} h_2} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -i\omega k_2 & -1 & i\omega k_2 e^{-i\frac{\omega}{\beta_2} h_2} & e^{-i\frac{\omega}{\beta_2} h_2} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \cdot & i\omega k_n & -1 \end{bmatrix} \quad (2n-1) \times (2n-1)$$

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_1(0, \omega) \\ \tilde{u}_2(0, \omega) \\ \tilde{\tau}_2(0, \omega) \\ \tilde{u}_3(0, \omega) \\ \tilde{\tau}_3(0, \omega) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \tilde{\tau}_n(0, \omega) \\ \tilde{\tau}_n(h_n, \omega) \end{bmatrix} \quad (2n-1) \times 1 \quad \text{и} \quad \bar{F} = \tilde{u}(h_n, \omega) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \\ i\omega k_n \end{bmatrix} \quad 2n \times 1$$

где

В результате решения системы уравнений определяется изображение Фурье функции перемещений границ слоёв грунта $\tilde{u}_j(h_j, \omega)$, зная которые можно определить изображение Фурье функций скоростей и ускорений:

$$\tilde{\dot{u}}_j(h_j, \omega) = (-i\omega)\tilde{u}_j(h_j, \omega);$$

$$\tilde{\ddot{u}}_j(h_j, \omega) = (-i\omega)^2\tilde{u}_j(h_j, \omega).$$

Для определения оригиналов этих функций (зависимостей от времени) используется алгоритм быстрого преобразования Фурье.

Для учёта рассеяния энергии при распространении волн в грунте используется комплексный модуль упругости в соответствии с теорией внутреннего трения Е.С. Сорокина [3]:

$$\mu_j = \mu_{0j}(1 + 2\xi i) \text{ - комплексный модуль сдвига;}$$

$\xi = \frac{\gamma}{2}$ - коэффициент внутреннего трения в грунте, определяющий демпфирование.

Для получения численных результатов аспиранты МИИТа Нгуен Ван Хунг и А.В. Косауров разработали программы в МАТЛАБе.

Список литературы

1. Хургин Я. И., Яковлев В. П. Фinitные функции в физике и технике. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1971. 408 с.
2. Курбацкий Е. Н., Метод решения задач строительной механики и теории упругости, основанный на свойствах изображений Фурье фinitных функций : дис. д-ра техн. наук. Москва : Миит, 1995. 205 с.
3. Kurbatskiy E. Seismic Abatement Method for Nuclear Power Plants and Seismic-Isolation Systems for Structural Elements. In the First Edition "Infrastructure Systems for Nuclear Energy", Edited by Thomas T.C. Hsu, Chiun-Lin Wu and Jui-Liang Lin. 2014 John Wiley & Sons, Ltd. Published © 2014 by John Wiley & Sons, Ltd.
4. Сорокин Е. С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем / Е. С. Сорокин. Академия строительства и архитектуры СССР. ЦНИИС строительных конструкций. М. : Госстройиздат, 1960. 131 с.
5. Отчёт «Предварительное определение расчётных сейсмических воздействий (акселерограмм, спектров, пиковых ускорений и макросейсмических интенсивностей – балльности – колебаний грунта) на участках проектируемого железнодорожного перехода через пролив Невельского».
6. Купчикова Н. В. Определение коэффициента постели по деформации свободного конца сваи с использованием методики дискретного преобразования Фурье // Вестник Саратовского государственного технического университета. № 1. (73). Т. 4. 2013. С. 206–209

УДК 338.45:69

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Г. Б. Сучилин, О. О. Мостовой

*Астраханский государственный архитектурно-строительный университет
(Россия)*

В статье рассмотрены этапы и особенности развития строительного комплекса в России, основные проблемы и возможные пути их решения.

Ключевые слова: *строительство, строительные организации, производство, экономика.*

The article describes the stages and features of the development of the construction complex in Russia, the main problems and possible solutions.

Keywords: *construction, construction organizations, production, economy.*

Строительство – это огромный сектор экономики Российской Федерации. Вклад данной отрасли в ВВП составляет порядка 7%. Ее продуктом являются завершённые жилые, общественные, промышленные здания и сооружения, дороги и пути сообщения, аэропорты, речные и морские порты и т.д. Столь многочисленная отрасль позволяет обеспечивать работой более чем 2,8 млн. человек.

Строительство обладает рядом специфических особенностей. В первую очередь это недвижимость конечного продукта, сложность организации технологических процессов его производства, зачастую тяжёлые условия