

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРЕОБЛАДАЮЩИХ ПЕРИОДОВ НЕОДНОРОДНЫХ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

© 2000 г. Э. Е. Хачиян

*Институт геологических наук НАН РА  
375019 Ереван, пр. Маршала Баграмяна, 24а, Республика Армения  
Поступила в редакцию 08.11.1999*

Статья посвящена сравнительному анализу величин преобладающих периодов неоднородного геологического разреза, вычисленных по разработанным автором теоретическим формулам и установленным экспериментально на этих же разрезах в результате регистрации акселерограмм сильных землетрясений. Для рассмотренных в качестве примера четырех неоднородных разрезов в Эль-Центро, Гукасяне, Гюмри и Мехико обнаружена их достаточная сходимость

Результаты анализа записей ускорений грунта (акселерограмм) во время землетрясений показывают, что их амплитудно-частотный спектр существенно зависит от эпицентрального расстояния и геологических условий места регистрации. За последние годы на основе анализа большого количества записей ускорений грунта предложено множество эмпирических зависимостей максимального ускорения грунта от магнитуды землетрясения и эпицентрального расстояния пункта регистрации. Наиболее полные данные по зависимости максимального ускорения грунта от эпицентрального расстояния, магнитуды и глубины очага имеются в работах Н.Абрасейса, Дж.Боммера, В.Джойнера, В.Буре, Е.Фукишима, Т.Танака [6,12,10,16]. Ранее такие зависимости предлагали Л.Эстева, Н.Ньюмарк, Н.Шебалин, Ф.Аптекаев, В.Штейберг, К.Камбелл и др. Таким образом можно констатировать, что вопрос прогнозирования максимальной величины ускорения грунта на данной строительной площадке (вне ближней зоны) от известных зон возможных землетрясений с данной магнитудой с достаточной обеспеченностью можно считать разрешенной. Существует большой дефицит данных о частотных составах колебания строительных площадок с различными грунтовыми условиями. Между тем, для обеспечения сейсмостойкости сооружений прогнозирование частотного состава колебания грунта с данными геологическими разрезами во многих случаях имеет не менее решающее значение, чем прогнозирование максимального значения ускорения грунта. Самые общие сведения о преобладающих периодах колебания грунта можно уловить от спектров реакций, построенных по записям ускорения грунта на участках с различными геологическими разрезами. Сопоставительный анализ таких спектров указывает, что величины преобладающих периодов колебания скальных грунтов во время землетрясений находятся в узком диапазоне – 0.15+0.35 сек, тогда как их значения для многослойных “мягких” грунтов изменяются в широком диапазоне – 0.5+1.5 сек, а иногда доходят до 3.0 сек. (грунты Мехико).

Настоящая работа в развитии ранее опубликованных наших работ [3,4] направлена на изыскание практических способов аналитического вычисления величин преобладающих периодов колебания грунтов с различными геологическими разрезами, а главная цель – оценка сте-

пени их достоверности.

Главную роль в процессе передачи энергии сейсмических волн сооружению играет верхний слой грунта, на который опирается его фундамент. С другой стороны, кинематические параметры верхнего слоя, в свою очередь, обусловлены физико-механическими и акустическими свойствами нижележащих слоев грунта. Но возникает естественный вопрос: до какой глубины  $H$  нижележащие слои оказывают ощутимое влияние на амплитуду и частоту колебания верхнего слоя. Для скальных грунтов значение  $H$  можно принимать в пределах 30-50 метров, а для аллювиальных грунтов – до уровня коренных пород – от 10 до 300 и более метров [3,4]. Если основание сооружения однородное, то его количественно можно характеризовать значением собственного периода колебания слоя грунта, определяемого известной формулой:  $T_{01} = 4H/V_s$ , где  $V_s$  – скорость распространения поперечных волн в слое.

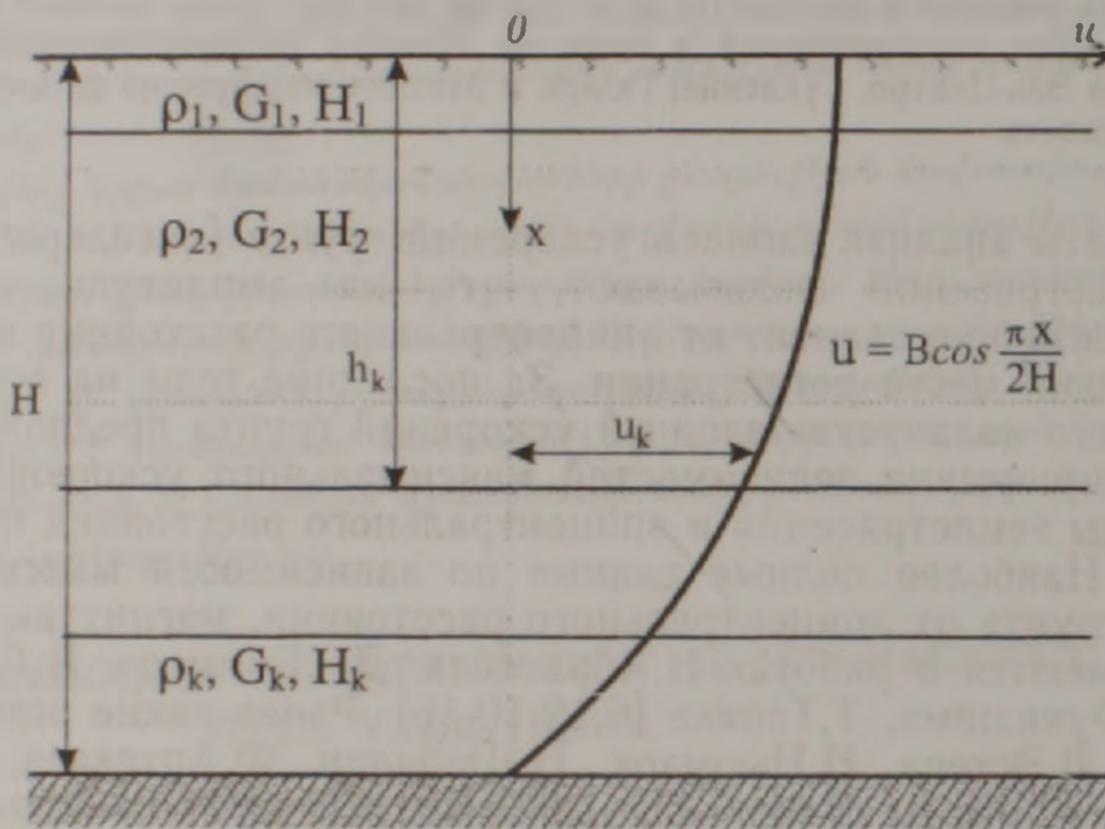


Рис.1

В общем случае собственные частоты неоднородного основания (рис.1) определяются из следующих волновых уравнений

$$G_k \frac{\partial^2 u_k}{\partial x^2} - \rho_k \frac{\partial^2 u_k}{\partial t^2} = 0 \quad k=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

с двумя граничными условиями:

при  $x=0, \quad \frac{\partial u_1}{\partial x} = 0, \quad (2)$

при  $x=H, \quad u_n(H, t)=0$

и  $2n-2$  условиями неразрывности среды:

при  $x=H_i \quad \begin{cases} u_i(x, t) = u_{i+1}(x, t) \\ G_i \frac{\partial u_i}{\partial x} = G_{i+1} \frac{\partial u_{i+1}}{\partial x} \end{cases} \quad (3)$

$i=1, 2, \dots, n-1,$

где  $u_k(x,t)$  – деформация сдвига  $k$ -ого слоя.

В наиболее часто встречающихся случаях двухслойного, трехслойного и четырехслойного оснований, характеристические уравнения системы (1) для определения преобладающих периодов колебания грунтов  $T_0$ , полученных точным методом волновой механики, удовлетворяя условиям (2) и (3), имеют вид следующих трансцендентных уравнений:

– для двухслойного основания

$$\sqrt{\frac{\rho_1 G_1}{\rho_2 G_2}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_1 \times \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_2 - 1 = 0; \quad (4)$$

– для трехслойного основания

$$\begin{aligned} & \sqrt{\frac{\rho_1 G_1}{\rho_2 G_2}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_1 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_2 + \sqrt{\frac{\rho_2 G_2}{\rho_3 G_3}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_2 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_3 + \\ & + \sqrt{\frac{\rho_1 G_1}{\rho_3 G_3}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_1 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_3 - 1 = 0; \end{aligned} \quad (5)$$

– для четырехслойного основания

$$\begin{aligned} & \sqrt{\frac{\rho_1 G_1}{\rho_2 G_2}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_1 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_2 + \sqrt{\frac{\rho_1 G_1}{\rho_3 G_3}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_1 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_3 + \sqrt{\frac{\rho_1 G_1}{\rho_4 G_4}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_1 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_4 + \\ & + \sqrt{\frac{\rho_2 G_2}{\rho_3 G_3}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_2 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_3 + \sqrt{\frac{\rho_2 G_2}{\rho_4 G_4}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_2 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_4 + \\ & + \sqrt{\frac{\rho_3 G_3}{\rho_4 G_4}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_3 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_4 - \sqrt{\frac{\rho_1 G_1 \rho_3 G_3}{\rho_2 G_2 \rho_4 G_4}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_1 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_2 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_3 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_4 - 1 = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где приняты обозначения:

$$\alpha_1 = H_1 \sqrt{\frac{\rho_1}{G_1}}, \quad \alpha_2 = H_2 \sqrt{\frac{\rho_2}{G_2}}, \quad \alpha_3 = H_3 \sqrt{\frac{\rho_3}{G_3}}, \quad \alpha_4 = H_4 \sqrt{\frac{\rho_4}{G_4}}. \quad (7)$$

В общем случае неоднородного грунтового основания (рис.1) из  $n$  пластов с характеристиками  $H_k$ ,  $\rho_k$ ,  $v_{sk}$  и общей мощностью  $H$  получение характеристического уравнения типа (4)-(6) существенно затруднено, поэтому в таких случаях рекомендуется путем осреднения физико-механических характеристик слоев расчетную модель основания привести к вышерассмотренным двух-четырёхслойным вариантам. В большинстве таких случаев, если физико-механические характеристики слоев резко не отличаются друг от друга для определения величины первого преобладающего периода  $T_{01}$ , принимая форму деформирования неоднородного поверхностного слоя в виде формы деформирования однородного слоя  $u(x) = B \cos \pi x / 2H$ , которая удовлетворяет только граничным условиям задачи (2), энергетическим методом получено следующее приближенное решение:

$$T_{01} = 4H \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n \rho_k \left[ H_k + \frac{H}{\pi} \left( \sin \frac{\pi h_k}{H} - \sin \frac{\pi h_{k-1}}{H} \right) \right]}{\sum_{k=1}^n \rho_k v_{sk}^2 \left[ H_k - \frac{H}{\pi} \left( \sin \frac{\pi h_k}{H} - \sin \frac{\pi h_{k-1}}{H} \right) \right]}}, \quad (8)$$

где:  $v_{sk} = \sqrt{G_k / \rho_k}$  – скорость волн сдвига  $k$ -го слоя;  $G_k$  – модуль сдвига;  $\rho_k$  – плотность  $k$ -ого слоя (массовая);  $h_0 = 0$ ,  $h_k = \sum H_i$ ,  $h_n = H$ .

При этом, согласно теореме Рэлея приближенное значение периода  $T_{01}$  по формуле (8) всегда меньше его истинного значения, вычисленного по трансцендентным уравнениям (4)-(6).

Что касается значений периодов высших тонов колебаний, то их рекомендуется определять по следующим формулам:

$$T_{02} = \frac{T_{01}}{3}, \quad T_{03} = \frac{T_{01}}{5}. \quad (9)$$

Справедливость этих формул подтверждается данными, приведенными на карте грунтовых характеристик города Токио. Согласно [2] центральная часть территории города разделена на однокилометровые квадраты, в узлах которых указаны значения преобладающих периодов, установленные экспериментально, путем гармонического анализа записанных микросейсмических колебаний грунтов (табл.1). Как видно из таблицы, средние значения отношений  $T_{01}/T_{02}$  и  $T_{01}/T_{03}$  по 15 узлам составляют соответственно 2.9 и 5.02, что очень близко к коэффициентам формул (9).

Таблица 1

| N узла           | Значения частот первых трех форм колебаний (в герцах) |            |            | $T_{01}/T_{02}$ | $T_{01}/T_{03}$ |
|------------------|---|------------|------------|-----------------|-----------------|
|                  | $1/T_{01}$  | $1/T_{02}$ | $1/T_{03}$ |                 |                 |
| 1                | 0.6   | 2.0        | 3.5        | 3.3             | 5.8             |
| 2                | 0.6   | 1.9        | 3.2        | 3.1             | 5.3             |
| 3                | 0.5   | 1.5        | 2.5        | 3.0             | 5.0             |
| 4                | 0.6   | 1.7        | 3.0        | 2.8             | 5.1             |
| 5                | 0.5   | 1.4        | 2.3        | 2.8             | 4.6             |
| 6                | 0.6   | 1.8        | 3.1        | 3.0             | 5.1             |
| 7                | 0.5   | 1.4        | 2.4        | 2.8             | 4.8             |
| 8                | 0.6   | 1.7        | 2.6        | 2.8             | 4.3             |
| 9                | 0.6   | 1.8        | 3.0        | 3.0             | 5.0             |
| 10               | 0.8   | 2.3        | 4.0        | 2.8             | 5.0             |
| 11               | 0.8   | 2.5        | 4.3        | 3.1             | 5.3             |
| 12               | 1.1   | 3.2        | -          | 2.9             | -               |
| 13               | 1.7   | 4.1        | -          | 2.4             | -               |
| 14               | 1.6   | 4.8        | -          | 3.0             | -               |
| 15               | 1.4   | 4.5        | -          | 2.8             | -               |
| Среднее значение |   |            |            | 2.9             | 5.02            |

Отметим, что в литературе по инженерной сейсмологии имеются и другие приближенные формулы для определения  $T_{01}$ . Так в работе [2] для определения величины  $T_{01}$  при условии, что характеристики раз-

ных слоев не очень отличаются друг от друга, предлагается следующая формула:

$$T_{01} = \sum_{k=1}^n \frac{4H_k}{v_{sk}} \quad (10)$$

В документах Американского консилиума по сейсмической защите сооружений (редакция 1997 года) [13] для среднего значения скорости распространения волн сдвига в неоднородном "поверхностном слое" предлагается формула:

$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{k=1}^n H_k}{\sum_{k=1}^n \frac{H_k}{v_{sk}}} \quad (11)$$

Простыми преобразованиями можно убедиться, что обе формулы (во втором случае  $T_{01} = 4H / \bar{v}_s$ ) приводят к одинаковым результатам.

Преимущество формулы (8) перед формулами (10) и (11) заключается в том, что в нее кроме характеристик мощностей слоев  $H_k$  и величин скоростей распространения волн сдвига  $v_{sk}$  входят также величины плотностей слоев  $\rho_k$ . Тем самым формула (8) обеспечивает более высокую точность при определении  $T_{01}$ , чем формула (10) или (11).

#### Примеры

Ниже приводятся результаты вычисления значений преобладающих периодов по формулам (4)-(11) для некоторых геологических разрезов и сравнения с их реальными значениями, установленными в результате обработки зарегистрированных на этих разрезах акселерограмм землетрясений или микроколебаний грунта. Во всех примерах для "грунта основания" значение  $v_p$  принимается более 800 м/сек.

- Эль-Центро – двухслойное основание со следующими характеристиками [2]:

$$H_1=20 \text{ м}, \quad \rho_1=0.2 \text{ тсек}^2/\text{м}^4, \quad v_{s1}=208 \text{ м/сек (глина);}$$

$$H_2=12, \quad \rho_2=0.2, \quad v_{s2}=150 \quad \text{(суглинок)}$$

"Грунт основания" представляет собой большой слой гравия, песка и глины –  $v_p=1800$  м/сек. Значения первых трех корней трансцендентного уравнения (4) следующие:

$$T_{01}=0.785 \text{ с}, \quad T_{02}=0.227 \text{ с}, \quad T_{03}=0.143 \text{ с}.$$

Для сравнения значение  $T_{01}$  было вычислено также по формулам (8) и (10). Они оказались соответственно:

$$T_{01}=0.747 \text{ с по формуле (8)}$$

$$T_{01}=0.704 \text{ с по формуле (10)}.$$

При землетрясении 18 мая 1940 года с магнитудой  $M=6.7$  на станции Эль-Центро, находящейся на расстоянии примерно 50 км от эпицентра, была зарегистрирована акселерограмма грунта с максимальным ускорением грунта 0.32g. Максимальные (пиковые) значения ускорений на спектре реакции, построенном по акселерограмме землетрясения, соответствовали периодам 0.25 с и 0.6 с – близкие к вычисленным значениям  $T_{02}$  и  $T_{01}$ .

- Гукасян – четырехслойное основание со следующими характеристиками [17]:

$$H_1=3.0 \text{ м}, \quad \rho_1=0.154 \text{ тсек}^2/\text{м}^4, \quad v_{s1}=200 \text{ м/сек} \quad \text{– суглинок,}$$

$$H_2=1.8, \quad \rho_2=0.177, \quad v_{s2}=200 \quad \text{– озерная глина,}$$

$$H_3=5.7, \quad \rho_3=0.180, \quad v_{s3}=300 \quad \text{– гравий с песком,}$$

$$H_4=24.5, \quad \rho_4=0.177, \quad v_{s4}=300 \quad \text{– озерные образования}$$

"Грунт основания" – трещиноватые базальты с  $v_s = 1000$  м/сек

Значения первых трех корней трансцендентного уравнения (6) следующие:

$$T_{01} = 0.463 \text{ с}, \quad T_{02} = 0.157 \text{ с}, \quad T_{03} = 0.098 \text{ с}.$$

Значения  $T_{01}$ , вычисленные по формулам (8) и (10), оказались:

$$T_{01} = 0.463 \text{ с по формуле (8)}, \\ T_{01} = 0.499 \text{ с по формуле (10)}.$$

При Спитакском землетрясении 7-ого декабря 1988 года в Гукасяне была зарегистрирована акселерограмма (трехкомпонентная) грунта как при главном толчке ( $M_s = 6.9$ ), так и при афтершоке через 4 мин. 15 сек ( $M_s = 6.25$ ). По спектру реакции (затухание 5%) этих акселерограмм значение преобладающих периодов (в секундах) грунта оказались [8,9]:

по компоненте N-S 0.33; 0.45 (главный толчок); 0.25; 0.38 (афтершок);  
по компоненте E-W 0.38; 0.9 (главный толчок); 0.55 (афтершок).

• Гюмри – шестислойное (старая часть города) основание со следующими характеристиками [7, 9, 11, 17]:

|                |   |                      |                       |
|----------------|---|----------------------|-----------------------|
| $H_1 = 5.5$ м. | $\rho_1 = 0.20$ тсек <sup>2</sup> /м <sup>4</sup> . | $v_{s1} = 200$ м/сек | – песок,              |
| $H_2 = 7.0$ .  | $\rho_2 = 0.20$ .                                   | $v_{s2} = 300$       | – глина,              |
| $H_3 = 12.5$ . | $\rho_3 = 0.21$ .                                   | $v_{s3} = 450$       | – туфы,               |
| $H_4 = 25$ .   | $\rho_4 = 0.20$ .                                   | $v_{s4} = 350$       | – пластическая глина, |
| $H_5 = 100$ .  | $\rho_5 = 0.21$ .                                   | $v_{s5} = 550$       | – озерные глины,      |
| $H_6 = 200$ .  | $\rho_6 = 0.21$ .                                   | $v_{s6} = 800$       | – озерные глины.      |

"Грунт основания" – плотные грунты с  $v_s = 1800$  м/сек.

Значения преобладающих периодов, вычисленные по формулам (8) и (10), соответственно оказались:

$$T_{01} = 1.799 \text{ с по формуле (8)}, \\ T_{01} = 1.990 \text{ с по формуле (10)}.$$

Значения  $T_{01}$ ,  $T_{02}$ ,  $T_{03}$  были вычислены также по трансцендентному уравнению (5), заранее шестислойное основание приведя к трехслойному. При этом значения плотностей аналогично формуле (11) были осреднены по формуле

$$\bar{\rho}_i = \frac{\sum_{k=1}^m H_k \rho_k}{\sum_{k=1}^m H_k}. \quad (12)$$

В результате, для приведенного трехслойного основания Гюмри были приняты следующие характеристики:

|                       |  |                      |               |
|-----------------------|--|----------------------|---------------|
| $\bar{H}_1 = 12.5$ м. | $\bar{\rho}_1 = 0.2$ тсек <sup>2</sup> /м <sup>4</sup> . | $v_{s1} = 246$ м/сек | – (1-2 слой), |
| $\bar{H}_2 = 37.5$ .  | $\bar{\rho}_1 = \bar{\rho}_2 = 0.203$ .                  | $v_{s2} = 378$       | – (3-4 слой), |
| $\bar{H}_3 = 300$ .   | $\bar{\rho}_3 = 0.21$ .                                  | $v_{s3} = 695$       | – (5-6 слой). |

По этим характеристикам из трансцендентного уравнения (5) получены:

$$T_{01} = 2.017 \text{ с}, \quad T_{02} = 0.711 \text{ с}, \quad T_{03} = 0.464 \text{ с}.$$

Для приведенного трехслойного основания значения  $T_{01}$  были вычислены также по формулам (8) и (10), они оказались:

$$T_{01} = 2.009 \text{ с по формуле (8)}, \\ T_{01} = 1.990 \text{ с по формуле (10)}.$$

К сожалению, во время землетрясения 7-го декабря 1988 года на территории Гюмри не были зарегистрированы акселерограммы грунта. Непосредственно после землетрясения на территории города Гюмри японскими специалистами были произведены записи микроколебаний грунтов на 12 участках (включая новые участки для строительства). По их результатам [14] для старой части города значения преобладающих периодов колебаний изменяются в большом диапазоне: от 0.51 до 0.64 секунд, а по результатам записи афтершока Спитакского землетрясения 31.12.1988г в г.Гюмри преобладающие периоды на территории города оказались в диапазоне от 0.8 до 2.0 секунд [7].

• Мехико – 14-слойное основание (Аламада Парк) со следующими характеристиками [15]:

|                 |  |                     |
|-----------------|--|---------------------|
| $H_1=5.5$ м     | $\rho_1=0.169$ тсек <sup>2</sup> /м <sup>4</sup> , | $v_{s1}=76.9$ м/сек |
| $H_2=3.6$ ,     | $\rho_2=0.153$ ,                                   | $v_{s2}=114.4$ ,    |
| $H_3=6.6$ ,     | $\rho_3=0.119$ ,                                   | $v_{s3}=48.5$ ,     |
| $H_4=0.7$ ,     | $\rho_4=0.180$ ,                                   | $v_{s4}=62.3$ ,     |
| $H_5=3.3$ ,     | $\rho_5=0.118$ ,                                   | $v_{s5}=55.2$ ,     |
| $H_6=3.85$ ,    | $\rho_6=0.126$ ,                                   | $v_{s6}=61.0$ ,     |
| $H_7=3.55$ ,    | $\rho_7=0.120$ ,                                   | $v_{s7}=62.5$ ,     |
| $H_8=1.9$ ,     | $\rho_8=0.122$ ,                                   | $v_{s8}=76.7$ ,     |
| $H_9=4.4$ ,     | $\rho_9=0.119$ ,                                   | $v_{s9}=77.7$ ,     |
| $H_{10}=4.7$ ,  | $\rho_{10}=0.180$ ,                                | $v_{s10}=148.9$ ,   |
| $H_{11}=3.35$ , | $\rho_{11}=0.129$ ,                                | $v_{s11}=87.0$ ,    |
| $H_{12}=0.4$ ,  | $\rho_{12}=0.178$ ,                                | $v_{s12}=105.9$ ,   |
| $H_{13}=3.3$ ,  | $\rho_{13}=0.127$ ,                                | $v_{s13}=93.8$ ,    |
| $H_{14}=2.45$ , | $\rho_{14}=0.130$ ,                                | $v_{s14}=138.4$ .   |

Материалы слоев в основном представляют из себя разной степени водонасыщенные наносы, глины и пески.

Значения преобладающих периодов, вычисленные по формулам (8) и (10), соответственно оказались:

$$T_{01}=1.837 \text{ с по формуле (8).}$$

$$T_{01}=2.559 \text{ с по формуле (10).}$$

Как и в предыдущем случае, 14-слойное основание, согласно формулам (11) и (12), было приведено к 4-слойному со следующими характеристиками:

|                       |  |   |
|-----------------------|--|---|
| $\bar{H}_1 = 15.7$ м, | $\bar{\rho}_1 = 0.144$ тсек <sup>2</sup> /м <sup>4</sup> , | $\bar{v}_{s1} = 65.59$ м/сек (1-3 слой) |
| $\bar{H}_2 = 11.4$ ,  | $\bar{\rho}_2 = 0.121$ ,                                   | $\bar{v}_{s2} = 59.70$ (4-7 слой)       |
| $\bar{H}_3 = 11.0$ ,  | $\bar{\rho}_3 = 0.146$ ,                                   | $\bar{v}_{s3} = 97.37$ (8-10 слой)      |
| $\bar{H}_4 = 9.5$ ,   | $\bar{\rho}_4 = 0.131$ ,                                   | $\bar{v}_{s4} = 99.82$ (11-14 слой)     |

Для приведенного четырехслойного основания решение трансцендентного уравнения (6) дало следующие значения для преобладающих периодов:

$$T_{01}=2.402 \text{ с, } T_{02}=0.852 \text{ с, } T_{03}=0.553 \text{ с.}$$

Для приведенного четырехслойного основания значения  $T_{01}$  по формулам (8) и (10) соответственно оказались:

$$T_{01}=2.119 \text{ с по формуле (8).}$$

$$T_{01}=2.559 \text{ с по формуле (10).}$$

По данным [15], значение преобладающего периода  $T_{01}$  этого участка города Мехико, установленного по спектру реакции землетрясения, составило:

– при землетрясении 11 мая 1962г.

$$T_{01}=2.0 \text{ с (компонента N11W),}$$

$$T_{01}=1.75 \text{ с (компонента N79E);}$$

– при землетрясении 19 мая 1962г.

$$T_{01}=3.5 \text{ с (N11W),}$$

$$T_{01}=1.75 \text{ с (N79E);}$$

– при землетрясении 19 сентября 1985г.

$$T_{01}=2.0+2.6 \text{ с.}$$

Одно важное замечание: как сказано выше, приближенная формула (8) всегда приводит к уменьшению величины преобладающего периода  $T_0$  по сравнению с его истинным значением, вычисленным по решению соответствующего трансцендентного уравнения. Результаты

рассмотренных примеров показывают, что степень такого уменьшения составляет 10-30%. Поэтому при применении упрощенной формулы (8) рекомендуется полученные значения  $T_0$  умножать на корректирующий коэффициент 1.2.

Как видно из приведенных примеров, значения преобладающих периодов, вычисленные по формулам (4)-(11), в первом приближении можно принимать равными значениям преобладающих периодов колебания грунта во время реального землетрясения. К.Канаи [2] считает, что при землетрясениях с магнитудой  $M > 6$  реальные значения преобладающих периодов колебаний грунта приближаются к их значениям (наибольшему или обертому), установленным экспериментально, путем гармонического анализа микроколебаний грунта данной местности. Приведенные в [15] данные по значениям преобладающих периодов колебаний грунтов, установленные по пиковым значениям ускорений на спектре реакции и по спектру Фурье одного и того же землетрясения, показывают, что они отличаются очень незначительно. При этом максимальное (наибольшее из пиковых) значение ускорения на спектре реакции может иметь место как при низких, так и при высших гармониках колебания грунта.

Таким образом, можно констатировать два важных обстоятельства. Во-первых, вычисленные по предлагаемым формулам (4)-(11) значения преобладающих периодов колебаний грунта близки к их значениям, установленным экспериментально, путем гармонического анализа микроколебаний данного участка, и во вторых, они близки также к их значениям, наблюдаемым на акселерограммах, зарегистрированных на данном участке при реальных землетрясениях.

Вышеприведенные результаты дают основание предполагать, что в формировании колебательного процесса грунтов во время землетрясения главную роль играют собственные колебания поверхностного слоя. Это означает, что акселерограммы, зарегистрированные на данном пункте наблюдения при различных землетрясениях, в основном должны иметь одни и те же преобладающие периоды, вне зависимости от магнитуды и эпицентрального расстояния. При такой упрощенной гипотезе о формировании колебательного процесса верхних слоев грунта значительно упростится также задача генерирования искусственных акселерограмм для данных грунтовых условий от известных зон возможных землетрясений с заданной магнитудой  $M$ , эпицентральным расстоянием  $\Delta$  и глубиной  $h$ , так как в качестве их амплитудно-частотной характеристики можно принимать спектры частот свободных колебаний поверхностного слоя.

Предположение о главной роли поверхностного слоя при формировании колебательного процесса грунтов, нам кажется, согласуется с современным представлением о механизме возникновения землетрясения, как результат мгновенного разрыва сплошности и распространения части энергии разрыва в виде упругих сейсмических волн. Сейсмические волны в верхних, менее стесненных с точки зрения деформирования, слоях Земли нарушают их статическое равновесие, вследствие чего в них возникают сдвиговые колебательные процессы (аналогичные собственным сдвиговым колебаниям сплошной упругой среды конечных размеров и заданных физико-механических параметров) с преобладающими периодами, в результате суперпозиции которых сформулируется акселерограмма данной местности. Пиковые значения на акселерограмме будут обусловлены как размерами разрыва в очаге (магнитудой землетрясения), так и эпицентральным расстоянием места регистрации. Длительность сотрясения бу-

дет обусловлена как величиной начальной амплитуды, так и динамическими характеристиками данных грунтов: чем больше уровень начального возмущения (магнитуды) и значения периодов преобладающих колебаний и меньше коэффициент затухания грунта, тем длительнее землетрясение в данной местности.

Отметим, что аналогичное явление имеет место и при колебаниях зданий и сооружений при землетрясениях. Как показывают теоретические исследования и анализ инструментальных записей, реакция сооружения на его различных уровнях образуется в результате суперпозиции квазигармонических колебаний с периодами, равными периодам собственных колебаний самого сооружения [5]. Таким образом, общую картину передачи сейсмического воздействия от очага землетрясения до верха сооружения упрощенно можно представить в следующем виде: сейсмические волны, распространяющиеся от очага землетрясения на поверхности Земли, генерируют колебания с преобладающими периодами поверхностного слоя грунта, которые в свою очередь в наземном сооружении вызывают новые колебания с преобладающими периодами сооружения, т.е. в процессе землетрясения происходит двойная фильтрация сейсмических волн — сначала в поверхностном слое грунта, а потом в самом сооружении.

**ԳՐՈՒՆՏԱՅԻՆ ԱՆՀԱՄԱՍԵՌ ՀԻՄՆԱՏԱԿԻ ԳԵՐԱԿՇՈՂ  
ՊԱՐԲԵՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՏԵՍԱԿԱՆ ԵՎ ԳՐԱՆՑՎԱԾ  
ՄԵԾՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԱՄԵՄԱՏԱԿԱՆ ՎԵՐԱՆՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ**

**Է. Ե. Խաչիյան**

**Ա մ փ ո փ ու մ**

Հողվածը նվիրված է գրունտային անհամասեռ հիմնատակի գերակշռող պարբերությունների մեծությունների որոշման եղանակների հետազա կատարելագործմանը: Ստացված են իրարից  $H$ , հզորություն,  $\rho$ , խտություն և  $G$ , սարքի մոդուլով տարբերվող  $n$  շերտերից կազմված ստվարաշերտի (նկ.1) սեփական տատանումների պարբերությունների հաշվարկման (4)-(6) ճշգրիտ բանաձևերը, երբ ( $n \leq 4$ ) և (8) ու (9) մոտավոր բանաձևերը՝ ցանկացած թվով շերտերի դեպքում:

Չորս անհամասեռ տեղանքների՝ էլ-Ցենտրո (2 շերտ), Ղուկասյանի (4 շերտ), Գյումրիի (6 շերտ) և Մելիկոյի (14 շերտ) համար ստացված բանաձևերով հաշվարկված գերակշռող պարբերությունների մեծությունները համեմատված են այդ նույն տեղանքներում ուժեղ երկրաշարժերի (Սպիտակի և Մեքսիկայի) ժամանակ գրանցված գետնի աքսելերոգրամների հիման վրա հաստատված գերակշռող պարբերությունների մեծությունների հետ: Ստացված արդյունքները վկայում են առաջարկված տեսական բանաձևերով հաշվարկված և իրականում գրանցված պարբերությունների մեծությունների գործնական կիրառման տեսակետից բավարար ճշտության մասին:

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE THEORETICAL AND REGISTERED  
VALUES OF PREDOMINANT PERIODS OF INHOMOGENEOUS  
SOIL FOUNDATIONS**

**E. Y. Khachian**

**Abstract**

The paper is devoted to the comparative analysis of the predominant period values of an inhomogeneous geological section calculated by the theoretical formulae

developed by the author and established for the same sections by the registration of strong earthquake accelerograms. For four inhomogeneous sections in El-Centro, Ghoukassian, Gumri and Mexico considered as an example, ample similarity has been established.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Т.Бабаян, Ф.Минасян, С.Пирузян. Определение сейсмических свойств грунтов города Лениакана. Известия АН АрмССР, Науки о Земле, 1974, XXVII, N3, с.56-65.
2. М.Окомото. Сейсмостойкость инженерных сооружений. М., 1980, 342с.
3. Э.Е.Хачиян. Исследование динамических характеристик неоднородных грунтовых оснований. Известия НАН РА, Науки о Земле, 1995, XLVIII, N2-3, с.112-119.
4. Э.Е.Хачиян. Об одной физической предпосылке для упрощенной оценки параметров колебания грунтов и их воздействия на сооружения при сильных землетрясениях. Сборник научных трудов конференции, посвящ. 90-летию со дня рождения академика А.Г.Назарова (1-4 июля 1998, г.Гюмри), с.157-163.
5. Э.Е.Хачиян. Сейсмические воздействия на высотные здания и сооружения. Ереван, Айастан, 1973, 328 с.
6. N.N.Ambraseys and J.J.Boinmer. Database of European Earthquake Associated with Strong-motion Records. European Earthquake Eng. V, N2, 1991, p.18-37.
7. R.Borcherdt, G.Glassmouer, M.Andrews and E.Cranswick. Effect of Site Conditions on ground Motion and Damage. Earthquake Spectra, Special Supplement, August, 1988, pp.22-42.
8. A.Der-Kiureghian. Strong-Motion Records. Earthquake Spectra. August, 1989. Special Supplement "Armenia Earthquake Reconnaissane Report" pp. 43-53.
9. Earthquake Spectra, August, 1989, Special Supplement, Armenian Earthquake Reconnaissane Report.
10. Y.Fukushima and Tanaka. A New Attenuation for Peak Ground Acceleration, Velocity and Displacement Based on Multiple Regression Analisys of Japanes Strond Motion. Bull. seis. soc. Am. 80, 1990, p.757-783.
11. A.Hadjian. The Spitak, Armenian Earthquake of 7 december 1988 – why so much destruction. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 12 (1993) 1-24.
12. W.B.Joyrner and D.M.Boore. Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-motion Records Including Records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake Bull. seis. soc. Am. 71, 1981, p.2011-2038.
13. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures. Part I: 1997 Edition. Building Seismic Safety Concil (USA).
14. S.Suyebiro, T.Okada, H.Kobayashi, M.Hirosawa, M.Murakami, S.Sugano. Evaluation of the Results Obtained by the Japenese Mission of Armenia. Proceeding of International Seminar on Spitak-88 Earthquake, Sponsored by UNESCO, Yerevan, May 23-26, 1989, pp.103-118.
15. The September 1985 Mexico Earthquakes: Final Report it the New Zeland Reconnaissance Team. Bulletin of the New Zeland Society for Earthquake Engineering, vol.21, N1, March, 1988.
16. F.Yamazaki. Comparative Study of Attenuation Characteristics of Ground Acceleration in Europe, North America and Japan. Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research center. N26, March, 1993. Inst. of ind. Science univ. of Tokyo, p.39-56.
17. M.K.Yegian, V.G.Ghahraman. The Armenian Eartquake of December 1988, Northeastern University, Boston, Massachusetts, October, 1992, p.207.