

УДК 699.841

**Ր.Ա. ԱՏԱԵԿՅԱՆ, ՅՈՎ. ԱՐՄԻՈՅԱՆ**

**УСТРОЙСТВО СЕЙСМИЧЕСКИХ ШВОВ В ЗДАНИЯХ  
И СМЕЩЕНИЯ НА СЛАБЫХ ГРУНТАХ ПРИ СИЛЬНЫХ  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ**

*(Վանաձոր)*

Проведена сравнительная оценка смещений, скоростей и ускорений на слабых грунтах при сильных землетрясениях. В качестве исходного материала использованы как собственные данные измерений, так и результаты исследований, проведенных специалистами разных стран в зоне хорошо изученного Спитакского землетрясения 1988г. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета больших смещений на слабых грунтах, что особенно важно для протяженных сооружений, Рассматривается также целесообразность разделения фундаментов антисейсмическим швом.

**Ключевые слова:** сейсмический шов, слабые грунты, смещение, сейсмическая нагрузка.

Влияние грунтовых условий на интенсивность сейсмических воздействий общеизвестно и учитывается в нормах сейсмостойкого строительства всех стран [1-3]. Как правило, нагрузки на сооружения от сейсмических воздействий определяются по ускорениям, и для учета влияния грунтовых условий площадки строительства вводятся соответствующие коэффициенты. В нормах сейсмостойкого строительства РФ [1] этот фактор учитывается увеличением или уменьшением исходной сейсмичности на один балл по шкале MSK64, а в строительных нормах США (BSSC) [2,3] -введением коэффициентов  $F_a$  и  $F_v$  для различных категорий площадок строительства (*A, B, C, D, E*). Эти коэффициенты, как и другие, используются при оценке истинных сейсмических воздействий на сооружения путем корректировки расчетных ускорений. Такой подход дает удовлетворительные результаты при плотных грунтах (категории *A, B, C*). Однако на слабых грунтах могут иметь место несравнимо большие смещения, в то время как сейсмические ускорения на разных грунтах изменяются в определенном диапазоне. Следовательно, применение упомянутых выше коэффициентов приводит к некоторой корректировке расчетных ускорений, но никак не учитывает возможные большие смещения слабых грунтов. В качестве примера на рис. 1а показаны расчетные спектры реакции ускорения на скальных породах и поверхностных слабых грунтах для определенного диапазона скоростей волн сдвига, зарегистрированных в городе Гюмри

(Ленинакан, Армения) [4]. На рис. 1б показаны соотношения спектральных ускорений на слабых грунтах и поверхностных скальных породах в зависимости от короткопериодного спектрального ускорения  $S_s$  в соответствии с BSSC [2].

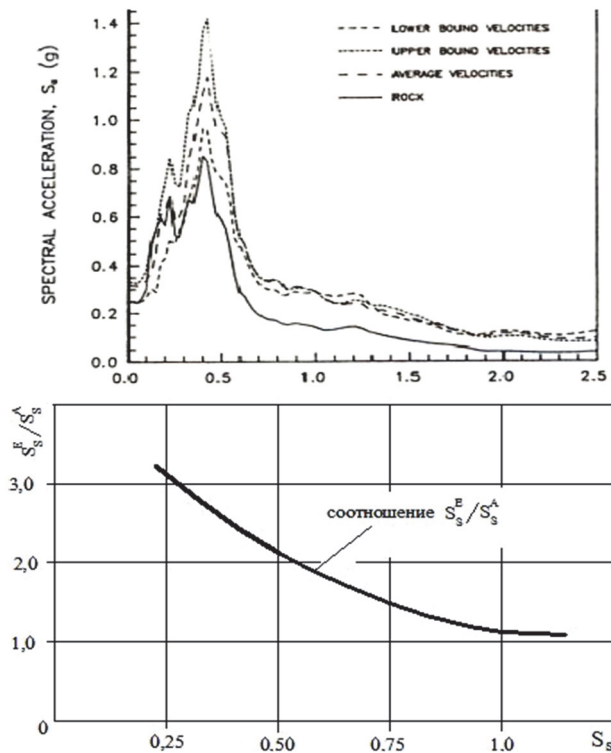


Рис.1: а - спектры реакции ускорения скальных пород и на слабых грунтах [4]; б - соотношение спектральных ускорений на слабых грунтах и скальных породах в соответствии с BSSC [2]

На рис. 1а имеем увеличение ускорений на слабых грунтах до двух раз, а BSSC (рис.1б) предусматривает возможность их увеличения до трех раз. Однако, как будет показано ниже, смещения на слабых грунтах могут увеличиваться в несколько десятков раз, и путем корректировки ускорений их невозможно учесть.

В настоящей работе сделана попытка проведения сравнительной оценки смещений, скоростей и ускорений на слабых грунтах при прохождении сейсмических волн сильного землетрясения. В качестве исходного материала использованы как собственные данные многочисленных измерений скоростей волн  $V_s$  и преобладающих периодов колебания грунтов  $T_0$ , выполненных для микрорайонирования, так и результаты исследований, проведенных специа-

листами разных стран в зоне хорошо изученного Спитакского землетрясения 1988г. [4-11].

Для оценки скоростей колебания частиц среды  $-V$  исходили из плотности потока энергии землетрясения [12]:

$$F_0 = V^2 V_S \rho, \quad (1)$$

где  $V_S$  - скорость прохождения волн;  $\rho$  - плотность.

Энергия Спитакского землетрясения с магнитудой до 7,0 составляет ( $E=10^{22}$  эрг  $\approx 10^{15}$  н.м). Она связана с плотностью потока энергии следующей формулой:

$$E = \int_S \int_T F_0 dS dT. \quad (2)$$

Для ограниченной территории принято  $E = F_0 S T$ . В эпицентральной зоне Спитакского землетрясения при глубине очага 10 км для полушаровой поверхности имеем  $S = 2\pi R^2 = 6,28 \cdot 10^8 \text{ км}^2 = 6,28 \cdot 10^8 \text{ м}^2$ . Продолжительность записи основного удара в ближней зоне:  $T = 24 \text{ с}$  (по записи Ашоцкской инженерно-сейсмометрической станции). По этим данным плотность потока энергии составляет

$$F_0 = E / S T = 1 \cdot 10^{15} \text{ н.м} / (6,28 \cdot 10^8 \text{ м}^2 \cdot 24 \text{ с}) = 663 \cdot 10^2 \text{ н/м.с.}$$

Часть сейсмической энергии, приходящейся на горизонтальные колебания, составляет [13]

$$\nu = 1/\sqrt{2} = 0.71 \text{ и } F_0^\nu = 663 \cdot 10^2 \text{ н/м.с.} \cdot 0.71 = 470,7 \cdot 10^2 \text{ н/м.с}$$

Для поверхностных, коренных скальных пород имеем средние значения  $V_S = 2,7 \text{ км/с}$  и  $\rho = 2400 \text{ кг/м}^3$ . Из (1) для грунтов первой категории (кат. А) получим скорость колебания:

$$V^2 = F_0^\nu / V_S \rho = 0,00726 \text{ м}^2/\text{с}^2; V = 0,085 \text{ м/с} = 8,5 \text{ см/с},$$

что приблизительно соответствует силе землетрясения в VII баллов по шкале MSK 64. Дальнейшее увеличение интенсивности сотрясений происходит в пределах рыхлых отложений [4-6,11]. Отметим, что в городе Ваназор (Кировакан) интенсивность Спитакского землетрясения на аналогичных грунтах также оценивается в VII баллов [6,14].

Принимая, что плотность энергии в различных грунтах не меняется, аналогичным образом определены скорости их колебания. При этом, с целью более подробного разделения грунтов по сейсмическим свойствам, принята приведенная в табл.1 классификация площадок согласно BSSC (США).

В табл.1 приведены также усредненные значения скоростей  $V_S$  по категориям грунтов, полученные в результате обработки более 100 измерений на разных площадках, с учетом фондовых данных. Здесь же приведены соответствующие плотности и рассчитанные значения скоростей колебания  $V$ .

Таблица 1

Категория грунтов	А	В	С	Д	Е
$BSSC (м/с)$	$V_S > 1500$	$1500 > V_S > 760$	$760 > V_S > 360$	$360 > V_S > 180$	$V_S > 180$
$V_S^{CP} (м/с)$	$V_S = 2700$	$V_S = 980$	$V_S = 620$	$V_S = 210$	$V_S = 110$
$\rho (кг/м^3)$	2400	2150	1900	1650	1350
$V (см/с)$	8,5	14,9	20,0	36,9	56,3

Смещения  $D$ , ускорения  $A$  и напряжения  $\tau$  при прохождении сейсмических волн определены по известным выражениям (3) для колебаний в неограниченной упругой среде с учетом условия на поверхности: усредненных значений  $V_S$  и скоростей колебания, полученных для различных грунтов:

$$\frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = V_S^2 \frac{\partial^2 D}{\partial x^2}; \quad \tau = V_S^2 \rho \frac{\partial D}{\partial x}. \quad (3)$$

Для колебаний задана функция  $D = D_0 \sin 2\pi(t/T_S - x/L_S)$ , которая с достаточной для поставленной задачи точностью описывает колебания на начальном, наиболее интенсивном участке вступления  $S$  волн.

Для скоростей, ускорений и напряжений соответственно получим

$$\begin{aligned} V &= D_0(2\pi/T_S) \cos 2\pi(t/T_S - x/L_S); \\ A &= -D_0(2\pi/T_S)^2 \sin 2\pi(t/T_S - x/L_S); \\ \tau &= -V_S^2 \rho D_0(2\pi/L_S) \cos 2\pi(t/T_S - x/L_S). \end{aligned} \quad (4)$$

Имея рассчитанные значения скоростей колебаний  $V$  для различных площадок (табл.1), по выражениям (4) определены соответствующие максимальные смещения  $D_0$ , ускорения  $A$  и напряжения  $\tau$  по имеющимся значениям преобладающих периодов  $T_0$ .

Рассчитанные по усредненным значениям -  $T_0$  перемещения, ускорения и напряжения приведены в табл.2.

Таблица 2

Значения смещений, ускорений и напряжений полученные для различных грунтов

Категор. гр.	А	В	С	Д	Е
$V$ (см/с)	8,5	14,9	20,0	36,9	56,3
$T_0$ (с)	0,13	0,22	0,28	0,49	1,00
$D_0$ (см)	0,17	0,52	0,89	2,88	8,96
$A$ (см/с <sup>2</sup> )	397	424	448	473	353
$\tau$ (кн/м <sup>2</sup> )	552	313	235	128	84

По результатам всех имеющихся данных построены кривые (рис.2) относительных смещений, скоростей и ускорений в зависимости от грунтовых условий (от скоростей  $V_s$ ). На рис.2 ордината показывает соотношение размеров данного параметра и соответствующего параметра для класса В ( $V_s = 980$  м/с). Здесь же, для сравнения, показаны также кривые относительных скоростей и ускорений, построенные по коэффициентам грунтовых условий  $F_v$  и  $F_a$  (FEMA P-750).

Согласно полученным результатам, изменение скоростей и ускорения на слабых грунтах в основном согласуется с принятыми в BSSC значениями, а смещения увеличиваются несравнимо больше (до нескольких десятков раз). Такие же результаты получаются при натуральных измерениях. На рис.3 показаны сейсмограммы и акселерограммы, полученные на станциях Леникан (Len, грунты кат. Е) и Гогаран (Gog, грунты кат.В) при афтершоке Спитакского землетрясения с магнитудой 4,7 [10]. Эти станции расположены на одинаковом расстоянии от эпицентра (24 и 23 км), и при практически одинаковых ускорениях (соответственно 15 и 18 см/с<sup>2</sup>, акселерограммы внизу) смещения на слабых грунтах в десять раз больше, чем на грунтах категории В (соответственно 0,25 и 0,024 см, сейсмограммы наверху). Таким образом, смещения на слабых грунтах увеличиваются многократно (рис. 2 и 3), а ускорения на разных грунтах изменяются в небольшом диапазоне (рис.1а, 2, 3). Следовательно, применение коэффициентов грунтовых условий, направленных на корректировку сейсмических воздействий на сооружения, приводит только к уточнению расчетных ускорений и не отражает истинного характера сейсмических воздействий на слабых грунтах.

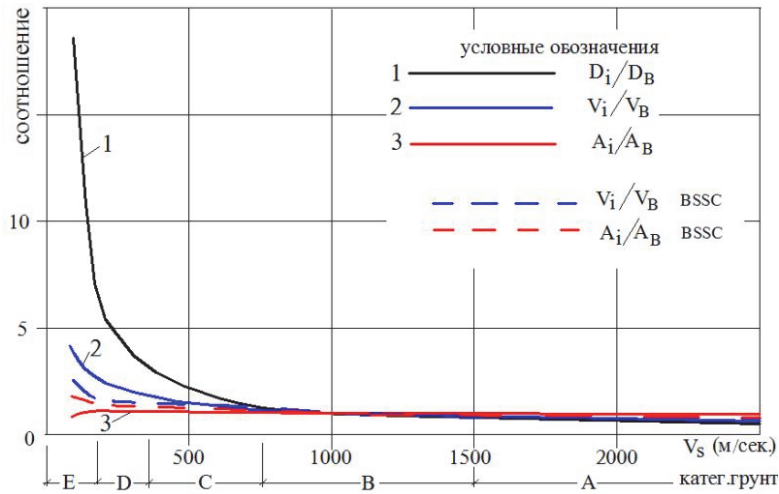


Рис. 2. Изменение относительных перемещений -  $D_i/D_B$ , скоростей -  $V_i/V_B$  и ускорений -  $A_i/A_B$  в зависимости от грунтовых условий

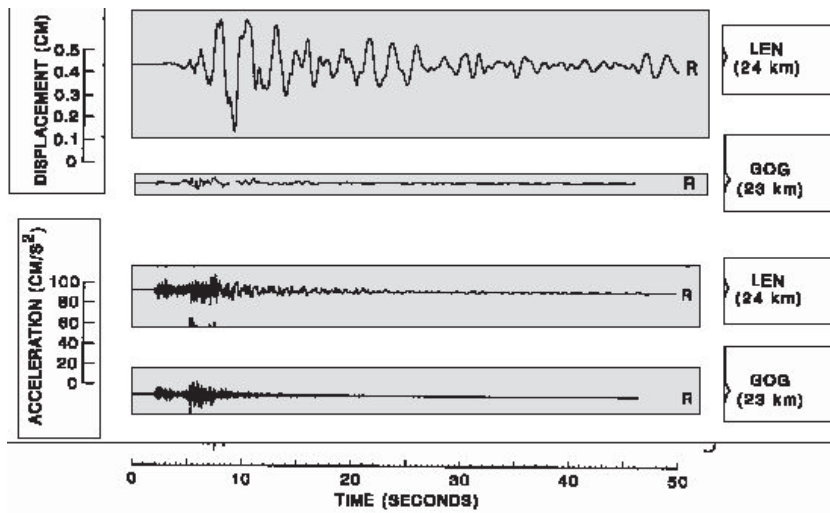


Рис. 3. Сейсмограммы и акселерограммы (внизу), полученные на станциях Len и Gog при афтершоке магнитудой 4,7 [10]

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета больших смещений на слабых грунтах, что особенно важно для протяженных сооружений, мостов и т.п., где большие смещения частей сооружения относительно друг друга могут стать причиной их значительных повреждений или разрушений при сильных землетрясениях.

Здесь возникает сомнение также в определении понятия “антисейсмический шов”. Поскольку изначально в расчетных схемах основание сооруже-

ния принимается неподвижным, то естественным образом в строительных нормах принято допущение - *не устраивать антисейсмический шов в фундаменте*. Известно, что в зданиях и сооружениях устройство антисейсмических швов предусматривается с целью обеспечения отдельной, свободной работы разделенных блоков сооружения при сейсмических воздействиях. При общих, не разделенных антисейсмическим швом фундаментах указанное выше условие обеспечивается частично и приводит к развитию дополнительных напряжений как в самих фундаментах, так и в надземных конструкциях. Очевидно, что принятое в нормах допущение о возможности неразделения фундаментов антисейсмическим швом в корне неверно, и, по нашему мнению, сейсмический шов должен разделить также и фундаменты. Этот фактор особенно важен при слабых грунтах, когда имеют место большие смещения оснований и фундаментов без соответствующего увеличения расчетных ускорений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Строительство в сейсмических районах, СНиП П-7-81\*.
2. BSSC, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulation for New Buildings and other Structures (FEMA 368), 2000 Edition.
3. NEHRP, Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA P-750), 2009 Edition.
4. **Yegian M.K., Ghahraman V.G. and Gazetas G.** Soil Response during the 1988 Armenia Earthquake//Proceedings of the Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. -1993.- P.1701-1707.
5. **Атабекян Р.А.** Об оценке интенсивности Спитакского землетрясения 1988г. в г. Ванадзор (Кировакан)// Сейсмостойкое строительство. –М., 1988. -№4. -С.44–46.
6. **Аки К, Ричардс П.** Количественная сейсмология. – В 2-х томах.- М., 1983.
7. **Borcherdt R.D.** Results and data from seismologic and geologic studies following earthquake of December 7, 1988, near Spitak, Armenia S.S.R. Technical Report - 1989. -No. 89-163A. P 188 USGS.
8. **Атабекян Р.А.** О возможных максимальных значениях ускорений фундаментов зданий при сильных землетрясениях//Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений.- М., 2007. - №1. –С. 52–54.
9. **Atabekyan R.A.** Possible maximal accelerations of buildings foundations at strong earthquake /Asian Seismological Commission General Assembly.- Yerevan, 2004.
10. Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ (РБ-06-98).
11. **Yegian M.K., Ghahraman V.G. and Gazetas G.** Ground-motion and soil response analyses for Leninakan, 1988 Armenia Earthquake//J.Geotech. Eng, ASCE.- 1994.-120(2).
12. **Атабекян Р.А.** Проявление интенсивности Спитакского землетрясения 1988г. на территории г. Ванадзор в зависимости от геоморфологических условий // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. -СПб., 2003.-Том 8, №4. –С.27–29.

13. **Атабекян Р.А., Дарбинян С.С., Назаретян С.Н., Атабекян Л.Р.,** О влиянии грунтовых условий на интенсивность землетрясения//Сборник научных трудов “Современные задачи геофизики и инженерной сейсмологии“/ Институт геофизики и инженерной сейсмологии НАН РА. -Гюмри, 2008. -С.27-32.
14. **Атабекян Р.А., Назаретян С.Н., Мхитарян К.А.** Предварительная оценка сейсмического риска территории г. Ванадзор (Республика Армения)// Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. -СПб., 2006. -Том 11, №8, вып.2.-С.21–24.

**Ռ.Ա. ԱԹԱԲԵԿՅԱՆ, Յ.Վ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ**

**ՌԻՃԵՂ ԵՐԿԱՇԱՐԺԵՐԻ ԺԱՄԱՆԱԿ ԳՐՈՒՆՏՆԵՐԻ  
ՏԵՂԱՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԵՎ ՀԱԿԱՍԵՅՍՄԻԿ ԿԱՐԱՆՆԵՐԻ  
ՁԵՎԱՎՈՐՈՒՄԸ**

Կատարվել է ուժեղ երկրաշարժերի ժամանակ գետնի տեղափոխությունների, արագությունների և արագացումների համեմատական վերլուծություն: Օգտագործվել են ինչպես սեփական չափումների տվյալները, այնպես էլ Սպիտակի 1988թ. երկրաշարժն ուսումնասիրած արտասահմանյան մասնագետների հետազոտությունների արդյունքները: Ստացված արդյունքները վկայում են անթույլատրելի տեղափոխությունների առաջացման և հիմքերը սեյսմիկ կարաններով անջատելու անհրաժեշտության մասին:

**Առանցքային բառեր.** սեյսմիկ կարան, թույլ գրունտներ, տեղափոխություններ, սեյսմիկ թեղներ:

**R.A. ATABEKYAN, Y.V. HARUTYUNYAN**

**FORMATION OF SEISMIC JOINTS IN BUILDINGS AND  
DISPLACEMENT ON SOFT SOIL SITES AT STRONG EARTHQUAKES**

Peak ground acceleration, velocity, and displacement values calculated from strong motion records obtained from our seismic instruments on soft soil sites are evaluated. Data from microseismic activities, as well as the motions from the 1988 Spitak earthquake were evaluated and the displacements for each site class defined by the Building Seismic Safety Council (BSSC) were computed. It is observed that while the design accelerations increase for Site Class B rock to Site Class E soft soils at some rate, the displacements increase by a much larger rate. While current building design according to seismic codes are based on acceleration values for different site class, it is recommended that for long-period structures, design parameters include peak ground displacements. The implications using ground displacements on foundation design and foundation ties are also discussed.

**Keywords:** seismic joint, soft soils, displacement, earthquake load.