

Ордобаев Б.С., Эргешов Э.

ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

B.S. Ordobaev, E.Ergeshov

STUDIES OF SEISMIC EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES

УДК: 624.031

Описан механизм взаимного приспособления волн сдвига и верхних слоев грунта, позволяющий волнам двигаться в этих слабосжатых слоях, не способных воспринимать растяжение и сдвиг. Констатируется, что маятниковые сейсмические приборы не способствуют отображать разрушительные волновые сейсмические импульсы. Приведено экспериментальное подтверждение изложенной теории.

The described mechanism of mutual adaptation of shear waves and the upper layers of the soil, allowing the waves to move in these seostatic layers, not able to perceive the tensile and shear. It is stated that the pendulum seismic instruments do not contribute to display the destructive seismic wave pulses. Experimental confirmation of the theory.

Согласно результатам исследования необычных форм разрушения зданий сделан вывод, что при землетрясениях на здания сначала воздействует разрушительный волновой процесс, который срезает здания и проявляется в виде резких импульсных толчков [1-6]. Волновой импульсный сдвиг верхних слоев грунта вызывает затем появление их собственных сдвиговых колебаний, которые гораздо менее опасны для зданий (рис. 1).

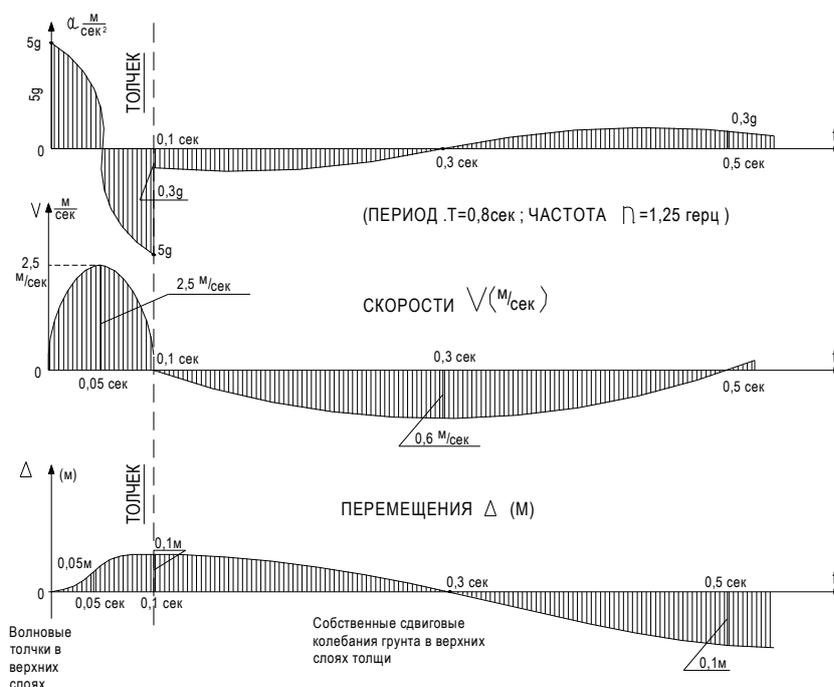


Рис. 1. Параметры сейсмических толчков и колебаний грунта

В этих качественно различных процессах решающую роль играет поверхностная толща грунта.

В данной работе мы намерены доказать, что поверхностная толща грунта глубиной в 100-150 м, является мощным усилителем разрушительного воздействия сейсмических волн при их прохождении через нее под достаточно крутым углом к поверхности.

Частный случай этого эффекта применительно к вторичным волнам сдвига был нами описан ранее в работах [1,2]. Здесь мы впервые намерены дать развернутую формировку этого эффекта в самой общей и строгой постановке.

Согласно экспериментальным данным, полученным в [3] сейсмические волны, проходя через поверхностную толщу грунта высотой 100-150 м, имеющую большой градиент модулей деформации  $E$  и  $G$ , снижают, примерно, в 10 раз свою фазовую скорость  $C$  при прохождении самых верхних наиболее податливых слоев грунта.

В связи с этим мы утверждаем, что при своем торможении, т.е. при снижении скорости  $C$ , волны обязательно должны интенсивно наращивать скорость верхних слоев грунта  $V$ , величина которой как раз и определяет разрушительную силу волнового воздействия на сооружения.

Эта взаимосвязь между величинами фазовой  $C$  и массовой  $V$  скоростью должна проявляться при прохождении сейсмической волны через любую к вази упругую среду, интенсивно и плавно снижающую свои модули  $E$  и  $G$ , в направлении движения волны при условии, что площадь  $F$  фронта волны постоянна.

В нашем случае условие  $F = \text{const}$  вполне реально, если учесть, что высота  $H$  толщи с большим градиентом модулей  $E$  и  $G$  составляет 100-150 м, т.е. она мала сравнению полной длиной пробега волны, равной десяткам километров.

Эффект наращивания массовой скорости грунта  $V$  за счет снижения фазовой скорости волны  $C$  чисто математическими следует прямо из закона сохранения импульса.

Для продольной волны это выглядит так:

$$F\sigma t = mV = \text{const} \text{ при } m = \rho F C t \quad (1)$$

где  $m$  – это масса грунта, вовлеченная волной в движении за время  $t$ ;

$\sigma$  – это волновое сжимающее напряжение;

$\rho$  – плотность грунта;  $t$  – время действия силы  $F\sigma$ .

Для верхних и нижних слоев толщи закон сохранения импульса (1) имеет вид:

$$F\sigma t = m_n V_n = m_v V_v = \text{const} \text{ или} \\ \rho_n F C_n t V_n = \rho_v F C_v t V_v \quad (2)$$

Из (2) находим базовые соотношения между верхней и нижней скоростями грунта в поверхностной толще глубиной  $H$ :

$$V_v = V_n \rho_n C_n (\rho_v C_v)^{-1} \quad (3)$$

Ту же формулу (3) можно получить из условия равновесия грунта в зоне действия волны в виде:

$$\sigma = \sigma_n = \sigma_v = \text{const}; \sigma_n = V_n C_n \rho_n = \sigma_v = V_v C_v \rho_v \quad (4)$$

Если учесть, что скорость в верхнем слое грунта  $V_v$  удваивается при отражении волны от поверхности, то при расчете зданий на импульсное волновое воздействие скорость следует находить по формуле:

$$V_v = 2V_n \rho_n C_n (\rho_v C_v)^{-1} \quad (5)$$

Если учесть, что  $C_n / C_v = 10$ , а  $\rho_n / \rho_v = 2$ , то из (5) следует, что поверхностная толща может увеличить скорость грунта  $V$  в 40 раз ( $V_v = 40V_n$ ) при прохождении через нее сейсмической волны, которая при этом уменьшает в 10 раз свою фазовую скорость  $C$ .

Именно в этом и состоит усиливающий эффект поверхностной толщи грунта. Он приводит еще и к тому, что самые верхние слои грунта за то же время  $t$  успевают аккумулировать примерно в 20 раз больше

разрушительной энергии  $U_v$  чем нижние слои, принявшие энергию  $U_n$ .

Если учесть, что полная энергия равна  $U = mV^2$ , то с учетом (2,3) найдем, что

$$U_v / U_n = m_v V_v^2 (m_n V_n^2)^{-1}; \\ U_v / U_n = C_n \rho_n / C_v \rho_v \quad (6)$$

Это связано с тем, что сила волновая  $F\sigma$  проходит за время  $t$  в верхних слоях путь  $S_v = V_n t$ , который в 20 раз больше, чем ее путь  $S_n = V_n t$  в нижних слоях.

Все формулы (1-6) будут справедливы также и для поперечных волн, если в них заменить сжимающие напряжения  $\sigma$  на касательные напряжения  $\tau$ , а фазовую скорость  $C = \sqrt{E(\rho)^{-1}}$  заменить на фазовую скорость  $C = \sqrt{G(\rho)^{-1}}$ , где  $G$  – это модуль сдвига грунта.

Усиливающий эффект поверхностной толщи ослабляется за счет потери энергии волн при неупругих волновых деформациях грунта в ее верхних слоях.

Величина этих потерь пропорциональна длине пути  $S$ , проходимого волной в пределах слабо сжатого неупругого верхнего слоя толщиной примерно в 50 м.

Если волна движется вдоль нормали к поверхности, то это путь минимален. В этом случае потеря энергии минимальна и составляет по нашим оценкам примерно 20 %.

В зонах возле границ области разрушения, удаленных от эпицентра на расстояние  $L$ , превышающее более чем в 5 раз глубину залегания гипоцентра  $H_r$ ,  $L > H_r$ , прямой путь волны от гипоцентра к зданиям по неупругому верхнему слою возрастает более чем в 5 раз. Поэтому их разрушительное воздействие почти полностью исчезает.

В результате срез зданий там могут производить только вторичные волны сдвига [1,2], которые пересекают верхний слой почти по нормали к поверхности грунта. Они порождены глубинными продольными волнами, проходящими под зданиями на глубине более 100 метров [1,2].

Судя по самой массовой форме сейсмических разрушений зданий в виде среза их колонн, простенков и стен [4-6], ведущую роль в этих разрушениях должны играть поперечные волны, (т.е. волны сдвига), создающие большую горизонтальную скорость в грунте, обеспечивающую этот срез.

В зонах, близких к гипоцентру, где  $L \leq H_r$  срез зданий осуществляют первичные волны сдвига. В средних зонах, где  $H_r < L < 4H_r$  срез зданий производят как продольные, так и поперечные волны, которые создают значительную горизонтальную составляющие скорости грунта, необходимую для среза колонн и стен.

Наконец, в дальних зонах, где  $L > 4H$ , сейсмический срез зданий могут производить только вторичные волны сдвига [1,2].

В эпицентральных и средних зонах сжимающие грунт продольные волны интенсивно бьют по подошвам зданий и этим существенно усугубляют разрушительный эффект от волн сдвига, создавая дополнительное сжатие в колоннах и стенах. Дело в том, что для прочности бетона комбинация сдвига со сжатием наиболее опасны.

Теперь нам следует объяснить, как разрушительная сдвиговая волна, несущая в себе касательные напряжения  $\tau$  и главные растягивающие напряжения  $\sigma_{гг}^+ = \tau$  порядка **0,5 МПа** [1,2], может проходить сквозь самые верхние ( $H < 50$ м) слабо сжатые слои грунта, которые в принципе, не способны воспринимать ни растяжение  $\sigma_{гг}^+$ , ни сдвиг  $\tau$  (даже при высоких скоростях нагружения).

На большей глубине  $H > 50$  м грунт, сжатый вертикальным давлением  $P = \rho H > 1$  Мпа и боковым давлением **0,2P**, легко воспринимает волновое растяжение величины  $\sigma_{гг}^+ < 0,5$  Мпа, перекрывая его статическим сжатием **P** от веса грунта.

Кроме того, там грунт может воспринять сдвиг величины  $\tau \leq 0,5$  Мпа за счет напряжений трения

$$\tau_{тр} = f |\sigma_p^-| > \tau,$$

т.к. коэффициент трения  $f$  близок к единице.

Когда волна сдвига входит в самые верхние слабо сжатые слои, где  $H < 50$  м, тогда она резко изменяет поле напряжений в грунтовой среде, приспособляя его к себе.

Главные растягивающие напряжения  $\sigma_{гг}^+$  кратковременно создают в грунте наклонные плоскости разрыва, которые членят грунт на наклонные полосы, сжатые главными напряжениями  $\sigma_{гг}^-$ . Эти полосы наклонены под углом  $\pi/4$  к поверхности в сторону от гипоцентра. Их толщина равна нескольким метрам, ширина равна  $50 \sin \pi/4 = 70$  м, а длина может составлять сотни метров.

По этим сжатым полосам волны сдвига уже смогут беспрепятственно проходить, но для этого они должны превратиться в две новых волны: продольную и поперечную, которые в сумме создают исходную горизонтальную скорость грунта **V**.

Первая – продольная волна бежит вдоль полосы со скоростью

$$C_1 = \sqrt{E(\rho)^{-1}}.$$

Она создает в грунте скорость  $V_1 = 0,71V$  и сжимающие напряжения

$$\sigma_1^- = \rho V_1 C_1,$$

направленные вдоль полосы.

Вторая волна – это новая волна сдвига, бегущая по полосе со скоростью

$$C_2 = \sqrt{G(\rho)^{-1}}$$

и несущая касательные напряжения  $\tau_2 = \rho V_2 C_2$  и скорость грунта

$$V_2 = 0,71V,$$

направленные поперек полосы. Здесь напряжения  $\tau_2$  грунт воспринимает за счет напряжений трения  $\tau_{тр}$ ,

$$\tau_{тр} = f |\sigma_1^-|.$$

При  $f = 1$   $\tau_{тр} > \tau_2$ . Растяжение  $\sigma_2^+ = \tau_2$  погашается сжатием **0,71**  $|\sigma_1^-| > \sigma_2^+$ . При этом возникает новое горизонтальное сжатие грунта величины **/0,71**  $\sigma_1^- + \sigma_2^+$ . В результате плоскости разрыва закрываются и две новые волны бегут по обновленному верхнему грунтовому слою, где отсутствует растяжение и по-прежнему создается усиливающий волновой эффект.

При землетрясениях на здания сначала воздействует разрушительный волновой процесс, который срезает здания и проявляется в виде резких толчков [4-6]. Волновой импульсный сдвиг верхних слоев грунта вызывает затем появление их собственных сдвиговых колебаний, которые гораздо менее опасны для зданий.

В обоих этих качественно различных процессах решающую роль играет поверхностная толща грунта.

Анализ наиболее типичных сдвиговых форм разрушения колонн и стен, проведенный в [4-6], позволяет утверждать, что при землетрясениях происходят два качественно разных процесса: волновой и колебательный. Первый процесс внешне проявляется в виде кратких толчков. Он является главной причиной сейсмических разрушений и его не способны зафиксировать маятниковые сейсмические приборы, фиксирующие лишь второй, колебательный процесс.

В первом процессе, наиболее опасном для зданий, волны сдвига (т.е. поперечные волны) вызывают односторонние сдвиги поверхностной толщи грунта [1,2], которые проявляются как разрушительные импульсы (толчки) с большими ускорениями и скоростями. Именно волновые сдвиги толщи вызывают затем ее собственные затухающие колебания, описанные в [7]. Их частота  $\omega$  находится по формуле

$$\omega^2 = r (0,4m)^{-1},$$

где  $r$  – это возвратная реакция толщи при смещении ее верха на единицу;  $m$  – ее масса, у которой центр тяжести расположен на расстоянии  $0,4H$  от низа толщи. Здесь

$$r = FG(H)^{-1}; \quad m = \rho HF, \quad (7)$$

где  $G$  – усредненный модуль сдвига;  $F$  – площадь сечения толщи;  $H$  – ее высота,  $\rho$  – средняя плотность грунта.

$$\text{С учетом (7) находим, что } \omega^2 = \frac{1}{0,4H^2} * \frac{G}{\rho} = \frac{\check{c}^2}{0,4H^2},$$

где  $\check{c}$  – это средняя скорость волны сдвига в толще. Окончательно имеем следующую приближенную формулу для частоты  $\omega$  и периода  $T$  сдвиговых колебаний толщи:

$$\omega = \sqrt{2,5C(H)^{-1}}; \quad T = \frac{2\pi}{\sqrt{2,5}} * \frac{H}{\check{c}}; \quad \check{c} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (8)$$

Величина периода  $T$ , найденная для реальных параметров поверхностной толщи  $H = 100$  м и  $C = 500$  м/сек; взятых из [3], составляет 0,8 сек.

Сейсмические маятниковые приборы нацелены именно на отображение гармонических колебаний грунта и не способны, в принципе, фиксировать разрушительные волновые импульсы, срезая пики их ускорений.

Любые колебания основания приборов (будь то грунт, или, например, виброплатформа) всегда порождают появление кратковременных локальных волн сдвига, которые проникают внутрь маятниковых приборов и существенно влияют на картину движения их маятников. Этот эффект никак не учитывается [8] при расшифровке стандартных акселерограмм и сейсмограмм.

Такая ошибка приводит к существенному занижению реальных ускорений скоростей и перемещений грунта.

Данное утверждение было нами строго доказано с помощью экспериментов, проведенных в Кыргызстане, по нашей программе. При этом оказалось, что стандартные маятниковые акселерометры и сейсмометры не способны точно отобразить параметры колебаний виброплатформы.

Отсюда следует вывод о том, что за неимением иных приборов, кроме маятниковых мы до сих пор не имеем достоверной информации о параметрах разрушительных сейсмических воздействий. Это объясняет причину неудач официальной антирезонансной стратегии сейсмозащиты зданий.

В заключение подчеркнем, что для официально признанной фиксации разрушительных импульсов надо лишь применить вместо традиционных приборов маятников настоящие современные приборы, которые способны измерить реальную скорость грунта. Полученные при этом результаты смогли бы привести к позитивным преобразованиям в сфере сейсмозащиты зданий и сооружений.

#### Литература:

1. «Карпатское землетрясение 1986г.», Изд. «Штиинца», Кишинев-1990, с.334.
2. К.Штейнбругге, Д.Морган «Инженерный анализ последствий землетрясений 1952 года в Южной Калифорнии», Гостройиздат, Москва-1957, с.270.
3. Поляков С.В. «Последствия сильных землетрясений», Стройиздат, Москва-1978, с.312.
4. Рыков Г.В. «Прикладные методы динамики сооружений», Труды МИСИ им. Куйбышева, М.-1992, с.103.
5. Смирнов С.Б. «Исследование аномальных форм в сейсмических разрушениях зданий, противоречащих официальной теории сейсмозащиты и опровергающих официальный взгляд на причины разрушения зданий при землетрясениях», Объединенный научный журнал, 2008, №9, с.51-59.
6. Смирнов С.Б. «О принципиальной ошибке в традиционной трактовке записей инерционных сейсмических приборов», Жилищное стр-во, 1995, №1, с.23-25.
7. Смирнов С.Б. «Сдвиговой механизм сейсмических колебаний грунта и качественно новые эксперименты для получения их реальных параметров, вызывающих волновой срез колонн и стен в зданиях». Объединенный научный журнал, Москва-2009, №12, с.51-55.
8. Смирнов С.Б. «Ударно-волновая концепция сейсмического разрушения сооружений», Энергетическое строительство, 1992, №9, с.70-72.
9. Смирнов С.Б., Ордобаев Б.С., Айдаралиев Б.Р. «Сейсмические разрушения – альтернативный взгляд», сборник научных трудов, часть I., Издательство «Айат», Бишкек-2012, 138с.
10. Смирнов С.Б., Ордобаев Б.С., Айдаралиев Б.Р. «Сейсмические разрушения – альтернативный взгляд», сборник научных трудов, часть II., Издательство «Айат», Бишкек-2012, 144с.
11. Смирнов С.Б. «Упругая отдача сдвигаемой толщи грунта как реальная причина сейсмического срезаний», Объединенный научный журнал, М.-2008, №11, с.57-60.
12. «A survey report for building damages due to the 1995 Hyogo-Ken Nanbu earthquake», Building Research Institute; Ministry of Construction (Japan) 1996, March, p.222.
13. «Seismic design guide – lines for structures», International Navigation Association, 2001, 284 p.
14. «Soils and Foundations», Special issue of Geotechnical aspect of the January 17, 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake, Japanese Geotechnical Society, January 1996, p.356.
15. Proceedings of the ninth European Conference on Earthquake Engineering, Moscow, 1990, 297 p.
16. Ray W. Clough, Joseph Penzien «Dynamics of Structures», New-York-1975, p.p. 320.
17. Sergey Smirnov «Discordances between seismic destruction and present calculation», International Civil Defense Journal, 1994, №1, p.p. 6-7; 28-29; 46-47.
18. Sergey Smirnov «Seismic shears of buildings are the result of output of soil thickness, displaced by abyssal seismic waves», The integrated scientific Journal, Moscow, Russia-2009, №7, p.p. 64-68.

Рецензент: д.т.н., профессор Тентиев Ж.