

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Э. Е. ХАЧИЯН, В. А. АМБАРЦУМЯН, А. Г. САРКИСЯН

УПРОЩЕННЫЙ СПОСОБ УЧЕТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
СООРУЖЕНИЯ С ОСНОВАНИЕМ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ  
ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Инженерный анализ последствий сильных землетрясений [1] подтверждает, что степень повреждаемости сооружений существенно зависит от характеристик сооружения и грунта основания. Установлено также, что при сейсмических воздействиях большое влияние на динамические реакции оказывает взаимодействие сооружения с грунтом, которое оценивается по величине изменений в перемещениях (ускорениях, скоростях) в основании сооружения по сравнению со значениями, полученными при отсутствии сооружения. Исследование взаимодействия сооружения с грунтом связано с решением динамической контактной задачи теории упругости и рассматривалось в работах [2—5]. Целью настоящей статьи является учет слоистости грунтового основания и получение сравнительно простых зависимостей для определения динамических реакций сооружений с учетом взаимодействия. Грунт основания принимается с горизонтальным поверхностным слоем, лежащим на коренных породах. Коренные породы идеализируются в виде однородного изотропного полупространства. Поверхностный слой также принимается однородным и изотропным. Сооружение, расчетная схема которого принимается в виде сдвигаемого бруса, заменяется эквивалентным слоем с приведенными значениями модуля сдвига  $G_0$  и плотности  $\rho_0$ , которые определяются, исходя из экспериментальных значений периода основной формы колебания сооружения  $T$  и скорости распространения волн деформации  $C$  [3]. В итоге получаем, что система «поверхностный слой грунта — сооружение» фактически можно рассматривать как двухслойный поверхностный слой. Принимается одномерная модель линейно-деформируемого грунта. Задача сначала решается без учета затухания в сооружении и в грунте основания, после чего введением в полученные результаты комплексного волнового числа, аналогично способу, изложенному в [6], учитывается влияние затухания.

Предположим, что от подстилающих коренных пород вертикально вверх движется гармоническая поперечная волна с единичной амплитудой и круговой частотой  $p$ :  $\exp i p \left( t + \frac{x}{c_2} \right)$ . При этом отраженные и

проходящие волны от границ  $x=0$ ,  $x=-H_1$  и  $x=-H_0$  также будут поперечными гармоническими с частотой  $p$  (рис 1). Удовлетворяя условиям неразрывности напряжений и перемещений на границах  $x=0$  и  $x=-H_1$  и условию отсутствия напряжения на  $x=-H_0$ , получаем перемещение в произвольном сечении  $x$  сооружения:

$$u_0 = |u_0| e^{i(p t + (\gamma_1 - \gamma_0))}, \quad (1)$$

где

$$|u_0| = 4 \left[ \frac{E^2 + M^2}{(A + B)^2 + (C + D)^2} \right]^{1/2}; \quad (2)$$

$$E = \cos k_{01}(L - L_x) \operatorname{ch} k_{02}(L - L_x);$$

$$M = \sin k_{01}(L - L_x) \operatorname{sh} k_{02}(L - L_x);$$

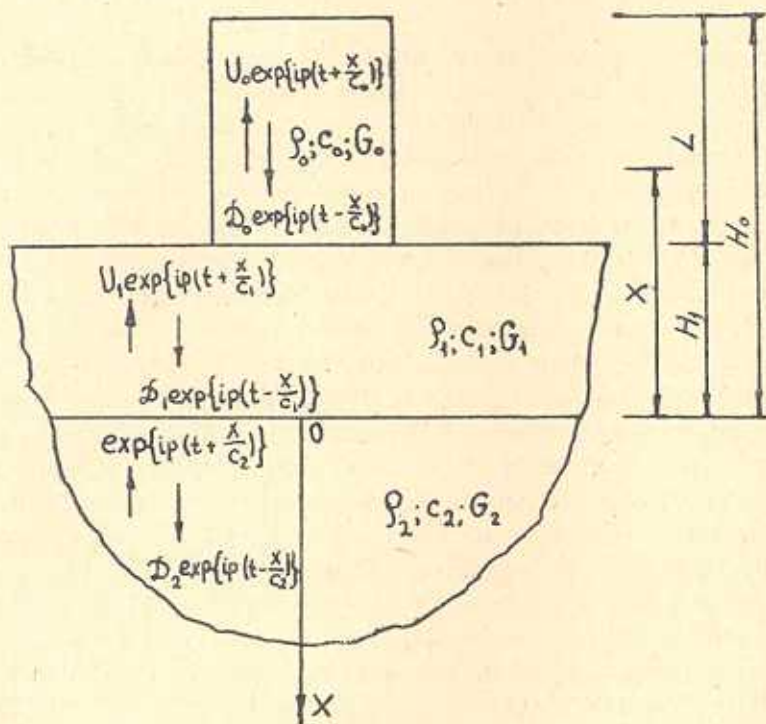


Рис. 1. Схема сооружения и сложного основания.

$$A = (1 + m_0) \cos (H_1 k_{11} + L k_{01}) [\operatorname{ch} (H_1 k_{12} + L k_{02}) + m_1 \operatorname{sh} (H_1 k_{12} + L k_{02})];$$

$$B = (1 - m_0) \cos (H_1 k_{11} - L k_{01}) [\operatorname{ch} (H_1 k_{12} - L k_{02}) + m_1 \operatorname{sh} (H_1 k_{12} - L k_{02})];$$

$$C = (1 + m_0) \sin (H_1 k_{11} + L k_{01}) [\operatorname{sh} (H_1 k_{12} + L k_{02}) + m_1 \operatorname{ch} (H_1 k_{12} + L k_{02})];$$

$$D = (1 - m_0) \sin (H_1 k_{11} - L k_{01}) [\operatorname{sh} (H_1 k_{12} - L k_{02}) + m_1 \operatorname{ch} (H_1 k_{12} - L k_{02})];$$

$$\gamma_1 = \operatorname{arctg} \frac{M}{E}; \quad \gamma_2 = \operatorname{arctg} \frac{C + D}{A + B}; \quad m_0 = \frac{\rho_0 c_0}{\rho_1 c_1}; \quad m_1 = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2};$$

$$L_x = x - H_1; \quad L = H_0 - H_1; \quad k_j = \frac{D}{C_j} = k_{j1} - ik_{j2} \quad (j = 0, 1). \quad [8]$$

Дифференцированием выражения (1) по  $x$  и  $t$  легко определяются скорость, ускорение и напряжение сдвига на любом уровне сооружения. Для количественного анализа полученных результатов рассмотрены три типа сооружений различной жесткости на разных грунтах поверхностного слоя при гармоническом возмущении коренных пород с единичной амплитудой и периодами  $T_0 = 0,3$  с и  $T = 0,6$  с. Все сооружения имеют высоту 36 м. Периоды основного тона составляют  $T = 0,17, 0,48$  и  $1,2$  с, скоро-

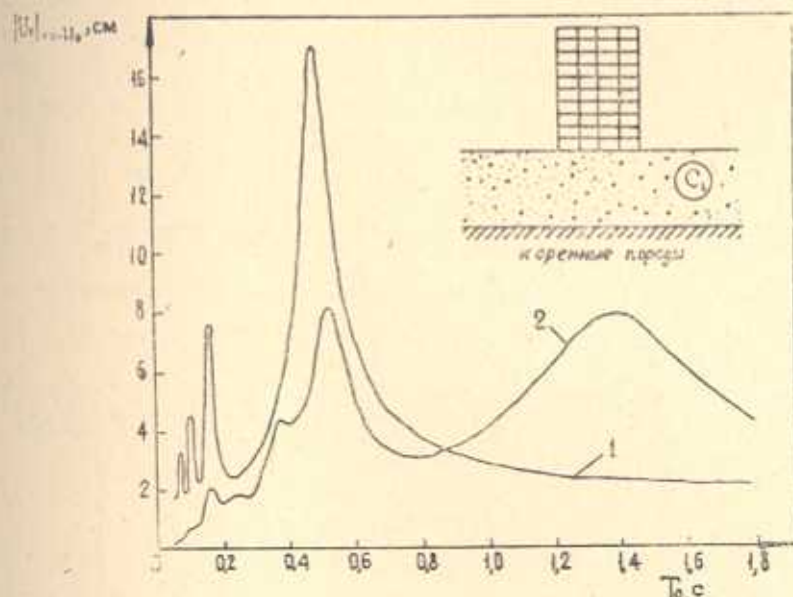


Рис. 2. Зависимость амплитуды перемещений верха сооружения от периода колебаний воздействия.

сти распространения волн сдвига —  $C = 850, 300, 120$  м/с, приведенные плотности —  $\rho = 0,363, 0,358$ , и  $0,35$  т/м<sup>3</sup>, а коэффициенты поглощения —  $\psi = 0,65, 0,55$  и  $0,45$ . Поверхностный слой принимается толщиной 60 м. Рассматривались грунты со следующими характеристиками:  $C_1 = 200 - 1200$  м/с;  $\rho_1 = 1,6 - 2,2$  т/м<sup>3</sup>;  $\psi = 1,22 - 0,1$ . Характеристики полупространства следующие:  $\rho_2 = 2,2$  т/м<sup>3</sup>;  $C_2 = 1000$  м/с. По формуле (2) вычислены амплитуды перемещений на уровнях контакта сооружения с грунтом и в верхнем сечении сооружения. Вычислены также перемещения на поверхности грунта основания при отсутствии сооружения.

На рис. 2 построен амплитудный спектр перемещений для уровня верха сооружения ( $|u_0|_{x=H_1}$ ) при его периоде основного тона  $T = 0,48$  с. Как видно, сооружение, находящееся на жестком грунте основания (кривая 1,  $C_1 = 800$  м/с), имеет большие перемещения, чем на податливом основании (кривая 2,  $C_1 = 200$  м/с).

По полученным данным построены зависимости коэффициента взаимодействия  $|u_0|_{x=+H_1} / |\bar{u}_0|_{x=H_1}$  ( $|\bar{u}_0|_{x=H_1}$  — перемещение свободной поверхности при отсутствии сооружения) от характеристик грунта основания (рис. 3) и перемещения верха сооружения относительно основания от характеристик грунта основания при  $T_0 \neq 0,3c$  (рис. 4).

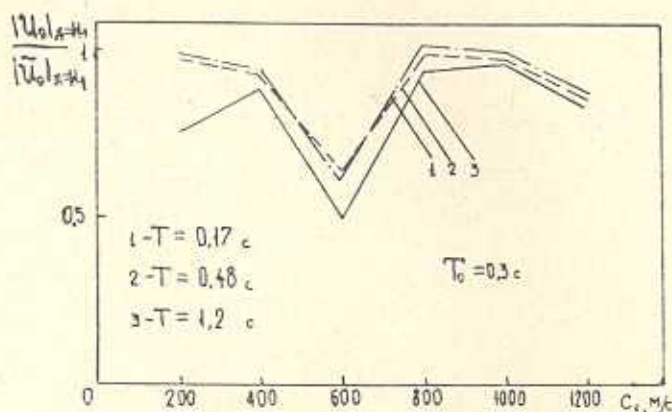


Рис. 3. Зависимость коэффициента взаимодействия от скорости поля сдвига грунта основания.

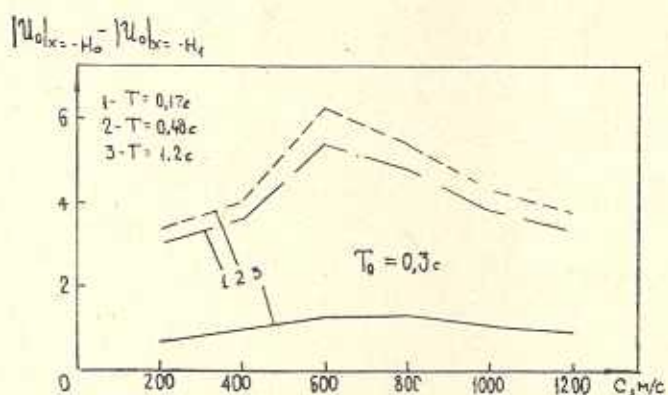


Рис. 4. Перемещения верха сооружения относительно основания.

Примерно такие же графики получены и при  $T_0 = 0,6c$ . Если при  $T_0 = 0,3c$  минимальное значение коэффициента взаимодействия соответствует значению  $C_1 = 600 \text{ м/с}$ , то при  $T_0 = 0,6c$  — значению  $C_1 = 400 \text{ м/с}$ . Минимальный коэффициент взаимодействия и относительное перемещение при  $T = 0,17c$  и  $T_0 = 0,3c$  соответственно равны 0,5 и 6,1, а при  $T = 0,17c$  и  $T_0 = 0,6c$  — 0,08 и 9,1. Анализ результатов показал, что взаимодействие сооружения с грунтом приводит к значительным изменениям перемещений в основании сооружения по сравнению со значениями, полученными при отсутствии сооружения. Кроме того, из рис. 4 видно, что независимо от типа сооружения изменение грунтовых условий может привести к изменению относительных перемещений верха сооружения ( $|u_0|_{x=+H_0} - |u_0|_{x=-H_1}$ ), которые об-

улавливают величины усилий в элементах конструкции, примерно, в два раза.

Это означает, что различные грунтовые условия независимо от типа землетрясения и характеристик сооружений могут привести к изменению сейсмического воздействия на сооружения в пределах одного балла. Отсюда важный практический вывод — сейсмическое микрорайонирование целесообразно произвести для конкретного сооружения. Инструментально или иными другими путями установленные отношения перемещений и ускорений на разных площадках еще не свидетельствует о таких же отношениях перемещений и ускорений сооружений, которые должны быть возведены на этих площадках. Как свидетельствуют результаты, перемещения и ускорения на площадках с различными грунтовыми условиями, при одном и том же землетрясении могут отличаться значительно больше, чем перемещения и ускорения сооружений, возводимых на этих площадках. Причиной такого явления является взаимодействие между грунтом и сооружением.

АрмНИИСА

20. VII. 1983

Է. Ե. ԽԱԶՐՅԱՆ, Վ. Ա. ՀԱՄԲԱՐՉՈՒՄՅԱՆ, Հ. Գ. ՍԱԲՎՅԱՆ

ՍԵՅՍՄԵԿ ԱԶԻԵՅՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԺԱՄԱՆԱԿ ՀԻՄՆԱՏԱԿԻ ԵՎ ԿԱՌՈՒՅՅԻ  
ՓՈՒՆԱԶԻԵՅՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՌՄԱՆ ՄԻ ՊԱՐԶԱԿՈՒՅՆ ՄԵԹՈԴ

### Ա մ փ ո փ ու մ

Դիտարկված է լայնական սեյսմիկ ալիքների փոխազդեցությունը կառուցվածքի հետ: Ստացված են արդյունքներ, որոնք ցույց են տալիս կառուցվածքների կրկնաձևային պարամետրերի փոփոխման աստիճանը՝ կախված շերտավոր հիմնատակի բնութագրերից և արտաքին ազդեցությունից:

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Поляков С. В. Последствия сильных землетрясений.— М.: Стройиздат, 1978.— 311 с.
2. Низров А. Г. О взаимодействии между фундаментом сооружения и основанием при землетрясении.— В сб.: Тр. Тбили. геофиз. и-та, 1939, т. IV, с. 35—63.
3. Хачиян Э. Е., Амбарцумян В. А. Динамические модели сооружений в теории сейсмостойкости.— М.: Наука, 1981.— 204 с.
4. Сквуццо Р., Бейли Ж., Рафтопулос Д. Горизонтальное взаимодействие сооружений с сейсмическими волнами.— Тр. Амер. общества инженеров-механиков (сер. Е), прикл. механика, 1971, № 1, с. 123—130.
5. Сейшов В. М. Динамические контактные задачи.— Киев: Наукова думка, 1976.— 283 с.
6. Сиваренский Е. Ф. Сейсмические волны.— М.: Недра, 1972.— 292 с.