

of the Ararat depression; this simulation is a basis for calculation of sedimentary series response to seismic effects, and it can be used in other researches too.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геология Армении, том X, «Геофизика» под ред. Акопяна Ц. Г. Ереван, 1972.
2. Гуревич Г. И. Деформируемость сред и распространение сейсмических волн. М.: «Наука», 1988.
3. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность. Методическое руководство по СМР под редакцией О. В. Павлова, М.: «Наука», 1988.
4. Павлов О. В., Рогожина В. А. Сейсмическое микрорайонирование. М.: «Наука», 1988.
5. Ратникова Л. И. Методы расчета сейсмических волн в тонкослоистых средах. М.: «Наука», 1988.
6. Ратникова Л. И. Сакс М. В. Влияние скоростных и диссипативных параметров на резонансные свойства грунтов. Вопросы инженерной сейсмологии, вып. 23, 1982, с. 18—29.
7. СНиП. II-2.02-94. Ереван, 1995.
8. Справочник Физических констант горных пород под ред. Р. Кларка, М.: «Мир», 1969, с. 28—33, 183—194.
9. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Справочник. М.: «Недра», 1988.

Известия НАН РА, Науки о Земле, 1995, XLVIII, № 2—3, с. 112—

Э. Е. ХАЧНЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕОДНОРОДНЫХ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ*)

Рассматривается задача определения динамических характеристик неоднородных грунтовых оснований. Считается, что основание сооружения сложено из n пластов с различными физико-механическими характеристиками и мощностями. Описывается методика точного решения задачи в общем виде и в случае двухслойного основания. Для общего случая энергетическим методом получена окончательная формула для определения значений преобладающего периода основания, рассмотрены отдельные примеры.

Анализ результатов записей землетрясений показывает, что различия горизонтальных, вертикальных и вращательных перемещений, скоростей и ускорений грунта при землетрясениях на территории с практически одинаковыми эпицентрными расстояниями существенно зависят от геологических условий места регистрации, физико-механических, прочностных, деформационных и акустических характеристик залегающих грунтов. Кроме того, результаты анализа последствий большинства сильных землетрясений показывают, что в зависимости от грунтовых условий и конструктивного решения сооружения, их повреждения обусловлены или осадками, наклонами и опрокидыванием, или образованием больших относительных деформаций и повсеместных трещин во всем объеме сооружения. Таким образом, грунтовые условия не только значительно изменяют кинематические параметры сейсмического воздействия, но и существенно изменяют характер повреждения зданий и сооружений. Все эти об-

*) Эта работа была поддержана и финансирована Центром инженерных исследований АУА, руководству которого автор приносит свою благодарность. The work was supported and financed by AUA ERC and the author acknowledges the management staff.

стоятельства должны найти отражение в Нормах как в виде количественных коэффициентов, так и в виде принципов проектирования.

Главными критериями, на которых необходимо основываться при составлении нормативных документов по учету влияния грунтовых условий, на наш взгляд, являются: количественные показатели разделения грунтов по сейсмическим свойствам, величины максимальных ускорений, испытываемые верхними слоями грунтов различных категорий при землетрясениях, соотношения динамических характеристик грунтов и надземных сооружений. Отличия между величинами перемещений (сейсмограммы) различных грунтов, зарегистрированных при землетрясениях, особенно при местных слабых и далеких сильных землетрясениях (несущественных с точки зрения сейсмостойкости) характеризуются большой нестабильностью и поэтому не могут быть критериями по учету грунтовых условий.

Способы определения динамических характеристик надземных сооружений достаточно полно теоретически и экспериментально изучены и не вызывают сомнений. Методы определения динамических характеристик грунтов еще нуждаются во всесторонних теоретических исследованиях и экспериментальных подтверждениях.

Грунтовые условия оказывают существенное влияние также на длительность и спектральный состав ускорения грунта. Их учет, с точки зрения сейсмостойкости, целесообразно производить посредством изменения величин нормативных коэффициентов допустимых повреждений и характера нормативной кривой спектра реакции.

Настоящая работа посвящена разработке способа определения периода свободных колебаний многослойного неоднородного основания.

При изучении вопроса влияния грунтовых условий при сейсмических воздействиях необходимо учесть, что главную роль в передаче энергии сейсмических волн сооружению играет верхний поверхностный 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. Здесь сразу возникает естественный вопрос: до какой глубины грунта нижележащие слои оказывают ощутимое влияние на амплитуду и частоту ускорения верхнего слоя. Иными словами, какими законами уменьшается сейсмический эффект в заглубленных слоях в зависимости от грунтовых условий. К сожалению, очень незначительно количество таких данных, зарегистрированных во время землетрясений, особенно при сильных и разрушительных землетрясениях. Пока для общности принимаем, что при землетрясении в колебательный процесс вовлекаются части грунтовой толщи до некоторой глубины H от уровня опирания фундамента сооружения.

Если основание сооружения однородное, то значение преобладающего периода колебания грунта определяется по известной формуле [1, 3]:

$$T_0 = \frac{4H}{v_s} \quad (1)$$

где $v_s = \sqrt{G/\rho}$ — скорость распространения поперечных волн. Даже в этом простом случае сразу возникает естественный вопрос: до какой глубины взять значение H , так как в противном случае можно прийти к парадоксальному заключению, что чем больше глубина, например, скальных грунтов, тем больше значение преобладающего

периода верхних слоев. Например, при $H = 50 \text{ м}$, $v_s = 1500 \text{ м/сек.}$ — для скалы), $T_s = 0,8 \text{ с.}$, что вряд ли будет соответствовать действительности при инструментальной регистрации микроколебаний скальных грунтов. Причина такого явления, на наш взгляд, заключается в том, что, во-первых, с увеличением глубины значение скорости распространения поперечных волн v_s также возрастает и, во-вторых, как мы уже отметили, полный объем грунтовой толщи до такой глубины не вовлекается в колебательный процесс.

По нашим предположениям и на основании имеющихся в литературе [1] фактических данных, значение H для скальных грунтов можно принимать в пределах 30—50 метров, а для нескальных грунтов — до уровня коренных пород (от 10 до 300 и более метров).

Теперь рассмотрим общий случай. Будем считать, что основание сооружения сложено из нескольких пластов. Пусть n — количество пластов, ρ_k , G_k и H_k — соответственно плотность (массовый), модуль сдвига и мощность k -го пласта. Начало отсчета примем в точке на верхней грани самого верхнего пласта и обозначим через

$$H_k = \sum_{i=1}^k H_i, \quad H_n = H, \quad h_0 = 0.$$

Точное решение задачи о вычислении спектра частот свободных колебаний сводится к решению волновых уравнений типа

$$G_k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

Граничные условия задачи заключаются в равенстве нулю напряжения $G_1 \frac{\partial u}{\partial x} = 0$ (при $x=0$) на верхней грани верхнего пласта и перемещения $u = 0$ (при $x=H$) нижней грани нижнего пласта. К этим двум условиям добавляются еще $2(n-1)$ условия неразрывности на напряжениях и перемещениях по границам между пластами. Хотя решение поставленной задачи не представляет принципиальных затруднений, определение значений преобладающих периодов колебаний при такой постановке в явном виде в зависимости от физико-механических характеристик пластов (слоев) не представляется возможным: оно связано с вычислением корней сложных трансцендентных уравнений. Даже для самого простого двухслойного основания точное определение значений преобладающих периодов связано с вычислением корней следующего трансцендентного уравнения:

$$\operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \sqrt{\frac{\rho_1}{G_1}} H_1 \times \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \sqrt{\frac{\rho_2}{G_2}} H_2 = \sqrt{\frac{\rho_2 G_1}{\rho_1 G_2}} \quad (3)$$

Поэтому нам кажется целесообразным значение свободного преобладающего периода T_0 определить приближенно-энергетическим методом, приняв в качестве упругой линии деформирования неоднородного слоя точное решение задачи для однородного однослойного основания мощностью H в следующем виде:

$$u(x) = B \cos \frac{\pi x}{2H}, \quad (4)$$

удовлетворяющего граничным условиям задачи. Для краткости изложения, не останавливаясь на промежуточных вкладах, приведем

окончательное значение формулы для определения основного периода T_0 грунтового основания из n пластов:

$$T_0=4H \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n \rho_k \left[H_k + \frac{H}{\pi} \left(\sin \frac{\pi h_k}{H} - \sin \frac{\pi h_{k-1}}{H} \right) \right]}{\sum_{k=1}^n G_k \left[H_k - \frac{H}{\pi} \left(\sin \frac{h_k \pi}{H} - \sin \frac{\pi h_{k-1}}{H} \right) \right]}} \quad (5)$$

Если характеристики грунтов необходимо выразить через величины скоростей распространения поперечных волн v_s , то в формуле (5) необходимо принимать $G_k = \rho_k v_{sk}^2$. Что касается величин высших преобладающих периодов, то их значения, учитывая сдвиговой характер деформирования грунтов, можно вычислить, исходя из известных соотношений:

$$T_1 = \frac{T_0}{3}, T_3 = \frac{T_0}{5} \quad (6)$$

что подтверждается прямыми измерениями преобладающих периодов микроколебаний грунта [1]. Как показал сопоставительный анализ, максимальное отличие значений T_0 по точной формуле (3) и по формуле (5) для двухслойного основания не превышает 20% в сторону уменьшения.

Рассмотрим несколько характерных примеров применения формулы (5). Будем считать, что основание сложено из двух слоев с характеристиками, приведенными в таблице 1.

Рассмотрим два крайних случая.

1. В двухслойном основании нижним слоем мощностью $3/4 H$ является скала, а верхним слоем—один из грунтов 2—9 таблицы 1.

2. В двухслойном основании верхним слоем мощностью $1/4 H$ является скала, а нижним слоем мощностью $3/4 H$ —один из грунтов 2—9 таблицы 1 [1, 9].

Таблица 1

№№	Вид грунта основания	ρ в кН/м ³	v_s в м/с	G в МПа	Значение для 30-метрового однородного слоя T_0 в с.
1.	Скала	22	1000	2200	0.12
2.	Гравий	22	600	790	0.20
3.	Влажный песок	20	340	230	0.35
4.	Гравий с песком	22	300	198	0.40
5.	Глина	20	250	125	0.48
6.	Суглинок	20	150	45	0.80
7.	Насыпной грунт	20	100	20	1.2
8.	Супесь	20	80	13	1.5
9.	Песок (сухой)	20	60	7.2	2.0

В первом случае период колебания двухслойного основания, как показали вычисления, можно представить в виде

$$T_0 = \frac{4H}{v_{s1}} k_1, k_1 > 1. \quad (7)$$

Для всех рассмотренных случаев значение k_1 оказалось не больше, чем 1,012.

Во втором случае значение периода T_0 двухслойного основа-

ния, как показали вычисления по формуле (5), также можно представить в виде:

$$T_0 = \frac{4H}{v_{sl}} k_{2i}, \text{ где } k_{2i} < 1. \quad (8)$$

v_{sl} — скорость поперечных волн грунтов 1—9 таблицы 1.
Для k_{2i} в этом случае имеем:

Таблица 2

Грунты по табл. 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Значение k_{2i}	1	0,97	0,94	0,89	0,85	0,68	0,52	0,45	0,42

В большинстве национальных норм по сейсмостойкому строительству, влияние грунтов на уровень сейсмического воздействия учитывается путем их подразделения на 4 категории: скальные, средние (полускальные), рыхлые, мягкие или слабые. Существующие приемы такого разделения грунтов основаны на их структурном описании и на некоторых количественных показателях физико-механических свойств, применение которых для неоднородных многослойных оснований может привести к большим ошибкам. Как мы уже отметили выше, главную роль в передаче энергии сейсмических волн сооружению играет верхний поверхностный слой грунта, основным динамическим параметром которого является преобладающий период свободных колебаний. Поэтому категоричность грунта по сейсмическим свойствам целесообразно характеризовать, в первую очередь, через значения основного периода их свободных колебаний.

Один из вариантов такого разделения грунта на категории приведен в таблице 3. Он включен в Нормы по сейсмостойкому строительству Республики Армения [6, 7].

Таблица 3

Тип грунта	Категория (по сейсмическим свойствам) грунта	Скорость волн сдвига, м/с.	Преобладающий период 30-метрового поверхностного слоя T_0 , с.	Поправочный коэффициент ускорений для грунтовых условий K_0
Скальные	I	$v_s > 800$	$T_0 < 0,25$	0,8
Полускальные	II	$500 < v_s < 800$	$0,25 < T_0 < 0,5$	1,0
Рыхлые	III	$200 < v_s < 500$	$0,5 < T_0 < 0,7$	1,2
Мягкие	IV	$v_s < 200$	$T_0 > 0,7$	1,4

Проведенный анализ показал, что для двухслойного основания грунты относятся к категории i , если мощность грунтов $i+1$ категорий составляет не более, чем $1/4$ мощности всего слоя.

Анализ последствий разрушительных землетрясений показывает, что многоэтажные гибкие и высотные здания и сооружения подвергаются сравнительно меньшим повреждениям, если они возведены на грунтах I категории, а сравнительно жесткие, если они возведены на грунтах II и III категорий. Как показывают динамические расчеты по акселерограммам землетрясений с учетом взаимодействия между грунтом и сооружением, наиболее благоприятные условия для обеспечения сейсмостойкости здания обеспечиваются при соблюдении следующих условий:

$$T_1 > 1,5T_0 \text{ или } 1,5T_1 < T_0. \quad (9)$$

где T_1 — период первой формы свободных колебаний надземного сооружения, T_0 — период свободных колебаний грунтовой толщи (5).

В заключение отметим, что мы склонны предполагать, что в формировании колебательного процесса грунтов во время землетрясений главную роль играют периоды и формы их свободных колебаний, которые, в свою очередь, как мы уже отметили, обусловлены процессом деформирования некоторого объема неоднородной сплошной среды. Это означает, что акселерограммы, зарегистрированные на данном пункте наблюдения при разных землетрясениях, в основном должны иметь одни и те же преобладающие периоды, что во многих случаях косвенно подтверждается на спектрах реакций, так как на них вне зависимости от магнитуды и эпицентрального расстояния для скальных грунтов пиковые ускорения перемещены в сторону малых периодов, а для рыхлых грунтов — наоборот, в сторону больших периодов.

При такой упрощенной гипотезе о формировании колебательного процесса верхних слоев грунтового основания, значительно упростится также задача генерирования искусственных акселерограмм для данных грунтовых условий, так как в качестве их частотной характеристики можно принимать спектры частот и формы собственных колебаний грунтового основания, а значения амплитуд определить по эмпирическим формулам в зависимости от магнитуды ожидаемого землетрясения и эпицентрального расстояния [8].

Предположение о главной роли свободных колебаний при формировании колебательного процесса грунтов, нам кажется, откликается с современным представлением о механизме возникновения землетрясений, как результат мгновенного разрыва (единичного) сплошности и распространения энергии разрыва в виде упругих сейсмических волн [1]. Сейсмические волны в верхних (менее стесненных с точки зрения деформирования) слоях небольшой мощности вызывают обусловленные параметрами данных грунтовых условий собственные колебания, в результате суперпозиции которых сформулируется акселерограмма данной местности. Пиковые значения на акселерограмме будут обусловлены как размерами разрыва в очаге, так и поглощающими свойствами среды (трассы) распространения сейсмических волн. Что касается длительности сотрясения, то она как и при любых свободных колебаниях, будет зависеть как от величины начальной амплитуды, так и от динамических характеристик данных грунтов: чем больше уровень начального возмущения (магнитуда или интенсивность) и период свободных колебаний T_0 и меньше коэффициент затухания грунта, тем длительнее землетрясение в данной местности. Продолжительность сотрясения, конечно, будет зависеть также от количества разрывов в очаге, но это существенно не изменит спектральный состав акселерограммы грунта.

АрмНИИ сейсмостойкого
строительства

Поступила 16.VI.1995.

Է. Ն. ԽԱԶԻՅԱՆ

ԱՆՀԱՄԱՍԵՌ ԳՐՈՒՆՏԱՅԻՆ ՀԻՄՔԻ ԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄ

Ա. մ. ֆ. ո. ֆ. ո. մ.

Շենքերի և կառուցվածքների հիմքի գրունտային պայմանները մեծ ազդեցություն են թողնում նրանց երկրաշարժադինամիկականության վրա: Գրուն-

տային պայմանները ոչ միայն թուլացնում կամ ուժեղացնում են երկրաշարժի ազդեցության մակարդակը շենքերի և կառուցվածքների վրա, այլև զգալիորեն փոխում են նրանց վնասման ու քայքայման բնույթը՝ համատարած ճաքեր կառուցվածքի ամբողջ մարմնում ժայռային գրունտների դեպքում և նստվածքներ, թերումներ ու տապալումներ փափուկ գրունտների դեպքում: Այս հանգամանքները սեյսմակայուն շինարարության վերաբերյալ նորմատիվ փաստաթղթերում հաշվի առնելու համար անհրաժեշտ է հիմքի գրունտային պայմանները տարբերակել ոչ միայն որակական, այլև քանակական չափանիշներով: Հոդվածում որպես գրունտային պայմանների քանակական չափանիշ առաջարկվում է ընդունել որոշ հզորության մակերևութային շերտի սեփական տատանումների ամենամեծ T_0 պարբերության արժեքը: Համասեռ գրունտային պայմանների դեպքում T_0 -ի արժեքը որոշվում է (1) բանաձևերով: Հոդվածում ստացված է իրարից H_k հզորությամբ, ρ_k խտությամբ և G_k սահքի մոդուլով տարբերվող n շերտերից կազմված ստվարաշերտի սեփական տատանումների ամենամեծ T_0 տարբերության որոշման համար (5) բանաձևը և նրա կիրառումը լուսաբանելու նպատակով հաշվարկված են տարբեր բնահողերից կազմված (աղյուսակ 1) երկշերտանի գրունտային հիմքի սեփական պարբերության արժեքները: Հստ սեյսմիկ հատկությունների հիմքի գրունտային պայմանների դասակարգումը հոդվածում առաջարկվում է կատարել ըստ աղյուսակ 3-ի տվյալների: Տվյալ գրունտային պայմաններում շենքեր և կառուցվածքներ նախագծելիս առաջարկվում է կողմնորոշվել (9) պայմանների բավարարմամբ, որոնք նպաստում են երկրաշարժի ժամանակ շենքերում իներցիոն սեյսմիկ ուժերի ավելի ցածր մակարդակի առաջացմանը: Հոդվածի վերջում նշվում է, որ հեղինակը հակված է ընդունելու, որ իրական երկրաշարժի ժամանակ տվյալ տեղանքում գրունտի տատանողական շարժման բնույթը հիմնականում ձևավորվում է նրա ֆիզիկա-մեխանիկական և երկրաբանական կտրվածքով պայմանավորված, սեփական տատանումների օրինաչափություններով: Այս ենթադրությունը արձագանքվում է երկրաշարժերի առաջացման ժամանակակից պատկերացումներին և հնարավորություն է ստեղծում տվյալ տեղանքի համար տարբեր ենթադրվող օջախներից սինթեզել արհեստական աքսելերոգրամներ:

E. E. KHACHIAN

INVESTIGATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF NONUNIFORM GROUND FOUNDATIONS

Abstract

A problem for determination of dynamic characteristics of nonuniform ground foundations is considered. It is assumed that a structure foundation is composed of layers with different physical-and-mechanical properties and thicknesses. The technique for accurate solution of the problem in the general case and in the case of two-layer foundation is described. The final formula for determination of dominant foundation period values is obtained by the energy method for the general case. Individual examples are considered.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брун Дж. Н. Физика сильных движений, вызванных землетрясениями. В кн.: «Сейсмический риск и инженерные решения». М.: Недра, 1981.
2. Красников Н. Д. Динамические свойства грунтов и методы их определения. М.: Стройиздат, 1970, 239 с.
3. Медведев С. В. Инженерная сейсмология. М.: 1962, 284 с.

4. Ньюмарк Н., Розенбмоэт Э. Основы сейсмостойкого строительства. 344 с.
5. Окомото М. Сейсмостойкость инженерных сооружений. М.: Стройиздат, 1980, 342 с.
6. СНРА П-2. 02-94. Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования. Ереван: 1995, 72 с.
7. Хачиян Э. Е. Сейсмические воздействия на высотные здания и сооружения. Ереван: Айастан, 1973, 328 с.
8. Хачиян Э. Е. Некоторые аспекты нормирования сейсмостойкого строительства.— Изв. АНА, Науки о Земле, 1992, № 1, с. 55—64.
9. Khachian E. E, On the draft of antiseismic construction standards in the Republic of Armenia, The Proceedings of the 10-th World Conference on Earthquake Engineering, Spain, 19—24 July, 1992, pp. 5629—5632.

Известия НАН РА, Науки о Земле, 1995, XLVIII, №2—3, с. 119—122

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Г. Н. ПЕТРОВА, ДЖ. О. МИНАСЯН, А. А. ВАРДАНЯН, А. К. КАРАХАНЯН

О ПАЛЕОНАПРЯЖЕННОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЛЕЙСТОЦЕНЕ АРМЕНИИ НА ПРИМЕРЕ РАЗРЕЗА АРАПИ

Одной из основных задач современной магнитостратиграфии являются расчленение и корреляция однополярных магнитных зон и составление палеомагнитных характеристик границ между отдельными стратиграфическими системами. До сих пор не разработан оптимальный набор критериев, позволяющих однозначно идентифицировать инверсии геомагнитного поля, принадлежащие одному временному интервалу. Особенно это относится к четвертичному периоду. Несмотря на то, что стратиграфия плиоцен-четвертичных образований разрабатывается почти на протяжении века, она до сих пор содержит множество дискуссионных положений.

В последнее время как параметр, характеризующий однополярные зоны в одном и том же возрастном подразделении, привлекается напряженность древнего геомагнитного поля $H_{др}$.

Величина естественной остаточной намагниченности (I_n) зависит не только от величины $H_{др}$, которую исследователи хотят оценить, но также от состава ферромагнитной фракции, ее концентрации и вида намагниченности. Если возможно в лаборатории воспроизвести вид намагниченности, которой обладает порода *in situ*, то древнее поле определяется простым соотношением I_n и I лабораторного, полученного в известном поле. Так, определяется $H_{др}$ в случае изверженных пород, обладающих однокомпонентной намагниченностью термомагнитного происхождения [8]. При этом $H_{др}$ определяется с точностью, достаточной для изучения не только среднего значения $H_{др}$ для какого-то отрезка времени, но и вариаций $H_{др}$. Для оценки палеонапряженности по осадочным породам используется лабораторное переосаждение. При этом, не говоря уж о громоздкости этого эксперимента, точность его недостаточна для изучения вариаций $H_{др}$ [2].

Изучая вековые вариации, «записанные» в осадочных породах разреза Арапи [1], были обнаружены в ряду Q те же колебания, что и в угловых элементах D и J , и отсутствие таких колебаний в ряду K (параметр определения $H_{др}$).

На основании этого в настоящей статье сделана попытка принять Q как параметр (пусть с оговоркой), отражающий в данном случае изменения древнего поля.