

О СЖИМАЕМОСТИ ГРУНТОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Г. М. Ляхов (Москва)

Рассмотрены результаты экспериментального исследования зависимости скорости D фронта взрывных волн от максимального давления в песчаных грунтах разной влажности. Изучается характер зависимостей $D = D(p, \alpha_1)$ и $p = p(\epsilon, \alpha_1)$ при взрывных нагрузках (ϵ — деформация, α_1 — содержание в грунте воздуха).

1. **Характеристики грунта.** Для определения состояния грунта, как трехкомпонентной среды, введем следующие характеристики: $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — содержание по объему соответственно газообразного (воздух), жидкого (вода) и твердого (минеральные частицы) компонентов; ρ_1, ρ_2, ρ_3 — плотность каждого из компонентов.

Эти величины связаны между собой, а также с объемным весом скелета γ , пористостью n и плотностью ρ_0 соотношениями

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1, \quad \gamma = \alpha_3 \rho_3, \quad n = \alpha_1 + \alpha_2 = 1 - \frac{\gamma}{\rho_3}, \quad \rho_0 = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 + \alpha_3 \rho_3 \quad (1.1)$$

Для атмосферного давления $\rho_1 = 12 \cdot 10^{-4}$, $\rho_2 = 1$, $\rho_3 = 2.65 \text{ г/см}^3$.

Грунты со средним значением пористости 0.35—0.45 при $\alpha_1 < 0.07$ —0.10 находятся в водонасыщенном состоянии (воздух в порах изолирован водой от атмосферы).

2. **Результаты опытов.** Рассмотрим результаты экспериментальных исследований скорости распространения фронта ударной волны D (или максимума давления D_m , когда взрывная волна не является ударной) в зависимости от величины давления p на фронте волны в песчаных мелко- и среднезернистых грунтах различной влажности. Зная эти величины, при помощи соотношения

$$D = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0} \frac{p - p_0}{\rho - \rho_0}} \quad (2.1)$$

можно построить диаграмму сжатия грунта, т. е. зависимость $p = p(\rho)$ или $p = p(\epsilon)$ при разных значениях α_1 . Здесь ρ и ρ_0 — плотность среды, соответствующая давлению p и p_0 .

Приводим значения D в м/сек при некоторых значениях p кг/см² в водонасыщенном песчаном грунте ненарушенной структуры с $\gamma = 1.52$ —1.60 г/см³ и разным содержанием заземленного воздуха α_1 , взятые из работы [1]

p	$\alpha_1 = 0$	$\alpha_1 = 5 \cdot 10^{-4}$	$\alpha_1 = 10^{-2}$	$\alpha_1 = 4 \cdot 10^{-2}$
10	—	—	320	250
25	1620	1250	480	340
50	1640	1420	620	450
100	1650	1500	—	—
200	1680	1600	—	—

Волны создавались при взрывах зарядов весом от 1.6 до 1000 кг. Параметры измерялись пьезоэлектрическими и тензоэлектрическими датчиками, показания которых записывались катодными и шлейфными осциллографами.

Из результатов опытов следует, что при возрастании α_1 от нуля до $4 \cdot 10^{-2}$, т. е. при незначительном уменьшении влажности водонасыщенного грунта, происходит значительное падение D . Величина падения скорости зависит от давления. При малых p (слабые волны) падение больше.

Аналогичные опыты проводились в неводонасыщенном насыпном песке с $\gamma = 1.50$ —1.55 г/см³. Веса сосредоточенных зарядов менялись от 0.2 до 5 кг.

Приводим значения скорости D , а также скорости максимума давления D_m в м/сек

p_2^1	$\alpha_1 = 0.24 - 0.28$		$\alpha_1 = 0.32 - 0.35$		$\alpha_1 = 0.36 - 0.38$	
	D	D_m	D	D_m	D	D_m
2	—	—	110	60	70	40
4	180	90	110	70	75	45
6	—	—	—	—	80	60
10	200	180	120	110	90	90
20	210	210	130	130	110	110

(Значения D и D_m совпадают, когда волна является ударной)

Опыты показывают, что при возрастании α_1 от 0.24—0.28 до 0.36—0.38 имеет место падение скоростей D и D_m при всех значениях p .

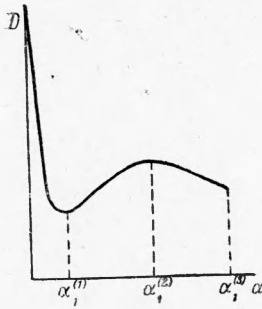
Падение скорости фронта с уменьшением влажности получено в том же интервале давлений при распространении плоских взрывных волн в песчаном грунте [2].

Измерения скорости распространения слабых волн в образцах песчаного грунта нарушенной структуры с $\gamma = 1.54-1.60 \text{ г/см}^3$ проведены Ю. И. Гримза [3]. Волны создавались ударом маятникового копра. Время прохождения волны между точкой удара и точкой на втором конце образца определялось специальным электронным прибором. Приводим значения содержания воздуха α_1 и соответствующей скорости распространения волны D м/сек

$\alpha_1 = 0.03$	0.13	0.22	0.27	0.32	0.37	0.41
$D = 156$	210	258	264	268	245	170

Из результатов опытов следует, что скорость D с увеличением α_1 , т. е. с уменьшением влажности, сначала возрастает, при $\alpha_1 = 0.22-0.32$ достигает максимума, а затем снова убывает.

Аналогичная зависимость получена в опытах Р. К. Кузьмицкого, проведенных в насыщенном песке с $\gamma = 1.65-1.80 \text{ г/см}^3$. Волны создавались при взрывах зарядов весом 0.1 и 0.2 кг. Запись производилась пьезоэлектрическими датчиками, показания которых фиксировались на катодных и шлейфных осциллографах. Приводим результаты измерения D и D_m при разных значениях α_1



Фиг. 1

$\alpha_1 = 0.027$			$\alpha_1 = 0.12$		
$p = 6$	11	16	$p = 4$	5.5	11
$D = 380$	500	750	$D = 130$	140	170
$D_m = -$	310	560	$D_m = 120$	120	120
$\alpha_1 = 0.24$			$\alpha_1 = 0.30$		
$p = 5$	7	10	$p = 7$	9	11
$D = 310$	350	350	$D = 290$	320	330
$D_n = 250$	300	320	$D_n = 190$	240	290

Скорости D и D_m с увеличением α_1 сначала падают, затем возрастают, а потом снова падают.

Из сопоставления всех приведенных опытных данных следует, что при полном водонасыщении грунта $\alpha_1 = 0$ скорость волн умеренной силы имеет максимальное значение 1600—1700 м/сек. По мере увеличения α_1 скорость резко падает и при $\alpha_1 = \alpha_1^{(1)} = 0.07-0.10$ имеет минимальное значение, примерно равное 100—200 м/сек. Затем с увеличением α_1 скорость возрастает и достигает при $\alpha_1 = \alpha_1^{(2)} = 0.20-0.28$ максимума. При этом $D = 180-320$ м/сек. При дальнейшем увеличении α_1 скорость убывает и при влажности, близкой к гигроскопической ($\alpha_1 = \alpha_1^{(3)}$), составляет 70—290 м/сек. Скорость D_m при изменении α_1 возрастает или убывает в тех же интервалах изменения влажности, что и D .

Значения D и D_m существенно зависят не только от α_1 , но и от γ . При одинаковых значениях α_1 , но разных γ , они отличаются в 1.5—2.5 раза. С возрастанием γ скорости растут.

Общий характер зависимости D от α_1 в исследованном интервале значений давления представлен на фиг. 1. При больших значениях вид этой зависимости меняется, в частности, может не сохраниться минимум при $\alpha_1^{(1)}$.

3. Обсуждение результатов опытов. Характер экспериментальной зависимости $D = D(p, \alpha_1)$ (фиг. 1) объясняется наличием в грунте двух механизмов сжатия.

Вследствие кратковременности динамических (взрывных, ударных и др.) нагрузок, при их действии не успевает произойти перераспределение воды и воздуха в порах и их частичное удаление из грунта, как это имеет место при статических нагрузках. Поэтому, как было показано [1], при $\alpha_1 < \alpha_1^{(1)}$ (водонасыщенное состояние) сжимаемость грунта определяется по закону многокомпонентных сред, т. е. содержанием и объемной сжимаемостью твердых частиц, воды и воздуха, а при $\alpha_1 > \alpha_1^{(1)}$ (неводонасыщенное состояние) — сжимаемостью скелета, связанной со смятием в точках контакта и смещением твердых частиц.

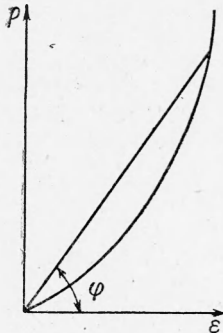
Убывание D при возрастании α_1 от нуля до $\alpha_1^{(1)}$ связано с увеличением сжимаемости грунта при возрастании содержания наиболее сжимаемого компонента — воздуха.

При дальнейшем увеличении α_1 сжимаемость грунта, определяемая сжимаемостью скелета, не остается постоянной. Она зависит от сцепления между твердыми частицами. Чем сильнее сцепление, тем большее усилие требуется для переукладки твердых частиц и тем меньше сжимаемость скелета. С убыванием сжимаемости сред, как известно, скорость распространения волновых процессов растет.

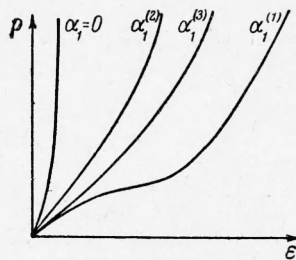
Сцепление между твердыми частицами грунтов, как показано в работах [4-7], определяется молекулярным притяжением между ними, наличием цементирующих пле-

нок солей, выделяющихся из воды при уменьшении влажности и оседающих в точках контакта твердых частиц, и капиллярными силами. В песчаных грунтах, благодаря относительно большим размерам зерен и расстояний между ними, сцепление практически не зависит от сил молекулярного притяжения и цементации и определяется только капиллярными силами, величина которых зависит от содержания в порах воды и воздуха.

При $\alpha_1 = 0$ поры грунта заполнены водой, капиллярные силы не действуют. С появлением в порах воздуха эти силы возникают вследствие образования менисков воды. Они сжимают скелет грунта подобно внешней силе и создают сцепление между твердыми зернами. С увеличением α_1 (т. е. с уменьшением влажности) число менисков и их глубина, определяющие сжимающее действие, возрастают. Это связано с перемещением воды при уменьшении влажности в более узкие участки



Фиг. 2



Фиг. 3

капиллярной системы, с ее концентрацией у точек контакта отдельных зерен. При $\alpha_1 = \alpha_1^{(2)}$ капиллярное давление и сцепление между твердыми частицами достигают максимума. Дальнейшее увеличение α_1 до $\alpha_1^{(3)}$ приводит к постепенному исчезновению менисков вследствие удаления воды. Песок высыхает и превращается в сыпучую среду, лишенную связности.

Таким образом, сжимаемость песчаного грунта имеет два минимума при $\alpha_1 = 0$ и $\alpha_1 = \alpha_1^{(2)}$ и два максимума при $\alpha_1 = \alpha_1^{(1)}$ и $\alpha_1 = \alpha_1^{(3)}$. В соответствии с (2.1) и учитывая, что $\varepsilon = (\rho_0 - \rho)/\rho$, получим выражение для скорости фронта волны в виде

$$D = \sqrt{\frac{p - p_0}{\rho_0 \varepsilon}} = \sqrt{\frac{\text{tg } \varphi}{\rho_0}}, \quad \text{tg } \varphi = D^2 \rho_0 \quad (3.1)$$

где φ — угол наклона прямой, соединяющей начало координат с точкой на диаграмме $p = p(\varepsilon)$, где давление равно максимальному значению на фронте (фиг. 2). Чем меньше скорость волны, тем меньше φ и тем ближе кривая $p = p(\varepsilon)$ подходит к оси ε .

Из рассмотренной выше экспериментальной зависимости скорости фронта волны от влажности в соответствии с уравнением (3.1) следует, что кривые $p = p(\varepsilon)$ при уменьшении влажности песчаного грунта от $\alpha_1 = 0$ до $\alpha_1 = \alpha_1^{(3)}$ сначала приближаются к оси ε , затем отклоняются от нее, а потом снова к ней приближаются (фиг. 3). В разных грунтах $\alpha_1^{(1)}$ и $\alpha_1^{(2)}$ могут иметь несколько различные значения, зависящие от γ , гранулометрического состава и других характеристик грунта.

Наличие воды в порах может в некоторой степени уменьшать трение между твердыми частицами при переукладке, как отмечено в работе [8]. Однако наличие двух минимумов скорости может быть объяснено влиянием капиллярного давления.

Изложенные выше результаты относятся к песчаным грунтам. Общий характер зависимостей $D = D(p, \alpha_1)$ и $p = p(\varepsilon, \alpha_1)$ при динамических нагрузках в глинистых и лессовых грунтах может быть определен из анализа механизма сжатия этих грунтов и величины сил сцепления между твердыми частицами.

В этих грунтах размеры твердых частиц и расстояний между ними существенно меньше, чем в песчаных грунтах. Поэтому, как показано в работах [6, 7], силы сцепления, обусловленные молекулярным притяжением между твердыми частицами, во много раз больше, чем в песчаных грунтах. Площади контакта твердых частиц, отнесенные к массе, существенно больше, чем в песчаных грунтах. Поэтому цементующее действие солей, выпадающих из воды при уменьшении влажности грунта и концентрирующихся в точках контакта твердых частиц, оказывается значительным. Этим объясняется возрастание связности мелкодисперсных грунтов при их высыхании.

Таким образом, при возрастании содержания воздуха α_1 от нуля до $\alpha_1^{(1)}$ сжимаемость мелкодисперсных грунтов, как и песчаных, увеличивается по законам трех-

компонентной среды, а D падает. При дальнейшем увеличении α_1 до $\alpha_1^{(3)}$ в связи с возрастающей цементацией твердых частиц сжимаемость будет монотонно убывать, а D увеличиваться.

Таким образом, сжимаемость мелкодисперсных глинистых и лессовых грунтов в зависимости от влажности должна иметь два минимума при $\alpha_1 = 0$ и $\alpha_1 = \alpha_1^{(3)}$ и один максимум, лежащий между этими значениями α_1 .

С изменением сжимаемости грунтов, вызываемой изменением влажности, меняется не только скорость распространения взрывных волн, но и значения максимальных давлений, интенсивность угасания волн с расстоянием и величины нагрузок, действующих на сооружения. Как показывают опыты [1,2], величина максимального давления может меняться в десятки и сотни раз.

Следует отметить, что понятие динамической сжимаемости грунта не является в полной мере однозначным. Динамические нагрузки могут иметь различную продолжительность, вследствие чего различными будут и величины деформаций. Однако опыты показывают, что на фронте волн в грунтах, образующихся при взрывах больших и малых зарядов ВВ, при одинаковых p значения D практически одинаковы.

Поступила 14 IX 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Л я х о в Г. М. Ударные волны в многокомпонентных средах. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1959, № 1.
2. Л я х о в Г. М., Н а р о ж н а я З. В. Плоские взрывные волны в грунте. ПМТФ, 1962, № 6.
3. Г р и м з а Ю. И. Некоторые результаты экспериментальных исследований по определению скорости распространения продольных волн в образцах грунта. Сб. № 44. Динамика грунтов. Госстройиздат, 1961.
4. Т е г з а г h i К. Erdbaumechanik, Wien, 1925.
5. О р н а т с к и й Н. В. Механика грунтов. Изд-во МГУ, 1962.
6. Д е н и с о в Н. Я. О природе деформаций глинистых грунтов. Изд-во Мин-ва речного флота СССР, 1951.
7. Д е н и с о в Н. Я. Строительные свойства лесса и лессовидных суглинков. Госстройиздат, 1951.
8. Г р и г о р я н С. С. Об учете влажности в уравнениях движения грунтов. ПМТФ, 1962, № 2.

О ДЕЙСТВИИ ДЛИННЫХ УДАРНЫХ ВОЛН НА ТВЕРДОЕ ТЕЛО

С. С. Григорян

(Москва)

При прохождении ударной волны мимо препятствия ограниченных размеров возникает сложная дифракционная картина, а препятствие испытывает воздействие нестационарных нагрузок, определение которых представляет довольно трудную задачу. Однако в случае, когда размер препятствия мал по сравнению с длиной волны, задача упрощается и допускает сравнительно полный анализ. Для этого случая процесс нестационарного воздействия волны на тело может быть разбит на два этапа. На первом этапе, начинающемся непосредственно в момент достижения фронтом волны тела, происходит отражение и дифракция ударной волны, и на теле возникает существенно нестационарное распределение давлений. Этот этап, однако, сравнительно непродолжителен, так как фронты отраженной и дифрагировавшей волн быстро удаляются от тела, и порожденные ими нестационарные возмущения затухают (при сверхзвуковом потоке за проходящей волной фронт отраженной волны остается на конечном расстоянии от тела). После этого начинается второй, более продолжительный этап, когда тело подвергается воздействию потока газа с медленно меняющимися параметрами. Продолжительность первого этапа t_1 будет порядка

$$t_1 \approx k \frac{d}{D}, \quad k \sim 3 - 5 \quad (1)$$

где d , D — характерный размер тела и скорость волны соответственно, так как этот