

СФЕРИЧЕСКИЕ ВЗРЫВНЫЕ ВОЛНЫ В ГРУНТАХ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ

С. С. Григорян, Г. М. Ляхов, П. А. Паршуков

(Москва, Киев)

Экспериментальные исследования сферических взрывных волн проводились в грунтах всех основных видов [1—4]. При этом определялись компоненты напряжения и скорость частиц. При малых напряжениях проводились также измерения деформаций [5]. Ниже приведены результаты опытов, включавших одновременное измерение главных компонентов напряжения и деформации, что позволило изучить процесс развития деформаций грунта во времени на разных расстояниях от места взрыва, а также получить диаграммы $\sigma(\epsilon)$, реализуемые при этом. Показано, что максимальные объемные деформации достигаются в период уменьшения напряжения, остаточные деформации могут превышать значения, соответствующие максимуму напряжения, диаграммы сжатия и разгрузки $\sigma(\epsilon)$ зависят от скорости деформации. Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии на закономерности распространения взрывных волн как пластических, так и вязких свойств грунта.

1. Методика экспериментальных исследований. Опыты проводились в полевых условиях в насыпном супесчаном грунте средней крупности, с плотностью скелета $\gamma = (1,42-1,48)10^3$ кг/м³, влажностью $W = 4-8\%$, уложенном в котлован глубиной и длиной по 1,8 и шириной 1,5 м. Котлован был отрыт в плотном суглинке. Сферический заряд тротила массой 0,2 кг устанавливался на глубине 1 м на расстоянии 0,5 м от ближайшей стенки. Перед каждым опытом котлован очищался от грунта и заполнялся вновь для создания одинаковых грунтовых условий.

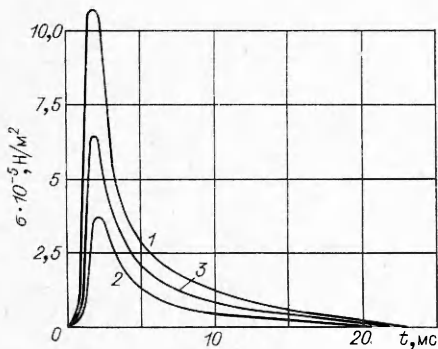
Нормальный σ_r и тангенциальный σ_α компоненты напряжения при прохождении взрывной волны измерялись высокочастотными тензометрическими датчиками, показания которых после усиления записывались шлейфными осциллографами.

Деформации фиксировались датчиками, основанными на записи во времени взаимного смещения двух легких пластинок, расположенных в грунте на расстоянии 5 см друг от друга. Одна из пластинок соединялась с поршнем, который перемещался внутри цилиндра, соединенного с другой пластинкой. Диаметр цилиндра примерно в восемь раз меньше диаметра пластинок. Сопротивление поршня смещению пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением сжатию грунта между пластинками. Взаимное смещение пластинок фиксировалось с помощью проволочных тензорезисторов, показания которых записывались на шлейфном осциллографе.

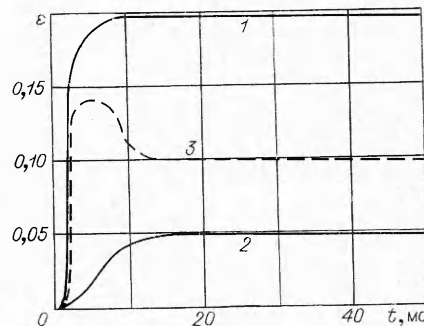
Датчики деформаций двусторонние, т. е. могут записывать как сближение, так и удаление пластинок друг от друга. Они устанавливались в грунте параллельно и перпендикулярно направлению движения взрывной волны, что позволяло измерять нормальный ϵ_r и тангенциальный ϵ_α компоненты деформации. Рядом с пластинками датчиков в грунте для контроля их показаний устанавливались такие же пластинки, ничем не соединенные между собой (свободные). Они фиксировали остаточные смещения (определяемые при откопке). Во всех случаях конечные смещения пластинок датчиков и свободных пластинок оказались одинаковыми, что подтверждает пренебрежимость влияния их соединения (поршень, цилиндр) между собой на величины смещений.

Датчики напряжений и деформаций устанавливались на одной глубине с зарядом ВВ на расстояниях от него 0,45; 0,6 и 0,75 м. На каждом расстоянии ставилось по два датчика каждого типа для записи σ_r , σ_α , ε_r и ε_α . Датчики напряжений, кроме того, располагались на удалении 0,3 м. Все датчики размещались между зарядом и наиболее удаленной от него стенкой котлована. Над поверхностью заполненного котлована насыпался еще слой грунта толщиной 0,2 м для обеспечения полного камуфлета при взрыве.

2. Результаты экспериментов и их обсуждение На фиг. 1, 2 представлены полученные в одном и том же опыте зависимости компонентов напряжения и деформации от времени на расстоянии от места взрыва $R = 0,45$ м (приведенные к одному масштабу копии осциллограмм). Кривые 1—3 на фиг. 1 соответствуют значениям σ_r , σ_α и среднему нормальному напряже-



Ф и г. 1

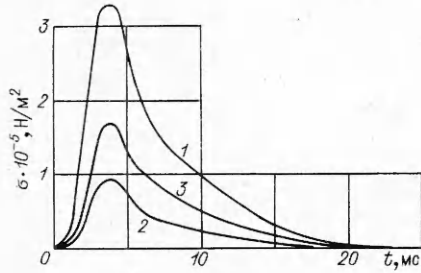


Ф и г. 2

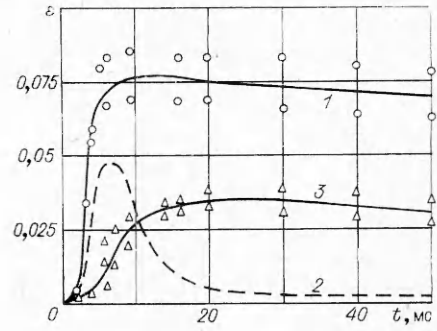
нию $\sigma = (\sigma_r + 2\sigma_\alpha)/3$, а кривые 1—3 на фиг. 2 — ε_r , ε_α и объемной деформации $\varepsilon = \varepsilon_r + 2\varepsilon_\alpha$ соответственно. Знаки ε_r и ε_α различны, так как по радиальному направлению происходит сжатие, а по перпендикулярному к нему — расширение грунта. Из фиг. 1 следует, что впереди движется предвестник, величина скачка на фронте которого практически равна нулю. Нарастание напряжения до максимума происходит за 1,5—2,0 мс, а падение до нуля — за 25—30 мс. Значения σ_r и σ_α на участке нарастания напряжения меняются со временем. Сначала они растут, достигают максимума, а затем убывают до отрицательных значений. Коэффициент бокового давления $k_t = \sigma_\alpha/\sigma_r$ при нарастании и падении напряжения практически постоянен, $k_t = 0,3—0,4$.

Деформации нарастают медленнее, чем напряжения. Максимумы ε_r и ε_α достигаются при $t = 8,5$ мс и $t = 15$ мс соответственно, т. е. в существенно различные моменты времени. После достижения максимума ε_r и ε_α убывают незначительно. Объемная деформация имеет максимум при $t = 5$ мс, после чего она к моменту $t = 15$ мс убывает примерно до 0,66 максимального значения. При $t = 2$ мс, когда напряжение максимально, величина объемной деформации составляет около одной трети максимального значения.

Зависимости напряжений и деформаций от времени на расстоянии от места взрыва $R = 0,6$ м даны на фиг. 3, 4. Кривые 1—3 соответствуют σ_r , σ_α , σ (фиг. 3) и ε_r , ε_α , ε (фиг. 4). Графики деформаций построены по двум опытам, поэтому приведены экспериментальные точки. Общий ход графиков такой же, как на фиг. 1, 2. Однако нарастание напряжений и деформаций происходит медленнее. Максимум напряжений достигается при $t = 4$ мс, максимумы ε_r , ε_α и ε — при $t = 10$; 25 и 7 мс соответствен-



Ф и г. 3



Ф и г. 4

но. Объемная деформация убывает к моменту времени $t = 25$ мс примерно до 0,05 максимального значения. Коэффициент бокового давления $k_t = 0,3-0,4$.

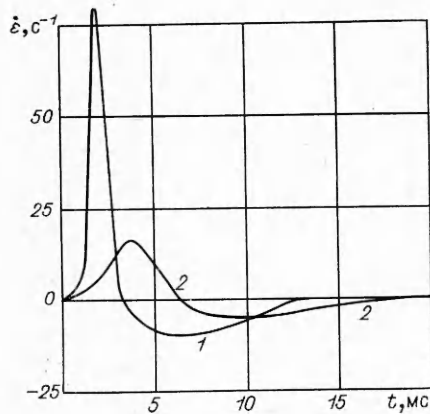
Графики скорости деформации $\dot{\epsilon}(t)$ приведены на фиг. 5. Кривые 1 и 2 относятся к расстояниям $R = 0,45$ и $0,6$ м соответственно. Величина $\dot{\epsilon}(t)$ знакопеременна. По абсолютной величине максимальные положительные значения существенно больше, чем отрицательные. Однако длительность существования больше у отрицательных значений.

Зависимость максимальных значений напряжений σ_r от расстояния приближенно можно представить в виде

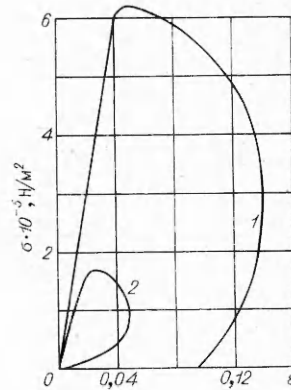
$$\sigma_r = k(\sqrt[3]{Q/R})^\mu,$$

где Q — масса заряда ВВ, кг; R — расстояние, м. При этом $k = 4,5 \cdot 10^5$, $\mu = 3,3$. В песчаных грунтах нарушенной структуры с $\gamma = (1,45-1,55)10^3$ кг/м³ и $W = 5-7\%$ ранее [4] получены близкие значения максимального напряжения. В последнем уравнении при этом $k = 6 \cdot 10^5$, $\mu = 3,2$.

Определить по осциллограммам скорость распространения фронта волны (начала нарастания напряжения) затруднительно, так как величина скачка напряжения на фронте практически равна нулю. Скорость D распространения значения напряжения, равного 0,05 максимального, на рассмотренных расстояниях составляет около 100 м/с. Скорость распростра-



Ф и г. 5



Ф и г. 6

нения максимума напряжения D_{\max} меняется при этом от 80 до 55 м/с. В песчаных грунтах с $\gamma = (1,45-1,55)10^3$ кг/м³ и $W = 5-7\%$ ранее получены близкие значения скоростей $D = 110$ м/с, $D_{\max} = 60$ м/с [4].

Величина остаточного смещения грунта, определенная по смещению свободно расположенных пластинок (при откопке), на расстояниях R от 0,25 до 0,75 м менялась от 0,05 до 0,005 м. Отклонения смещений отдельных пластинок от средних значений достигали 30%.

Тангенциальная деформация ε_α связана со смещением грунта S соотношением $\varepsilon_\alpha = S/R$. Дифференцируя по времени (R — лагранжева координата), получим зависимость скорости частиц от времени в виде

$$u(t) = \dot{\varepsilon}_\alpha(t)R.$$

Средняя скорость частиц на расстояниях от взрыва $R = 0,45$ и $0,6$ м, вычисленная в соответствии с экспериментальными значениями $\dot{\varepsilon}_\alpha$ для промежутков времени $\Delta t = 2$ мс по последнему уравнению, приводится в таблице.

t , мс	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$u(0,45)$, м/с	0,8	1,8	3,2	2,5	1,8	1,0	0,5	0,1	—	—
$u(0,6)$, м/с	0,5	1,2	1,9	2,3	1,8	1,2	0,7	0,4	0,2	0,1

Максимальные значения скорости частиц достигаются в период уменьшения напряжения примерно одновременно с максимумом объемной деформации.

На фиг. 6 показаны зависимости среднего нормального напряжения от объемной деформации $\sigma(\varepsilon)$ в соответствии со значениями $\sigma(t)$ и $\varepsilon(t)$ на фиг. 1—4. Кривые 1, 2 относятся к расстоянию $R = 0,45$ и $0,6$ м. Полученные диаграммы при разных ε соответствуют различным значениям скорости деформации. Максимальные деформации в обоих случаях превышают значения, соответствующие максимуму напряжения. Остаточная деформация на расстоянии $R = 0,45$ м в полтора раза превышает значение, достигнутое при максимуме напряжения, при $R = 0,6$ м она составляет лишь около одной десятой.

Полученное в опытах постоянство коэффициента бокового давления k_τ соответствует условию пластичности Мизеса—Шлейхера—Боткина, применение которого к грунтам предложено в работе [6]. Действительно, в соответствии с этим условием интенсивность касательных напряжений, определяемая вторым инвариантом девиатора напряжений I_2 , является функцией σ

$$I_2 = [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]/6 = \psi(\sigma).$$

При сферической симметрии отсюда следует

$$(\sigma_r - \sigma_\alpha)^2/3 = \psi(\sigma), \quad \sigma_r - \sigma_\alpha = F(\sigma) = [3\psi(\sigma)]^{1/2},$$

с другой стороны, учитывая, что $\sigma_\alpha = k_\tau \sigma_r$, найдем

$$\sigma_r + 2\sigma_\alpha = \sigma_r(1 + 2k_\tau) = -3\sigma, \quad \sigma_r - \sigma_\alpha = \sigma_r(1 - k_\tau), \\ F(\sigma) = -3(1 - k_\tau)\sigma/(1 + 2k_\tau).$$

Условие Мизеса—Шлейхера выполняется, при этом функция пластичности определяется последним уравнением.

Результаты проведенных опытов показывают, что процесс деформации грунта начинается с его уплотнения при относительно малых смещениях. Максимальное уплотнение достигается (на исследованных расстояниях от места взрыва) при смещении, примерно равном одной трети максимального значения. Дальнейшее смещение сопровождается разуплотнением грунта, уменьшением его объемной деформации. На близких расстояниях от взрыва разуплотнение меньше, чем предшествовавшее уплотнение, в грунте сохраняются остаточные объемные деформации. На дальних расстояниях величины уплотнения и разуплотнения становятся одинаковыми, остаточные объемные деформации не возникают.

Изменение скорости частиц и объемной деформации во времени отстает от изменения напряжения. Их максимумы достигаются в период уменьшения напряжения. С удалением от места взрыва длительность периода нарастания до максимума напряжения, скорости частиц и объемной деформации увеличивается — происходит размывание волны. Графики объемного сжатия и разгрузки $\sigma(\varepsilon)$ зависят от скорости деформации. На разных расстояниях они различны как при нарастании, так и при падении напряжения.

Эти результаты подтверждают, что закономерности распространения взрывных волн определяются пластическими и вязкими свойствами, и это обстоятельство должно учитываться при совершенствовании моделей грунтов.

Поступила 28 I 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорян С. С., Ляхов Г. М., Мельников В. В., Рыков Г. В. Взрывные волны в лессовидном грунте.— ПМТФ, 1963, № 4.
2. Алексеенко В. Д., Григорян С. С., Кошелев Л. И., Новгородов А. Д., Рыков Г. В. Измерение волн напряжений в мягких грунтах.— ПМТФ, 1963, № 2.
3. Ляхов Г. М., Нарожная З. В. Экспериментальные исследования взрывных волн в глинистом грунте.— ПМТФ, 1961, № 2.
4. Ляхов Г. М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М., «Недра», 1974.
5. Васильев Ю. И., Иванова Л. А., Щербо М. И. Измерение напряжений и деформаций в грунте при распространении взрывных волн.— «Изв. АН СССР. Физика земли», 1969, № 1.
6. Григорян С. С. Об основных представлениях динамики грунтов.— ПММ, 1960, т. 24, вып. 6.