

05.1;12

Методика определения основных физико-механических свойств мягких грунтов при скоростях деформации $10^3 - 10^5 \text{ s}^{-1}$ и амплитудах нагрузок до нескольких гигапаскалей

© А.М. Брагов, А.К. Ломунов, И.В. Сергеичев, У. Прауд,
К. Сембеллис, Ф. Черч

Научно-исследовательский институт механики
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского
E-mail: bragov@mech.unn.ru
Кавендишская Лаборатория, Кембриджский университет
E-mail: wgp1000@phy.cam.ac.uk

Поступило в Редакцию 8 февраля 2005 г.

Предложена методика определения основных закономерностей деформирования мягких грунтов при динамическом нагружении в диапазоне амплитуд до нескольких гигапаскалей. Методика основана на использовании результатов высокоскоростных испытаний в условиях одноосной деформации, получаемых модифицированным методом Кольского и методом плосковолнового ударного эксперимента. Возможности методики проиллюстрированы на примере определения динамических свойств песка.

Изучению динамических свойств мягких грунтов в диапазоне нагрузок до 100 МПа и скоростей деформации до 10^2 s^{-1} посвящен ряд работ [1–5]. В работах [6–8] исследована сжимаемость мягких грунтов в ударных волнах при нагрузках до нескольких GPa. Однако область динамических нагрузок от 50 МПа до 5 GPa и скоростей деформации $10^3 - 10^5 \text{ s}^{-1}$ остается слабо изученной.

В настоящее время для изучения динамических свойств мягких грунтов при скоростях деформации $\sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ используют модифицированный метод Кольского [8]. В этом случае образец грунта помещается в жесткую обойму и располагается между торцами двух мерных стержней. Как было показано [9], в этих условиях можно считать напряженное

состояние объемным, а деформированное — одноосным. В этой работе помимо регистрации импульсов деформаций в мерных стержнях было предложено с помощью тензодатчиков дополнительно проводить измерение окружной деформации обоймы. Эта модификация позволяет в одном эксперименте получить кривые одноосного деформирования $\sigma_x \sim \varepsilon_x$, а также кривую объемной сжимаемости $P \sim \rho$, зависимость сопротивления сдвигу от давления $\tau \sim P$, коэффициент бокового распора.

Как известно [10], область определения зависимостей $\sigma_x \sim \varepsilon_x$, $P \sim \rho$, $\tau \sim P$ при использовании модифицированного метода Кольского ограничена осевыми напряжениями ~ 500 МПа. Более высокие значения амплитуд нагрузок достигаются при ударно-волновом нагружении. В подобных экспериментах обычно определяется ударная адиабата, связывающая продольные напряжения σ_x с осевой деформацией ε_x . Поскольку напряженно-деформированные состояния как в модифицированном методе Кольского, так и в плосковолновом методе близки к друг другу, то совместное использование получаемых этими методами результатов позволяет построить кривую одноосного сжатия $\sigma_x \sim \varepsilon_x$ в широком диапазоне скоростей деформации и амплитуд нагрузок. Пример такого построения представлен на рисунке (кривые 1 и 2).

В плосковолновых ударных экспериментах при умеренных нагрузках для построения кривой сжимаемости $P \sim \rho$ необходимо измерять две компоненты тензора напряжений, что в случае грунтов методически осуществить достаточно сложно. В этой связи нами предлагается определять давление P на основании получаемой ударной адиабаты $\sigma_x \sim \varepsilon_x$ следующим образом.

Для мягких грунтов на основании экспериментальных данных установлено, что при нагрузках до ~ 500 МПа зависимость сопротивления сдвигу от давления близка к линейной [2,3,10]:

$$\tau = a + \operatorname{tg} \varphi \cdot P, \quad (1)$$

где a — сцепление, φ — угол внутреннего трения.

Предположим, что эта зависимость сохраняется и при более высоких значениях напряжений (до нескольких гигапаскалей). Косвенным подтверждением этого служат данные плосковолновых экспериментов с регистрацией двух компонент тензора напряжений, полученные при испытании цементного раствора [11].

Размер фракции, мм	1.6	1	0.63	0.4	0.315	0.2	0.16	0.1	0.063	0.05	0.001
%	0.03	0.375	4.425	22.955	18.035	40.09	9.22	3.31	0.42	0.215	0.265

В случае одноосной деформации

$$P = \sigma_x - \frac{4}{3} \tau. \quad (2)$$

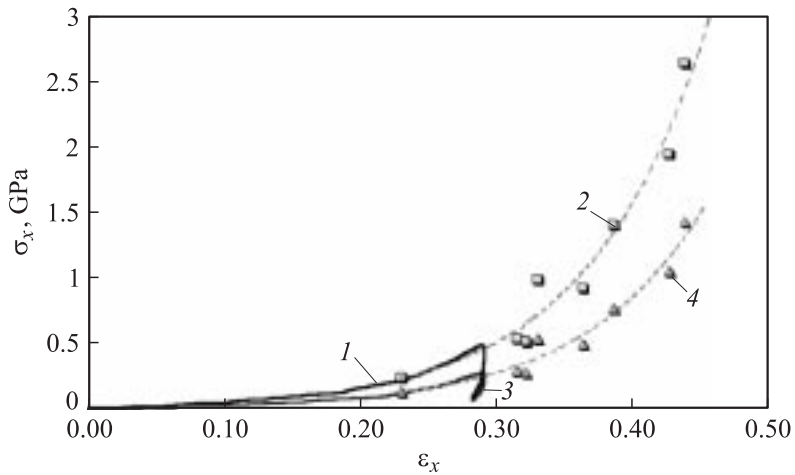
Тогда для грунтов, используя линейную зависимость (1), получим связь давления P с напряжением σ_x

$$P = \frac{\sigma_x - 4/3a}{1 + 4/3 \operatorname{tg} \varphi}. \quad (3)$$

Последнее выражение при указанных выше предположениях позволяет на основании ударной адиабаты $\sigma_x \sim \varepsilon_x$ при известных значениях a и $\operatorname{tg} \varphi$ определить зависимость $P \sim \varepsilon_x$ или $P \sim \rho$ в области ударного сжатия, что в совокупности с кривой $P \sim \varepsilon_x$, полученной модифицированным методом Кольского, дает возможность построить единую зависимость $P \sim \varepsilon_x$ в широком диапазоне изменения амплитуд нагрузок.

В качестве примера рассмотрим данные, полученные в НИИ механики ННГУ и Кавендишской лаборатории Кембриджского университета при динамических испытаниях песка. Был испытан песок плотностью $\sim 1.5 \text{ г/см}^3$. Гранулометрический состав песка приведен в таблице.

С использованием модифицированного метода Кольского были определены константы уравнения (1): $a \approx 0$, $\operatorname{tg} \varphi = 0.643$. По результатам плосковолновых испытаний [11] была получена ударная адиабата в виде линейной зависимости: $D = A + BU$, где D — скорость распространения ударной волны, U — массовая скорость. При этом значения A и B составили: $A = 510.9 \text{ м/с}$, $B = 1.71$. На основании этой адиабаты, используя зависимость (3), была построена кривая сжимаемости $P \sim \varepsilon_x$ или $P \sim \rho$.



Единые кривые сжимаемости песка в осях $\sigma_x \sim \epsilon_x$ (1 и 2) и в осях $P \sim \epsilon_x$ (3 и 4).

На рисунке показаны единые кривые в осях $\sigma_x \sim \epsilon_x$ (кривые 1 и 2) и $P \sim \epsilon_x$ (кривые 3 и 4). Причем кривые 1 и 3 соответствуют динамическим диаграммам, получаемым методом РСГ, а кривые 2 и 4 — ударным адиабатам, построенным по результатам плосковолновых экспериментов. Из рисунка хорошо видно, что данные, полученные двумя независимыми методами, в пределах погрешности эксперимента хорошо согласуются между собой, дополняя друг друга и существенно расширяя область определения основных закономерностей деформирования грунтовых сред.

Заключение. Предложена методика, позволяющая получать основные зависимости высокоскоростного деформирования мягких грунтов в широком диапазоне изменения амплитуд нагрузок и скоростей деформаций. Построены основные зависимости для песка. Представляется, что получаемые таким образом экспериментальные зависимости станут основой для оснащения математических моделей грунтов необходимыми параметрами и константами.

Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ, грант 04–05–64614а.

Список литературы

- [1] Григорян С.С. // ПММ. 1960. В. 4. С. 1057–1072.
- [2] Ляхов Г.М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. М.: Наука, 1982.
- [3] Рахматулин Х.А., Сагомонян А.Я., Алексеев Н.А. Вопросы динамики грунтов. М.: Изд-во МГУ, 1964.
- [4] Вовк А.А., Замышляев Б.В., Евтерев Л.С. и др. Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок. Киев: Наук. думка, 1984.
- [5] Gasagrande A., Schanon W.Z. // Proc. ASCE. 1948. V. 74 (4).
- [6] Дианов М.Д., Златин Н.А., Мочалов С.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. В. 12. С. 529–532.
- [7] Лагунов В.А., Степанов В.А. // ПМТФ. 1963. № 1. С. 88–96.
- [8] Bragov A.M., Grushevsky G.M., Lomunov A.K. // Exper. Mech. 1996. V. 36. P. 237–242.
- [9] Bragov A.M., Grushevsky G.M., Lomunov A.K. // DYMAT Journal. 1994. V. 1. N 3. P. 253–259.
- [10] Брагов А.М., Котов В.Л., Ломунов А.К., Сергеевичев И.В. // ПМТФ. 2004. Т. 45. № 4. С. 147–153.
- [11] Tsembelis K., Proud W.G., Vaughan B.A.M., Field J.E. // Proc. of 14th DYMAT technical meeting „Behavior of materials at high strain rates“. 2002. P. 193–203.