

УДК 539.3:624.131

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЯГКИХ ГРУНТОВ МЕТОДОМ КОЛЬСКОГО

А. М. Брагов, В. Л. Котов, А. К. Ломунов, И. В. Сергеичев

Научно-исследовательский институт механики
Нижегородского государственного университета, 603950 Нижний Новгород

Проведен анализ модифицированного метода Кольского для динамических испытаний мягких грунтов в упругой обойме. Показана однородность осевых и радиальных напряжений в образце, определена рациональная геометрия обоймы, отмечено влияние сил трения на получаемую динамическую диаграмму деформирования, для его уменьшения предложено использовать смазку внутренней поверхности обоймы.

Ключевые слова: метод Кольского, грунты, динамические нагрузки, волновые процессы.

Введение. Поведение грунтовых сред при воздействии на них интенсивных динамических нагрузок представляет интерес при анализе волновых процессов в грунтах для получения уравнений состояния и использования их в численных методах решения задач проникания и задач о взаимодействии грунта и различных конструкций при землетрясениях, взрывах и ударах. Недостаток систематических данных о динамических свойствах грунтов связан с отсутствием стандартных высокоскоростных методов испытаний, что, в свою очередь, обусловлено существенными методическими трудностями проведения таких испытаний. Основополагающим методом динамических испытаний материалов является метод разрезного стержня Гопкинсона (РСГ), предложенный Г. Кольским [1]. Для проведения высокоскоростных испытаний грунтов и других малоплотных сред метод РСГ был модифицирован путем использования ограничивающей упругой обоймы [2]. Дальнейшее развитие этой модификации [3] позволило получать, кроме одноосных диаграмм деформирования, значения радиальных напряжений, давления, сопротивления сдвигу и коэффициента бокового давления при скоростях деформации примерно 10^3 с^{-1} . В [4] проведен численный анализ применимости этой модификации для испытаний грунтов при высоких скоростях деформации и установлено значительное влияние соотношения размеров образца и обоймы на получаемые результаты. Данная работа посвящена дальнейшему анализу однородности напряженного состояния в образце грунта, влияния материала обоймы, длины образца и сил трения на получаемые физико-механические характеристики грунтовых сред.

Экспериментальная методика. В [4] отмечено, что при использовании обоймы, длина L которой превышает длину l образца грунта, возникает ошибка, пропорциональная отношению L/l , при восстановлении радиального напряжения в грунте по значению

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов НШ-1136.2003.8; 01-01-00556; 02-01-00594; 03-01-0633) и Министерства образования Российской Федерации (грант № PD02-2.10-4).

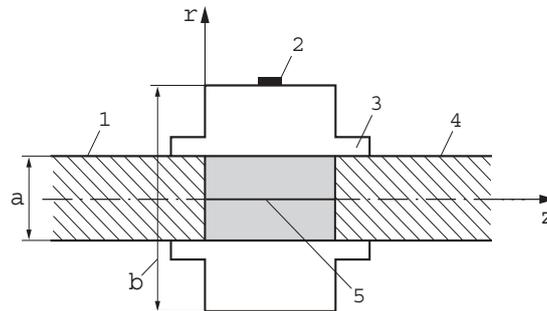


Рис. 1

измеряемой окружной деформации обоймы. Превышение длины обоймы по сравнению с длиной образца связано с необходимостью центрировать обойму относительно стержней.

На рис. 1 представлена предложенная нами обойма. Кольцевые выступы толщиной 1 мм и длиной 3 мм на торцевых поверхностях обоймы достаточно точно центрируют ее относительно мерных стержней 1, 4 и, как показал расчет, практически не влияют на напряженно-деформированное состояние (НДС) обоймы. Обоймы 3, в зависимости от амплитуд исследуемых нагрузок, изготавливались из сплава Д16Т, а также из стали 30ХГСА при соотношении внешнего диаметра b к внутреннему диаметру a , равном 1,5. Высокая деформативность алюминиевого сплава по сравнению со сталью позволяет более точно регистрировать окружные деформации на внешней поверхности обоймы с использованием тензодатчика 2 при малых давлениях в грунтовом образце 5.

Основные положения экспериментальной методики определения динамических характеристик грунтов с описанием волновых процессов, протекающих в системе РСГ, содержатся в [3]. Нагрузка на обойму со стороны грунта, характеризуемая компонентой напряжения $\sigma_{rr}(t)$, связана с окружной деформацией $\varepsilon_{\theta\theta}(t)$, регистрируемой на наружной поверхности обоймы, известным аналитическим решением о НДС отрезка толстостенной трубы под действием постоянного внутреннего давления. Окружное и радиальное напряжения в трубе внутренним диаметром a и внешним диаметром b под действием внутреннего давления q выражаются формулами [5]

$$\sigma_{\theta\theta} = A - B/r^2, \quad \sigma_{rr} = A + B/r^2,$$

где

$$A = qa^2/(a^2 - b^2), \quad B = -qa^2b^2/(a^2 - b^2).$$

Таким образом, на внешней поверхности обоймы

$$\sigma_{rr} = \sigma_{zz} = 0, \quad \sigma_{\theta\theta} = 2qa^2/(b^2 - a^2), \quad (1)$$

а на внутренней поверхности

$$\sigma_{rr} = -q, \quad \sigma_{zz} = 0, \quad \sigma_{\theta\theta} = q(b^2 + a^2)/(b^2 - a^2). \quad (2)$$

В эксперименте внутренним давлением q является напряжение σ_{rr} в грунте, следовательно, кроме диаграммы одноосного сжатия можно получить значение коэффициента бокового давления $K_\sigma = \sigma_{rr}/\sigma_{zz}$, сопротивление сдвигу τ , давление P , а также интенсивность напряжений и деформаций. Выражения (1), (2) справедливы при упругих деформациях обоймы. Оценим допустимые напряжения в грунте, не вызывающие пластических деформаций в обойме. С использованием критерия пластичности Треска — Сен-Венана [5] и соотношения (2) определяем, что пластические деформации возникают на внутренней поверхности обоймы при продольных напряжениях в грунте $\sigma_{zz} = (1 - (a/b)^2)\sigma_T/K_\sigma$ (σ_T —

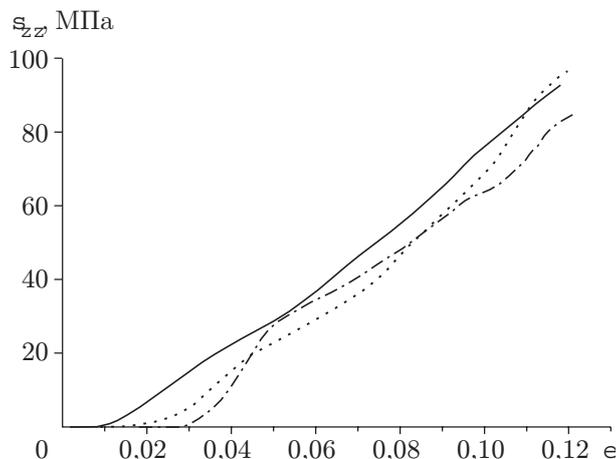


Рис. 2

предел текучести материала обоймы). Пластические деформации на внешней поверхности обоймы, где, собственно, и происходит регистрация импульсов окружной деформации, возникают при несколько бóльших значениях продольных напряжений, а именно при $\sigma_{zz} = ((b/a)^2 - 1)\sigma_T/K_\sigma$. При $b/a = 1,5$, $K_\sigma = 0,5$ получаем $\sigma_{zz}/\sigma_T = 1,1 \div 2,5$, если $\sigma_T = 200 \div 300$ МПа для сплава Д16Т. Таким образом, требование упругости деформаций в обойме выполняется при достаточно высоких напряжениях в грунте.

Для оценки влияния длины образца на диаграмму деформирования проведена серия испытаний песчаного грунта воздушной влажности. Во всех экспериментах длина образца l совпадала с длиной обоймы L и равнялась 6,5, 9,5 и 20 мм. Образцы нагружались трапецеидальными импульсами деформации длительностью примерно 175 мкс с длительностями переднего и заднего фронтов $15 \div 20$ мкс.

На рис. 2 пунктирной кривой показана зависимость продольного напряжения в грунте от деформации при $l = 9,5$ мм, сплошная и штрихпунктирная кривые соответствуют длинам образца 6,5 и 20 мм. Из представленных данных следует, что при малых деформациях на диаграмме деформирования наблюдаются колебания, обусловленные волновым нагружением образца, причем их амплитуды уменьшаются с уменьшением толщины образца. Поскольку минимальная длина образца ограничена требованием представительности объема (толщина образца должна, по крайней мере на порядок, превышать размер частиц грунта), в экспериментах использовались образцы толщиной 9,5 мм. На всех кривых деформирования на рис. 2 имеется участок с нулевыми напряжениями, наименьший для образца длиной 6,5 мм и наибольший для образца длиной 20 мм. В ходе испытаний образцов разной длины по временным задержкам между прошедшим и отраженным импульсами определена скорость распространения волн сжатия малой амплитуды в песке, которая оказалась равной приблизительно 430 м/с.

По усредненным данным испытаний образцов длиной $l = 9,5$ мм была получена зависимость сопротивления сдвигу песка от давления. Эта зависимость представлена на рис. 3 (сплошная линия). Пунктирной линией на рисунке показана аппроксимирующая линейная зависимость $\tau = P \operatorname{tg} \varphi$, где φ — угол внутреннего трения в грунте. Для испытанного песка воздушной влажности и плотности $1,6 \text{ г/см}^3$ полученное значение угла внутреннего трения равно $27,8^\circ$.

Результаты численных расчетов. Как известно, одной из основных предпосылок метода Кольского является предположение об однородности НДС образца. Для проверки этой предпосылки выполнен численный расчет с использованием пакета прикладных

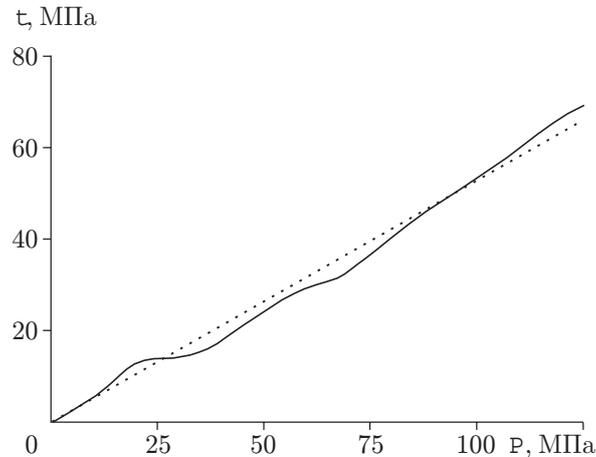


Рис. 3

программ “Динамика-2” [6]. Динамическое деформирование грунта в численной методике описывается соотношениями модели грунтовой среды С. С. Григоряна [7]. Для применения в расчетах этой модели необходимо задать зависимости давления P от деформации ε (диаграмму нагружения и разгрузки) и предела текучести от давления. Параметры начального участка кривой $P = f(\varepsilon)$ определяются из экспериментов с использованием системы РСГ [8]. Экспериментальные данные аппроксимируются предложенной Г. В. Рыковым [9] степенной зависимостью вида

$$P = M\theta^n, \quad \theta = 1 - \rho_0/\rho. \quad (3)$$

Константы M и n определяются для каждого типа грунта по результатам серии экспериментов, например методом наименьших квадратов. В диапазоне давлений свыше 200 МПа использовались результаты плосковолновых ударных экспериментов [10]. Получаемая в экспериментах зависимость скорости ударной волны D от массовой скорости U для линейного случая $D = A + BU$ может быть преобразована с использованием законов сохранения на фронте ударной волны к виду

$$\sigma(\theta) = -\rho_0 A^2 \theta / (1 - B\theta)^2. \quad (4)$$

Для $P(\theta)$ применяется та же зависимость, но с другими константами A и B . В среднем диапазоне давлений 50 ÷ 200 МПа, который на сегодняшний день остается малоизученным, применяется процедура интерполирования с использованием параметрического кубического полинома Безье [11], обеспечивающего в узлах стыковки непрерывность скоростей звука (производной $dp/d\rho$). Процедура построения ударной адиабаты и кривых разгрузки мягкого грунта описана в [9].

Динамическую зависимость предела текучести σ_T от давления принимаем линейной [7, 9]

$$\sigma_T = \sigma_0 + k\rho. \quad (5)$$

Для несвязных грунтов, в частности сухих песков, величина σ_0 , имеющая физический смысл сцепления, близка к нулю, константа $k = 2 \operatorname{tg} \varphi$.

Расчеты производились для стержней и обоймы, выполненных из сплава Д16Т, для которого принимали модуль Юнга $E = 70$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, плотность $\rho = 2,7$ г/см³. Для песка плотностью $\rho_0 = 1,6$ г/см³ константы M и n степенной зависимости (3), полученные в результате обработки данных эксперимента, равнялись соответственно 2,0 ГПа и 1,76, что хорошо коррелирует с результатами [7]. Константы

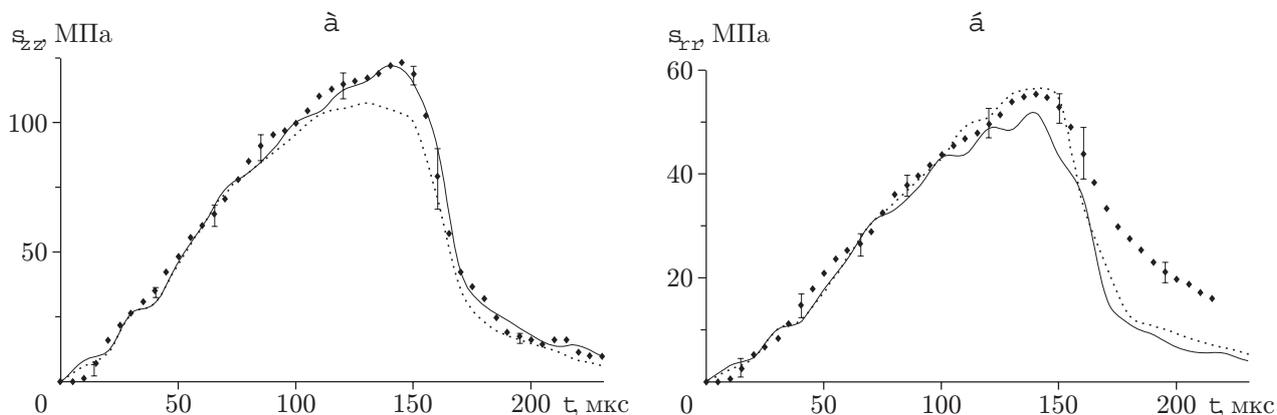


Рис. 4

ударной адиабаты (4) взяты из [9]: $A = 400$ м/с, $B = 2,2$. Значения констант интерполирующего полинома составили: $\alpha = \beta = 0,06$, $p_1 = 10$ МПа, $p_4 = 200$ МПа. Параметры функциональной зависимости для описания разгрузки $\gamma_c = 2$, $\gamma_p = 5$ (приняты обозначения из работы [11]), начальная скорость звука при разгрузке $C_0 = 250$ м/с, модуль сдвига $G = 150$ МПа, константы зависимости (5) предела текучести от давления $k = 1,06$, $\sigma_0 = 0$.

На рис. 4 представлены результаты численных расчетов волновых процессов в системе РСГ. На рис. 4,а показаны временные зависимости осевых напряжений в центре (сплошная линия) и на боковой поверхности образца (пунктирная линия) в сравнении с данными эксперимента (маркеры). Наблюдается хорошее соответствие результатов как на этапе нагружения, так и при разгрузке. На рис. 4,б приведены вычисленные значения радиальных напряжений в центре (сплошная линия) и на боковой поверхности образца (пунктирная линия). Маркерами на этом рисунке изображены данные, полученные по формуле (1) с использованием результатов эксперимента по измерениям окружной деформации обоймы. Указанные границы доверительного интервала определены с надежностью 0,94 [12]. Таким образом, результаты, представленные на рис. 4, свидетельствуют об однородности напряженного состояния образца.

Отличие результатов численного эксперимента от натурального не превышает погрешность натурального эксперимента, что свидетельствует о правильном определении параметров модели грунта в рассматриваемом диапазоне нагрузок.

Анализ эффектов трения. Поскольку грунты (особенно песок) являются достаточно абразивными материалами, на получаемые результаты могут оказывать влияние силы трения, возникающие на внутренней поверхности обоймы. Для оценки эффектов трения, а также влияния твердости материала обоймы выполнены опыты по нагружению песка в дюралевые и стальные обоймы со смазкой их внутренних поверхностей. В дюралевую обойму образец нагружался до осевых напряжений 150 МПа, в стальную — до 400 МПа. На рис. 5 пунктирными линиями показаны диаграммы деформирования, полученные с использованием обойм, на внутреннюю поверхность которых была нанесена графитовая смазка, сплошными линиями — с использованием обойм без нанесения смазки.

Видно, что при напряжениях до 50 МПа диаграммы деформирования, полученные с использованием как дюралевых, так и стальных обойм, практически совпадают. При этом влияние трения в обоих случаях несущественно. При напряжениях более 50 МПа диаграммы $\sigma_{zz} = f(\varepsilon)$, полученные в опытах со стальной обоймой, идут заметно ниже. Диаграммы деформирования, полученные с использованием дюралевых обойм со смазкой и без нее, практически совпадают и при напряжениях более 50 МПа. Это можно объяснить следу-

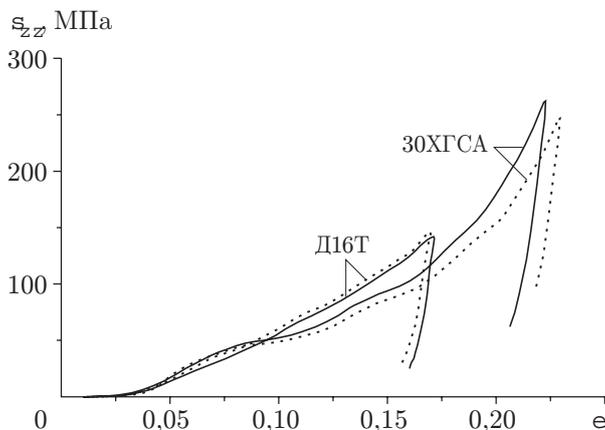


Рис. 5

ющим образом. После испытания на внутренней поверхности дюралевой обоймы наблюдалась заметная абразивная деформация вследствие контактного взаимодействия частиц песка и материала обоймы. Возникающие при этом дополнительные силы сопротивления дают существенный вклад в продольные напряжения, нивелируя влияние смазки. При использовании стальных обойм в силу более высокой твердости стали этот эффект значительно меньше, о чем свидетельствует отсутствие абразивной деформации на внутренней поверхности обоймы, вследствие чего диаграмма $\sigma_{zz} = f(\varepsilon)$ идет ниже. В то же время влияние смазки на диаграмму деформирования, получаемую при использовании стальной обоймы, становится значимым.

Таким образом, для получения достоверной диаграммы деформирования грунта в широком диапазоне давлений возможно совместное использование обойм из сплава Д16Т и стали 30ХГСА. Использование дюралевой обоймы позволяет корректно определять продольные и радиальные напряжения при малых давлениях, а использование стальной обоймы — при более высоких давлениях. Полученные в опытах со стальной обоймой на стальных мерных стержнях значения продольных напряжений примерно 400 МПа уже близки к данным плоскотового эксперимента [11], поэтому можно проводить их непосредственное сравнение и строить диаграммы деформирования в широком диапазоне изменения амплитуд нагрузок.

Заключение. По результатам проведенных исследований предложены рациональная конструкция и геометрия обоймы, позволяющие получать достоверные данные по динамической сжимаемости и сдвиговой прочности мягких грунтов. Используя в экспериментах обоймы, изготовленные из разных материалов, можно исследовать достаточно широкий диапазон нагрузок, верхняя граница которого больше нижней границы плоскотовых экспериментов. Отмечено влияние сил трения на внутренней поверхности обоймы при давлениях в грунте более 50 МПа, в связи с чем предложено обрабатывать внутреннюю поверхность обойм тонким слоем смазки. Проведенный численный анализ распределения осевых и радиальных напряжений в образце показал их однородность, что свидетельствует о выполнении основной предпосылки метода Кольского.

Авторы выражают благодарность В. Г. Баженову за интерес, проявленный к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кольский Г. Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения // Механика. 1950. Вып. 4. С. 108–119.

2. **Bragov A. M., Grushevsky G. M., Lomunov A. K.** Use of the Kolsky method for confined tests of soft soils // *Exper. Mechanics*. 1996. V. 36, N 3. P. 237–242.
3. **Брагов А. М., Гандурин В. П., Грушевский Г. М., Ломунов А. К.** Новые возможности метода Кольского для исследования динамических свойств мягких грунтов // *ПМТФ*. 1995. Т. 36, № 3. С. 179–186.
4. **Баженов В. Г., Брагов А. М., Котов В. Л. и др.** Анализ применимости модифицированного метода Кольского для динамических испытаний грунтовых сред в деформируемой обойме // *ПМТФ*. 2000. Т. 41, № 3. С. 155–162.
5. **Работнов Ю. Н.** *Механика деформируемого твердого тела*. М.: Наука, 1979. С. 280–282.
6. **Баженов В. Г., Зефиров С. В., Кочетков А. В. и др.** Пакет программ “Динамика-2” для решения плоских и осесимметричных нелинейных задач нестационарного взаимодействия конструкций со сжимаемыми средами // *Мат. моделирование*. 2000. Т. 12, № 6. С. 67–72.
7. **Григорян С. С.** Об основных представлениях динамики грунтов // *Прикл. математика и механика*. 1960. Т. 24, вып. 6. С. 1057–1072.
8. **Bragov A. M., Demenko P. V., Kruszka L., et al.** Investigation of dynamic compressibility and shear resistance of soft soils in a wide range of strain rate and pressure // *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. Paris: Presses de l’ENPC/LCPC, 2002. P. 909–917.
9. **Рыков Г. В.** Экспериментальное исследование поля напряжений при взрыве в песчаном грунте // *ПМТФ*. 1964. № 1. С. 85–89.
10. **Брагов А. М., Грушевский Г. М.** Влияние влажности и гранулометрического состава на ударную сжимаемость песка // *Письма в ЖТФ*. 1993. Т. 19, вып. 12. С. 70–72.
11. **Баженов В. Г., Котов В. Л., Крылов С. В. и др.** Экспериментально-теоретический анализ нестационарных процессов взаимодействия деформируемых ударников с грунтовой средой // *ПМТФ*. 2001. Т. 42, № 6. С. 190–198.
12. **Брагов А. М., Ломунов А. К.** Особенности построения диаграмм деформирования методом Кольского // *Прикладные проблемы прочности и пластичности. Статика и динамика деформируемых систем: Всесоюз. межвуз. сб. Горький: Изд-во Горьк. ун-та, 1984. С. 125–137.*

*Поступила в редакцию 17/VII 2003 г.,
в окончательном варианте — 29/IX 2003 г.*
