

УДК 539.3: 620.17.254

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СЖИМАЕМОСТИ
СУХОГО ПЕСКА В ДИАПАЗОНЕ АМПЛИТУД НАГРУЗОК
ДО НЕСКОЛЬКИХ ГИГАПАСКАЛЕЙ^{*)}**

А.М. Брагов, Г.М. Грушевский, А.К. Ломунов, И.В. Сергеичев

Нижний Новгород

У. Прауд

Кембридж (Великобритания)

Представлены результаты совместных динамических испытаний сухого песка, выполненных в НИИ механики Нижегородского госуниверситета и в Кавендишской лаборатории Кембриджского университета с использованием модифицированного метода разрезного стержня Гопкинсона и плоскочисловых ударных испытаний. Получены основные закономерности изменения физико-механических свойств песка в диапазоне скоростей деформаций 10^3 – 10^5 с⁻¹ и амплитудах нагрузок до 4 ГПа.

Введение

Интерес к изучению поведения грунтовых сред в условиях интенсивных кратковременных воздействий в последние годы значительно увеличился в связи с необходимостью решения задач взаимодействия сильных сейсмических и взрывных волн с надземными и подземными сооружениями, использования энергии взрыва при строительстве плотин, каналов и т.п. Особое место в динамике грунтов отводится исследованиям процессов ударного взаимодействия твердых тел с грунтовыми средами и задачам проникания. Для численного решения подобных задач необходимы модели грунтовых сред, оснащенные константами и параметрами, а также оценка адекватности этих моделей. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость получения экспериментальных данных в виде динамических зависимостей давления от плотности $P \sim \rho$, осевых напряжений от деформации $\sigma_1 \sim \epsilon_1$, сопротивления сдвигу от давления $\tau \sim P$ и т.д. для различных грунтовых сред в широком диапазоне нагрузок и скоростей деформации [1–4].

На сегодняшний день экспериментальные данные по динамическим зависимостям $P \sim \rho$ отсутствуют в связи с определенными методическими трудностями измерения главных компонент σ_2, σ_3 тензора напряжений. В области нагрузок порядка нескольких ГПа и скоростей деформаций 10^4 – 10^5 с⁻¹ плоскочисловые ударные или взрывные эксперименты позволяют определить лишь зависимость $\sigma_1 \sim \rho$.

В промежуточной области нагрузок 50–500 МПа и скоростей деформации

^{*)} Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ (проекты 04-01-00454а, 04-05-64614а) и Министерства образования и науки РФ (грант Президента РФ на поддержку ведущих научных школ НШ-6391.2006.8).

10^2 – 10^3 с⁻¹ компоненты σ_2 , σ_3 тензора напряжений и, следовательно, зависимость $P \sim \rho$ могут быть определены с использованием модификации метода разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) [5–8]. Как показано в [9], при подобных испытаниях деформированное состояние образца можно считать близким к одноосному, так как $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 \approx 0$, а напряженное состояние – к объемному с компонентами напряжений σ_1 , $\sigma_2 = \sigma_3$.

Для определения радиальной компоненты напряжения $\sigma_2 = \sigma_3$ в работе [5] было предложено проводить измерение тензодатчиками окружной деформации ограничивающей обоймы с привлечением решения задачи Ламе о деформировании толстостенной трубы под действием внутреннего давления [10]. Для этих же целей в более поздней работе [11] использовали дополнительный мерный стержень, пристыкованный к обойме.

В настоящей работе представлены результаты динамических испытаний песка, полученные в НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского (НИИМ ННГУ) и Кавендишской лаборатории с использованием модифицированного метода РСГ и плоскородных ударных экспериментов. Эти испытания позволили установить основные физико-механические свойства песка в диапазоне скоростей деформации 10^3 – 10^5 с⁻¹ и при нагрузках до 4 ГПа.

Модифицированный метод РСГ

Модифицированный метод РСГ, подробно описанный и проанализированный ранее [5–9], позволяет в одном эксперименте определить главные компоненты тензора напряжений, получить кривые одноосного деформирования $\sigma_1 \sim \varepsilon_1$ и объемной сжимаемости $P \sim \rho$, зависимость сопротивления сдвигу от давления $\tau \sim P$, коэффициент бокового распора $\xi = \sigma_2/\sigma_1$.

В экспериментах регистрируются импульсы (падающий, отраженный и прошедший) упругих деформаций в мерных стержнях и окружной деформации обоймы. На основании этих импульсов определяются параметрические зависимости $\sigma_1 \sim t$, $\varepsilon_1 \sim t$, $\sigma_2 \sim t$, $\tau \sim t$, $P \sim t$, $\rho \sim t$, $\xi \sim t$ и далее (после синхронизации исходных импульсов и исключения времени t как параметра) – зависимости: $\sigma_1 \sim \varepsilon_1$, $P \sim \rho$, $\tau \sim P$, $\xi \sim P$ и др.

Проведение плоскородных испытаний

В проведенных экспериментах по определению ударной сжимаемости грунтов использовался метод отражения [12]. Удар метаемой пластиной производится по образцу через пластину-экран. Толщины пластины-ударника, пластины-экрана и образца выбираются таким образом, чтобы волны разгрузки от свободных поверхностей не искажали картину одномерной деформации в волне сжатия. Предполагается, что ударные адиабаты материалов ударника и экрана и начальная плотность исследуемого материала известны.

Измерение скорости удара V и скорости распространения волны сжатия D в образце в совокупности с известными адиабатами ударника и пластины-экрана дают возможность определить точку ударной адиабаты исследуемой среды [12]. Проведение испытаний с различными скоростями соударения позволяет получить ряд точек ударной адиабаты материала.

Порядок проведения плоскородных испытаний и регистрация результатов в НИИМ ННГУ и Кавендишской лаборатории были аналогичны. Нагружающие устройства для проведения плоскородных ударных экспериментов представляли собой одноступенчатые газовые пушки и камеры с приемным устройством для разме-

щения сборки с грунтовым образцом. Технические параметры используемых пушек приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры	НИИМ ННГУ	Кавендишская лаборатория
Калибр, мм	57	50
Объем КВД, л	20	20
Длина ствола, м	7,2	5
Используемые газы	воздух и гелий	воздух и гелий
Рабочее давление, МПа	15	35
Предельные скорости, м/с	700	1200

Материалом ударника и пластин, окружающих образец песка, служили алюминиевый сплав Д16Т (НИИМ ННГУ) и медь (Кавендишская лаборатория). Скорость ударников V измерялась с помощью электроконтактных датчиков. Для измерения скорости распространения волны сжатия D в грунтовом образце использовались диэлектрические (НИИМ ННГУ) и манганиновые (Кавендишская лаборатория) датчики давления. Начальная плотность образцов составляла 1,52–1,58 г/см³.

Для проведения плосковолновых испытаний в НИИМ ННГУ образцы грунта готовились следующим образом (рис. 1). На ударяемой пластине-экране 3 из сплава Д16Т толщиной 5 мм размещался диэлектрический датчик давления 7; на заготовку приклеивалась ограничивающая обойма 5 (винипластовое кольцо) с внутренним диаметром 90 мм, высотой 6–8 мм. Далее заготовка заполнялась песком 4, на вторую заднюю поверхность образца помещалась упорная пластина 6 с размещенным на ней вторым диэлектрическим датчиком давления. Вторая пластина приклеивалась к винипластовому кольцу. К выводам датчиков припаивались соединительные провода. Метаемая пластина-ударник 2 в виде тонкостенного стакана имела толщину 5 мм.

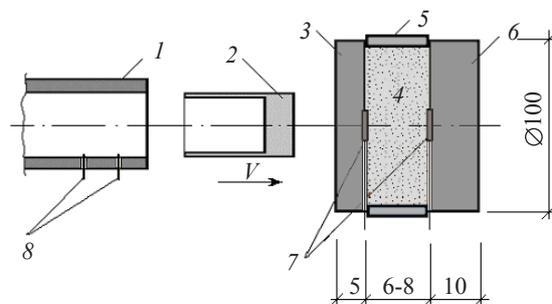


Рис. 1

Скорость распространения фронта волны сжатия D в изучаемом материале регистрировалась двумя диэлектрическими датчиками давления 7. Датчик представляет собой два токосъема из медной фольги толщиной 0,05 мм и диаметром 20 мм, между которыми размещается чувствительный элемент из диэлектрика (лавсановая пленка) толщиной 0,05 мм. Общая толщина датчика составляет 0,2 мм. При прохождении плоской волны сжатия через образец с датчиками на обкладках последних генерируются электрические сигналы, которые регистрируются цифровым запоминающим осциллографом.

В серии испытаний, проведенных в Кавендишской лаборатории, метаемый

ударник *1* (рис.2) представляет собой медную пластину толщиной 10 мм, закрепленную на торце поликарбонатного поддона *3*. Впадина на переднем торце поддона гарантирует, что во время нагружения с образцом взаимодействует только медная пластина-ударник.

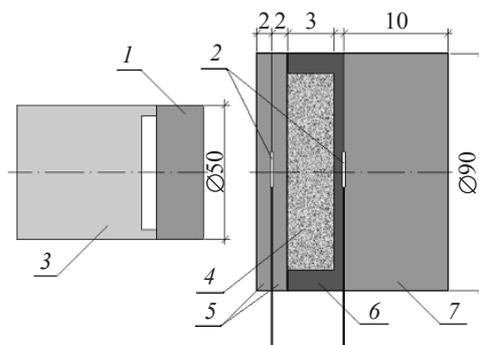


Рис. 2

Образец песка *4* толщиной 3 мм размещен в специальной ячейке. Ячейка состоит из четырех медных компонентов, как показано на рис. 2. Экран *5* состоит из двух пластин толщиной по 2 мм каждая, между которыми в слое эпоксидной смолы установлен первый манганиновый датчик *2*. Следующая пластина *6* имеет полость глубиной 3 мм, в которую помещен песок *4*. Эта пластина имеет дно толщиной 1 мм, после которого также в эпоксидной смоле установлен второй датчик *2*. Опорная пластина *7* имеет толщину 10 мм.

Используемые в данной конфигурации манганиновые датчики действуют, в первую очередь, как индикаторы времени прохождения волны по образцу. Временное разрешение датчиков имеет порядок 200 нс.

При испытании грунтовых материалов в условиях ударно-волнового нагружения особое внимание должно уделяться созданию плоской волны, в которой деформация одномерна. Создание плоской волны возможно при условии сведения к минимуму перекоса при соударении ударника и экрана. Поэтому перед испытанием осуществлялся контроль соосности ствола и приемного устройства и проверялась параллельность плоскостей образца и среза ствола. Неплоскостность соударения не превышала 1 мрад.

Построение единой кривой динамической сжимаемости грунта

Для построения единой кривой динамической сжимаемости песка в настоящей работе используются две взаимодополняющие методики: в области малых напряжений сжимаемость грунтов определяется с помощью модифицированного метода РСГ, а в области высоких – с помощью плосковолновых ударных экспериментов. Поскольку в обоих случаях напряженно-деформированные состояния образцов идентичны, сравнение результатов этих экспериментов и построение единых кривых $\sigma_1 \sim \epsilon_1$ динамического деформирования грунтовых сред в условиях одноосной деформации в широком диапазоне изменения нагрузок является корректным.

Для определения давления P в образце в плосковолновых экспериментах необходимо измерять две компоненты напряжения, что, в принципе, возможно с помощью двухкомпонентных датчиков давления, например, манганиновых. Однако методически это осуществить чрезвычайно сложно из-за неоднородности грунтовых

сред и быстрого выхода из строя измеряющих датчиков. В работе [13] предложен простой алгоритм вычисления зависимости $P \sim \varepsilon_1$ (или $P \sim \rho$) в области нагрузок до нескольких ГПа на основании ударной адиабаты $\sigma_1 \sim \varepsilon_1$ из плоскостных экспериментов и кривой $\tau \sim P$, получаемой с помощью модифицированного метода РСГ с использованием соотношения

$$P = \frac{\sigma_1 - 4/3C}{1 + 4/3 \operatorname{tg} \varphi}, \quad (1)$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ – тангенс угла внутреннего трения, C – сцепление грунта.

Таким образом, по результатам плоскостных испытаний можно определить осевое напряжение σ_1 в образце и далее, в совокупности с результатами, полученными по методу РСГ, построить единые кривые динамического деформирования грунтовой среды в осях $P \sim \varepsilon_1$ или $P \sim \rho$ в диапазоне нагрузок плоскостного ударного эксперимента.

Подготовка образцов и результаты испытаний на РСГ

Для испытаний была использована песчаная смесь, в гранулометрическом составе которой преобладали фракции 0,2 мм (67%), 0,16 мм (26%) и 0,1 мм (5,5%). Перед испытаниями песок высушивался в сушильном шкафу в течение 1,5–2 часов при температуре +700 °С.

При испытаниях по методу РСГ образцы формировались в обоймах с толщиной стенки 10 мм и длиной рабочей части 10 мм. Для центровки на торцах мерных стержней используемые обоймы имели тонкие направляющие длиной 2 мм. Было отмечено, что эти направляющие практически не влияют на напряженно-деформированное состояние обоймы и регистрируемые окружные деформации [8]. Величина навески песка была подобрана таким образом, чтобы получаемая длина образца составляла ~10 мм, то есть равнялась длине обоймы. Мерные стержни и обоймы для этих испытаний изготавливались из алюминиевого сплава Д16Т или высокопрочной стали. Параметры нагружающего импульса варьировались путем изменения скорости ударника, который был изготовлен из того же материала, что и мерные стержни. По результатам группы испытаний в близких условиях строились средние кривые в осях $\sigma_1 \sim \varepsilon_1$, $\sigma_2 \sim \varepsilon_1$, $P \sim \varepsilon_1$ (рис.3).

Представленные данные свидетельствуют о том, что изменение скорости деформации практически не влияет на ход нагрузочной части ветви диаграммы деформирования песка, то есть в данных условиях имеют место предельные диаграммы деформирования, на существование которых указывалось в [12, 14]. Отличительной особенностью этих диаграмм является нелинейный характер на ветви активного нагружения. При этом в начале процесс деформирования происходит, по-видимому, в основном за счет переукладки частиц песка. Далее, по мере замещения и выбора порового пространства, частицы начинают более интенсивно взаимодействовать друг с другом. Это взаимодействие сопровождается возрастанием трения их друг о друга, упругим деформированием и частичным разрушением, о чем

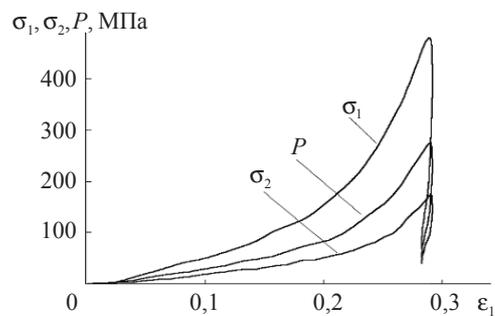


Рис. 3

свидетельствует проведенное после испытания исследование гранулометрического состава песка. Указанные процессы приводят к уменьшению сжимаемости среды и соответствующему росту напряжений.

На этапе разгрузки образца напряжения в падающей волне начинают уменьшаться, и начинается процесс разуплотнения грунта. Однако переход от активного нагружения к разгрузке происходит не мгновенно, а плавно, в некотором диапазоне изменения деформаций. Такое поведение может быть связано, с одной стороны, с падением скорости деформации, а с другой, – с тем, что при динамическом нагружении песка газообразная составляющая сжимается и защемляется в минеральном скелете. Появляющиеся внутренние напряжения в песке в состоянии преодолевать силы связности в грунте, возникающие при его деформировании, как только снимется нагрузка. В дальнейшем происходит интенсивная разгрузка образца с некоторым уменьшением степени достигнутой деформации (“упругая разгрузка”). Ветви разгрузки нелинейны и крутизна их зависит от достигнутых напряжений и соответственно от степени разрушения частиц песка.

Сравнение нагрузочных и разгрузочных ветвей диаграмм позволяет сделать вывод о том, что скорость волн разгрузки, определяемая углами наклона секущих, значительно превышает скорость волн нагрузки для всех режимов нагружения.

На рис. 4 показана зависимость $\tau \sim P$ сопротивления сдвигу от давления для песка. Эта зависимость практически линейна на ветви нагрузки и описывается известным соотношением Мора–Кулона: $\tau = C + \operatorname{tg} \varphi \cdot P$ (C – удельное сцепление песка, φ – угол внутреннего трения песка). При разгрузке она становится нелинейной и имеет другой угол наклона, что, по-видимому, обусловлено разрушением частиц песка.

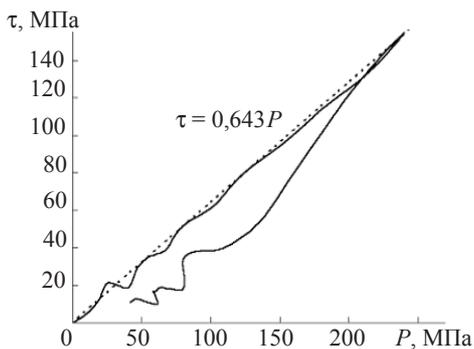


Рис. 4

$\varphi = 32,6^\circ$. В эксперименте был также определен коэффициент бокового давления (распора) $\xi = \sigma_2/\sigma_1 \approx 0,33$.

Результаты плосковолновых испытаний

Вариация скорости удара при плосковолновых испытаниях позволила получить ряд точек ударной адиабаты. На рис. 5 представлены ударные адиабаты в осях $D \sim U$,

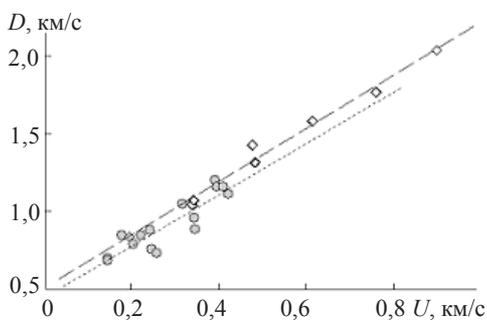


Рис. 5

полученные в НИИМ (темные кружки) и Кавендишской лаборатории (светлые ромбы). Видно достаточно хорошее совпадение полученных результатов. Некоторое отличие между ними можно объяснить разницей начальной плотности образцов.

Ударные адиабаты в осях $D \sim U$ могут быть описаны линейным уравнением $D = A + BU$. С использованием соотношений Гюгонио оно легко преобразуется

σ_1

к виду

$$\sigma_1 = \frac{\rho A^2 \varepsilon_1}{(1 - B\varepsilon_1)^2}. \quad (2)$$

Объемная деформация $\theta = \varepsilon_1$ может быть выражена через степень сжатия песка: $\theta = 1 - (D - U)/D$. Тогда, подставив (2) в (1), получим

$$P = \frac{\rho A^2 \varepsilon_1}{(1 + 4/3 \operatorname{tg} \varphi)(1 - B\varepsilon_1)^2}. \quad (3)$$

Значения констант A и B в соотношении (3), установленные при обработке экспериментальных данных, приведены в табл. 2.

Константа	НИИМ ННГУ	Кавендишская лаборатория
A , км/с	0,452	0,511
B	1,652	1,717

Как отмечалось выше, напряженно-деформированные состояния в модифицированном методе РСГ и плосковолновом ударном эксперименте подобны, поэтому использование получаемых этими методами результатов позволяет определять кривые одноосного сжатия $\sigma_1 \sim \varepsilon_1$, $\sigma_1 \sim \rho$, $P \sim \varepsilon_1$, $P \sim \rho$ и другие характеристики грунтов в широком диапазоне изменения скоростей деформации и амплитуд нагрузок.

На рис. 6 показаны единые кривые динамической сжимаемости песка в осях $\sigma_1 \sim \varepsilon_1$ и $P \sim \varepsilon_1$. Пунктирными линиями и маркерами показаны результаты плосковолновых ударных экспериментов, проведенных в Кавендишской лаборатории, определенные с учетом соотношений (2) и (3). Сплошные линии соответствуют кривым, полученным с использованием модифицированного РСГ в НИИМ ННГУ.

Из рисунка видно, что данные, полученные двумя различными методами, хорошо согласуются между собой в рассмотренном диапазоне нагрузок и описываются соотношениями (2) и (3) в пределах погрешности экспериментов.

Заключение

Предложен метод определения давления P в грунтовых средах на основании зависимостей $\sigma_1 \sim \varepsilon_1$, получаемых в плосковолновых ударных экспериментах, и зависимостей $\tau \sim P$, определяемых с помощью модифицированного метода РСГ. Показана возможность совместного применения этих двух методов для исследования сжимаемости грунтовых материалов в диапазоне нагрузок до нескольких ГПа. Отмечена хорошая согласованность кривых ударной сжимаемости (как в осях $\sigma_1 \sim \varepsilon_1$, так и в осях $P \sim \varepsilon_1$), полученных независимо с помощью различных методов в НИИМ ННГУ и в Кавендишской лаборатории.

Таким образом, совместное использование двух методов экспериментальных

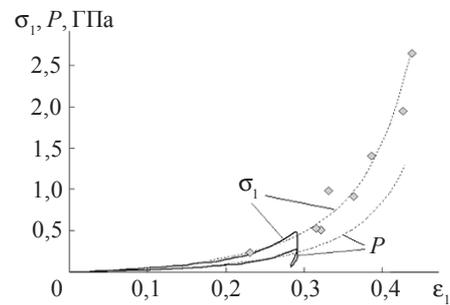


Рис. 6

исследований позволяет получить основные зависимости физико-механических свойств грунтовых материалов в широком диапазоне изменения амплитуд нагрузок.

Литература

1. Григорян, С.С. Об основных представлениях динамики грунтов / С.С. Григорян // ПММ. – 1960. – Вып. 4. – С. 1057–1072.
2. Сагомоян, А.Я. Обзор некоторых работ по динамике грунтов / А.Я. Сагомоян // Вестник МГУ. Сер. Механика. – 1967. – №1. – С. 124–135.
3. Рахматулин, Х.А. Вопросы динамики грунтов / Х.А. Рахматулин, А.Я. Сагомоян, Н.А. Алексеев. – М.: Изд-во МГУ, 1964. – 239 с.
4. Зельдович, Я.Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1966. – 688 с.
5. Bragov, A.M. Use of the Kolsky method for studying shear resistance of soils / A.M. Bragov, G.M. Grushevsky, A.K. Lomunov // DYMAT Journal. – 1994. – Vol.1, No3. – P. 253–259.
6. Новые возможности метода Кольского для исследования динамических свойств мягких грунтов / А.М. Брагов [и др.] // ПМТФ. – 1995. – Т. 36, №3. – С. 179–186.
7. Методические особенности изучения динамической сжимаемости мягких грунтов в диапазоне давлений 0,05–1,5 ГПа / А.М. Брагов [и др.] // Химическая физика. – 1995. – Т. 14, №2-3. – С. 126–135.
8. Анализ особенностей измерения динамических характеристик мягких грунтов методом Кольского / А.М. Брагов [и др.] // ПМТФ. – 2004. – Т. 45, №4. – С. 147–153.
9. Bragov, A.M. Use of the Kolsky Method for Confined Tests of Soft Soils / A.M. Bragov, G.M. Grushevsky, A.K. Lomunov // Exp. Mech. – 1996. – Vol. 36. – P. 237–242.
10. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. Т. 2. Более сложные вопросы теории и задачи / С.П. Тимошенко. – М.: Наука, 1965. – 480 с.
11. Semblat, J.F. 3D-Hopkinson bar: new experiments for dynamic testing on soils / J.F. Semblat, M.P. Luong, G. Gary // Soils and Foundations. – 1999. – Vol. 39, No1. – P. 1–10.
12. Ляхов, Г.М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах / Г.М. Ляхов. – М.: Наука, 1982. – 286 с.
13. Методика определения основных физико-механических свойств мягких грунтов при скоростях деформации 10^3 – 10^5 с⁻¹ и амплитудах нагрузок до нескольких гигапаскалей / А.М. Брагов [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31, вып.12. – С. 83–87.
14. Рыков, Г.В. Результаты определения предельных динамических диаграмм сжатия для песчаных грунтов и глины / Г.В. Рыков // ПМТФ. – 1988. – №6. – С. 166–169.

[8.09.2006]

STUDYING THE DYNAMIC COMPRESSIBILITY OF DRY SAND IN THE RANGE OF LOADING AMPLITUDES OF UP TO SEVERAL GPa

A.M. Bragov, G.M. Grushevsky, A.K. Lomunov, I.V. Sergeyechev

There are presented results of joint dynamic tests of dry sand carried out both in Research Institute of Mechanics, State University of Nizhny Novgorod and in Cavendish Laboratory, Cambridge University by using modified Split Hopkinson Pressure Bar method and plate-impact experiments. Principal relationships of physico-mechanical behavior of sand were obtained at strain rate 10^3 – 10^5 s⁻¹ and loads up to 4 GPa.