

шая плотность (уровень 2, фиг. 4, $\alpha_0=45^\circ$, $N=23$, $\Pi=32\%$; уровень 3, $\alpha_0=80^\circ$, $N=14$, $\Pi=33,5\%$).

Если теперь из этого состояния перейти к монотонному нагружению, то произойдет резкое разрыхление и плотность постепенно выйдет на прежнее стационарное значение. Здесь обнаруживается качественно новое поведение сыпучего материала — затухающая периодическая дилатационной кривой.

Итак, предложенные методика и прибор сложного нагружения могут быть использованы для измерения параметров и исследования реологических свойств широкого класса материалов, включая водонасыщенные грунты, суспензии, расплавы полимеров, гранулированные и порошковые материалы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ревуженко А. Ф. О самых простых течениях сплошной среды // Докл. АН СССР. 1988. Т. 303. № 1. С. 54–58.
2. Жуков А. М., Работнов Ю. Н. Исследование пластических деформаций стали при сложном нагружении // Инж. сб. 1954. № 18. С. 105–112.
3. Ильюшин А. А., Ленский В. С. Сопротивление материалов. М.: Физматгиз, 1959. 371 с.
4. Ревуженко А. Ф. Один класс сложных нагружений неупругой среды // ПМТФ. 1986. № 5. С. 150–158.
5. Кондауров В. И., Мухамедиев Ш. А., Никитин Л. В., Рыжак Е. И. Механика разрушения горных пород. М.: Ин-т физики Земли АН СССР. 1987. 218 с.
6. Kolymbas D. Bifurcation analysis for sand samples with a non-linear constitutive equation // Ing.-Arch. 1981. V. 50. No. 2. P. 131–140.
7. Шемякин Е. И., Ревуженко А. Ф., Бобряков А. П., Захаревич Э. В. Устройство для испытания образцов сыпучих материалов. А. с. № 1132192 // Бюлл. изобр. 1984. № 48. С. 153.
8. Бобряков А. П., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И. Однородный сдвиг сыпучего материала: Локализация деформаций // Физ.-техн. пробл. разработки полезных ископаемых. 1983. № 5. С. 17–21.
9. Лурье А. И. Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980. 512 с.
10. Николаевский В. Н. Механические свойства грунтов и теория пластичности // Итоги науки и техники. Механика твердых деформируемых тел. Т. 6. М.: ВИНТИ, 1972. 85 с.
11. Бобряков А. П., Ревуженко А. Ф. Однородный сдвиг сыпучего материала: Дилатансия // Физ.-техн. пробл. разработки полезных ископаемых. 1982. № 5. С. 23–29.

Новосибирск

Поступила в редакцию
30.XII.1988

УДК 624.131

© 1990 г.

И. К. РОХАНЕНКО, С. Ф. МАКЛАКОВ, В. А. ПРИЦЕПА

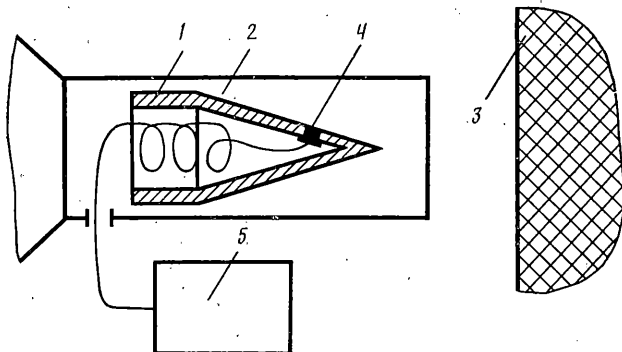
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ГРУНТА НА СДВИГ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Представлены результаты экспериментального определения предела прочности грунта на сдвиг при динамическом нагружении. Разработана экспериментальная установка, обеспечивающая непосредственное измерение касательных напряжений на поверхности тела при его внедрении в преграду. Показано, что интенсивное динамическое нагружение глинистой среды сопровождается уменьшением действующих в ней касательных напряжений до пренебрежимо малых значений.

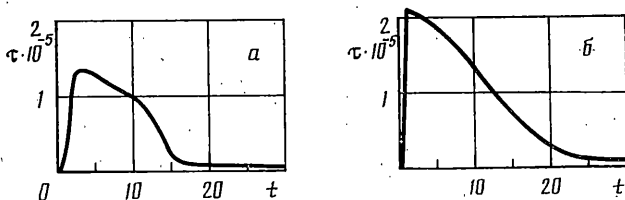
Важным определяющим соотношением для грунтов является условие пластичности. Как показано в [1, 2], для мягких грунтов наиболее достоверным условием предельного равновесия, когда они переходят в область пластического деформирования, является условие пластичности в форме Мизеса — Шлейхера с константой τ_* (сопротивлением сдвигу).

Характерным свойством мягких грунтов (глин, суглинков, супесей, лессов) является существование сильно отличающихся предельных диаграмм деформирования: статической, когда скорость деформирования мала, и динамической, когда скорость деформирования стремится к бесконечности.

Влияние скорости нагружения на величину τ_* исследовано в [3, 4], где предложены и методы экспериментальной оценки значений указанных предельных напряжений. В [4] для определения предела прочности грунта на сдвиг осуществлялось внедрение с постоянной скоростью в пластилин осесимметричных цилиндров с коническими наконечниками. Диапазон исследованных скоростей движения со-



Фиг. 1



Фиг. 2

ставлял от $5 \cdot 10^{-5}$ до 20 м/с. Цилиндр и конус не имели силовой связи и были закреплены каждый на своей силоизмерительной мезоде. Величина касательных напряжений, равная пределу прочности материала на сдвиг τ_s , определялась делением величины силы сопротивления движению цилиндра на площадь его поверхности, контактирующей с пластилином. Однако при скоростях движения, существенно больших 2 м/с, данный способ определения величины τ_s не может быть применен, поскольку с увеличением скорости контакт цилиндрической поверхности внедряемого тела со средой исчезает из-за образования каверны, диаметр которой больше диаметра цилиндра.

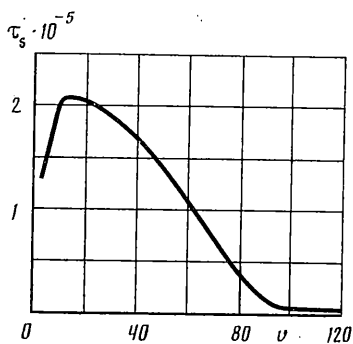
В [3] для определения сдвиговой прочности материалов производилось высокоскоростное внедрение по инерции тел с остроконическим наконечником. Величина τ_s определялась из условия баланса энергии по начальной скорости тела и глубине его внедрения. При этом полагалось, что сопротивление движению конуса определяется в основном пластическими свойствами, т. е. величиной касательных напряжений на поверхности конуса. Однако точность определения величины τ_s при больших скоростях проникания данным способом низка, что объясняется следующим. Во-первых, оценка значения τ_s производится в предположении о его постоянстве в течение всего времени проникания, т. е. фактически определяется осредненная величина τ_s для диапазона скоростей от ее начального значения до нуля. Во-вторых, с увеличением скоростей проникания возрастает погрешность, обусловленная неучетом вклада нормального давления в величину силы сопротивления.

Следовательно, рассмотренные методы не обеспечивают определения адекватной зависимости τ_s от скорости нагружения при ее больших значениях, так как с увеличением скорости движения тела в пластическом материале погрешность определения τ_s возрастает.

В связи с этим представляет интерес уточнение зависимости τ_s от скорости движения тела в пластическом материале. С этой целью разработана установка, обеспечивающая непосредственное измерение касательных напряжений, действующих на конической поверхности тела в процессе его внедрения в испытываемый материал. Схема экспериментальной установки приведена на фиг. 1. Цилиндрические тела 1 разогнали с помощью пневмопушки 2 и внедрялись по инерции в образец исследуемого материала 3. Пьезоэлектрические преобразователи силы сдвига 4 размещались на коническом наконечнике внедряемого тела вблизи его вершины, воспринимающая поверхность преобразователей находилась по уровню внешней поверхности тела. Масса внедряемого тела выбиралась такой, чтобы в процессе его проникания на глубину, равную расстоянию от вершины наконечника до пьезообразователя, падение скорости не превышало 5% от ее начального значения. Согласующая и регистрирующая аппаратура 5 располагалась стационарно, ее связь с размещенными на внедряемом теле пьезообразователями осуществлялась по кабельной линии¹.

¹ Подробно экспериментальная установка и методика проведения исследований описаны в: Козаенко И. К., Маклаков С. Ф. Установка для определения предела прочности на сдвиг пластических материалов при динамическом нагружении: А. с. 1420446 СССР // В. И. 1988. № 32. С. 194.

На разработанной установке определялись значения предела прочности глинистой среды на сдвиг для диапазона скоростей внедрения от 2 до 180 м/с. В качестве модели глинистой среды использовался пластилин, представляющий собой белую глину с небольшими добавками воска, парафина, вазелина. Эти добавки делают его свойства стабильными во времени и хорошо моделируют влагу, содержащуюся в реальных глинистых грунтах [4].



Фиг. 3

Типичные осциллограммы касательных напряжений τ (Па) на конической поверхности внедряемого тела приведены на фиг. 2 (время t — мс). На фиг. 2, а приведена осциллограмма, полученная при внедрении тела с начальной скоростью $v_0=3$ м/с. Время нарастания сигнала до максимального значения соответствует продолжительности входа воспринимающей поверхности пьезопреобразователя (ее характерный линейный размер равен 10 мм) в контакт с пластилином, возвращение сигнала на нулевой уровень соответствует остановке тела. На фиг. 2, б представлена осциллограмма, полученная при $v_0=12$ м/с. Как видно из этих осциллограмм, после внедрения конического наконечника на глубину, равную расстоянию от его вершины до пьезопреобразователя, величина касательных напряжений уменьшается вследствие снижения скорости движения тела.

На фиг. 3 представлен построенный по результатам эксперимента график зависимости величины предела прочности τ_s (Па) глинистой среды на сдвиг от скорости движения тела v (м/с). Видно, что в диапазоне скоростей от 2 до 10 м/с, при которых величина нормального давления на коническую поверхность сравнительно невелика, с ростом скорости нагружения прочность грунта на сдвиг и, соответственно, интенсивность касательных напряжений возрастают. В этом диапазоне скоростей значения τ_s близки к полученным в [3, 4]. При $v=10$ м/с рост величины τ_s прекращается, и при дальнейшем увеличении скорости интенсивность касательных напряжений на поверхности тела уменьшается. При скоростях $v > 95$ м/с значения τ_s становятся пренебрежимо малыми.

Полученную зависимость величины τ_s от скорости нагружения можно объяснить следующим образом. При сравнительно небольших значениях v с ростом скорости нагружения структурная прочность пластических материалов возрастает, приближаясь к некоторому значению динамического предела прочности [1]. В этом диапазоне значений v с ростом скорости нагружения увеличиваются и значения τ_s . При дальнейшем же увеличении скорости нагружения, когда структурная прочность глинистой среды уже достигла своего предельного значения, основное влияние на величину τ_s оказывает нормальное давление, величина которого пропорциональна квадрату скорости движения тела. Возрастание нормального давления приводит к снижению сдвиговой прочности глинистой среды и уменьшению τ_s практически до нулевых значений.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показывают, что интенсивное динамическое нагружение глинистой среды сопровождается уменьшением действующих в ней касательных напряжений до пренебрежимо малых значений. Это дает основание рассматривать глинистую среду при действии на нее динамических нагрузок как сжимаемую жидкость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вовк А. А., Замышляев Б. В., Евстеров Л. С. и др. Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок. Киев: Наук. думка, 1984. 287 с.
2. Бивин Ю. К., Колесников В. А., Флитман Л. М. Определение механических свойств среды методом динамического внедрения // Изв. АН СССР. МТТ. 1982. № 5. С. 181—185.
3. Бивин Ю. К., Викторов В. В., Коваленко Б. Я. Определение динамических характеристик грунтов методом пенетрации // Изв. АН СССР. МТТ. 1980. № 3. С. 105—110.
4. Бивин Ю. К., Викторов В. В., Степанов Л. П. Исследование движения твердого тела в глинистой среде // Изв. АН СССР. МТТ. 1978. № 2. С. 159—165.

Ростов н/Д

Поступила в редакцию
7.XII.1988