

УДК 539.215

© 1995 г. Ю. Н. БУХАРЕВ, А. Е. КОРАБЛЕВ, М. И. ХАЙМОВИЧ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ УДАРНИКА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВНЕДРЕНИИ В ГРУНТ

Для описания механических свойств грунта необходимо знание основной характеристики его пластичности — предельного сопротивления сдвигу (сдвиговой прочности) τ_c .

К настоящему времени разработан ряд методов определения τ_c . При этом достаточно широкое распространение получили так называемые пенетрационные методы испытаний, предусматривающие проведение измерений усилия в процессе статического или динамического внедрения конического индентора (ударника) в грунт. Например, в [1] величина τ_c определяется по глубине статического внедрения конуса под действием постоянной силы. В [2—4] значительное внимание уделено получению зависимости предельного напряжения τ_c от скорости нагружения. Вместе с тем в ряде случаев имеются определенные противоречия как в методике исследований, так и в полученных результатах. В [2] предел прочности на сдвиг τ_c пластилина, моделировавшего глинистый грунт, определялся делением силы сопротивления динамическому внедрению конического ударника на площадь его контакта с пластилином. В [3] величина τ_c находилась в экспериментах при скорости метания конических ударников в пластилин 30—300 м/с, тормозившихся в процессе взаимодействия с преградой. При этом использовалось условие равенства работы касательных сил изменению кинетической энергии ударника, т. е. не учитывалась составляющая силы торможения ударника от гидродинамического давления. Величина τ_c полагалась постоянной в диапазоне скоростей ударника от начальной v_0 до $v_k = 5$ м/с. Обработка опытов дала значение $\tau_c = 0,21$ МПа.

В [4] предпринята попытка получить для пластилина зависимость τ_c от скорости движущегося по инерции конического ударника с помощью прямого измерения касательной силы путем размещения пьезоэлектрического датчика на конической поверхности части ударника. Диапазон скоростей внедрения в опытах составил от 2 до 180 м/с. Полученная зависимость $\tau_c(v)$ имеет максимум $\tau_{c\max} = 0,21$ МПа при $v = 10$ м/с; с ростом скорости ($v \geq 100$ м/с) τ_c уменьшается практически до нуля. Такое поведение зависимости $\tau_c(v)$ не согласуется с указанными выше данными из [2, 3]. В то же время в [5, 6] получены зависимости величины τ_c от давления p при динамических нагрузках суглинков различной влажности. Показано заметное влияние влажности грунта на характер зависимости $\tau_c(p)$. При влажности суглинка W менее 14% [6] $\tau_c(p)$ монотонно возрастает вплоть до давления $p = 4$ МПа, а при $W = 17—20\%$ в зависимости $\tau_c(p)$ имеется максимум при $p = 1—2$ МПа, причем $\tau_{c\max} = 0,5$ МПа. При $W = 20\%$ с увеличением давления до 4 МПа τ_c падает до 0,08 МПа.

В связи с изложенными обстоятельствами и распространенным использованием пластилина в качестве модели глинистой среды с целью получения дополнительных данных по зависимости $\tau_c(v)$ были проведены эксперименты с внедрением в пластиновую преграду по инерции коническо-цилиндрических ударников.

Опыты проводились на пневмопушке калибром 30 мм. Преграда изготавливалась из пластилина плотностью $\rho = 1,4$ г/см³ в виде цилиндра диаметром 300 и длиной 600 мм. Экспериментально было установлено, что используемая преграда эквивалентна полубесконечной. Ударник представлял собой конус с углом полураствора $\beta = 15^\circ$, жестко соединенный с тонкой (толщина 1 мм) цилиндрической оболочкой из алюминиевого сплава АМг-6. Масса ударника 147 г. На основание конуса устанавливался пьезоакселерометр с чувствительным элементом из керамики ЦТС-19 для измерения ускорения ударника при внедрении в преграду. Согласующая и регистрирующая аппаратура располагалась

стационарно, ее связь с пьезоакселерометром осуществлялась по кабельной линии аналогично [4]. Ускорение из осциллограмм напряжения находилось по формуле

$$a(\tau) = nC_0 \left[U(\tau) + \frac{1}{RC_0} \int_0^\tau U(t) dt \right] \quad (1)$$

где n — коэффициент преобразования измерительной системы, V — напряжение, C_0 , R — емкость и электрическое сопротивление линии с датчиком соответственно, τ — время, отсчитываемое от начала соударения ударника с мишенью.

Затем интегрированием определялись зависимости скорости v и заглубления x (отсчитывается от невозмущенной поверхности преграды) от времени.

Значение τ_s определялось из условия равенства изменения кинетической энергии ударника на участке пути $[x_i, x_{i+1}]$ работе касательной и гидродинамической сил сопротивления при $0 < x < h_k$:

$$\frac{m(v_{i+1}^2 - v_i^2)}{2} = \int_{x_i}^{x_{i+1}} \pi \tau_s \text{tg}^2 \beta x^2 dx + \int_{x_i}^{x_{i+1}} \frac{c_{xP}}{2} \left(\frac{v_i + v_{i+1}}{2} \right)^2 \pi \text{tg}^2 \beta x^2 dx \quad (2)$$

или

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m (v_{i+1}^2 - v_i^2) &= \frac{1}{2} \pi \tau_s \text{tg}^2 \beta (x_{i+1}^3 - x_i^3) + \frac{1}{2} c_{xP} \pi \text{tg}^2 \beta \times \\ &\times (v_i + v_{i+1})^2 (x_{i+1}^3 - x_i^3) \end{aligned}$$

где m [кг] — масса ударника, c_x — коэффициент сопротивления, h_k [м] — длина конической части ударника.

При $h_k < x < H$ имеем

$$\frac{1}{2} (v_{i+1}^2 - v_i^2) m = \frac{1}{6} \text{tg}^2 \beta h_k^2 \pi (x_{i+1} - x_i) [\tau_s + c_{xP} (v_{i+1} + v_i)^2] \quad (3)$$

где H — полное заглубление ударника.

Уравнения (2) и (3) разрешались относительно τ_s для участков пути $(x_{i+1} - x_i)$, в пределах которых скорость внедрения изменялась не более чем на 10%. Для каждого участка скорость полагалась постоянной и равной среднему значению $\frac{1}{2} (v_{i+1} + v_i)$. Предполагалось также, что величина τ_s не зависит от скорости в пределах указанных участков пути и постоянна вдоль образующей конуса. В расчетах использовалось значение c_x из [7], в которой предложен способ обработки экспериментальных данных, позволяющий в каждом опыте в зависимости от скорости внедрения ударника в преграду определить гидродинамический коэффициент c_x и параметр ϵ , характеризующий прочностные свойства преграды.

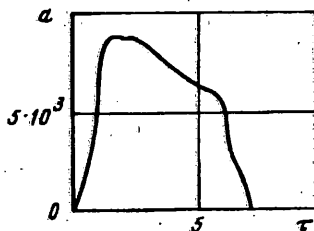
Проведено 11 опытов при скоростях внедрения v_0 от 20 до 80 м/с. Типичная осциллограмма ускорения при $v_0 = 55$ м/с представлена на фиг. 1 (время τ — [мс], ускорение a — [м/с²]). Нарастание ускорения обусловлено внедрением конической части ударника, максимальное значение ускорения соответствует заглублению $x = h_k$ (потеря скорости ударника на этом интервале движения мала, менее 5%).

Зависимость τ_s [МПа] от скорости внедрения v [м/с] приведена на фиг. 2. Значения, полученные при заглублении конической части, отмечены крестами, а при $x > h_k$ — светлыми точками. Кривая 1 получена путем обработки данных методом наименьших квадратов. На фиг. 2 обозначена также точка при $v_0 = 0$, найденная путем измерения глубины статического нагружения конуса методом П. А. Ребиндера [1]. Видно, что значения τ_s , полученные в разных опытах при различных начальных скоростях, хорошо согласуются между собой. Это говорит о слабом влиянии истории процесса нагружения в исследованном диапазоне скоростей.

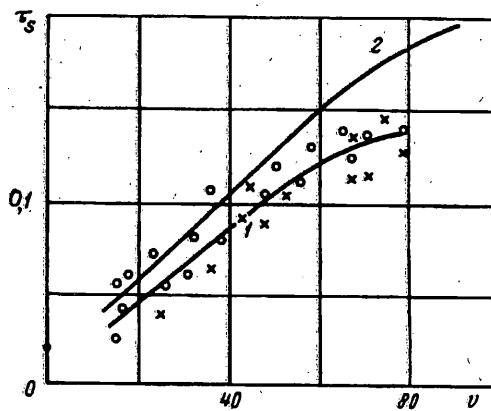
Результаты публикуемой работы не согласуются с данными [4] об уменьшении τ_s пластилина при $v > 10$ м/с. В то же время монотонное возрастание предельного сопротивления сдвигу наблюдалось при увеличении интенсивности нагружения суглинков малой влажности. Возрастание τ_s , полученное здесь, не противоречит данным из [3, 5, 6] и говорит о принципиальной возможности замены в модельных экспериментах сухих суглинков на пластилин.

Представляет интерес сопоставление полученных данных с результатами [7] по определению параметра прочности пластилиновой преграды при динамическом внедрении ударников с коническим наконечником. С одной стороны, сила сопротивления внедрению, вызванная напряжением τ_s , равна $F_1 = \tau_s \pi x^2 \text{tg} \beta$. В то же время эта сила может быть представлена в виде $F_2 = \epsilon S(x) = \epsilon \pi x^2 \text{tg}^2 \beta$; отсюда, приравнявая F_1 и F_2 , получим

$$\tau_s = \epsilon \text{tg} \beta \quad (4)$$



Фиг. 1



Фиг. 2

На фиг. 2 приведена кривая 2, полученная по формуле (4) на основании данных из [7]. Видно хорошее совпадение с результатами публикуемой работы.

Таким образом, результаты исследований показывают, что при увеличении интенсивности динамического нагружения пластилина (как и сухой глинистой среды) действующие в нем сдвиговые напряжения τ_s , соответствующие прочностной компоненте силы сопротивления внедрению, возрастают от 0,05 до 0,12 МПа при изменении скорости внедрения конического ударника от 20 до 80 м/с. Отмечено слабое влияние истории процесса нагружения на величину τ_s в исследованном диапазоне скоростей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ребиндер П. А., Семенов Н. А. О методе погружения конуса для характеристики структурно-механических свойств пластичновязких тел//Докл. АН СССР. 1949. Т. 64. № 6. С. 835—838.
2. 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.
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. Коханенко И. К., Маклаков С. Ф., Прищеп В. А. Определение предела прочности грунта на сдвиг при динамическом нагружении//Изв. АН СССР. МТТ. 1990. № 4. С. 182—184.
5. Черный Г. И. Изменение физико-механических свойств грунтов при механических нагрузках. Киев: Наук. думка, 1979.
6. Вовк А. А., Черный Г. И., Михалюк А. В., Гундарев К. А. Прочностные свойства суглинков различной влажности при динамическом нагружении//Основания, фундаменты и механика грунтов. 1973. № 5. С. 30—33.
7. Бухарев Ю. Н., Гандурин В. П., Кораблев А. Е. Экспериментальное исследование проникания недеформируемого ударника в глинистую среду и снег//Прикладные проблемы пластичности и прочности. Анализ и оптимизация конструкций. Всес. межвуз. сб. Нижний Новгород, 1991. С. 99—110.

Арзамас-16

Поступила в редакцию
16.IV.1992