

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ МЕТОДОМ ПЕНЕТРАЦИИ

Ю. К. БИВИН, В. В. ВИКТОРОВ, Б. Я. КОВАЛЕНКО

(Москва, Днепропетровск)

Представлены результаты экспериментального исследования механических характеристик грунтовых сред методом пенетрации. Показано наличие предельных динамических касательных напряжений, которые возникают при быстром внедрении цилиндра в среду. Отмечена независимость этих напряжений от некоторого вида предыстории деформирования. Обсуждаются два способа получения указанных предельных напряжений: внедрение с постоянной скоростью с измерением силы сопротивления и высокоскоростное внедрение по инерции. Отмечается, что оба способа дают близкие значения предельных касательных напряжений.

В последние годы в области экспериментального исследования динамических характеристик грунтов заметен определенный прогресс. Основную полагающее значение имеет работа [1]. На многочисленных опытах в [2] показано существенное влияние скорости деформирования на механические свойства грунтов¹ и отмечено, что скорость деформации в песчаных и глинистых грунтах не оказывает существенного влияния на условия пластичности, взятое в форме Мизеса — Шляйхера. В то же время в [3] указывается, что динамическая прочность глинистых грунтов возрастает с увеличением скорости нагружения более чем в два раза по сравнению с сопротивлением сдвигу при статической нагрузке.

Известно, что важной расчетной характеристикой грунтов является критерий пластичности, причем в грунте как упругопластической среде в отличие от металлов пластичность проявляется двояко — при объемном деформировании и при формоизменении. Изучение влияния скоростных факторов на эти характеристики представляется весьма своевременным. Вопрос о влиянии истории процесса нагружения во времени на критерий текучести остается открытым.

После опубликования работы [4] в экспериментальной практике находят все более широкое применение пенетрационные испытания грунтов [5], отличающиеся от других методов простотой, достаточной точностью получаемых результатов и высокой производительностью. Важно отметить, что разработанные методы предназначены для определения статических характеристик грунтов по глубине внедрения конуса или шарика под действием заданной постоянной силы. В публикуемой работе предпринята попытка, изменив методику пенетрационных испытаний, выявить влияние скоростных, вязких эффектов на предельные пластические характеристики среды — сопротивление сдвигу.

В работе [6] было исследовано влияние скорости на сопротивление движению тел в глинистой среде. Осесимметричные цилиндры с кониче-

¹ См. также: Кулинич Ю. В., Нарожная З. В., Рыков Г. В. Механические характеристики песчаных и глинистых грунтов с учетом их вязкопластических свойств при кратковременных динамических нагрузках. М., Ин-т проблем механики АН СССР, 1978, препринт № 69.

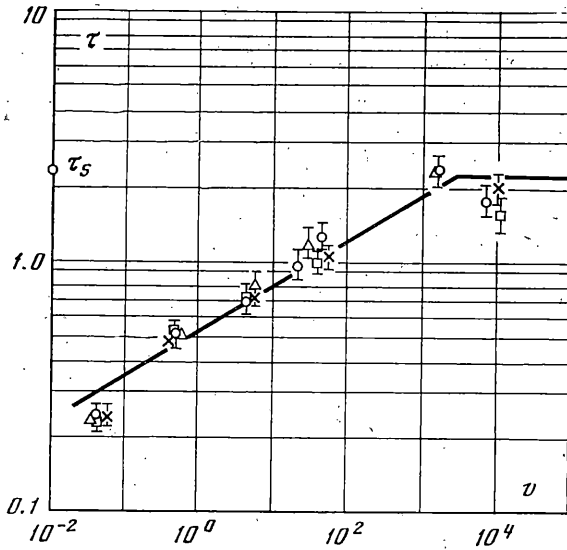
скими наконечниками внедрялись в пластилин и двигались с постоянной скоростью. Диапазон исследованных скоростей движения составлял от $5 \cdot 10^{-5}$ до 20 м/с. Цилиндр и конус не имели силовой связи и были закреплены каждый на своей мессоде, которыми измерялись отдельно силы сопротивления движению конуса и цилиндра. Использовались конусы с углом полураствора $\alpha = 15, 30, 45$ и 90° . В последнем случае перед цилиндром двигался диск толщиной 0.05 калибра.

В этих экспериментах при сравнительно малых скоростях внедрения сопротивление движению цилиндрической части определяется по существу касательными напряжениями, возникающими в среде на поверхности цилиндра. Так как характерный размер шероховатости стенки цилиндра составляет 20 мкм, а размеры частиц среды меньше 5 мкм, проскальзывание металлического цилиндра по среде происходить не может. Это подтвердилось серией опытов, в которых цилиндры с разной шероховатостью поверхности внедрялись с одной и той же скоростью. При этом в исследованном диапазоне скоростей движения изменение шероховатости не приводило к какому-либо изменению силы сопротивления. Таким образом, если распределение касательных напряжений на поверхности цилиндра равномерно, то их величина может быть определена делением величины силы сопротивления движению цилиндра на площадь его поверхности. Предположение о равномерности распределения касательных напряжений по поверхности цилиндра подтверждается также опытными данными. Приведенные в работе [6] осциллограммы указывают на прямую пропорциональную зависимость силы сопротивления от глубины погружения цилиндра при постоянной скорости его движения.

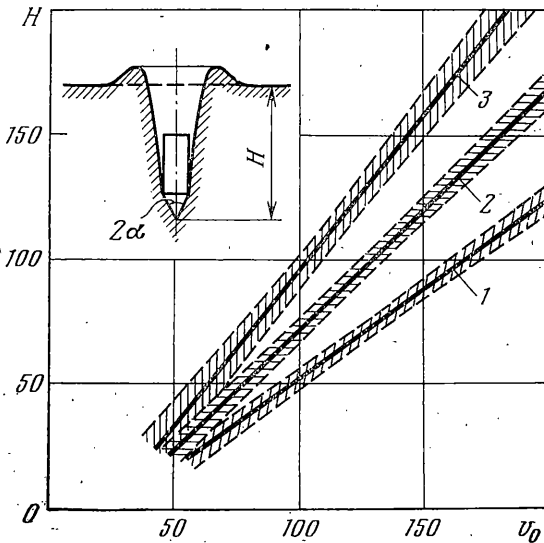
На фиг. 1 приведен построенный по данным из [6] график зависимости касательных напряжений на поверхности цилиндра от скорости его движения. Точками, треугольниками, крестиками и квадратами представлены средние значения касательных напряжений, вычисленные из данных опытов с внедрением конических наконечников с углом раствора 2α соответственно $30, 60, 90$ и 180° . Очевидно, конусы с разными углами раствора вызывают в среде в процессе движения различные предистории деформации для последующего напряженно-деформируемого состояния в окрестностях цилиндрической поверхности. Однако опытные данные показывают, что касательные напряжения на цилиндрической поверхности не зависят от угла раствора конического наконечника, и, следовательно, указанные предистории деформирования не влияют на касательные напряжения, возникающие на поверхности цилиндра.

При скоростях движения, больших 2 м/с, цилиндрическая часть внедряемого тела входит в контакт со средой не сразу после полного погружения конуса, а с некоторым запаздыванием, зависящим от скорости движения и угла конусности наконечника. Величина запаздывания, а следовательно, и площадь части поверхности цилиндра, где отсутствует контакт со средой, могут быть легко определены из осциллограмм усилие — время. Если учесть эту величину при подсчете касательного напряжения, то окажется, что при скоростях движения, больших 2 м/сек темп роста касательных напряжений заметно снижается, а его величина приближается к предельному значению 2.2 кг/см^2 . Очевидно, эта величина характеризует предельное значение касательных напряжений для пластилина в динамическом диапазоне скоростей деформации и, как показывают опыты, не зависит от описанного выше простейшего класса предисторий деформирования.

Представляет большой интерес получить оценку величины касательных напряжений на поверхности конического наконечника при скоростях, существенно больших чем 2 м/сек и сравнить ее с предельным значением,



Фиг. 1



Фиг. 2

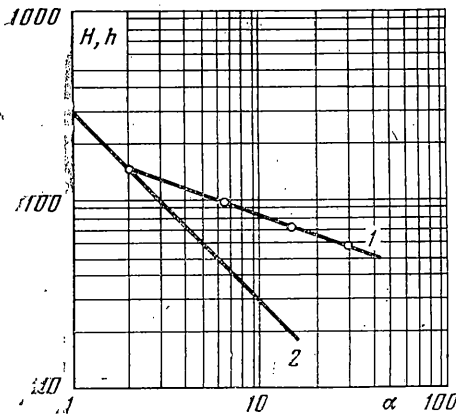
полученным на цилиндрической поверхности. С увеличением скорости контакт цилиндрической поверхности внедряемого тела со средой исчезает из-за образования каверны, диаметр которой больше диаметра цилиндра; контакт же осуществляется по поверхности конического наконечника.

Была проведена серия опытов с внедрением по инерции в пластилин тел одинаковой массы в форме цилиндра диаметром 10,5 мм с коническим наконечником. В опытах использовались конусы с углами раствора $2\alpha = 60, 30$ и 13° . Скорость соударения варьировалась в пределах $20 \div 300$ м/сек, при этом вектор скорости был нормален к свободной поверхности полупространства и совпадал с осью внедряемого тела. Разгон цилиндров производился на пневматическом устройстве, описанном в [7].

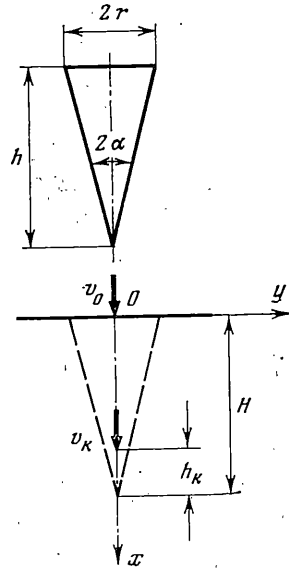
В результате экспериментов получена зависимость глубины проникания H от скорости соударения v_0 и угла полураствора конуса α . Величина H определялась как расстояние в мм от свободной поверхности полупространства до вершины конуса после его остановки. Опыты показали, что в исследованном диапазоне, начиная со скоростей, при которых происходит полное внедрение конической части, зависимость $H(v_0)$ близка к линейной для всех значений углов раствора конуса.

На фиг. 2 представлены эти зависимости, причем линии 1, 2 и 3 относятся к конусам с углами раствора $2\alpha=60, 30, 13^\circ$ соответственно. Пунктирные линии отмечают 90%-й доверительный интервал.

На фиг. 3 по данным фиг. 2 линией 1 представлена зависимость глубины проникания от угла конусности $H(\alpha)$ при фиксированной скорости



Фиг. 3



Фиг. 4

соударения 100 м/сек. Линией 2 на этом же графике представлена зависимость высоты конуса h от угла полураствора $\alpha - h(\alpha)$ при фиксированном значении радиуса основания конуса $r=5.25$ мм, равному радиусу цилиндров, использованных в опытах. Эта зависимость $h=r/tg\alpha$ близка к линейной при малых значениях параметра α . Точка пересечения этих линий дает значение $\alpha^*=2^\circ$, т. е. угла полураствора конического наконечника, который должен проникнуть на глубину, равную своей высоте $H=h$, при движении в пластине по инерции с начальной скоростью $v_0=100$ м/сек.

Разобьем путь H , проходимый внедряемым в пластину конусом высотой $h=H$ (фиг. 4), на два участка: первый участок от $x=0$ до $x=H-h_k$, на котором скорость меняется от v_0 до v_k , и второй участок от $x=H-h_k$ до $x=H$, на котором скорость меняется от v_k до 0. Результаты опытов [6] по внедрению с постоянными скоростями осесимметричных цилиндров с коническими наконечниками показали, что касательное напряжение τ зависит только от мгновенного значения скорости движения и при $0 < v < v_k \approx 5$ м/с может быть определено из соотношения

$$\tau = kv^b \quad (1)$$

где k и b — константы. Если предположить, что при $v \gg v_k$, $\tau = \tau_s$, то можно оценить значение касательного напряжения по результатам экспериментов с внедрением по инерции цилиндров с коническими наконечниками, начальная скорость которых больше v_k .

Запишем уравнение баланса энергии на первом участке движения тела массой m :

$$\frac{m}{2}(v_0^2 - v_k^2) = \pi \tau_s \operatorname{tg} \alpha \int_0^{H-h_k} x^2 dx = \pi \tau_s \operatorname{tg} \alpha \frac{(H-h_k)^3}{3} \quad (2)$$

т. е. изменение кинетической энергии внедряемого по инерции конуса равно работе касательных сил. Влияние работы нормальных сил и скоростного напора незначительно, и здесь не учитывается. В рассматриваемом случае внедряемым телом служит тонкий конус, сопротивление движению которого определяется в основном пластическими свойствами среды. Можно оценить величину скоростного напора, воспользовавшись зависимостью (3.15) в [8]) для силы сопротивления движению тонкого конуса в идеальной несжимаемой жидкости

$$F_1 = -\pi r h v^2 \alpha^3 (\ln 2 + \ln \alpha) \quad (3)$$

Здесь ρ — плотность среды, h — глубина внедрения конуса, r — радиус сечения конуса на расстоянии h от вершины, v — скорость движения.

Сила сопротивления, зависящая от касательных напряжений при движении тонкого конуса со скоростью, большей v_k , определяется соотношением

$$F_2 = \pi r l \tau_s \approx \pi r h \tau_s \quad (4)$$

Сравнение значений F_1 и F_2 при $\alpha = 2^\circ$ и $v = 100$ м/с показывает, что $F_1 \ll F_2$ и, если пренебречь скоростным напором, то ошибка в определении значения общей силы сопротивления движению составит меньше 2%.

На втором участке движения от $x = H - h_k$ до $x = H$, где скорость меняется от v_k до нуля, а сила сопротивления определяется касательными напряжениями, зависящими от скорости (1), закон движения можно записать в виде

$$m v^{1-b} dv/k = -\pi \operatorname{tg} \alpha x^2 dx \quad (5)$$

Проинтегрировав последнее равенство по x от $H - h_k$ до H и по v от v_k до нуля, получим

$$\frac{m v_k^{2-b}}{(2-b)k} = \frac{\pi \operatorname{tg} \alpha}{3} [H^3 - (H-h_k)^3] \quad (6)$$

Учитывая, что $k v_k^b = \tau_s$, окончательно получим из (2) и (6)

$$\tau_s = \frac{3m}{\pi r H^2} \left(\frac{v_0^2}{2} + \frac{b v_k^2}{2-b} \right) \quad (7)$$

Вторым членом в скобках можно пренебречь, т. к. $v_0 \gg v_k$, и согласно [8] $b = 0.58$, а $v_k = 5$ м/с, и тогда

$$\tau_s = 3m v_0^2 / (2\pi r H^2) \quad (8)$$

Подстановка в (8) соответствующих величин дает $\tau_s = 2.1$ кг/см², т. е. величину, фактически совпадающую с ранее найденным значением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Н. А., Размагулин Х. А., Сагомонян А. Я. Об основных уравнениях динамики грунта. ПМТФ, 1963, № 2.
2. Рыков Г. В., Сокобеев А. М. Измерение напряжений в грунтах при кратковременных нагрузках. М., «Наука», 1978.
3. Чедвик П., Кокс А., Гопкинс Г. Механика глубинных подземных взрывов. М., «Мир», 1966.
4. Ребиндер П. А., Семенов Н. А. О методе погружения конуса для характеристики структурно-механических свойств пластичновязких тел. Докл. АН СССР, 1949, т. 64, № 6.
5. Разоренов В. Ф. Пенетрационные испытания грунтов. М., Стройиздат, 1968.
6. Бивин Ю. К., Викторов В. В., Степанов Л. П. Исследование движения твердого тела в глинистой среде. Изв. АН СССР. МТТ, 1978, № 2.
7. Бивин Ю. К., Викторов В. В., Чурсин А. С. Пневматическое устройство для скоростного метания тел. В сб.: Прикладные проблемы прочности и пластичности, 1978, вып. 9, стр. 140-145.
8. Сагомонян А. Я. Проникание. М., Изд-во МГУ, 1974.