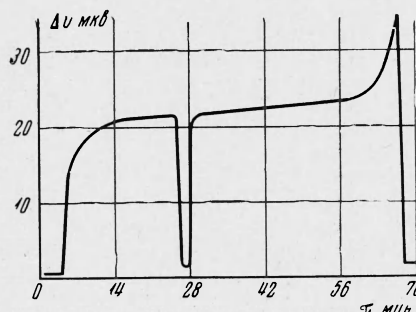


ках образца) при нагружении образца из стали X18H10T тремя первыми циклами при напряжении цикла, равном 24 кг/мм^2 . Цикл нагрузки осуществлялся за 2 сек. Нагружение последующими циклами проводилось после возвращения светового сигнала гальванометра в исходное положение и его стабилизации.

На фиг. 2 приведена температурная кривая, полученная при испытании до разрушения образца из стали 08 КП при $\sigma = 1.2 \sigma_{-1}$ с двухминутной остановкой. Характер кривой после повторного запуска показывает, что она сохранила ту же закономерность, которую имела к моменту остановки.

Представляется существенным, что температурная кривая полностью коррелирует с формой кривой внутреннего трения для подобных материалов (сталь с содержанием углерода 0.06%) [2], а также с кривой изменения прогиба образца при циклических нагрузках для технического железа [6], являясь при этом ее зеркальным отражением. Естественно, что форма температурной кривой зависит от вида циклически нагруженного металла.

Таким образом, при использовании высокочувствительной измерительной техники тепловой эффект при циклическом нагружении фиксируется с первых циклов нагружения металлических образцов, что соответствует современным представлениям о природе усталостного разрушения. Учитывая корреляцию температурной кривой с другими кривыми, описывающими кинетику усталостного разрушения, температурный метод можно рассматривать как один из эффективных способов исследования процесса усталости металлов.



Фиг. 2

Поступила 12 II 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Почтенный Е. К. Тепловой эффект при циклическом симметричном нагружении деталей. В сб. «Циклическая прочность металлов». М., Изд-во АН СССР, 1962.
2. Иванова В. С. Усталостное разрушение металлов. М., Металлургиздат, 1963.
3. Давиденков Н. Н. Усталость металлов. Киев, Изд-во АН УССР, 1949.
4. Иванова В. С. Установка для испытания на усталость плоских образцов при изгибе. Заводск. лаборатория, 1956, т. 22, № 12.
5. Берг Л. Г. Введение в термографию. М., Изд-во АН СССР, 1961.
6. Лебедев Т. А., Маринец Т. К., Ефремов А. И., Колосов И. Е., Жуков В. А. Кинетика разрушения металлов при циклических нагрузках. Тр. Ленингр. политехн. ин-та, 1967, № 282, стр. 33.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА ПРИ ТРЕХОСНОМ СЖАТИИ

М. Н. Захаров, И. Н. Иващенко

(Москва)

Описывается изменение поверхности нагружения в процессе простого нагружения. Исследуется направление вектора приращения пластической деформации в различных точках поверхности нагружения. Экспериментальные данные получены в опытах по регулируемому трехосному сжатию полых цилиндрических образцов глинистого грунта. Установлена приемлемость теории приращений в форме ассоциированного закона пластического деформирования.

Расчеты напряженно-деформированного состояния грунта как основания, среды и материала различных сооружений ведутся главным образом с использованием соотношений деформационной теории пластичности. Однако экспериментальные исследования последних лет показали, что при сложном нагружении соотношения деформационной теории нарушаются. В частности, экспериментально показана существенная за-

висимость траектории деформаций от траектории напряжений [1]. С другой стороны, известно, что нагружение грунта в натуральных условиях, как правило, не отвечает условиям простого или близкого к простому нагружения. Сказанным определяется интерес к теории приращения деформаций. Необходимые для проверки этой теории и конкретизации ее уравнений исследования крайне ограничены [2, 3], в особенности это относится к экспериментальным исследованиям при трехосном напряженном состоянии.

Выполненные исследования основываются на концепции поверхности нагружения и ассоциированного с ней закона пластического деформирования, связывающего тензор приращений пластических деформаций de_{jk}^p с тензором напряжений S_{jk} соотношением

$$de_{jk}^p = G \frac{\partial f}{\partial S_{jk}} df$$

где f — функция нагружения (представляет собой уравнение поверхности нагружения в пространстве напряжений).

Регулируемое трехосное сжатие грунта осуществлено путем нагружения полых цилиндрических образцов осевой силой, а также гидростатическим давлением, различным снаружи и внутри образца. Вертикальные деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0.01 мм, а тангенциальные и радиальные деформации — по изменениям внутреннего и наружного диаметров образца, фиксируемым соответствующими волюмометрами, соединенными с внутренней и наружной камерами экспериментальной установки (цена деления трубки волюмометра 0.05 см³). Точность измерения вертикальных деформаций 0.01%, а тангенциальных и радиальных — 0.03%. Высота образцов грунта 80 мм, внутренний и внешний диаметры 35 и 60 мм соответственно.

Исследованный каолиновый суглинок характеризуется следующими показателями: влажность на пределе текучести 30%, число пластичности 10, коэффициент пористости 0.76, весовая влажность 12.3%, степень влажности 0.44. Исходное состояние плотности и влажности достигалось уплотнением предварительно увлажненного порошка. Начальная изотропия образцов грунта подтверждена специальными экспериментами. Последние заключались в раздавливании по одной и той же программе различным образом ориентированных образцов.

Рассматриваемые эксперименты поставлены при постоянном значении среднего давления $\sigma = 5.0 \text{ кг/см}^2$. Таким образом, зависимость пластических деформаций от σ , как известно, весьма существенная для грунтов, в данном исследовании не рассмотрена. Кроме того, в опытах данного цикла главные оси напряжений фиксированы, поэтому при заданной их ориентации изменение напряженного состояния характеризуется интенсивностью напряжений σ_i и параметром вида напряженного состояния μ . Рассмотрение поверхности нагружения сводится к изучению ее следа на плоскости, перпендикулярной оси $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ в пространстве главных напряжений.

Задание в опытах одинакового значения $\sigma = 5.0 \text{ кг/см}^2$ достигалось гидростатическим обжатием образцов. Дальнейшее пластическое деформирование грунта осуществлено в условиях радиального нагружения при значениях $\mu = -1, +1$. При $\mu = -1$ построено три поверхности нагружения, отвечающих различной интенсивности деформаций e_i , соответственно для 1.25, 5.6 и 8.5%. Две поверхности нагружения исследованы при $\mu = +1$ для значений e_i , равных 1.6 и 2.8%.

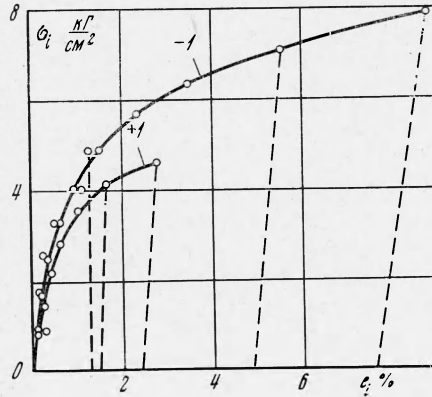
Большинство точек каждой поверхности нагружения построено с использованием в опытах одного образца грунта. Первичное нагружение — ступенчатое со стабилизацией деформаций ползучести на каждой ступени увеличения σ_i . После достижения заданного программой значения деформации e_i образец разгружался ($\sigma_i = 0$, $\sigma = 5.0 \text{ кг/см}^2$) и вновь нагружался ступенями по различным радиальным путям нагружения. Условием достижения поверхности нагружения принято приращение 0.1% деформации образца в осевом направлении. Заключительное радиальное нагружение осуществлялось по пути первичного нагружения. Этим подтверждалось отсутствие существенного смещения поверхности вследствие вторичных нагружений. Некоторые участки поверхностей построены с использованием различных образцов и часть точек при этом дублирована. В некоторых точках поверхности выполнено догружение малыми ступенями в различных направлениях с целью изучения ориентированности вектора приращения пластической деформации.

Результаты экспериментов представлены в виде графиков на фиг. 1 и фиг. 2. На фиг. 1 показан характер упрочнения исследованного грунта в процессе первичного нагружения по радиальным путям при $\mu = -1$ и $+1$ (величина μ помечена на кривых). Характерны довольно большие общие деформации грунта. Упрочнение исследованного грунта существенно зависит от вида напряженного состояния. Большая степень упрочнения получена при $\mu = -1$. В начале нагружения наблюдается небольшой линейный участок, общий для обеих кривых. В процессе дальнейшего нагружения упру-

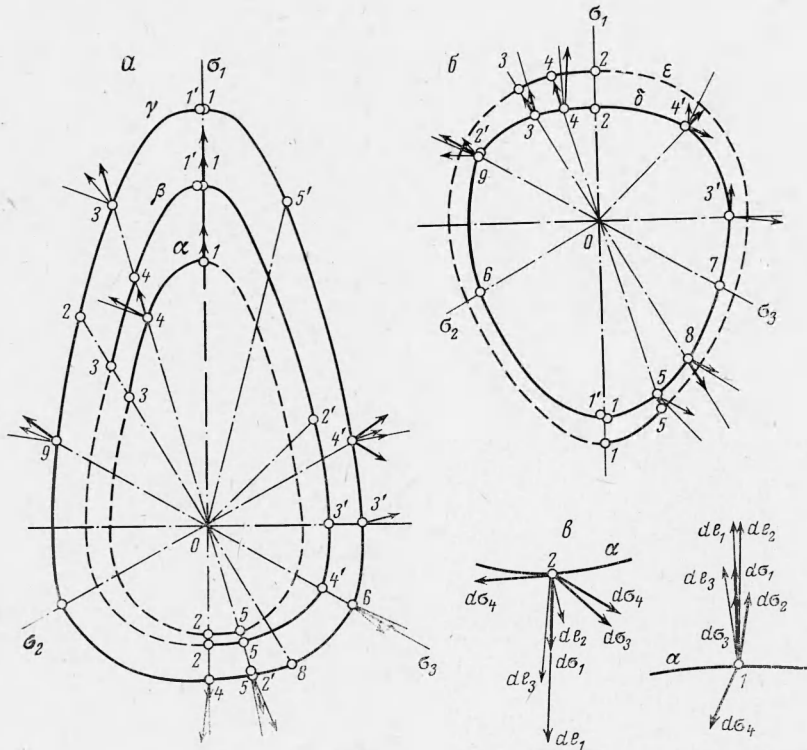
гие свойства грунта меняются мало, а деформации имеют в основном необратимый характер (линии разгрузки показаны на фиг. 1 пунктиром).

Развитие поверхности нагружения в процессе пластического деформирования при $\mu = -1$ и $+1$ представлено на фиг. 2, а и б соответственно в виде проекции на плоскость $\sigma = 5.0 \text{ кг/см}^2$. Поверхности α, β, γ (фиг. 2, а) соответствуют пластическим деформациям $e_i = 1.25, 5.6$ и 8.5% , а поверхности δ, ε (фиг. 2, б) — деформациям $e_i = -1.6$ и 2.8% . Штрих-пунктирными линиями показаны пути вторичных радиальных нагружений. Нумерация точек для каждой поверхности своя и соответствует последовательности вторичных нагружений. Цифрами со штрихами и без штрихов обозначены точки, полученные на разных образцах грунта. Пунктиром очерчены участки поверхности, не имеющие опытных точек и проведенные в соответствии с очертанием более исследованных поверхностей.

Рассмотрение графиков показывает, что в результате пластической деформации происходит существенная деформация поверхности нагружения с вытягиванием ее в направлении нагружения. Форма поверхности весьма значительно отличается от окружности Мизеса. Степень вытянутости поверхности зависит от направления нагружения и более выражена для $\mu = -1$. Поверхности остаются симметричными относительно направлений первичных радиальных нагружений. В процессе нагружения



Фиг. 1



Фиг. 2

в одном направлении происходит расширение поверхности по всем направлениям. Участок поверхности, прилегающей к направлению первичного нагружения, находится значительно дальше от начала координат (точка O), нежели противоположный

участок поверхности. Поверхности гладкие, выпуклые; образование углов на поверхности не отмечается.

Положение проекции вектора приращения пластической деформации на плоскость $\sigma = 5.0 \text{ кг/см}^2$ в различных точках исследованных поверхностей нагружения представлено на фиг. 2, а и б. Сплошной тонкой линией показано направление нормали к поверхности нагружения, толстыми стрелками показаны векторы приращения напряжений, а тонкими — векторы приращения пластической деформации.

Рассмотрение графиков фиг. 2, а и б показывает следующее. Поскольку форма поверхности нагружения существенно отличается от окружности, направление вектора напряжения, как правило, не совпадает с направлением нормали к поверхности. При пересечении поверхности нагружения вектором напряжения под острым углом и последующем догружении вектор приращения пластической деформации de^p в большинстве случаев не совпадает ни с направлением вектора напряжения, ни с направлением вектора догружения $d\sigma$. Во всех случаях de^p отклоняется от $d\sigma$ в сторону нормали к поверхности нагружения и находится к последней ближе, чем к $d\sigma$, иногда точно совпадая с нормалью (точки $4\alpha^1$ и 9γ на фиг. 2, а, точки 4δ , 8δ на фиг. 2, б). Кроме того, с нормалью совпадают векторы приращения пластической деформации, полученные при догружении в точках, расположенных на оси симметрии поверхности нагружения (точки 1α , 1β , 4γ на фиг. 2, а). Несовпадение de^p и $d\sigma$ следует также из того, что при догружении получены положительные приращения объемной деформации, т. е. de^p не только не совпадает с вектором напряжения, но и не лежит в плоскости $\sigma = \text{const}$, а наклонен к ней. Это обстоятельство, характерное для грунтов, свидетельствует о замкнутости поверхности нагружения в направлении пространственной диагонали [3].

На фиг. 2, в отдельно представлены векторы приращения пластической деформации, полученные при догружениях в нескольких направлениях в точках 1 и 2 поверхности нагружения α . Цифрами показана последовательность догружений в каждой точке. По-прежнему de^p не совпадает с $d\sigma$. Изменение направления $d\sigma$ меняет направление de^p , но это изменение менее сильное и результирующий вектор de^p расположен, как правило, ближе к нормали, нежели $d\sigma$. Следует отметить, что при догружениях, направленных по касательной к поверхности нагружения или внутрь ее ($d\sigma$ в точках 1 и 2), не получено приращения пластических деформаций. В целом рассмотрение графиков фиг. 2 несомненно показывает, что гипотеза о нормальности de^p к поверхности нагружения на основании рассмотренных экспериментальных данных удовлетворительно соблюдается.

Выполненные в условиях регулируемого трехосного сжатия экспериментальные исследования пластических деформаций глинистого грунта позволили установить следующее.

Деформации исследованного грунта в основном необратимые. Упрочнение грунта в процессе пластической деформации носит резко выраженный направленный характер. В процессе радиального нагружения поверхность нагружения симметрично расширяется и вытягивается в направлении радиального нагружения, но без движения поверхности в целом. Форма поверхности зависит от направления первичного нагружения. Поверхность нагружения гладкая, выпуклая; конусности точки нагружения не получено.

Направление вектора приращения пластической деформации не определяется вектором напряжений и не совпадает с ним вследствие некруговой формы поверхности, за исключением случая, когда направление последнего близко к нормали к поверхности. В частности, при догружении в плоскости $\sigma = \text{const}$ наблюдались приращения объемной деформации. Результаты выполненных исследований удовлетворительно подтверждают гипотезу о единственности направления вектора приращения пластической деформации и нормальности его к поверхности нагружения. Поверхность нагружения исследованного грунта не может быть представлена в виде изотропной функции не только интенсивности напряжений, но и трех инвариантов напряжений и должна включать в себя характеристику направления нагружения. Некруговая форма поверхности нагружения, несовпадение направления вектора приращения пластической деформации и вектора напряжения не позволяют применять простейшую форму ассоциированного закона

$$de_{jk}^p = F(\sigma_i) S_{jk} d\sigma_i$$

Однако в целом концепция поверхности нагружения и ассоциированного с ней закона пластического деформирования на основании проведенных экспериментов представляется вполне приемлемой.

Выполненные исследования показывают плодотворность использования концепций теории пластичности (в данном случае теории течения) в механике грунтов.

¹ Буква около номера точки означает индекс соответствующей поверхности нагружения.

В теории пластичности наряду с разработкой основ общей теории большое внимание уделяется конструированию в рамках феноменологического подхода простейших математических моделей. В частности, обстоятельные исследования в этом направлении выполнены М. Я. Леоновым и его сотрудниками [4]. В этих работах предложена модель линейной анизотропно упрочняющейся среды и выделен класс нагружений, отличных от пропорциональных, для которых возможно применение деформационной теории. Применение более простых математических теорий, построенных на феноменологической основе и призванных описывать ограниченные классы нагружений, безусловно целесообразно и в механике грунтов.

Поступила 4 VIII 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. И в а щ е н к о И. Н. Влияние траектории нагружения на деформируемость глинистых грунтов. В сб. «Вопросы деформируемости и прочности грунтов», Баку, 1966.
2. D r u c k e r D. C., G i b s o n R. E., H e n k e l D. J. Soil mechanics and work hardening theories of plasticity. Trans. Amer. Soc. Civil. Engrs., 1957, vol. 122. pp. 338—346.
3. Д и д у х Б. И., И о с е л е в и ч В. А. О построении теории пластического упрочнения грунтов. III Всес. съезд по теорет. и прикл. механ., Аннот. докл., М., «Наука», 1968.
4. Ш в а й к о Н. Ю., К л ы ш е в и ч Ю. В., Р ы ч к о в Б. А. Линейная анизотропно упрочняющаяся среда. В сб. «Пластичность и хрупкость», Фрунзе, «Илим», 1967.

ХОЛОДНОЕ СОЕДИНЕНИЕ СТЕКЛА ПРИ ТОНКОЙ ОЧИСТКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Б. В. Войцеховский, Ю. А. Дудин, Э. З. Мамлеев

(Новосибирск)

Сообщается о новом эффекте — возникновении больших сил молекулярного сцепления между плоскими стеклянными поверхностями, очистка которых производилась струей воды. При этом основное внимание обращалось на удаление твердых микроскопических загрязнений, препятствующих сближению поверхностей на малые расстояния.

Эксперименты производились со стеклянными дисками промышленного изготовления, отполированными до III оптического класса чистоты по ГОСТ 11141-65. Размеры дисков $\varnothing 40 \times 1.5$ мм.²

1. При предварительной очистке поверхностей были опробованы следующие моющие средства: водные растворы мыла, хромпика, тринатрийфосфата, этиловый и изопропиловый спирты. Осуществлялась также очистка в указанных средах, совмещенная с ультразвуковой обработкой. Окончательная промывка дисков во всех случаях производилась в проточной дистиллированной воде.

Для защиты от возможного последующего загрязнения, поверхности двух дисков приводились в соприкосновение под слоем воды, после чего в собранном виде просушивались на воздухе при температуре 40° С.

Степень чистоты соприкасающихся поверхностей контролировалась под микроскопом МИМ-7 в темном поле при увеличении 500.

Оказалось, что после очистки перечисленными способами поверхности равномерно загрязнены твердыми частицами диаметром в основном менее 2 мкм при среднем расстоянии между ними порядка 100 мкм. Отдельные частицы достигали величины 10—30 мкм.

2. Было решено ввести промежуточную обработку струей воды. Теперь поверхности стекол предварительно промывались в водном растворе мыла, где удалялась основная масса загрязнений и ослаблялись силы сцепления микроскопических частиц со стеклом. Затем последовательно очищались все участки поверхности дисков струей водопроводной воды, подаваемой из сопла диаметром 3 мм со скоростью ~ 20 м/сек.