

## О ДОПУСТИМОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ К ГРУНТАМ ПОНЯТИЯ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

*Бич Г.М. ( Черноморниипроект )*

На основании результатов экспериментальных и теоретических исследований показана допустимость применения к грунтам понятий сверхпластичности. Дано теоретическое решение по распределению напряжений при переменном коэффициенте пропорциональности между напряжением и деформацией. Показано, что возрастание тангенциальных напряжений, обусловленное переменностью коэффициента пропорциональности, может служить обоснованием экспериментального факта снижения с ростом нормального давления угла внутреннего трения грунтов.

В настоящее время нет четкого определения сверхпластичности и не существует ее единой теории, однако выделяются два характерных признака поведения материалов присущих этому понятию. Прежде всего – это способность материалов в определенном скоростном режиме деформироваться до значений порядка 1000 % и более без нарушения сплошности.

Достаточно много примеров, когда здания и сооружения в силу деформаций оснований претерпевают длительные незатухающие деформации ползучести. К таким примерам можно отнести следующие сооружения. Склоны побережья Одессы от Ланжерона до Аркадии, наблюдения за которыми ведутся с 1933 года. Наблюдения показывают, что склоны без признаков стабилизации смещаются в сторону Одесского залива. Склоны Одесского припортового завода смещаются в сторону Аджалыкского лимана более 20 лет. Незатухающие деформации илистого основания склада генгрузов в Ильичевском порту привели склад к аварийному состоянию. Эти и многие другие примеры свидетельствуют о том, что для грунта характерны длительные незатухающие во времени деформации, т.е. характерен один из признаков свехпластичности.

Вторым признаком наличия сверхпластичности является S – образная форма кривой зависимости логарифма напряжения от логарифма скорости деформирования. При определении прочности грунтов, методом контролируемой деформации имеет место скоростная составляющая сопротивления деформации, поэтому с уменьшением скорости деформирования уменьшается и сопротивление сдвигу.

Объяснение этому явлению дано в работе [2]. Наличие скоростной составляющей не позволяет экспериментально на уровне прикладных иссле-

дований обнаружить иные механизмы упрочнения, такие например как, система ориентации диполя примесь – вакансия и др. Свести к минимуму скоростную составляющую сопротивления сдвигу возможно путем применения дискретного метода деформирования, в котором образец деформируется незначительное время, а затем большую часть времени находится в условиях релаксации напряжения. Испытания с различными промежутками времени между импульсами позволяют определить такой скоростной режим, при котором совпадает время переориентации диполя со временем взаимодействия диполя с движущейся дислокацией. При таком совпадении образец испытываемого грунта будет оказывать наименьшее сопротивление. Условие наименьшего сопротивления деформированию следует расценивать как наиболее благоприятное для сокращения времени релаксационных процессов, а следовательно и всего эксперимента. Результаты исследований по оценке реакции грунта на дискретный характер деформирования показали, что как с позиции формально-феноменологического, так и структурно-динамического подхода при шаге смещения порядка  $10^{-6}$  мм в грунте не могут быть нарушены самые слабые, т.е. магнитные связи [4]. Следовательно, для получения зависимости напряжение – деформация необходимо приложить второй и последующие шаги смещения, однако при этом важнейшим показателем становится промежуток времени между импульсами. Результаты экспериментальных исследований зависимости пиковой прочности образцов грунта из пасты от скорости дискретного деформирования показали [5], что в полной мере соблюдается S – образный характер зависимости, присущий режиму сверхпластичности. Под скоростью дискретного деформирования понимается отношение величины деформации к сумме промежутков времени между импульсами, обеспечившими данную деформацию. Наиболее распространенным способом испытания грунтов является одноплоскостной сдвиг образца, помещенного в подвижную и неподвижную обоймы. В экспериментальной зависимости сопротивление срезу – нормальное давление, как правило, с ростом нормального давления наблюдается падение угла наклона графика зависимости. Например для полутвердой геотехнической глины при нормальном давлении более 0,6 Мпа угол наклона уменьшается с  $17^\circ$  до  $5^\circ$ . Объяснение этого экспериментального факта может быть дано с позиции распределения напряжений в образце при сдвиговых испытаниях. Как известно [6], одним из объяснений механизма деформирования в режиме сверхпластичности является вовлечение в движение соседних зерен в металлах. Нормальное давление прикладываемое к сдвигаемому образцу грунта приводит к смещению минеральных частиц и вклиниванию их по аналогии с замещением зерен в металлах между частицами, которые менее подвижны в силу механической неоднородности строения грунтов. Неодно-

родность сил взаимодействия между частицами грунта обусловлена наличием различного размера частиц, неравномерным распределением пор, различной ориентацией и формой минеральных частиц и т.д. Рассмотрим влияние проникания частиц на распределение напряжений для случая переменного коэффициента пропорциональности между напряжением и деформацией, обусловленного неоднородностью строения испытываемого грунта. Допустим, что под действием нормального проникания частиц окружающая среда находится в условиях осесимметричной плоской деформации. Различный характер изменения коэффициента пропорциональности в зависимости от расстояния до рассматриваемой точки может быть описан следующей зависимостью:

$$K_r = K_R \cdot R^n / r^n + K_\infty, \quad (1)$$

где  $R$  - условный радиус к моменту определения напряжений;

$K_R$  - дополнительная составляющая коэффициента пропорциональности на контуре контакта вертикально смещаемой частицы по сравнению со значением коэффициента  $K$ : для частиц, располагаемых вне зоны влияния переменности коэффициента;

$r$  - радиус, для которого определяется напряжение;

$n$  - параметр, отражающий степень изменчивости коэффициента пропорциональности.

Не приводя общеизвестные уравнения равновесия, условия совместности и связи напряжений с компонентами деформаций в полярной системе координат примем следующие граничные условия:

$$\text{При } r = R \quad \sigma_r = P - \sigma_0; \quad \tau_{r\theta} = 0;$$

$$\text{При } r \rightarrow \infty: \quad \sigma_r = 0; \quad \tau_{r\theta} = 0;$$

где  $R$  - горизонтальная составляющая нормального давления  $R_v$

$\sigma_r$  - радиальное напряжение, возникающее от проникания частиц;

$\sigma_0$  - начальное напряжение в испытываемом образце.

Выразим  $\sigma_r$  и  $\sigma_0$  через функцию напряжения  $\varphi$  и путем подстановок и преобразований, а так же учитывая, что

$$K'_r = -K_R \cdot R^n \cdot n \cdot r^{-1-n}.$$

Получим следующее уравнение типа Фукса с тремя регулярными особыми точками  $-1; 0; \infty$ .

$$\xi(\xi + 1)\eta''(\xi) + [(\alpha + \beta + 1)\xi + \gamma]\eta'(\xi) + \alpha\beta\eta(\xi) = 0, \quad (2)$$

где

$$\alpha = \frac{A+1}{n}; \quad \beta = \frac{A-1}{n}; \quad \gamma = \frac{2}{n}(A+n).$$

A – есть корень определяющего уравнения.

$$2A = \sqrt{\left(n^2 + 4 \frac{\mu}{1-\mu} + 4\right)};$$

$$\xi = mr^n;$$

$$m = \frac{K_\infty}{K_R \cdot R^n}$$

Уравнение (2) путем замены зависимой и независимой переменных может быть сведено к гипергеометрическому уравнению Римана. Замена  $z = 1 + \varphi$  приводит уравнение (2) к следующему виду:

$$z(z-1)\eta''(z) + [(a+b+1)z - c]\eta'(z) + ab\eta(z) = 0 \quad (3)$$

где  $a = \alpha$ ;  $b = \beta$ ;  $c = \alpha + \beta + 1 - \gamma$

Решение уравнения (3) [7] даст следующие выражения искомых напряжений:

$$\sigma_r = \frac{R^{1-A}(p - \sigma_0)(1 + \rho)^\alpha f(a_1; b_1; c_1; 1/(1 + mr^n))}{r^{1-A}(1 + mr^n)^\alpha f(a_1; b_1; c_1; 1/(1 + \rho))} \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = \frac{(p - \sigma_0)(1 - \rho)^\alpha}{f(a_1; b_1; c_1; 1/(1 + \rho))} \cdot \frac{R^{1-A}}{r^{1-A}} \cdot \frac{1}{(1 + mr^n)^\alpha} \left[ Af(a_1; b_1; c_1; 1/(1 + mr^n)) - \frac{a_1 \cdot b_1}{c_1} \cdot \frac{n \cdot mr^n}{(1 + mr^n)^2} \times \right. \quad (5)$$

$$\left. \times f(a_1 + 1; b_1 + 1; c_1 + 1; 1/(1 + mr^n)) - f(a_1; b_1; c_1; 1/(1 + mr^n)) \frac{anmr^n}{(1 + mr^n)} \right]$$

где  $a_1 = a$ ;  $b_1 = 1 - c + a$ ;  $c_1 = 1 + a - b$

При выводе выражения для  $\sigma_0$  использовано следующее свойство гипергеометрической функции

$$\frac{d}{dr} f\left(a_1; b_1; c_1; \frac{1}{z}\right) = \frac{a_1 \cdot b_1}{c_1} f\left(a_1 + 1; b_1 + 1; c_1 + 1; \frac{1}{z}\right) \frac{1}{z^2} \frac{dz}{dr} \quad (6)$$

Сопоставление величин напряжений, полученных по приведенным зависимостям (4) и (5) со значениями для случая постоянного коэффициента пропорциональности показали, что при параметре “n”, равном 1,3, тан-

тангенциальные напряжения по нагруженному контуру увеличиваются более чем в 2 раза по сравнению со значениями разрывных напряжений при постоянном коэффициенте пропорциональности между напряжениями и деформациями.

Значительное возрастание тангенциального напряжения при переменном коэффициенте пропорциональности может служить обоснованием экспериментального факта снижения с ростом нормального давления одной из основных констант прочности грунтов – угла внутреннего трения.

### *Литература*

1. Кайбышев О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов. – М.: Металлургия. 1975. 280с.
2. Пуарье Жан – Поль. Ползучесть кристаллов. – М.: Мир. 1978. с. 100-104.
3. Галусташвили М.В. и др. Влияние скорости деформирования на механические свойства кристаллов NaCl с ориентированными диполями. ФТТ. Т.23, вып.1, янв.1981. с.306-308.
4. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа. 1978. 435с.
5. Бич Г.М. К теории распределения напряжений при деформировании в режиме сверхпластичности. Сб. Прогрессивные технологии, материалы, конструкции и методы исследований для строительства в прибрежной зоне моря. М. В/О Мортехинформреклама. 1991.
6. Чадек И. Ползучесть металлических материалов. – М.: Мир. 1987. 304с.
7. Смирнов В.И. Курс высшей математики. т. III, ч.1, Госиздат, технико-теоретическая литература. – М.: 1953.