

## ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ ОТ УСЛОВИЙ НАГРУЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ГРУНТА ПРИ ОДНОПЛОСКОСТНОМ СРЕЗЕ

Болдырев Г.Г., Болдырева Е.Г., Идрисов И.Х., Крестинина В.В.

ООО «Геотек»

В ГОСТ 12248-96 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости» приведены рекомендации по определению характеристик прочности: сопротивление срезу  $\tau$ ; угла внутреннего трения  $\varphi$  и удельного сцепления  $c$  для песков, глинистых и органоминеральных грунтов.

Испытания грунтов проводятся в условиях одноплоскостного среза в срезных приборах с фиксированной плоскостью среза путем сдвига одной части образца относительно другой его части касательной нагрузкой при одновременном нагружении образца грунта нагрузкой, нормальной к плоскости среза.

При проведении испытаний по схеме «консолидировано-дренированная» касательная нагрузка к образцу грунта прикладывается ступенями (статическое нагружение) в 5% от значения нормальной нагрузки, при которой производят срез с выдержкой до условной стабилизации, характеризуемой скоростью деформации, не превышающей 0,01 мм/мин.

Во втором случае в испытаниях по схеме «консолидировано-дренированная» касательная нагрузка прикладывается непрерывно (кинематическое нагружение) с постоянной заданной скоростью среза. Величина скорости среза зависит от вида грунта и изменяется в интервале от 0,01 до 0,5 мм/мин.

При статическом нагружении касательной нагрузкой испытания считаются законченными, если при приложении очередной ступени касательной нагрузки происходит мгновенный срез или общая деформация среза превысит 5 мм.

При кинематическом нагружении касательной нагрузкой за предельную касательную нагрузку принимают значение, после которого наблюдается некоторое ее снижение или установление постоянного значения, или общая деформация среза превысит 5 мм.

Для проведения подобных испытаний нашим предприятием разработано два типа срезных приборов со статическим (рис. 1 а) и кинематическим нагружением (рис. 1 б) касательной нагрузкой. В первом приборе испытания проводятся до деформации среза в 8 мм, а во втором до деформации среза, равной 25 мм. Скорость среза при кинематическом нагружении касательной нагрузкой может изменяться в интервале от 0,01 до 10 мм/мин. Эти приборы входят в состав измерительно-вычислительного комплекса АСИС, что позволяет проводить испытания в автоматическом режиме с обработкой результатов при помощи программ GEOTEK ASIS, GEOTEK ASISGrad, GEOTEK ASISReport.

Основной целью подобных испытаний является определение параметров прочности  $\varphi$  и  $c$ . Для этого используется условие прочности Кулона, которое имеет вид

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c,$$

где  $\sigma$  - нормальное давление на образец грунта, а  $\tau$  - предельное значение касательной нагрузки.

Предельное значение  $\tau$  ГОСТ рекомендует определять как максимальное при кинематическом нагружении и значение при деформации среза равной 5 мм, если касательная нагрузка возрастает монотонно (рис. 2). Кривая 1 характеризует сопротивление сдвигу для рыхлых песчаных грунтов ( $e \geq 0,7$ ) или нормально уплотненного глинистого грунта, а кривая 2 – сопротивление сдвигу для плотных песчаных грунтов ( $e \leq 0,55 - 0,6$ ) или переуплотненных глинистых грунтов.

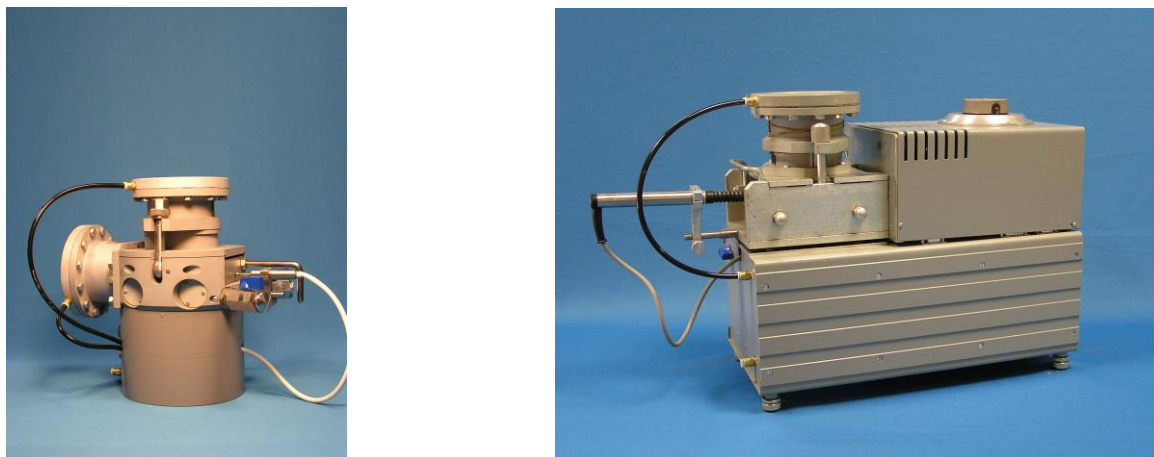


Рис. 1. Приборы для испытаний грунтов в условиях одноплоскостного среза

Из рис. 2 видно, что величина предельной касательной нагрузки и следовательно параметры прочности  $\varphi$  и  $c$  зависят от величины деформации среза для грунтов различного состояния. Для глинистых грунтов в мягкопластичном состоянии ( $0,5 \leq I_L \leq 0,75$ ) зависимость  $\tau = f(\delta)$  является монотонно возрастающей и максимальное значение касательной нагрузки часто находится в интервале деформации сдвига более 5 мм и

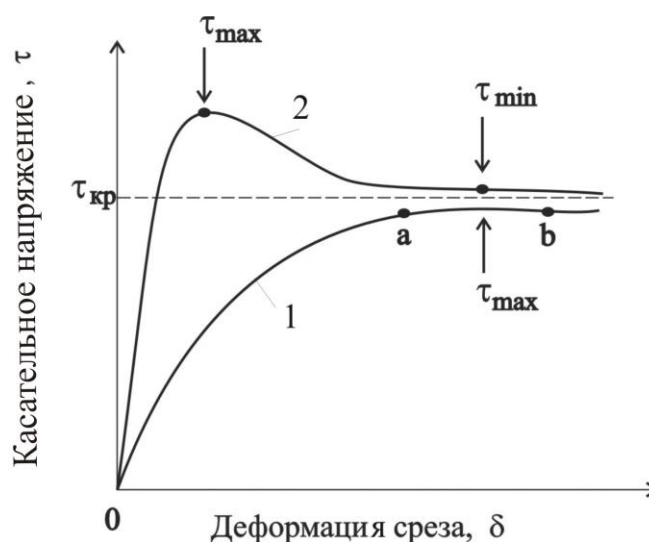


Рис. 2. Зависимость сопротивления сдвигу для различных грунтов: 1 – рыхлый песок и нормально уплотненная глина; 2 – плотный песок и переуплотненная глина

может составлять 8-12 мм. Однако, согласно, ГОСТ испытания необходимо прекратить при достижении деформации сдвига, равной 5 мм. Естественно при этом мы получаем заниженные значения параметров прочности  $\varphi$  и  $c$ . С нашей точки зрения испытания рыхлых песчаных грунтов и нормально уплотненных глинистых грунтов следует проводить до достижения максимального значения касательной нагрузки независимо от величины деформации сдвига.

Значения  $\varphi$  и  $c$ , полученные по методике консолидированного среза, используются для определения расчетного сопротивления грунта оснований фундаментов, а также для оценки несущей способности основания, находящегося в стабилизированном состоянии. Использование заниженных значений  $\varphi$  и  $c$ , например, при определении расчетного сопротивления, приводит к излишнему запасу прочности и как следствие увеличению стоимости фундаментов.

Рассматриваемый ГОСТ не дает рекомендаций, в каких случаях следует проводить испытания на срез с использованием кинематической схемы нагружения. Из него следует, что этот тип испытаний аналогичен консолидировано-дренированным, так как предполагается, что при медленной непрерывной скорости нагружения поровое давление в образце грунта рассеивается и возникающие напряжения являются эффективными и данные испытания подобны испытаниям со статической схемой нагружения.

Однако, при статической схеме нагружения невозможно обнаружить в опытах падение касательных напряжений после достижения предельной нагрузки, так как это состояние характеризуется непрерывным ростом деформации сдвига (участок  $ab$ , рис. 2) при постоянном касательном напряжении  $\tau_{\max}$ . При кинематическом нагружении задается деформация среза, а касательное напряжение измеряется датчиком силы, поэтому для плотных песков и переуплотненных глин после достижения  $\tau_{\max}$  фиксируется падение касательных напряжений с ростом деформации сдвига. Зависимость  $\tau = f(\delta)$  имеет явно выраженный максимум, соответствующий  $\tau_{\max}$  и минимум, соответствующий остаточной прочности грунта  $\tau_{\min}$ . Отсюда и параметры прочности  $\varphi$  и  $c$  будут иметь различное значение из условия прочности Мора при  $\tau_{\max}$  и  $\tau_{\min}$ .

В общем случае угол внутреннего трения и сцепление зависят от текущей деформации среза. Это показано на рис. 3 а, б, в. Каждому значению деформации ( $\delta$  - абсолютная деформация среза, мм)  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_i$  (рис. 3 а), соответствуют касательные напряжения  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_i$ , среди которых находятся  $\tau_{\max}$  и  $\tau_{\min}$ . При данных значениях из условия прочности Кулона получаем различные значения  $\varphi$  и  $c$ , как это показано на рис. 3 б, в. Учитывая это при расчете несущей способности оснований зданий и сооружений, а также устойчивости подпорных стен, свободно стоящих или пригруженных откосов используются три различных значения угла внутреннего трения.

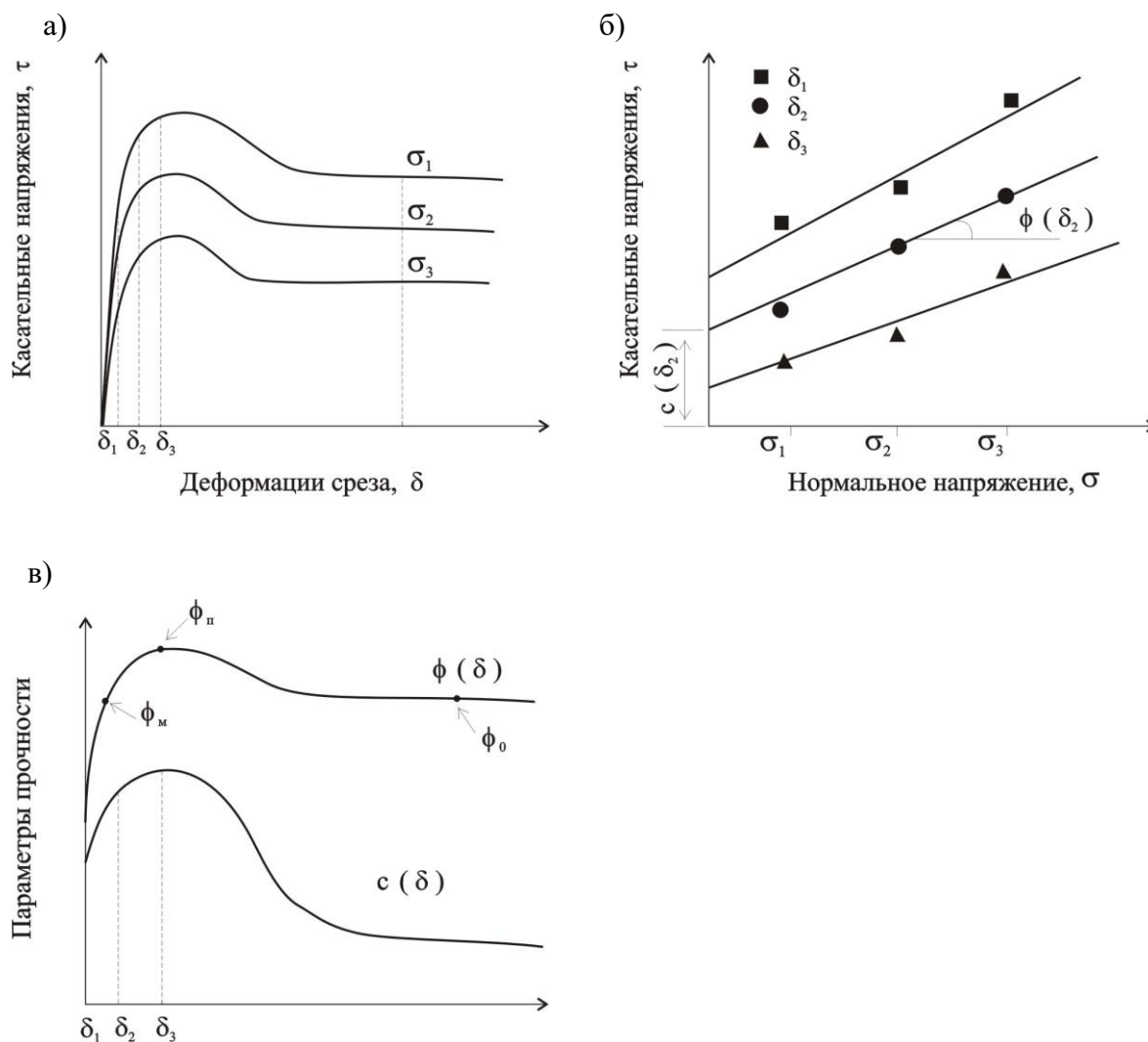


Рис. 3. Зависимость параметров прочности  $\phi$  и  $c$  от величины нормального напряжения и деформации сдвига: а – влияние нормального напряжения на прочность грунта; б – влияние нормального напряжения на параметры прочности  $\phi$  и  $c$ ; в – зависимость параметров прочности  $\phi$  и  $c$  от деформации

1. Мобилизационный угол внутреннего трения -  $\phi_m$ , соответствует изменению касательных напряжений на участке  $oa$  (рис. 2) вплоть до пикового значения.
2. Пиковое значение -  $\phi_n$ , соответствует  $\tau_{\max}$ .
3. Остаточное или критическое значение -  $\phi_o$ , соответствует  $\tau_{\min}$  для переуплотненных глинистых грунтов/плотных песчаных грунтов и  $\tau_{\max}$  для нормально уплотненных глинистых грунтов/рыхлых песчаных грунтов.

На рис. 4 приведены результаты испытаний песчаного грунта при различной плотности

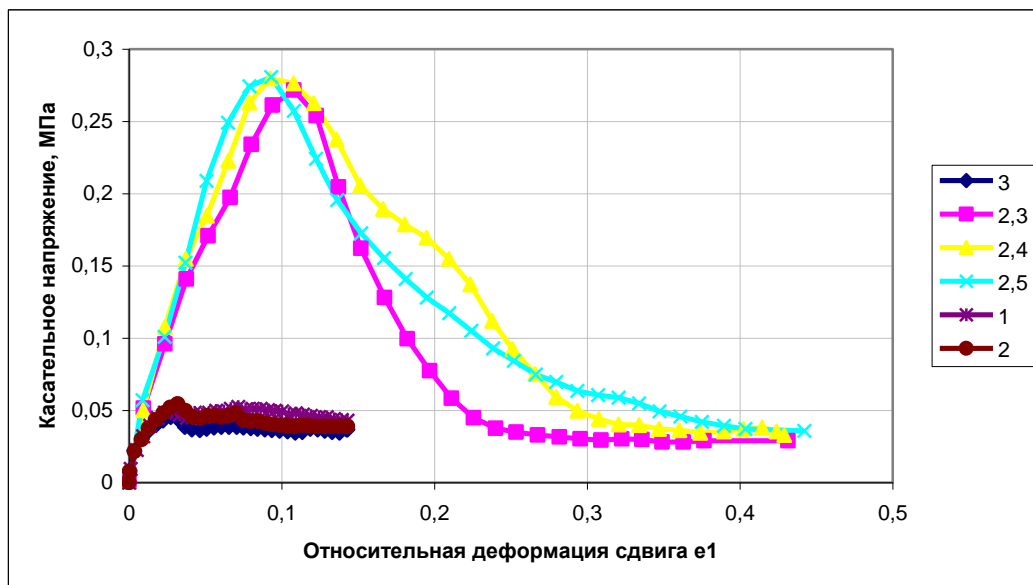


Рис. 4. Испытания на срез при кинематическом нагружении

и кинематическом действии касательной нагрузки. Три нижние кривые, результаты испытаний рыхлого песка ( $\rho = 1,54 \text{ г/см}^3$ ;  $e = 0,72$ ) в воздушно сухом состоянии, а три верхние кривые результаты испытаний песка средней плотности ( $\rho = 1,67 \text{ г/см}^3$ ;  $e = 0,66$ ). Скорость нагружения равна 1 мм/мин. Нормальное давление, равно 0,1 МПа. Из рис. 4 наглядно видно существенное влияние плотности песчаного грунта на величину максимальной касательной нагрузки – 0,048 МПа (песок рыхлый) и 0,276 МПа (песок средней плотности). Различие в пять раз. Это при относительной деформации сдвига, равной 0,08. Рост деформации сдвига приводит к падению измеряемой касательной нагрузки в песке средней плотности, сопротивление сдвигу уменьшается и при больших деформациях, равных 0,40 сопротивление сдвигу песка рыхлого и песка плотного примерно одинаково.

Анализируя результаты рассматриваемых опытов можно сделать еще один вывод. Если использовать условие завершения опыта при достижении деформации сдвига в 5 мм (относительная деформации, равна 0,071), то получаем значения предельной нагрузки сдвига (см. рис. 4) почти те же, что и отмеченные выше, т.е. 0,048 и 0,23 МПа. Из условия прочности Кулона при  $\sigma = 0,1 \text{ МПа}$  имеем  $\varphi^{e=0,72} = 26^\circ$  и  $\varphi^{e=0,66} = 67^\circ$ . Если эти же значения определить при деформации сдвига равной 0,4 мы получим  $\varphi^{e=0,72} = 21^\circ$  и  $\varphi^{e=0,66} = 21^\circ$ . Отсюда следующий вывод.

1. При использовании кинематического нагружения испытания на срез следует проводить до больших деформаций, при которых измеряемое касательное напряжение стабилизируется.

2. Угол внутреннего трения следует определять при достижении остаточной прочности грунтов.

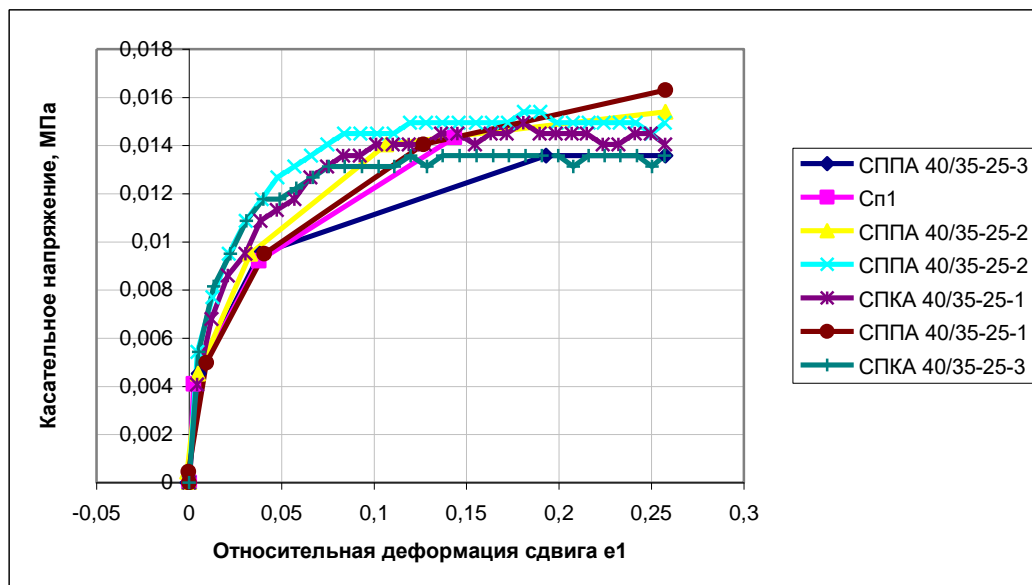


Рис. 5. Зависимость деформации сдвига от касательной нагрузки: СППА, СП1 – статическое нагружение; СПКА – кинематическое нагружение;  $\sigma = 0,1$  МПа

На рис. 1 а и б показаны два различных прибора предназначенные для одной и той же цели, а именно испытаний грунтов на срез. Будут ли отличаться значения предельного сопротивления срезу, если провести опыты с одинаковыми образцами грунта? На рис. 5 представлены результаты подобных испытаний с образцами глины в мягкопластичном состоянии. Как видно из опытов значение предельного сопротивления срезу для мягкопластичной глины практически не зависит от способа создания касательной нагрузки.

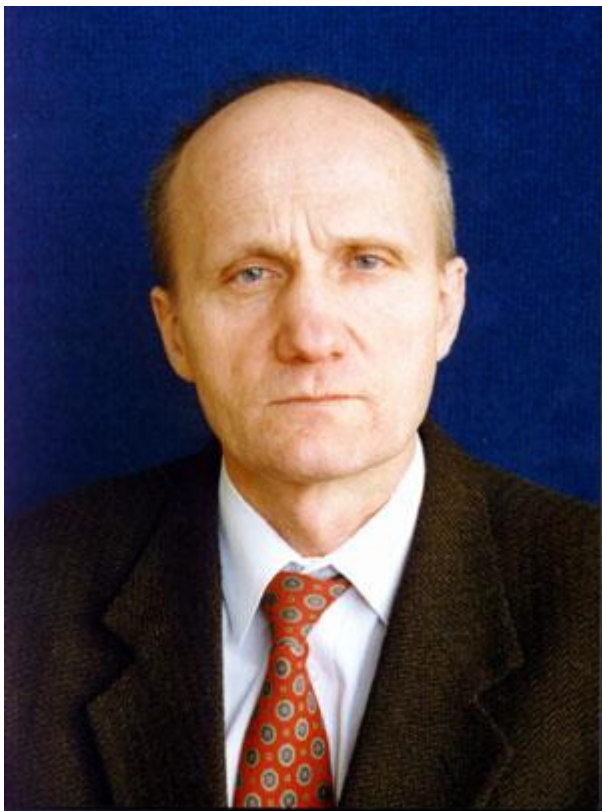
В заключение следует отметить, что практическое применение определяемых параметров прочности  $\varphi$  и  $c$  зависит от способа решения конкретных задач проектирования. Например, если используются решения СНиП 2.02.01.86\* «Основания зданий и сооружений», то при определении расчетного сопротивления грунта основания или несущей способности используются критические значения  $\varphi_0$  и  $c_0$ . В том случае если рассчитывается напряженно-деформированное состояние оснований с учетом упрочнения и разупрочнения грунта, то в зависимости от применяемой модели грунта могут потребоваться как  $\varphi_0$  и  $c_0$ , так и  $\varphi_n$ ,  $c_n$ .

### Сведения об авторах

1. Болдырев Геннадий Григорьевич – профессор, д.т.н., профессор кафедры «Основания и фундаменты» Пензенского государственного архитектурно-строительного университета.
2. Болдырева Елена Геннадьевна – инженер-исследователь ООО «Геотек».
3. Идрисов Илья Хамитович – инженер, директор ООО «Геотек».
4. Крестинина В.В. – инженер-программист ООО «Геотек».



Идрисов И.Х.



Болдырев Г.Г.



Болдырева Е.Г.