

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НЕСВЯЗНОГО ГРУНТА ПРИ СДВИГЕ В УСЛОВИЯХ СТЕСНЕННОЙ ДИЛАТАНСИИ

Попов О.В., канд. техн. наук, доцент.

(Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь)

При решении ряда геотехнических задач, к примеру при расчете несущей способности свай в несвязных грунтах, в зависимости от технологий устройства, принятой расчетной схемы работы сваи и расчетной модели грунта [1], необходимо учитывать изменение его напряженного состояния по боковой поверхности и под пятой сваи при нагружении. Напряженное состояние грунта в плоскости сдвига определяется двумя параметрами: касательными и нормальными напряжениями. Нормальные напряжения в плоскости сдвига по боковой поверхности сваи и под ее пятой следует разделить на две составляющие: напряжения, возникающие в процессе изготовления сваи (σ_0), зависящие от технологии изготовления сваи и ее параметров, и напряжения возникающие в процессе нагружения сваи (σ_d) вследствие развития объемных деформаций формоизменения при стесненном сдвиге.

Современные испытания образцов грунта, проводимые в приборах прямого среза в соответствии с существующей методикой [2], направлены на определение характеристик прочности: угла внутреннего трения (φ) и удельного сцепления (c). Данные характеристики определяют по результатам испытаний образцов грунта в приборах прямого среза методом сдвига одной части образца относительно другой горизонтальной нагрузкой при предварительном нагружении образца нагрузкой, нормальной к плоскости среза. В результате испытаний определяется предельное сопротивление грунта сдвигу (τ_u), возникающее в момент разрушения образца грунта от максимальной сдвигающей нагрузки и соответствующее начальному нормальному давлению (σ_0).

Особенностью деформируемости несвязных грунтов является их способность к существенным объемным деформациям в результате

развития деформаций формоизменения при сдвиге. Для изучения данного явления, называемого дилатансией, его влияния на прочность несвязных грунтов был применен дилатометрический прибор прямого сдвига [3], позволяющий моделировать напряженно-деформированное состояние грунта в условиях стесненного разрушения и определять предельные значения сопротивления грунта сдвигу как по обычной методике [1], так и по предлагаемой методике ограничения дилатансии зоны сдвига с использованием динамометрического приспособления регулируемой жесткости [2].

При проведении испытаний несвязный грунт с коэффициентом начальной пористости (e_0) ниже критического значения (e_k) по мере развития горизонтальных смещений каретки прибора начинает дилатировать, т.е. наблюдается интенсивное разрыхление грунта зоны сдвига. При этом происходит подъем штампа, достигающего своего максимума при разрушении образца. Величина дилатантных перемещений ограничена жесткостью динамометрического приспособления (коэффициентом жесткости K), которое моделирует отпор со стороны массива грунта, не участвующего в процессе разрушения на дилатансию зоны сдвига. В результате этого в плоскости разрушения возникают дополнительные дилатантные напряжения (σ_d), которые, накладываясь на начальное нормальное давление (σ_0), определяют предельное сопротивление грунта сдвигу (τ_u).

В случае проведения испытаний по традиционной методике предельное сопротивление несвязного грунта сдвигу, согласно закону Кулона, представлено прямой 1 на рис. 1, и определяется зависимостью

$$\tau_u = \sigma_0 \tan \varphi. \quad (1)$$

Данные испытаний в этом случае соответствуют условию действия постоянной вертикальной нагрузки на штамп прибора. В случае ограничения дилатансии возникает тенденция стремления начального коэффициента пористости (e_0) к критическому значению (e_k), имеющего большее значение. Подъем штампа вызывает увеличение вертикального давления на образец грунта за счет проявления дилатантных напряжений, величина которых определяется жесткостью дилатометрического приспособления, моделирующего упру-

гий отпор со стороны массива. Фактическое нормальное давление в сдвиговом приборе на момент разрушения составит

$$\tau_u = f(\sigma_0) \text{ и } \tau_u' = f(\sigma)$$

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_d, \quad (2)$$

а сопротивление грунта сдвигу определяется как

$$\tau_u = (\sigma_0 + \sigma_d) \tan \varphi = \sigma_0 \tan \varphi + \tau_d \quad (3)$$

На рис. 1 данная зависимость схематично представлена прямой 2 при заданном моделируемом коэффициенте жесткости массива (К).

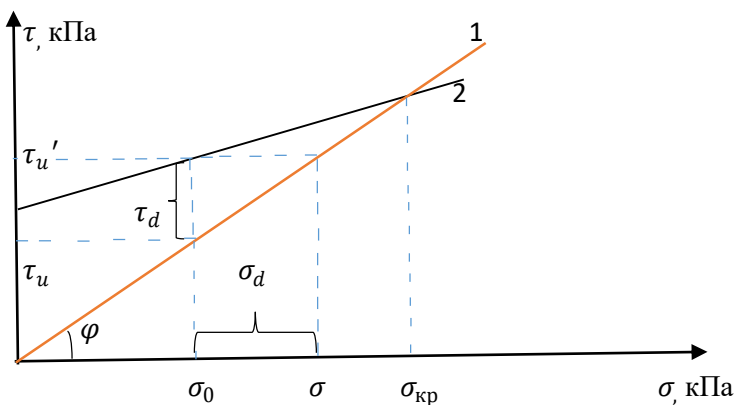


Рис. 1. Схематичные зависимости

Программа испытаний прямого сдвига включала в себя испытание песков разного гранулометрического состава и плотности при различных жесткостях динамометрического приспособления, т.е. различных моделируемых коэффициентах жесткости массива грунта. При обработке результатов сдвиговых испытаний песков с ко-

коэффициентом пористости ниже критического установлено, что в случае ограниченной дилатансии величина предельного сопротивления сдвигу должна определяться с учетом проявления дилатантных напряжений, зависящих от уровня начального нормального давления (σ_0), вида несвязного грунта (d_{50}), его плотности (e_0), коэффициента жесткости массива (K). Пересечение прямых 1 и 2 на рис. 1 определяет величину критического начального давления ($\sigma_{кр}$) на образец грунта, при котором дилатансия не проявляется, и величина дилатантных напряжений равна нулю. Проведенные эксперименты показали, что критическое начальное нормальное давление составляет порядка 0,7 МПа, т.е. наступает состояние при котором грунт до и после сдвига составляет один и тот же объем, т.е. выполняется условие критической пористости. Это свидетельствует о необходимости увязывать понятие критической пористости с напряженным состоянием грунта. Каждому начальному напряженному состоянию (σ_0) соответствуют определенная величина дилатантных напряжений (σ_d), определяющих прирост предельного дилатантного сопротивления грунта сдвигу (τ_d). При увеличении начального нормального давления (σ_0) до критического нормального давления ($\sigma_{кр}$) величины дилатантных нормальных напряжений (σ_d), а, следовательно, и соответствующий прирост дилатантного сопротивления сдвигу (τ_d), уменьшаются от своих максимальных значений до нуля. При этом, угол внутреннего трения согласно нашим экспериментам, рассматриваемый как соотношений $\tau_u / (\sigma_0 + \sigma_d)$, остается практически неизменной величиной в пределах погрешности измерений.

Исследования показали, что при известном значении критического нормального давления ($\sigma_{кр}$), величину дилатантных напряжений (σ_d) при заданном значении начального нормального давления (σ_0) можно определить по формуле

$$\sigma_d = \sigma_{d,max} (1 - \sigma_0 / \sigma_{кр}), \quad (4)$$

а величину предельного сопротивления грунта сдвигу

$$\tau_u = ((\sigma_{d,max} (1 - \sigma_0 / \sigma_{кр})) \tan \varphi, \quad (5)$$

где $\sigma_{d,max}$ – максимальные дилатантные напряжения, определяемые на основе экспериментальной выборки результатов и ее последующей математической обработки с использованием искусственных нейронных сетей, как функции действующего диаметра частиц несвязного грунта (d_{50}), его коэффициента пористости (e_0), коэффициента жесткости массива (K).

Выводы:

– при определении предельного сопротивления сдвигу несвязного грунта со значением коэффициента пористости ниже критического следует учитывать изменение нормального давления в плоскости разрушения вследствие дилатансии; новое напряженное состояние определяется соотношением предельного сопротивления грунта сдвигу к суммарным нормальным напряжениям в момент разрушения;

– статистическая обработка результатов сдвиговых испытаний несвязных грунтов в условиях стесненной дилатансии с использованием искусственных нейронных сетей позволяет с высокой точностью определять дополнительные нормальные дилатантные напряжения в плоскости разрушения в зависимости от крупности частиц несвязного грунта, его плотности, упругого отпора со стороны массива грунта на дилатансию зоны сдвига, начального нормального давления и геометрических размеров плоскости сдвига.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соболевский, Д.Ю. Прочность и несущая способность дилатирующего грунта / Д.Ю. Соболевский. – Мн: Навука і тэхніка, 1994. – 232 с.
2. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформированности: ГОСТ 12248–2010.
3. Устройство для определения сопротивления сдвигу сыпучих материалов: а. с. 1491143 СССР / Д.Ю. Соболевский, О.В. Попов. – 1989.