

*Уласик Тамара Михайловна, старший преподаватель  
Белорусского национального технического университета,  
г. Минск, Беларусь*

***Прочностные испытания грунтов на основе модели  
контактного сдвига***

***Strength test of soils on basis of contact shear model***

Анализируются данные испытаний однородных фракций на дилатометрическом приборе контактного сдвига. Акцентируется внимание на разделении методик испытаний несвязных грунтов в связи с объемным стеснением деформаций в зоне сдвига.

Some data of the tests homogeneous size fraction on dilatometric tool of contact shear are analysed. Noticed that testing methods of clay soils should be divided in connection with three-dimensional compression of deformations in the shear zone.

Испытания грунтов на срез (сдвиг) предполагают определенные условия, при которых сдвиговые или срезные приборы работают на основе моделей, позволяющих оценить как начальное напряженное состояние, так и состояние предельного равновесия грунта.

За основу модели контактного сдвига принято допущение: вся зона деформаций грунта разделяется на зону упругих деформаций и область пластических деформаций. Модель контактного сдвига соответствует феноменологической модели. При этом условная граница, отделяющая слой пластических деформаций скольжения зерен грунта от области упругих деформаций в массиве грунта, располагается нормально по отношению к дилатантной составляющей сдвига  $\Delta\sigma_d$ . Деформации формоизменения при сдвиге, связанные с явлениями дилатансии или контракции, ведет к расширению или сужению полосы сдвига. Дилатантные напряжения неотъемлемо связаны с дилатантными перемещениями и упругими деформациями, происходящими в исследуемом грунте. От того, насколько зна-

чительными будут изменения нормального давления, зависит весь процесс сдвига грунта.

Дилатантные перемещения для условий «стесненной» дилатансии, определенные нами при испытании песка крупного, среднородного ( $U_{max} = 6,28$ ) довольно незначительны и составляют  $\delta_d = 0,14$  мм,  $\sigma_o = 0,1$  МПа;  $\delta_d = 0,19$  мм,  $\sigma_o = 0,2$  МПа с коэффициентом упругого отпора  $K = 420$  МН/м<sup>3</sup>. Соответствующие им дилатантные напряжения составили 0,05 МПа и 0,075 МПа. Очевидно, что перемещения, составляющие доли миллиметров, вызывают значительный прирост нормального давления в плоскости сдвига. В момент сдвига, как известно, грунт достигает определенной или «критической» плотности. И то, насколько близкой будет плотность грунта от начала испытания к «критической» определит дальнейшее поведение исследуемого образца. Нами отмечен тот факт, что в опытах на сдвиг несвязных грунтов при различных значениях нормального давления в диапазоне 0,1 МПа до 0,5 МПа предельные сдвигающие напряжения могут возникать как на этапе контракции, так и на этапе дилатансии. В опытах наблюдались следующие варианты сдвига несвязного грунта:

1-й вариант, когда исследуемый образец сначала испытаний проходит этап контракции или уплотнения, уменьшения его объема, затем на нескольких ступенях нагружения нормальное давление остается постоянным и далее начинается этап дилатансии, который завершается сдвигом;

2-й вариант, когда от начала испытаний идет этап контракции, нормальное давление при этом существенно снижается и на этом этапе происходит сдвиг;

3-й вариант, от начала опыта начинается уплотнение грунта или его контракция и уже непосредственно перед сдвигом нормальное давление незначительно увеличивается;

4-й вариант, когда сразу после приложения сдвигающего усилия наблюдается дилатансия исследуемого грунта, нормальное давление в ходе всего опыта увеличивается и в конце испытания наступает сдвиг.

Некоторые исследователи отмечают, что «...важным фактором, определяющим несущую способность основания, является связанная с проявлением дилатантных свойств плотных песков их способность к снижению сопротивляемости сдвигу». Очевидно, что здесь

речь идет об условиях дилатирования, когда отсутствуют стеснения объемных деформаций, что соответствует условиям свободного дилатирования грунта. Схожие результаты были получены и в наших опытах. Из этого следует, что достижение «критической» плотности после этапа контракции позволяет зернам несвязного грунта переупаковаться так, что на этапе дилатансии, постепенно приближаясь к состоянию «критической» плотности, несвязный грунт проявляет большую сопротивляемость сдвигу, чем при условии только дилатансии.

На наш взгляд, контракция несвязных грунтов является определяющим фактором дальнейшего процесса сдвига. Глубина так называемой «петли контракции» характеризует как начальное состояние грунта (плотность, влажность, форму и размеры зерен грунта, минеральный состав их), так и изменение начального, нормального давления, степень изменения пористости от момента приложения вертикального давления до завершения испытания.

Чем больше «глубина петли контракции», тем более рыхлым будет несвязный грунт до начала сдвиговых испытаний и чем плотнее испытываемый грунт, тем меньше «петля контракции». Отсутствие «петли контракции» в сдвиговых испытаниях говорит о плотности несвязного грунта, соответствующей такой плотности упаковки его зерен, при которой сразу после приложения сдвигающего усилия начинается разворот зерен, возникает дилатантный распор. Насколько большими будут значения дилатантных напряжений зависит от размеров зерен грунта и от условий стеснения объемных деформаций, в которых происходит испытание.

Передача изменяющихся в ходе сдвига напряжений происходит через контакты зерен несвязного грунта, поэтому будет иметь значение не только количество контактов, но и минеральный состав зерен грунта, равно как и их размеры. Для дальнейших исследований нами был выбран грунт, зерна которого представлены различными минералами: кварц, полевые шпаты, мелкие обломки гранита и др.

Чтобы выяснить, как влияют на характер сдвига такие факторы, как однородность для опытов были взяты отсеянные фракции диаметром 2–5 мм, 5–10 мм, 1–2 мм. Используя зерна диаметром 2–5 мм, как основной грунт к нему добавлялись зерна 5–10 мм в процентном соотношении по массе 10 %, 30 %, 50 %.

Отсортированные фракции редко встречаются в основании сооружений, однако влияние присутствия зерен определенной крупности на характер сдвига, на проявление дилатансии и контракции, представляют интерес.

Присутствие более крупных зерен в основной массе грунта с менее крупными, оказывает тем большее влияние на сдвиг, чем больше их в грунте по массе. Дилатантные напряжения  $\Delta\sigma_d$  увеличиваются с процентным увеличением более крупных зерен в образце грунта по массе.

Определяющим фактором конечных значений сдвигающих напряжений служит начальное состояние грунта, характеризующее плотностью его упаковки или начальным коэффициентом пористости  $e_0$ . Следовательно, дилатантный распор также зависит от исходных физических характеристик грунта. Для песка крупного повышенной неоднородности значения дилатантных напряжений уменьшаются с увеличением  $e_0$  для испытаний при одном и том же коэффициенте упругого отпора  $K$ ; с уменьшением значений  $K$  дилатантные напряжения изменяются от 153 кПа до 75 кПа для наименьших значений  $e_0$  и от 34 кПа до 18 кПа для наибольших значений  $e_0$ . Подобная закономерность изменения дилатантных напряжений прослеживается и для песка средней крупности среднеоднородного и для песка мелкого однородного. Для песка среднего, среднеоднородного максимальное значение дилатантных напряжений при наибольшем значении  $K = 680 \text{ МН/м}^3$  составляет 130 кПа при  $e_0 = 0,4$ . При этом же коэффициенте пористости, но для  $K = 250 \text{ МН/м}^3$  дилатантное напряжение для песка среднего составляет 81 кПа. Для песка мелкого однородного с теми же начальными физическими параметрами дилатантное напряжение еще меньше – от 108 кПа при  $K = 680 \text{ МН/м}^3$  и до 67,5 кПа при  $K = 250 \text{ МН/м}^3$ .

Очевидно, что для более крупного грунта значения дилатантных напряжений больше, чем более мелкого. Увеличение стеснения объемных деформаций, выражаемое в увеличении коэффициента упругого отпора, приводит к закономерному росту дилатантных напряжений для конкретного вида грунта.

В более плотном несвязном грунте дилатансия проявляется сильнее, чем в рыхлом. Приведенные графики (рис. 1) построены для условий испытаний при проявлении дилатансии, т.е. когда все зафиксированные дилатантные напряжения имеют знак плюс и при

приложении сдвигающего усилия не наблюдается явление контракции или уплотнения песчаного грунта. Общий вид графиков характеризуется схожим расположением прямых дилатантных напряжений. Пользуясь этими графиками, можно количественно оценить величину дилатантных напряжений при сдвиге, а так же рассчитать, на сколько будут отличаться значения контактного трения, определенные с учетом дилатантных напряжений от определяемых на основе данных традиционных испытаний.

Традиционно в механике грунтов угол внутреннего трения считается величиной постоянной для конкретного вида грунта. Условия сдвига или разрушения, при которых определен угол внутреннего трения, обычно не учитываются.

Когда проводят сдвиговые испытания с использованием стандартных методик, в этом случае моделируются условия сдвига вблизи поверхности грунта. Когда же сдвиг происходит по контакту тела сваи, анкера, тогда зона сдвига зажата между сдвигаемым телом и массивом грунта. В этом случае наблюдаются условия, которые можно моделировать с помощью дилатометрических приборов (специальных сдвиговых приборов).

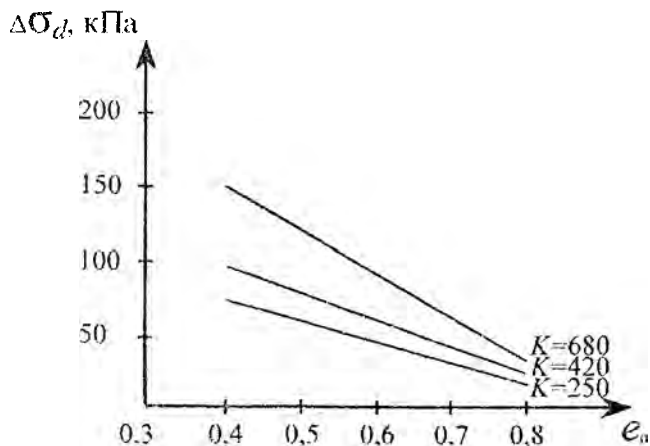


Рис. 1. Графики изменения дилатантных напряжений  $\Delta\sigma_d$  в зависимости от начального коэффициента пористости  $e_0$  при различных значениях коэффициента упругого отпора  $K$

Действие внешней нагрузки на массив грунта может привести к нарушению прочности внутренних связей между зернами грунта. Это приведет к скольжению (смещению) зерен относительно друг друга. И, поскольку сопротивление сдвигу внутри массива грунта зависит от ряда факторов (гранулометрический состав грунта, минеральное трение зерен, начальная плотность упаковки их, влажность, жесткость грунтового массива), то необходимо максимально учесть все вышеперечисленное. Прочностные характеристики, получаемые на основе испытаний грунтов на сдвиг (удельное сцепление  $C$  и угол внутреннего трения  $\varphi$ ) используются в расчетах прочности и устойчивости при проектировании оснований и фундаментов. Определение достоверных значений прочностных характеристик является, таким образом, важнейшей задачей сдвиговых испытаний грунтов.

В традиционных методах испытаний на сдвиг (срез), проводимых для несвязных грунтов, в консолидированно – дренированных испытаниях, консолидированно – недренированных испытаниях согласно нормативным требованиям (ГОСТ 12248 – 96) чаще всего сопротивление грунтов сдвигу определяют по заранее фиксированным плоскостям. Причем для испытаний несвязных (сыпучих) грунтов приборы должны иметь неподвижную нижнюю часть. Поскольку деформация сдвига – это смещение одной части грунта относительно другой, вызванное действием касательных напряжений от внешней нагрузки, то при таком смещении неизбежно изменение высоты образца за счет явления дилатансии в плоскости сдвига. На подобное явление исследователи обращали внимание неоднократно, были зафиксированы эти незначительные перемещения (миллиметры и доли миллиметров) и в связи с такой незначительностью этими перемещениями пренебрегали.

Предлагаемые нами методики определения параметров прочности основаны, в том числе, и на учете этих незначительных перемещений, названных дилатансией.

Процесс сдвига несвязного грунта, в условиях которого определяют значения сопротивления грунта сдвигу, хорошо моделируется с помощью специальных приборов, называемых дилатометрическими. Такими приборами являются дилатометрический прибор контактного сдвига и дилатометрический прибор плоского среза.

Название «дилатометрические» объединяет их по принципу учета явления дилатансии: дилатантных перемещений при сдвиге  $\delta_d$  (весьма незначительных), дилатантных напряжений  $\Delta\sigma_d$  и дилатантных составляющих предельных сдвигающих напряжений  $\tau_d$ .

Предельное состояние при сдвиге – незатухающее скольжение одной части несвязного грунта относительно другой – соответствует состоянию или состоянию исчерпания прочности. Именно в этот момент, в зависимости от значения дилатантных перемещений  $\delta_d$  и дилатантных напряжений  $\Delta\sigma_d$  мобилизуется предельное сдвигающее усилие и его составная часть – дилатантная составляющая сдвига  $\tau_d$ .

Разделение методики испытаний на испытания, в которых происходит объемное стеснение деформаций в зоне сдвига и когда такое стеснение отсутствует, позволяет четко разграничить традиционные и нетрадиционные методики испытаний несвязных грунтов. Традиционная методика испытаний известна как закон Кулона: сопротивление сыпучих грунтов сдвигу есть сопротивление внутреннего трения, прямо пропорциональное нормальному давлению. С учетом явления дилатансии традиционная методика требует специального дополнения, уточнения при определении параметров прочности несвязного грунта. Этим дополнением является методика на определение дилатантных составляющих сдвига, дилатантных напряжений и дилатантных перемещений.

В соответствии с исследованиями, проведенными по учету явления дилатансии [5], предложена следующая формула определения предельных сдвигающих напряжений:

$$\tau = \sigma_{no} \operatorname{tg} \varphi + \Delta\sigma_d \operatorname{tg} \varphi.$$

Очевидно, что первая часть уравнения – это закон Кулона для сыпучих (несвязных) грунтов, а вторая – названа нами дилатантной составляющей сдвига  $\tau_d$ .

Для того чтобы зафиксировать в опытах изменение нормального давления необходимо смоделировать условия стеснения объемных деформаций. В дилатометрических приборах таким устройством для моделирования стеснения объемных деформаций является винтовой домкрат и динамометр типа ДОСМ с индикатором часового

типа. Полученные в опытах значения дилатантных напряжений могут существенно повлиять на величину несущей способности оснований фундаментов, определяемую на основании параметров прочности несвязного грунта.

Дилатометрические приборы устроены так, что с их помощью можно моделировать испытания, проводимые по традиционной методике. В этом случае нормальное давление поддерживается в ходе всего опыта постоянным и не происходит подавления дилатансии.

Существует ряд факторов, определяющих влияние дилатансии на напряженное состояние грунта и процесс сдвига. Влияние физических характеристик несвязного грунта на проявление дилатансии неотъемлемо связано с таким явлением, как контракция. Падение нормального давления, также как и его увеличение, может быть зафиксировано в опытах, проводимых на дилатометрических приборах. Методика испытаний дилатирующих несвязных грунтов на сдвиг от этого не меняется. Различие будет только в конечном результате – предельном сдвигающем напряжении, которое определится с учетом явления контракции. В том случае, когда сдвиг или разрушение несвязного грунта произойдет на этапе контракции, знак  $\Delta\sigma_d$  будет «минус».

Плотные и рыхлые несвязные грунты по-разному будут реагировать на приложение сдвигающего усилия при одном и том же нормальном давлении. Но все они могут быть испытаны по одной методике, позволяющей определить, зафиксировать и количественно описать явление дилатансии несвязного грунта.

Следовательно, использование стандартных методов испытаний грунтов на сдвиг, когда происходит свободное изменение объема образца грунта в процессе сдвига, может привести к определению неточных значений сопротивления сдвигу. Это обусловлено тем, что при наличии дилатантных перемещений с возникновением дилатантного распора в грунте наблюдается противодействие дилатансии. При использовании приборов, в которых объемное расширение образца не ограничивается, условия при которых происходит сдвиг, будут оставаться достаточно неопределенными. Ни один из таких приборов не позволит нам количественно измерить величину дилатансии и определить влияние ее на параметры прочности грунта.

Использование традиционных методов испытаний грунтов на сдвиг не моделирует условия, при которых деформации объема в



области разрушения стеснены. Подобные условия испытаний моделируют дилатометрические приборы. С использованием таких приборов связаны методики испытаний, существенно дополняющие существующие стандартные методики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цытович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1983.– 288 с.
2. Гольдштейн, М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. – М.: Стройиздат, 1973. – 375 с.
3. Гольдштейн, М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. – М.: Стройиздат, 1979. – 304 с.
4. Гольдштейн, М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. – М.: Издательство литературы по строительству, 1971. – 367 с.
5. Соболевский, Д.Ю. Прочность и несущая способность дилатирующего грунта / Д.Ю. Соболевский. – Минск: Навука і тэхніка, 1994.– 232 с.