

УДК 624.13/15

З. Г. Тер-Мартirosян, А. Ю. Мирный, Мухаммед Назим Джаро

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ НЕСВЯЗНЫХ ГРУНТОВ ПРИ КОМПРЕССИОННЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Рассматриваются теоретические предпосылки определения прочностных характеристик грунтов по результатам компрессионных испытаний. Представлены результаты лабораторных опытов в одометре и стабилометре.

К л ю ч е в ы е с л о в а: угол внутреннего трения, несвязные грунты, прочность грунта, компрессионные испытания.

Theoretical basis for obtaining strength characteristics of soils on the result of compression tests is considered in the article. The results of laboratory tests in odometer and stabilometer are given.

К е y w o r d s: inner friction angle, incoherent soils, strength of soils, compression test.

Отличительной особенностью грунтовой среды (скелета грунта) является ее свойство оказывать неодинаковое сопротивление при нагружении и разгрузке как при объемных, так и при сдвиговых деформациях. Это свойство обусловлено внутренним трением между минеральными частицами при их взаимном перемещении в процессе деформирования. Трение скольжения и трение качения проявляются по-разному и зависят от минералогического состава грунта, его плотности-влажности и степени приближения к предельному состоянию. В мономинеральных глинистых грунтах преобладает вязкое сопротивление между минеральными частицами, обусловленное водно-коллоидными связями. Как показывают опыты на сдвиг, вязкое сопротивление также зависит от всестороннего сжатия, следовательно, можно говорить о вязком трении, которое пропорционально скорости относительного смещения частиц. Очевидно, что сопротивление грунта, обусловленное взаимным перемещением частиц, проявляется не только в предельном по прочности состоянии, но также и в допредельном состоянии. Модуль деформации сдвига при разгрузке не зависит от уровня всестороннего сжатия. Учет этих особенностей грунтовой среды имеет существенное значение при циклическом нагружении и разгрузке, так как они приводят к накоплению остаточных деформаций в грунтовом массиве и в инженерных сооружениях, взаимодействующих с ним. Ярким примером такого явления служат результаты компрессионных и штамповых испытаний грунтов в режиме многократного нагружения и разгрузки [1].

Известно, что вид компрессионной кривой при нагружении и разгрузке различается и что по ветви нагружения определяют модуль общей деформации E_0 , а по ветви разгрузки — E_e , причем

$$\frac{1}{E_0} = \frac{1}{E^e} + \frac{1}{E^p}, \quad (1)$$

где E^p — модуль пластической деформации грунта.

Эта связь вытекает из условия, что общая деформация грунта

$$\varepsilon_0 = \varepsilon^e + \varepsilon^p. \quad (2)$$

На примере компрессионного сжатия покажем, что модуль общей деформации грунта существенно зависит от угла внутреннего трения грунта, полагая, что угловая деформация связана с линейной деформацией известной зависимостью вида

$$\gamma_i = \frac{2\varepsilon}{\sqrt{3}}, \quad (3)$$

где ε_i — деформация грунта в условиях компрессии.

Интенсивность угловой деформации γ_i можно выразить через интенсивность касательных напряжений известной зависимостью вида

$$\gamma_i = \frac{\tau_i}{G^e} \frac{\tau_i^*}{\tau_i^* - \tau_i}, \quad (4)$$

где G^e — модуль упругого сдвига при $\tau_i \rightarrow 0$,

$$\tau_i = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sqrt{3}}, \quad (5)$$

$$\tau_i^* = \sigma \operatorname{tg} \varphi_i, \quad (6)$$

где $\sigma = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_2}{3}$, φ_i — угол внутреннего трения в плоскости $\tau_i - \sigma$.

Подставляя (5) и (6) в (4), с учетом (3) получаем

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2G^e} \frac{(\sigma_1 + 2\sigma_2) \operatorname{tg} \varphi_i}{(\sigma_1 + 2\sigma_2) \operatorname{tg} \varphi_i - (\sigma_1 - \sigma_2) \sqrt{3}}$$

или

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{2G^e} \frac{\left(1 - \frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right) \left(1 + \frac{2\sigma_2}{\sigma_1}\right) \operatorname{tg} \varphi_i}{\left(1 + \frac{2\sigma_2}{\sigma_1}\right) \operatorname{tg} \varphi_i - \left(1 - \frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right) \sqrt{3}}. \quad (7)$$

Отсюда легко определить коэффициент относительной сжимаемости грунта $m_{v0} = \varepsilon_1 / \sigma_1$, полагая, что $\sigma_2 = \xi \sigma_1$, а также $\xi = \frac{\nu}{1 - \nu}$, т. е. получаем:

$$m_{v0} = \frac{2(1 + \nu^e)(1 - 2\nu_0)(1 + \nu_0) \operatorname{tg} \varphi_i}{E^e (1 + \nu_0) \operatorname{tg} \varphi_i - (1 - 2\nu_0) \sqrt{3}}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что коэффициент относительной сжимаемости грунта зависит от модуля линейной деформации E^e , коэффициента Пуассона ν^e и угла внутреннего трения φ_i . Это то, что требовалось доказать.

Здесь индекс «0» означает общий, так как $m_{\nu 0} = m_0^e + m_0^p$. Из (8) следует также, что по нему можно определить модуль общей деформации по формуле вида

$$E_0 = \frac{E^e (1 + \nu_0) \operatorname{tg} \varphi_i - (1 - 2\nu_0) \sqrt{3}}{2(1 + \nu^e)(1 - 2\nu_0)(1 + \nu_0) \operatorname{tg} \varphi_i \beta(\nu_0)}. \quad (9)$$

Модуль линейной упругой деформации E^e можно определить в первом приближении по кривой разгрузки или по начальному участку компрессионной кривой.

Учитывая, что существует зависимость между E_0 , E^e и E^p вида (1), можно определить модуль пластической деформации E^p на основании (9), т. е. получаем:

$$E^p = E^e \frac{\lambda}{1 - \lambda}, \quad (10)$$

где

$$\lambda = \frac{(1 + \nu_0) \operatorname{tg} \varphi_i - (1 - 2\nu_0) \sqrt{3}}{2(1 + \nu^e)(1 - 2\nu_0)(1 + \nu_0) \operatorname{tg} \varphi_i \beta(\nu_0)}. \quad (11)$$

Из (9) легко определить также отношение E_n/E_p , полагая, что $E_n = E_0$, $E^p = E^e$, то есть получаем:

$$\frac{E_n}{E_p} = \lambda. \quad (12)$$

Рассмотрим пример. Пусть даны $\varphi_i = 30^\circ$; $\nu_0 = 0,35$; $\nu_e = 0,25$; $\lambda = 0,17$. Тогда $E_p/E_n = 5,88$, что соответствует нормативным требованиям, то есть $E_p/E_n = 3 \dots 5$.

Таким образом, можно считать, что модуль общей деформации грунта E_0 связан с модулями упругой линейной деформации E^e , углом внутреннего трения φ_i и коэффициентами Пуассона ν_0 и ν_e . Это позволяет обосновать первоначальную гипотезу о том, что неодинаковое сопротивление грунта при нагружении и разгрузке обусловлено внутренним трением грунта. Изложенное выше доказательство этой гипотезы получено на основе решения задачи механики грунтов без учета рассеивания энергии и теплотер, то есть в изотермическом режиме. Однако известно, что при деформировании сухого песчаного грунта наблюдается изменение температуры. Поскольку чисто механический подход, изложенный выше, приводит к желаемым результатам, следует для практических целей ограничиться механическим подходом для обоснования первоначальной гипотезы.

Из решения (9) следует также, что по значениям E_0 , E^e , ν_0 и ν_e , определенным по результатам экспериментов по ветви нагрузки и разгрузки, можно определить тангенс угла внутреннего трения грунта по формуле вида

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{(1 - 2\nu_0)\sqrt{3}}{(1 + \nu_0) - 2\beta(\nu_0)(1 + \nu^e)(1 + \nu_0)\lambda}. \quad (13)$$

Изложенная в этом разделе теория справедлива для случая, когда нагрузка и разгрузка рассматриваются по главной ветви компрессионной кривой, то есть когда рассматривается связь, которую можно представить в виде

$$\varepsilon = a(1 - e^{-b\sigma}), \quad (14)$$

где a и b — параметры компрессионной кривой.

С целью проверки применимости теоретического решения в первой части статьи была проведена серия компрессионных испытаний образцов-близнецов сухого мелкого песка в одометре [2], в ходе которых определялись значения модулей деформации E_0 и E^e . Значения коэффициентов Пуассона принимались по результатам трехосных испытаний схожих грунтов и составляли, соответственно, $\nu_0 = 0,35$; $\nu_e = 0,25$. Начальный коэффициент пористости e составлял 0,752.

Испытания проводились в трех различных диапазонах напряжений: 0...100, 0...300 и 0...500 кПа, что позволило оценить зависимость угла внутреннего трения от модулей деформации. После достижения предельного напряжения производилась разгрузка. Осредненные результаты испытаний представлены в табл. 1.

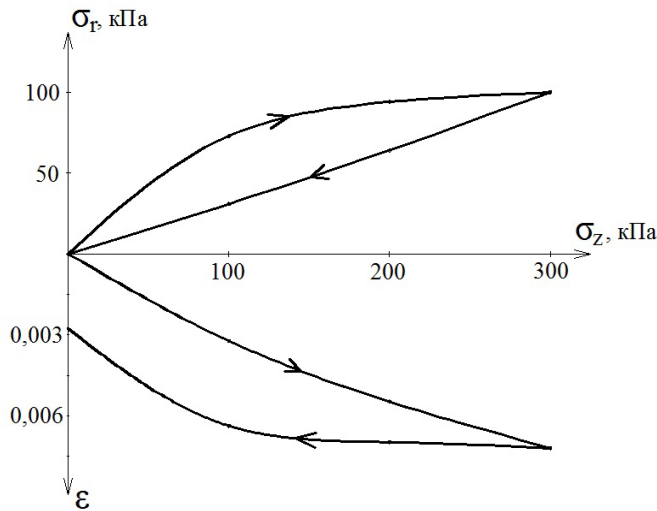
Т а б л и ц а 1

Диапазон напряжений, кПа	E нагрузки, кПа	E разгрузки, кПа	E_p/E_n
0...100	9582	37770	3,94
0...300	23601	67939	2,88
0...500	38527	83892	2,18

Аналогичные испытания были проведены в стабилометре в компрессионном режиме. В ходе испытаний проводилось нагружение образца, в процессе чего контролировалось изменение давления жидкости в камере прибора, что позволило определить коэффициент Пуассона и скорректировать полученные с помощью предложенной формулы значения угла внутреннего трения.

Графики зависимости относительных деформаций от вертикальных напряжений, а также горизонтальных напряжений от вертикальных напряжений, полученные в результате испытаний в диапазоне от 0 до 300 кПа, представлены на рис.

В результате проведения компрессионных испытаний в стабилометре были получены значения модулей нагрузки и разгрузки, а также соответствующих им коэффициентов Пуассона. Результаты представлены в табл. 2.



Зависимости относительных деформаций от вертикальных напряжений и горизонтальных напряжений от вертикальных напряжений

Т а б л и ц а 2

Диапазон напряжений, кПа	E нагрузки, кПа	E разгрузки, кПа	E_p/E_n	ν нагрузки	ν разгрузки
0...100	21657	96727	4,46	0,34	0,12
0...300	36072	150427	4,17	0,31	0,12

Применение теоретического решения первой части статьи позволило определить значения угла внутреннего трения для всех испытанных образцов. Эти значения приведены в табл. 3. В пятом столбце представлено значение угла внутреннего трения ϕ , определенного по стандартной методике проведения прочностных испытаний в стабилометре.

Т а б л и ц а 3

tg ϕ (одеметр)	ϕ (одеметр)	tg ϕ (стабилометр)	ϕ (стабилометр)	ϕ
0,642	32,7	0,613	31,5	39
0,780	38	0,810	39	
0,835	39,9			

Выводы. Представленная в данной статье методика позволяет определить угол внутреннего трения для образцов грунта по результатам компрессионных испытаний. В случае применения трехосного прибора возможно определение точных значений коэффициента Пуассона, при использовании одеметра необходимо принимать нормативные значения. С увеличением пределов испытаний наблюдается некоторое увеличение угла внутреннего трения. Это связано с изменением коэффициента Пуассона по мере уплотнения грунта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Тер-Мартirosян З. Г.* Механика грунтов. М. : АСВ, 2009.
2. *Чапoвский Е. Г.* Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. М. : Недра, 1975.

1. *Ter-Martirosyan Z. G.* Mekhanika gruntov. M. : ASV, 2009.
2. *Chapovskiy E. G.* Laboratornye raboty po gruntovedeniyu i mekhanike gruntov. M. : Nedra, 1975.

© *Тер-Мартirosян З. Г., Мирный А. Ю., Мухаммед Назим Джаро, 2012*

*Поступила в редакцию
в октябре 2012 г.*

Ссылка для цитирования:

Тер-Мартirosян З. Г., Мирный А. Ю., Мухаммед Назим Джаро. Определение угла внутреннего трения несвязных грунтов при компрессионных испытаниях // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2012. Вып. 3 (23).