Построение траектории напряжений для ненасыщенного грунта при консолидированно-недренированных испытаниях в стабилометре

Д.т.н., профессор А.Л. Гольдин,
ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»;
аспирант Нгуен Фыонг Зунг*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: прочностные характеристики грунта; степень водонасыщения; трехосное испытание для ненасыщенных грунтов; абсорбция; поровое давление воздуха; поровое давление воды

Для ненасыщенных грунтов вести расчеты по эффективным напряжениям практически невозможно, поскольку избыточное поровое давление остается неизвестным. В этом случае поровое давление складывается из двух компонентов: порового давления воды и порового давления воздуха. Для оценки устойчивости откоса по эффективным напряжениям необходимо определить компоненты поровых давлений воды и воздуха.

Исследованиям прочностных характеристик насыщенных грунтов посвящены работы многих авторов [1-5]. Сопротивляемость глинистых грунтов сдвигу по К. Терцаги описывалась в [6]. По предложению Н.Н. Маслова для сопротивления глинистых грунтов сдвигу была разработана теория «плотности-влажности» [7]. Согласно этой теории, величины угла внутреннего трения φ и начального сцепления c не остаются постоянными для большой группы грунтов, как это предусматривалось теорией Терцаги-Кулона в ее чистом виде. По Fredlund D.G., прочностные характеристики описывались в зависимости от абсорбции [8].

В ненасыщенном грунте в природных условиях поровое давление воздуха обычно равно атмосферному, а поровое давление воды меньше, чем давление воздуха. Так как атмосферное давление обычно считается нулевым, то поровое давление воды оказывается отрицательным (так как оно будет меньше атмосферного). Такое отрицательное давление называется абсорбцией [8], так как грунт при контакте с водой при атмосферном давлении будет абсорбировать воду. В системе, в которой воздух и вода находятся под давлением, эффективное давление может быть описано уравнением:

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_W), \quad (1)$$

в котором χ – коэффициент, зависящий от степени водонасыщения [9,10]. Это выражение получено эмпирическим путем. Для определения численного значения χ для ненасыщенных грунтов необходимо знать давления воздуха и воды, так же как параметры φ' и c' сопротивления сдвигу водонасыщенного грунта в условиях эффективных напряжений.

Чтобы определить прочность на сдвиг для ненасыщенного грунта с заданными давлениями воздуха и воды, используем формулу:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\,\mathrm{tg}\,\varphi' + (u_a - u_W)\,\mathrm{tg}\,\varphi^b, \quad (2)$$

где u_a, u_W – давления порового воздуха и поровой воды; φ^b – угол с указанием темпов прироста прочности по отношению к степени абсорбции ($u_a - u_W$) в момент разрушения [8].

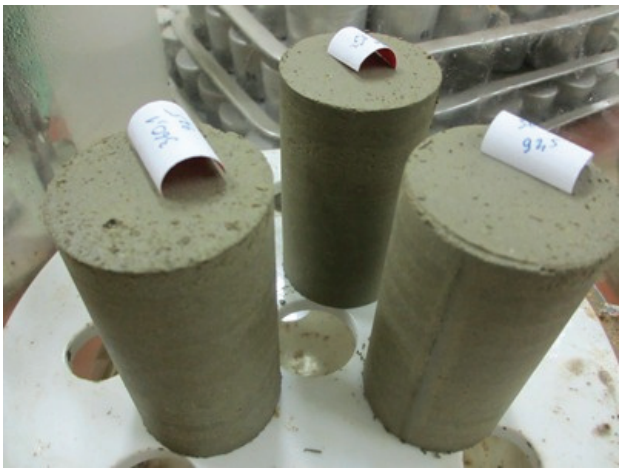
Существуют и другие формулы для нахождения прочности сдвига ненасыщенного грунта: в работах Richards L.A. [11], Aichison G.D. [12,13], Morgenstern N.R. [14], Fredlund D.G. [15,16] описывается взаимоотношение прочностных характеристик и физического состояния грунта.

Цель исследования – экспериментально проверить основные положения теории «плотности-влажности» Н.Н. Маслова и теории абсорбции Fredlund D. при определении прочностных свойств связных грунтов, а также при учете расчета устойчивости откосов.

В данной работе проведены экспериментальные исследования прочностных характеристик грунтов методом трехосного сжатия при варьировании абсорбции, вследствие чего изменялась степень водонасыщения. Эксперименты выполнены в Институте Водных Ресурсов (Социалистическая республика Вьетнам, СРВ) на приборе трехосного сжатия (ПТС Control 28-

Т0410/А). Для испытаний применялись искусственно приготовленные образцы грунта нарушенной структуры (рис. 1а-д) [17,18], которые были доставлены из откоса котлована ГЭС «Хуа-На» (СРВ). В процессе испытания измеряли поровые давления воды и воздуха. Физико-механические характеристики грунта представлены в табл.1.

а б



в г

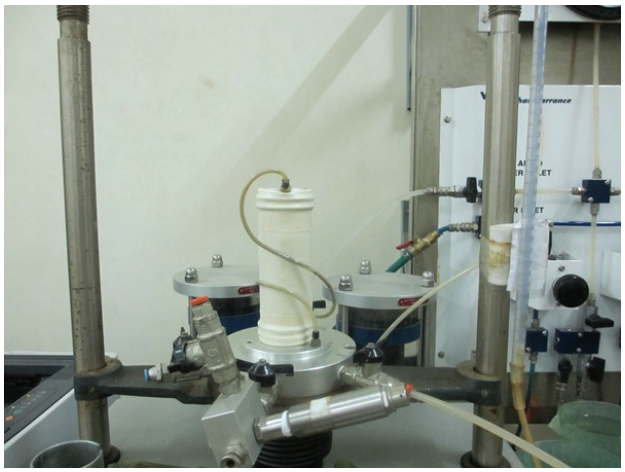
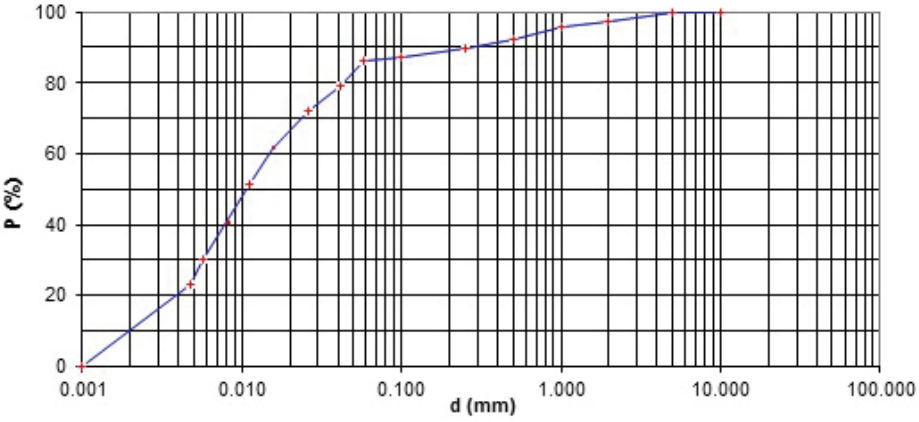


Рисунок 1. Приборы трехосного сжатия (ПТС) для испытаний на прочность образцов в лабораторных условиях: а – изготовление испытуемого образца; б – готовые образцы в водонасыщенном состоянии; в – установка образца грунта в приборе; д – ПТС и приборы для измерения давлений

Таблица 1. Основные физико-механические характеристики грунта

№	Испытание грунтов	Образцы	1
1	Гранулометрический состав 		

№	Испытание грунтов		Образцы		1
2	Природная влажность		W_{tn}	%	15,92
3	Оптимальная влажность		W_{cb}	%	14,71
4	Плотность влажного образца грунта (K=0,95)		ρ_w	T/m^3	2,090
5	Плотность сухого грунта		ρ_d	T/m^3	1,822
6	Плотность частиц грунта		ρ_s		2,690
7	Коэффициент пористости		e		0,476
8	Пористость		n	%	32,27
9	Водонасыщенность		S	%	89,89
10	Предел текучести		LL	%	31,26
11	Предел раскатывания (пластичности)		PL	%	18,30
12	Числа пластичности		PI	%	12,96
13	Показатель консистенции		LI		-0,18
14	Уплотнение грунтов трамбованием	Оптимальная влажность	W_{opt}	%	14.71
15		Максимальная плотность сухого грунта	ρ_{dmax}	T/m^3	1.822
16	Одноплоскостной срез		φ	(°)	25°35'
			C	(кгс/см^2)	0,39
17	Трехосное сжатие	CW (КН)	φ'	(°)	21° 30'
			Cu'	(кгс/см^2)	0,29

Прочностные характеристики ненасыщенного грунта

Испытания в стабилометре водонасыщенных грунтов [19,20] подразделяются на 3 стадии:

1) этап реконсолидации грунта;
2) процесс консолидации (в этой работе были проведены консолидированно-недренированные испытания (КН);
3) этап разрушения образцов.

Прочностные характеристики *φ* и *c* определены по кругам предельных напряжений: tg*φ* = 0,39 (*φ* = 21° 30') и *c* = 0,29 кгс/см^2 (рис. 2).

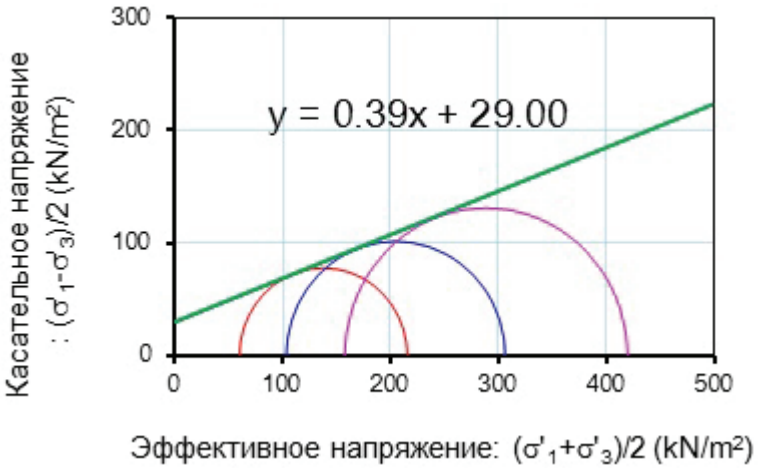


Рисунок 2. Круги предельных напряжений, построенные по результатам испытаний на приборе трехосного сжатия стабилометрического типа

Для ненасыщенных грунтов после этапа консолидации проведен процесс выравнивания абсорбции (suction equalization), при котором степень водонасыщения достигает определенного значения и образцы становятся ненасыщенными [8,21-25]. Результаты испытания этого ненасыщенного грунта размещены ниже.

Степень абсорбции (u_a – u_W) была установлена до проведения этапа разрушения соответственно в 50кПа и 100кПа. После разрушения образцов определены углы с указанием темпов прироста прочности по отношению к степени абсорбции (u_a – u_W) в момент разрушения. Как показали результаты испытания (рис. 3), φ^b при абсорбции в 100кПа меньше его значения при абсорбции в 50кПа. Значения угла φ^b получились соответственно 10.8° и 6.6° (рис. 4). Эти углы были меньше эффективного угла φ'=21.5° для насыщенного грунта.

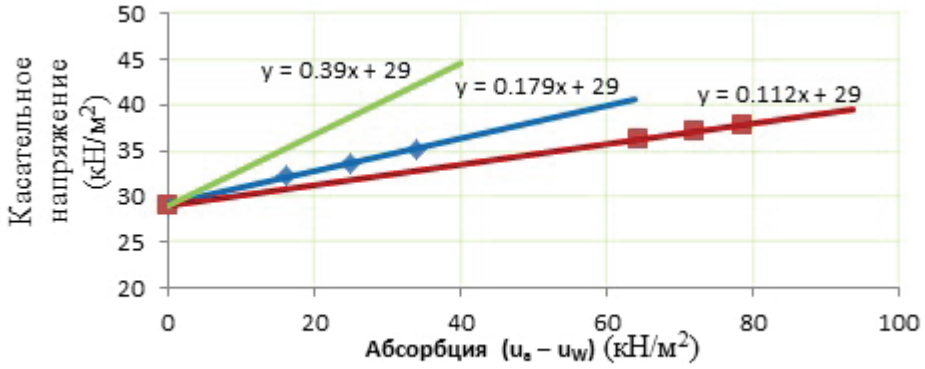


Рисунок 3. Зависимость угла φ^b от степени абсорбции (u_a – u_W) в момент разрушения

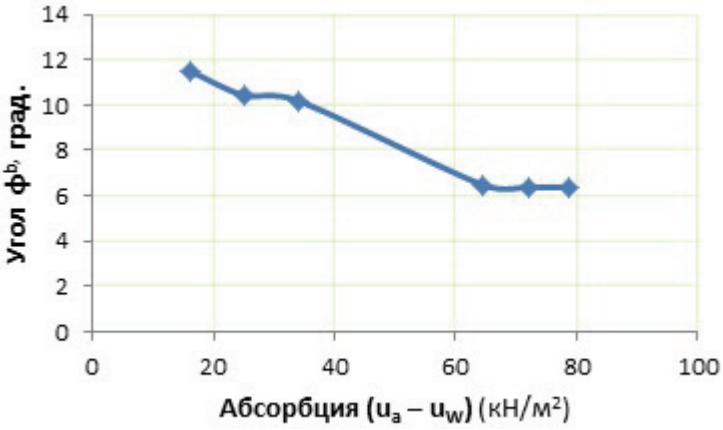


Рисунок 4. Значение угла φ^b в момент разрушения

При проведении консолидированно-недренированного испытания для ненасыщенных грунтов поровое давление воздуха остается постоянным, а поровое давление воды возрастает, поэтому абсорбция уменьшается. Чем меньше эффективные напряжения до момента проведения разрушения, тем меньше снижение абсорбции и, следовательно, меньше снижение степени водонасыщения.

Траектории напряжений

До разрушения начальные абсорбции ψ=(u_a – u_W) были установлены соответственно 50 кПа и 100 кПа, а давление воздуха равно 295 кПа и 345 кПа . Боковые напряжения σ_3 равны 345, 395, 495 кПа. Тогда минимальные главные напряжения (эффективные напряжения) σ'_3 = (σ_3 – u_a) были равны 50, 100 и 200 кПа.

В процессе испытания фиксировались поровое давление воды и нормальное напряжение. В момент разрушения образцов определено максимальное напряжение $\sigma_{1пр}$. По полученным $\sigma_{1пр}$, ψ=(u_a – u_W) и принятым σ'_3 = (σ_3 – u_a) для каждого испытания построены круги напряжений (синие круги на рис. 5 и рис. 6). К полученным предельным кругам напряжений (кругам Мора) проведена прямолинейная касательная (красная линия) с известным углом φ'=21.5°, которая была получена из испытаний для насыщенного грунта (рис. 2). Отрезок, отсекаемый на плоскости (τ , ψ), является сцеплением в зависимости от степени абсорбции c = c' + (u_a – u_W) tg φ^b (или общее сцепление по теории Н.Н. Маслова). Линия, проведенная через эти точки, наклонена к горизонтали под углом φ^b, как определено выше. Затем построены траектории напряжений (зеленые). Из этих траекторий следует определить НДС образцов при известной их начальной абсорбции и нагрузке.

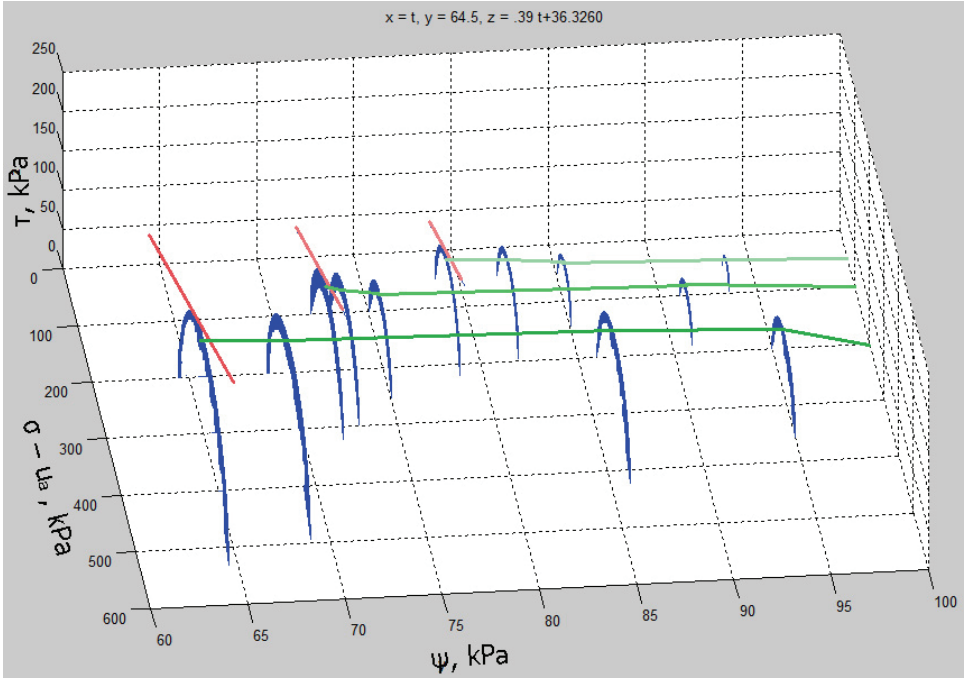


Рисунок 5. Траектории напряжений при КН–испытании с начальной абсорбцией ψ = 50 кПа и боковыми давлениями σ_3 = 345, 395, 495 кПа

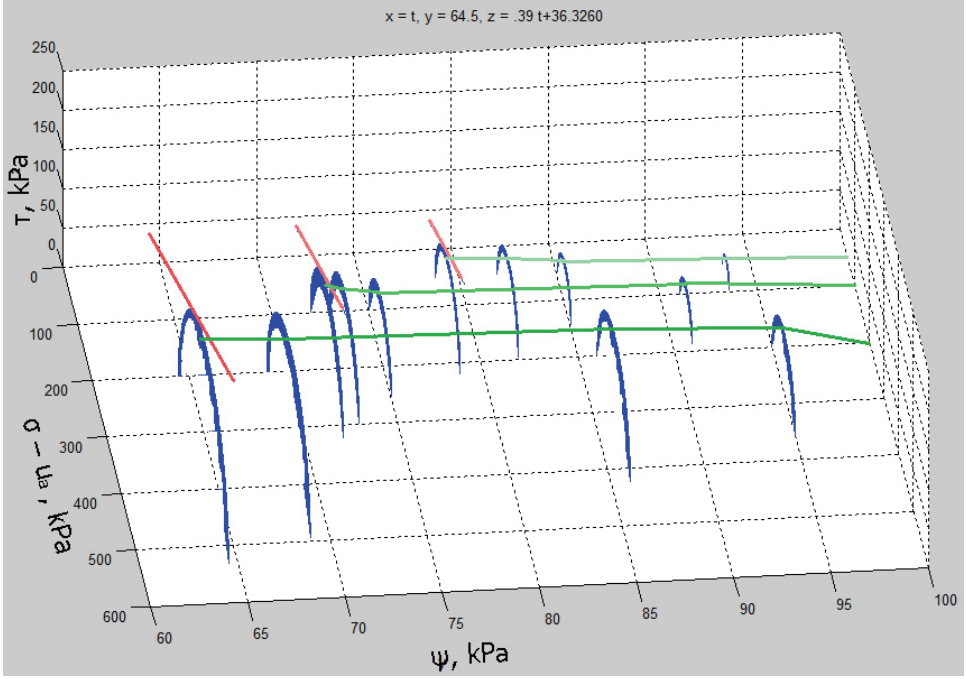


Рисунок 6. Траектории напряжений при КН–испытании с начальной абсорбцией ψ = 100 кПа и боковыми давлениями σ_3 = 395, 455, 545 кПа

Выводы

Для данного грунта, доставленного из откоса котлована ГЭС «Хуа-На» (СРВ), значение φ^b сильно уменьшается, хотя абсорбция ψ небольшая (грунт почти насыщенный).

Зависимость предельных сопротивлений сдвигу $\tau_{пр}$ от эффективных сжимающих напряжений (σ – u_a) нелинейная при больших значениях абцорбции ψ. Когда грунт считается сухим, предельное сопротивление сдвигу $\tau_{пр}$ почти не изменяется при повышении сжимающих напряжений.

По траекториям напряжений следует определять НДС образцов при известной начальной абсорбции и нагрузке.

Литература

1. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1991. 447 с.
2. Бугров А.К. Механика грунтов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 285.
3. Whitlow R. Basic Soil Mechanics. Harlow, Essex, England: Longman Scientific & Technical; New York: Wiley&Sons Inc., 1990. 528 p.
4. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. Пенза: ПГУАС, 2008. 696 с.
5. Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics. New York: Wiley, 1943. 507 p.
6. Terzaghi K. Stability of steep slope in Hard Unweathered Rock // Geotechnique. 1962. №4. Pp. 251-270.
7. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними). М.: Стройиздат, 1977. 320 с.
8. Fredlund D.G., Rahardjo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. New York: John Wiley & Sons Inc., 1993. 544 p.
9. Bishop A.W. The principle of effective stress // Teknich Ukeblad. 1959. Vol. 106. №39. Pp. 859-863.
10. Bishop A.W. The measurement of pore pressure in the triaxial test // Pore Pressure and Suction in Soils Conference. London: Butterworth, 1961. Pp. 38-46.
11. Richards L.A., Gardner W.R., Ogata G. Physical Processes Determining Water Loss from Soil // Soil Sci. Soc. America Proc. 1956. Vol. 20. Pp. 310-314.
12. Aitchison D. Relationship of moisture and effective stress functions in unsaturated soils // Pore Pressure and Suction in Soils Conference. London: Butterworths, 1961. Pp. 47-52.
13. Aitchison D., Donald I.B. Effective stresses in unsaturated soils// Proceedings of the Second Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics. Christchurch, New Zealand, 1956. Pp. 192-199.
14. Morgenstern N.R., Fredlund D.G. Stress state variables for unsaturated soils // ASCE J. Geotech. Eng. Div. GT5. 1977. Vol. 103. Pp.447-466.
15. Fredlund D.G., The shear strength of unsaturated soils and its relationship to slope stability problem in Hong Kong // The Hong Kong Engineer. 1981. Vol. 9. №4. Pp. 37-45.
16. Fredlund D.G., Rahardjo H. State of development in the measurement of soil suction // In Proceeding of the International Conference on Engineering Problems of Regional Soils. Beijing, China, 1988. Pp. 582-588.
17. СП 23.13330.2011 Основания гидротехничеких сооружений.
18. Алексеев В.М., Калугин П.И. Физико-механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения. Воронеж: Изд-во ВГАСУ, 2009. 89 с.
19. Инструкция по определению механических характеристик грунтов методом статического трехосного сжатия / ВНИИГ. СПб., 2001.
20. Бугров А.К., Нарбут Р.М., Сипидин В.П. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия. Л.: Стройиздат, 1987. 184 с.
21. ASTM Designation: D 2435 – 96. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading.
22. BS 1377:Part 8:1990. Methods of test for soils for civil engineering purposes. Shear strength tests (effective stress).
23. Thu T.M., Rahardjo H., Leong E.C. Shear Strength and Pore Water Pressure Characteristics during Constant Water Content Triaxial Test // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2006. Vol. 136(3). Pp. 411-419.
24. Nyunt T.T., Leong E.C., Rahardjo H. Stress-strain behavior and shear strength of unsaturated residual soil from triaxial tests // Conference on Unsaturated Soils: Theory and Practice. Thailand, November 2011. Pp. 221-226.
25. Nuntasarn R., Cameron D.A. The unsaturated shear strengths of two compacted collapsiable soils // Conference on Unsaturated Soils: Theory and Practice. Thailand, November 2011. Pp 191-196.

** Нгуен Фыонг Зунг, Санкт-Петербург, Россия*
Тел. моб.: +7(965)767-16-35; эл. почта: hatmit_cep@mail.ru

© Гольдин А.Л., Нгуен Фыонг Зунг, 2012

doi: 10.5862/MCE.35.5

Plotting the stress-path for unsaturated soil during consolidated undrained tests in stabilometer

A.L. Goldin,
JSC Vedeneyev VNIIG, Saint-Petersburg, Russia;
Nguyen Fuong Dzung,
Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia
+7(965)767-16-35; e-mail: hatmit_cep@mail.ru

Key words

soil strength; water saturation degree; triaxial test for unsaturated soils; absorption; pore air pressure; pore water pressure

Abstract

It is almost impossible to do calculations by the effective stresses for unsaturated soils as excess pore pressure remains unknown.

Purpose of this research is to verify experimentally the basic statement of the N.N. Maslov's theory of density-humidity and Fredlund's theory of absorption for determining strength properties of binder soils and taking into account calculation of slope stability.

Tests of soils taken from the collapsed slope of the Hua-Na Hydropower Station (Vietnam) were conducted in stabilometer in consolidated-undrained state. The changes in strength parameters of the unsaturated soils depending on the value of absorption and therefore volume humidity are examined.

The stress paths were plotted for these samples; it can be used to determine the stress strain behavior of the soil, found knowing the initial absorption and stress.

References

1. Ivanov P.L. *Grunty i osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. Mekhanika gruntov* [Soil and foundation of hydraulic structures. Soil mechanics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1991. 447 p. (rus)
2. Bugrov A.K. Mekhanika gruntov [Soil mechanics]. Saint-Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007. 285 p. (rus)
3. Whitlow R. *Basic Soil Mechanics.* 2nd edition. Harlow, England: Longman Scientific & Technical; New York: Wiley&Sons Inc. 1990. 592 p.
4. Boldyirev G.G. *Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov. Sostoyaniye voprosa* [Methods for determining the soils mechanical properties. State of the problem]. Penza: PGUAS, 2008. 696 p. (rus)
5. Terzaghi K. *Theoretical Soil Mechanics*. N.Y.: Wiley, 1943. 507 p.
6. Terzaghi K. Stability of steep slope in Hard Unweathered Rock. *Geotechnique*. 1962. No. 4. Pp. 251-270.
7. Maslov N.N. *Mekhanika gruntov v praktike stroiteltstva (opolzni i borba s nimi)* [Soil mechanics in the construction practice (landslides and their control)]. Moscow: Stroiizdat, 1977. 320 p. (rus)
8. Fredlund D.G., Rahardjo H. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils.*New York: John Wiley & Sons Inc., 1993. 544 p.
9. Bishop A.W. The principle of effective stress. *Teknich Ukeblad*. 1959. Vol. 106. No. 39. Pp. 859-863.
10. Bishop A.W. The measurement of pore pressure in the triaxial test. Pore *Pressure and Suction in Soils Conference*. London: Butterworth, 1961. Pp. 38-46.
11. Richards L.A., Gardner W.R., Ogata G. Physical Processes Determining Water Loss from Soil. *Soil Sci. Soc. America Proc*. 1956. Vol. 20. Pp. 310-314.
12. Aitchison D. Relationship of moisture and effective stress functions in unsaturated soils. *Pore Pressure and Suction in Soils Conference*. London: Butterworths, 1961. Pp. 47-52.
13. Aitchison D., Donald I.B., Effective stresses in unsaturated soils. *Proceedings of the Second Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics*. Christchurch, New Zealand, 1956. Pp. 192-199.

14. Morgenstern N.R., Fredlund D.G. Stress state variables for unsaturated soils. *ASCE J. Geotech. Eng. Div. GT5*. 1977. Vol. 103. Pp. 447-466.

15. Fredlund D.G. The shear strength of unsaturated soils and its relationship to slope stability problem in Hong Kong. *The Hong Kong Engineer*. 1981. Vol. 9. No. 4. Pp. 37-45.

16. Fredlund D.G., Rahardjo H. State of development in the measurement of soil suction. *Proceeding of the International Conference on Engineering Problems of Regional Soils*. Beijing, China. 1988. Pp. 582-588.

17. *СП 23.13330.2011 Osnovaniya gidrotekhnichekikh sooruzheniy* [Foundations of hydraulic structures]. (rus)

18. Alekseiev V.M., Kalugin P.I. *Fiziko-mekhanicheskiye svoystva gruntov i laboratornyye metody ikh opredeleniya* [Physical and mechanical properties of soil and laboratory methods of their determination]. Voronezh:Izd-vo VGASU, 2009. Pp. 89 (rus)

19. *Instruktsiya po opredeleniyu mekhanicheskikh kharakteristik gruntov metodom staticheskogo trekhosnogo szhatiya* [User manual determining the soil mechanical properties by triaxial tests]. St.Petersburg: VNIIG im. B.E. Vedeneeva, 2001. Pp. 45 (rus)

20. Bugrov A.K., Narbut R.M., Sipidin V.P. *Issledovaniye gruntov v usloviyakh trekhosnogo szhatiya* [The soil study by triaxial compression apparatus]. Leningrad, 1987. 184 p. (rus)

21. *ASTM Designation: D 2435 – 96. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*.

22. *BS 1377:Part 8:1990. Methods of test for soils for civil engineering purposes. Shear strength tests (effective stress)*.

23. Thu T.M., Rahardjo, H., Leong E.C. Shear Strength and Pore Water Pressure Characteristics during Constant Water Content Triaxial Test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2006. Vol. 136(3). Pp. 411-419.

24. Nyunt T.T., Leong E.C., Rahardjo H. Stress-strain behavior and shear strength of unsaturated residual soil from triaxial tests. *Conference on Unsaturated Soils: Theory and Practice.* Thailand, November 2011. Pp. 221-226.

25. Nuntasarn R., Cameron D.A. The unsaturated shear strengths of two compacted collapsiable soils. *Conference on Unsaturated Soils: Theory and Practice.* Thailand, November 2011. Pp. 191-196.

Full text of this article in Russian: pp. 35-40