

## Исследование зависимости прочностных свойств грунта от его физического состояния

*Аспирант Нгуен Фьонг Зунг\**,

*ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

**Ключевые слова:** прочностные характеристики грунта; плотность; влажность; степень водонасыщения; трехосное испытание; одноплоскостной срез

Грунты гидротехнических сооружений и оснований находятся в основном в ненасыщенном состоянии и обладают разными плотностями. Прочностные свойства этих грунтов в пределах каждой строительной площадки могут быть крайне разнообразны и должны внимательно изучаться. Особенно это относится к тропическим и засушливым регионам, в зонах с умеренным климатом грунты, находящиеся выше уровня грунтовых вод, могут оставаться в ненасыщенном состоянии. Теория прочностных характеристик насыщенных грунтов, заложенная известными учеными [1-4], до сих пор является основой для геомеханических расчетов. Исследования проводились автором с конкретным грунтом в целях подтверждения теории для ненасыщенных грунтов.

Ненасыщенный грунт содержит между своими частицами воздух и воду. Присутствие сил поверхностного натяжения на границах раздела между воздухом и водой в ненасыщенном грунте позволяет существовать разным давлениям в воздухе и воде [5,6]. Некоторые частично водонасыщенные грунты имеют по контактам цементационные связи. При насыщении водой контакты разрушаются, и грунты теряют свою структуру. При оценке их прочности необходимо учитывать влажность в условиях их работы.

Нарушение устойчивости откосов обычно сопровождается значительными изменениями пористости пород в области сдвига, а следовательно, и плотности пород. В свою очередь, это сильно влияет на устойчивость откосов [7,8].

Целью этой работы является определение прочностных характеристик ненасыщенных грунтов при больших величинах степени водонасыщения. Образцы были взяты из откоса котлована ГЭС «Хуа-На» (Социалистическая республика Вьетнам), в котором произошел оползень в сезон дождей 2010 г. На начальном этапе был проведен расчет устойчивости с характеристиками прочности по естественному и водонасыщенному состоянию. В данной работе автором представлены результаты экспериментальных исследований прочностных характеристик грунтов при варьировании степени водонасыщения  $G$  и плотности грунта методом одноплоскостного среза и методом трехосного сжатия. Для испытаний применялись искусственно приготовленные образцы грунта нарушенной структуры [8,9,10].

По К. Терцаги [2] сопротивляемость глинистых грунтов сдвигу описывается выражением (1), предложенным в свое время Кулоном (XVIII в.) для песчаных грунтов:

$$\tau_p = p \cdot \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (1)$$

где  $\tau_p$  – сопротивляемость грунта сдвигу при нагрузке-давлении  $p$ ;  $\varphi$  – угол внутреннего трения;  $c$  – удельное сцепление.

Это выражение справедливо при методике испытания глинистых грунтов с предварительным обжатием образцов грунта под нагрузкой ( $p$ ). При этом условии каждая из точек линейного уравнения (1), отвечающая нагрузкам опыта ( $p$ ), будет характеризоваться в общем случае различными плотностями ( $\rho$ ) и влажностью ( $W$ )

По предложению Н.Н. Маслова, для сопротивляемости сдвигу глинистых грунтов была разработана теория «плотности-влажности» [8]. Согласно теории «плотности-влажности», величины угла внутреннего трения  $\varphi$  и начального сцепления  $c$  не остаются для большой группы грунтов некоторыми постоянными величинами, как это предусматривалось теорией Терцаги – Кулона в ее чистом виде. Более того, в теории «плотности-влажности» эти параметры были поставлены в прямую зависимость от начального состояния, и в первую очередь от влажности ( $W$ ) грунта, а также от приложенной к нему нагрузки ( $p$ ).

Завершающим эту теорию выражением явилась зависимость:

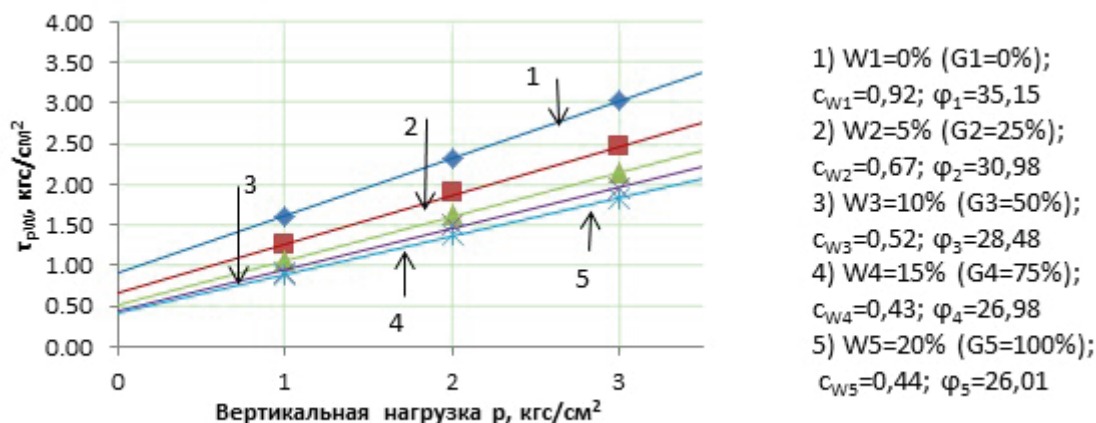
$$\tau_{pW} = p \cdot \operatorname{tg} \varphi_W + \Sigma_W + c_W = p \cdot \operatorname{tg} \varphi_W + c_W, \quad (2)$$

где  $\tau_{pW}$  – сопротивляемость грунта сдвигу при некоторой его плотности-влажности и воздействующей на него нагрузке;  $\varphi_W$  – истинный угол внутреннего трения, не зависящий от возрастающей с нагрузкой связности грунта;  $c_W$  – общее сцепление, зависящее от плотности-влажности грунта.

На рис. 1 приведена зависимость вида  $\tau_{pW} = f(p)$  для одной из разновидностей скрытопластичной глины при различной плотности-влажности ( $W_i$ ). На каждом из приведенных здесь лучей  $\tau_{pW} = f(p)$  для разных значений нагрузок ( $p_i$ ) плотность-влажность грунта ( $W$ ) остается постоянной. Следовательно, каждый из этих лучей отвечает испытываемому грунту в его состоянии определенной плотности-влажности. Отсюда, согласно теории Н.Н. Маслова, и связность  $\Sigma_{W_i}$  глинистого грунта, зависящая от его состояния плотности-влажности, для каждого из этих лучей при разных нагрузках остается также неизменной. Остается неизменным и начальное общее сцепление, определяемое природными свойствами грунта и начальным состоянием его плотности-влажности, например, природной влажностью  $W_{пр}$ .

Вместе с тем, присущие грунту истинный угол внутреннего трения ( $\varphi_{W_i}$ ) и начальная связность  $\Sigma_{W_i}$  являются для данного грунта функционально связанными с его плотностью-влажностью ( $W$ ).

По этому графику мы имеем возможность найти для заданного грунта величины  $\varphi_W$  и  $c_W$  и затем из выражения (2) – значение сопротивляемости грунта сдвигу ( $\tau_{pW}$ ) для любого его состояния плотности-влажности.



**Рисунок 1. Значение истинного угла внутреннего трения и общего сцепления в зависимости от плотности-влажности грунта**

График (рис. 2) строится для каждой из нагрузок  $p_i$  по найденной зависимости  $\tau_{pW} = f(W)$ .

Исходя из графика вида  $\tau_{pW} = f(p, W)$ , приведенного на рис. 2, представляется возможным найти значения  $\tau_{pW}$  при некоторых выбранных величинах  $W$ , для тех или иных принятых нагрузок  $p_i$ .

При неполном водонасыщении ( $G < 100\%$ ) характеристики прочности грунта увеличиваются и достигают максимального значения, когда  $G = 0\%$ , однако эта величина водонасыщения имеет лишь теоретическое значение, т.к. в природе грунт имеет некую влажность больше нуля [9,10]. Нахождение зависимости характеристик прочности грунта от состояния плотности-влажности имеет практическое значение, поскольку существенным вопросом при оценке устойчивости откосов является правильное определение параметров внутреннего трения и сцепления грунтов. Например, слои грунтов выше уровня грунтовых вод, не находящиеся под влиянием капиллярной каймы и поверхностных вод, должны иметь прочностные характеристики выше тех, которые были при полном водонасыщении.

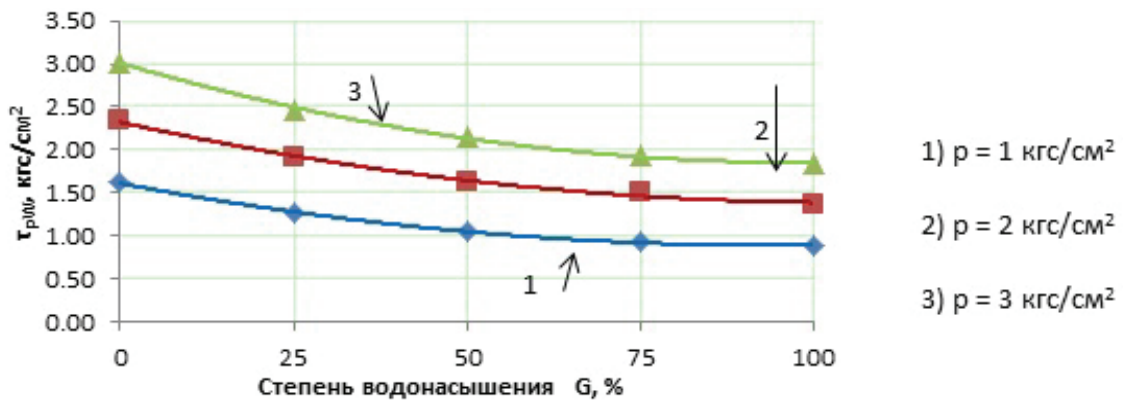


Рисунок 2. График первичной обработки данных опытов на сдвиг по методу «плотности-влажности»

На рис. 3 и 4 показана зависимость  $\phi$  и  $c$  от степени водонасыщения  $G$  и плотности  $\rho$ , что подтверждает теорию Н.Н. Маслова. В процессе проведения испытаний по схеме одноплоскостного среза поровое давление не измерялось. 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, так как грунт при контакте с водой при атмосферном давлении будет абсорбировать воду. При испытании на стабилометре эти значения были определены.

Метод статического трехосного сжатия водонасыщенных грунтов подразделяется на 3 стадии.

1. Этап реконсолидации грунта. Показателем водонасыщения служит параметр  $V = \Delta U / \Delta \sigma$ , где  $\Delta U$  и  $\Delta \sigma$  – приращения соответственно порового давления и гидростатической нагрузки к моменту измерения. При  $V \geq 0,95$  грунт считается полностью водонасыщенным.
2. Процесс консолидации. В данной работе были проведены консолидированно-недренированные испытания (КН).
3. Этап разрушения образцов [11,12,13].

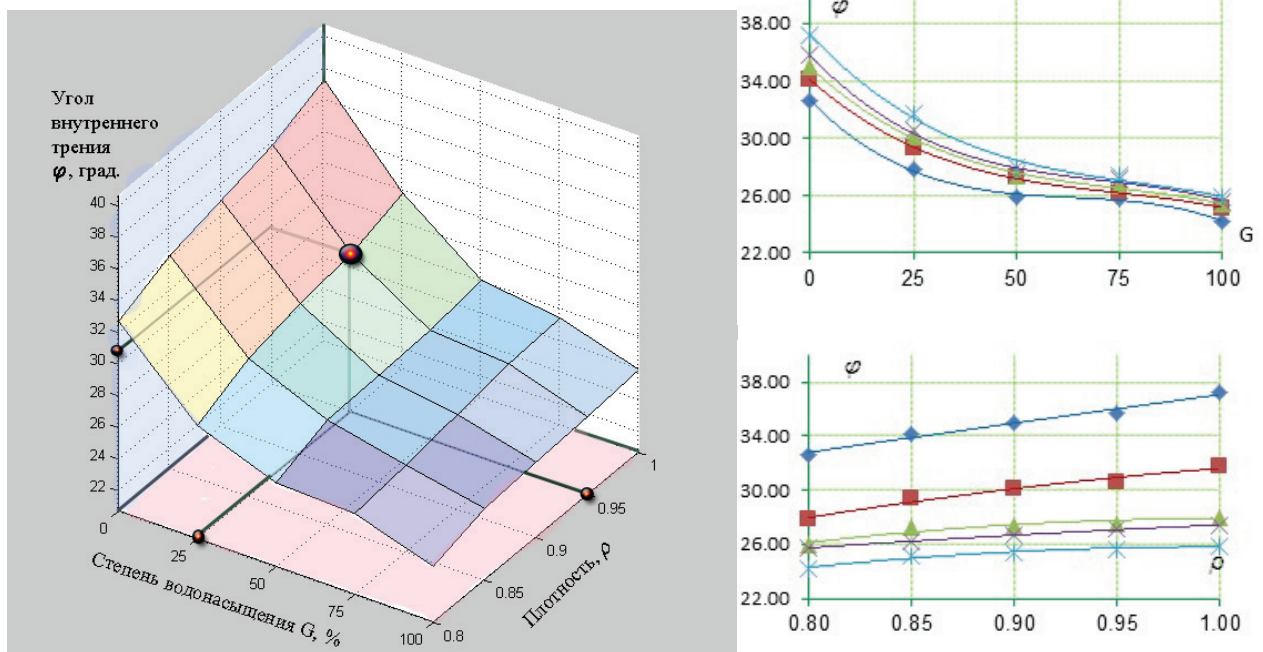


Рисунок 3. График зависимости  $\phi$  от степени водонасыщения  $G$  и плотности  $\rho$

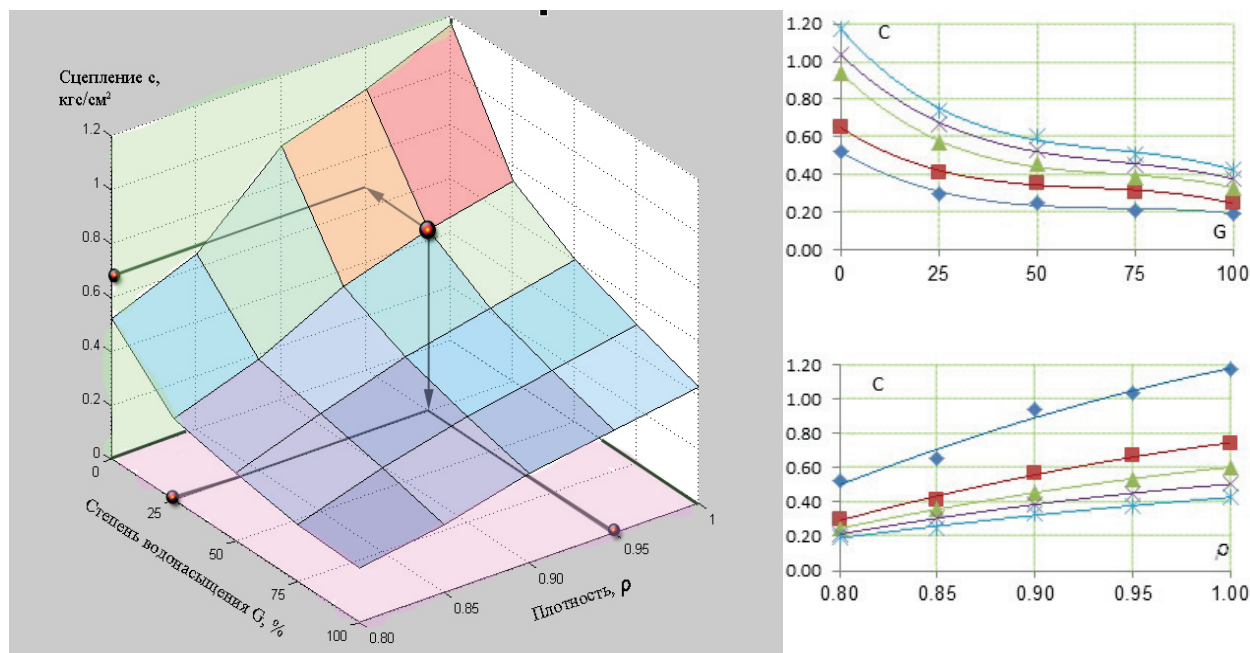


Рисунок 4. График зависимости  $c$  от степени водонасыщения  $G$  и плотности  $\rho$

Образец грунта в стабилометре доводят до момента разрушения, которое происходит либо в виде образования «бочки», либо в виде «скола». Объяснение вида разрушения образца можно осуществить с помощью значения давления предуплотнения  $P'_c$  [11]. Определение значения  $P'_c$  по методу Казангранде [11] выполняется в компрессионных приборах, обеспечивающих передачу на образец вертикальных напряжений. Если эффективное давление меньше давления предуплотнения (коэффициент переуплотнения  $OCR > 1$ ), то образец характеризуется упругими деформациями [14,15,16], форма разрушения приобретает вид «скола»; иначе образец испытывает и упругие, и остаточные деформации (коэффициент переуплотнения  $OCR \leq 1$ ), форма разрушения приобретает вид «бочки». Проведены экспериментальные исследования деформирования глинистых грунтов в условиях статического трехосного сжатия при девиаторном нагружении  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ . После испытаний получены характерные картины разрушения опытных образцов следующего вида:

- при начальном эффективном напряжении  $\sigma'_{1,3} = 50$  кПа разрушение образца имеет вид «скола» (рис. 5а);
- при  $\sigma'_{1,3} = 100, 200$  кПа разрушение образца имеет вид «бочки» (рис. 5б).



Рисунок 5: а – разрушение образцов в виде «скола»; б – в виде «бочки»



По результатам испытания образцов грунта в условиях трехосного сжатия определены:

- при различных значениях  $\sigma'_{1,3} = 50; 100; 200$  кПа абсолютная вертикальная деформация образца грунта:  $\Delta h = 10,32$  мм;  $12,28$  мм;  $15,24$  мм;
- относительная вертикальная деформация при разрушении  $\varepsilon_1 = 12,57\%$ ;  $15,31\%$ ;  $19,74\%$ .

По результатам испытаний для первого образца (начальное эффективное напряжение  $\sigma'_{1,3} = 50$  кПа) построен график зависимости относительной вертикальной деформации от разности напряжений ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) (рис. 6). В момент разрушения эффективные напряжения достигают:  $\sigma'_3 = 28,1$  кПа и  $\sigma'_1 = 178,7$  кПа.

Прочностные характеристики  $\varphi$  и  $c$  определены по кругам предельных напряжений:  $\text{tg} \varphi = 0,39$  ( $\varphi = 21^\circ 30'$ ) и  $c = 0,29$  кгс/см<sup>2</sup> (рис. 7).

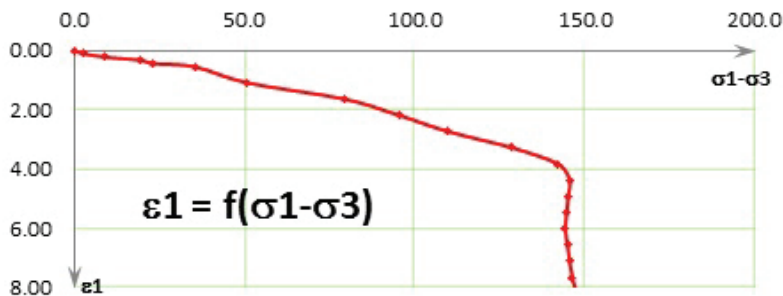


Рисунок 6. Зависимость относительной вертикальной деформации от девиаторного нагружения

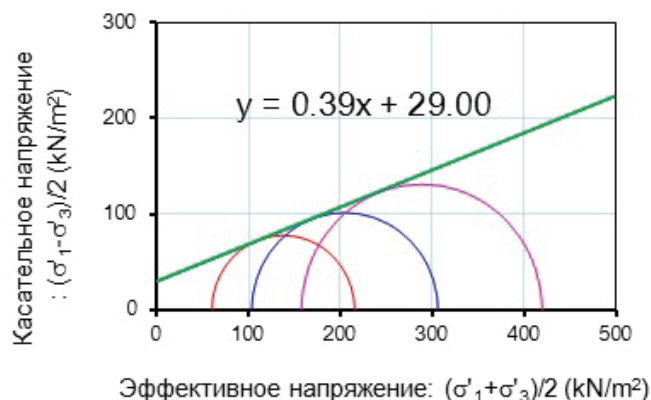


Рисунок 7. Круги предельных напряжений, построенные по результатам испытаний на приборе трехосного сжатия стабилометрического типа

Следует отметить, что прочностные характеристики определены испытаниями насыщенных образцов грунта, а испытания ненасыщенных грунтов описываются в исследованиях [17,18].

Полученные значения  $\varphi$  и  $c$  приведены в табл. 1. Отметим, что между результатами испытаний на разных приборах не наблюдается больших различий в значениях  $\varphi$  и  $c$ . Величина  $\varphi$  уменьшалась на 14,8%, а значение  $c$  уменьшалось на 25,6% по сравнению с испытаниями при одноплоскостном срезе.

**Таблица 1. Сравнение прочностных характеристик по схеме одноплоскостного среза и трехосного сжатия.**

| Характеристики прочности   | Метод испытания      |                  |
|----------------------------|----------------------|------------------|
|                            | одноплоскостной срез | трехосное сжатие |
| $\varphi$ (°)              | 25°35'               | 21° 30'          |
| $c$ (кгс/см <sup>2</sup> ) | 0,39                 | 0,29             |

Необходимо отметить различия в результатах испытаний других авторов [19-21], которые можно объяснить следующими факторами:

- при использовании метода одноплоскостного среза не учитывается коэффициент бокового расширения  $\mu$ ;
- плоскость разрушения на приборе одноплоскостного среза определена заранее;
- при испытании грунтов методом статического трехосного сжатия происходит боковое расширение, кроме того, образец был реконсолидирован перед испытанием, таким образом, расчетная плоскость разрушения хорошо совпадает с теоретической.

### Выводы

1. Результаты испытаний на приборе одноплоскостного среза и на приборе статического трехосного сжатия дают небольшое различие. Величины  $\varphi$  и  $c$ , полученные при одноплоскостном срезе, больше значений, полученных при трехосных испытаниях.
2. Чем выше значение плотности скелета грунта, тем больше его характеристики прочности.

### Литература

1. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1991. 447 с.
2. Terzaghi K. Stability of steep slope in Hard Unweathered Rock // Geotechnique. 1962. Vol. 12. №4. Pp. 251-270.
3. Bishop A.W. The strength of Soils as Engineering Materials // Geotechnique. 1966. Vol. 16. №2. Pp. 91-128.
4. Whitlow R. Basic Soil Mechanics. New York: Wiley. 592 p.
5. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Основы гидрогеомеханики. М., изд. «Недра», 1974. 296 с.
6. Braja M. Das. Advanced Soil Mechanics. New York: Taylor & Francis Group, 2008. 567 p.
7. Абелев М.Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах. М.: Стройиздат, 1983. 248 с.
8. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними). М.: Стройиздат, 1977. 320 с.
9. Бугров А.К. Механика грунтов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 285 с.
10. Зарецкий Ю.К. Лекции по современной механике грунтов. Ростов: Изд-во Ростовского университета, 1989. 608 с.
11. СП 23.13330.2011 Основания гидротехнических сооружений.
12. ГОСТ 12248–96. Грунты. Метод лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
13. ASTM Designation: D 2435 – 96. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading.
14. Бугров А.К., Нарбут Р.М., Сипидин В.П. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия. Л.: Стройиздат, 1987. 184 с.
15. Бугров А.К., Сластенко В.К. Механика грунтов. Методы полевого определения характеристик грунтов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 71 с.
16. Алексеев В.М., Калугин П.И. Физико-механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения. Воронеж: Изд-во ВГАСУ, 2009. 89 с.
17. 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.
18. Nuntasarn R., Cameron D.A. The unsaturated shear strengths of two compacted collapsible soils // Unsaturated Soils: Theory and Practice. 2011. Pp. 191-196.
19. Засорина О.А. Исследование параметров природного напряженного состояния глинистых грунтов методами компрессионного и трехосного сжатия. // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2010. №260. С. 69-77.
20. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Исследования механических свойств глинистых грунтов в условиях пространственного напряженного состояния // Известия КГАСУ. 2010. №1(13). С. 170- 175.
21. Жиленков В.Н. Характерная особенность консолидированного линейного уплотнения водонасыщенных глинистых грунтов и торфа под воздействием внешних нагрузок // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2010. №258. С. 87-92.

\* Нгуен Фьонг Зунг, Санкт-Петербург, Россия

Тел. моб.: +7(965)767-16-35; эл. почта: hatmit\_ser@mail.ru

© Нгуен Фьонг Зунг, 2012

doi: 10.5862/MCE.35.3

## The dependence of the strength properties of soil on its physical state

**Nguyen Phuong Dzung,**

*Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia*

+7(965)767-16-35; e-mail: *hatmit\_cep@mail.ru*

### Key words

strength properties of soil; density; moisture; water saturation degree; triaxial test; direct shear apparatus

### Abstract

Soils of hydraulic facilities and foundations are basically in the unsaturated state. Strength properties of these soils inside of each building area may be extremely various and should be carefully studied. It especially applies to tropical and arid areas. Soils that are above ground waters can remain in the unsaturated state in the areas with temperate climate.

Research results of the dependence of the soil strength on its physical state (density and moisture) are presented. It was found that increase in the soil density brings to increase in the angle of internal friction and cohesion, but increase in the moisture, on the contrary – to its decrease. Collapse mode of specimens tested in stabilometer depends on how the value of the effective vertical stress relates to preconsolidation pressure, determined by compression test.

### References

1. Ivanov P.L. *Grunty i osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy*. Mekhanika gruntov [Soils and foundations of hydraulic structures. Soil mechanics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1991. 447 p. (rus)
2. Terzaghi K. Stability of steep slope in Hard Unweathered Rock. *Geotechnique*. 1962. Vol. 12. No. 4. Pp.251-270.
3. Bishop A.W. The strength of Soils as Engineering Materials. *Geotechnique*. 1966. Vol.16. No. 2. Pp. 91-128.
4. Whitlow R. *Basic Soil Mechanics*. 2<sup>nd</sup> edition. Harlow, England: Longman Scientific & Technical; New York: Wiley&Sons Inc. 1990. 592 p.
5. Mironhenko V.A. , Shestakov V.M. *Osnovy gidrogeomekhaniki* [The basics of hydrogeomechanics]. Moscow: Nedra, 1974. 296 p. (rus)
6. Braja M. Das. *Advanced Soil Mechanics*. New York: Taylor & Francis Group, 2008. 567 p.
7. Abelev M.I.Y. *Stroitelstvo promyshlennykh i grazhdanskiykh sooruzheniy na slabyykh vodonasyshchennykh gruntakh* [Construction of industrial and civil structures on weak saturated soils]. Moscow: Stroyizdat, 1983. 248 p. (rus)
8. Maslov N.N. *Mekhanika gruntov v praktike stroitelstva (opolzni i borba s nimi)* [Soil mechanics in the construction practice (landslides and their control)]. Moscow: Stroyizdat, 1977. 320 p. (rus)
9. Bugrov A.K. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Saint-Petersburg: Izd-vo Politekh. un-ta, 2007. 285 p. (rus)
10. Zareskiy Yu.K. *Lektsii po sovremennoy mekhanike gruntov* [Lectures on the modern soil mechanics]. Rostov: Izd-vo Rostovskogo universiteta, 1989. 608 p. (rus)
11. SP 23.13330.2011 *Osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Foundation hydraulic engineering constructions].
12. GOST 12248 – 96. *Grunty. Metod laboratornogo opredeleniya kharakteristik prochnosti i deformiruyemosti* [Soils. Laboratory methods for determining strength and strain characteristics].
13. ASTM Designation: D 2435 – 96. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading.
14. 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)

15. Bugrov A.K., Slastenko V.K. *Mekhanika gruntov. Metody polevogo opredeleniya kharakteristik gruntov* [Soil mechanics. Methods of field determining characteristics of soils]. Saint-Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2006. 71 p. (rus)
16. 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. 89 p. (rus)
17. 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. 132(3). Pp. 411-419.
18. Nuntasarn R., Cameron D.A. The unsaturated shear strengths of two compacted collapsible soils. *Unsaturated Soils: Theory and Practice*. 2011. Pp. 191-196.
19. Zasorina O.A. *Ivestia VNIIG im. B.E. Vedeneeva*. 2010. No. 260. Pp. 69-77. (rus)
20. Mirsaipov I.T., Koroleva I.V. *Ivestia KGASU*. 2010. No. 1(13). Pp. 170- 175. (rus)
21. Zhilenkov V.N. *Ivestia VNIIG im. B.E. Vedeneeva*. 2010. No. 258. Pp. 87-92. (rus)

**Full text of this article in Russian: pp. 23-28**