Богомолов А.Н., Подтелков В.В., Цветкова Е.В., Богомолова О.А. Взаимосвязь между прочностными характеристиками слагающего грунта и геометрией однородного ненагруженного откоса в предельном состоянии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 29–36. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.03

Bogomolov A.N., Podtelkov V.V., Tsvetkova E.V., Bogomolova O.A. Interrelation between strength characteristics of the composing soil and the geometry of homogeneous slope unloaded at the ultimate state. *PNRPU Bulletin Construction and architecture*. 2016. Vol. 7, No. 2. Pp. 29-36. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.03

**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
Т. 7, № 2, 2016
PNRPU BULLETIN
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.03

УДК 624.131

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ПРОЧНОСТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СЛАГАЮЩЕГО ГРУНТА И ГЕОМЕТРИЕЙ ОДНОРОДНОГО НЕНАГРУЖЕННОГО ОТКОСА В ПРЕДЕЛЬНОМ СОСТОЯНИИ

А.Н. Богомолов, В.В. Подтелков, Е.В. Цветкова, О.А. Богомолова

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, Волгоград, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 02 февраля 2016
Принята: 24 февраля 2016
Опубликована: 30 июня 2016

Ключевые слова:

физико-механические свойства, трансформация напряжений, предельное напряженное состояние грунтового массива, однородный откос, угол заложения, коэффициент бокового давления

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются вопросы зависимости физико-механических характеристик грунтов от факторов, определяющих их напряженное состояние. Поскольку переход от прочностных и деформационных характеристик, полученных в лабораторных условиях для образцов грунта, к аналогичным характеристикам, соответствующим ненарушенному грунтовому массиву, в настоящее время недостаточно обоснован, необходимо проводить исследования, направленные на установление аналитических зависимостей между прочностными свойствами грунтов и параметрами, определяющими их напряженное состояние. Для установления взаимосвязи между прочностными характеристиками слагающего грунта и геометрией однородного ненагруженного откоса в предельном состоянии проанализированы результаты ранее выполненных исследований. На примере однородного, изотропного и прямолинейного грунтового откоса показано, что прочностные свойства слагающего грунта находятся в определенной взаимной зависимости, если уровень напряжений таков, что приоткосная область оказалась в предельном состоянии. Наиболее подробно рассмотрены зависимости угла внутреннего трения от угла заложения откоса при различных значениях коэффициента бокового давления. Выполнены расчеты и составлена модернизированная таблица предельных прочностных характеристик грунтов. Приведены графические и аналитические зависимости, позволяющие проиллюстрировать установленные закономерности.

© ПНИПУ

© **Богомолов Александр Николаевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, e-mail: banzaritcyn@mail.ru.

Подтелков Василий Владимирович – кандидат технических наук, профессор, e-mail: vvp2000@mail.ru.

Цветкова Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: elentsvetkova@yandex.ru.

Богомолова Оксана Александровна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: banzaritcyn@mail.ru.

Aleksandr N. Bogomolov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, e-mail: banzaritcyn@mail.ru.

Vasilii V. Podtelkov – Ph.D. in Technical Sciences, Professor, e-mail: vvp2000@mail.ru.

Elena V. Tsvetkova – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: elentsvetkova@yandex.ru.

Oksana A. Bogomolova – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: banzaritcyn@mail.ru.

INTERRELATION BETWEEN STRENGTH CHARACTERISTICS OF THE COMPOSING SOIL AND THE GEOMETRY OF HOMOGENEOUS SLOPE UNLOADED AT THE ULTIMATE STATE

A.N. Bogomolov, V.V. Podtelkov, E.V. Tsvetkova, O.A. Bogomolova

Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, Volgograd, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 02 February 2016
Accepted: 24 February 2016
Published: 30 June 2016

Keywords:

physico-mechanical properties,
transformation of stress, ultimate
stress state of the soil, homogene-
ous slope, the angle of laying, lat-
eral pressure coefficient

ABSTRACT

In work questions of dependence of physicomachanical characteristics of soil on the factors that determine their stress state. As transition from the strength and deformation characteristics received the laboratory for soil samples to the similar characteristics corresponding to the undisturbed soil massif is insufficiently reasonable now, it is necessary to conduct the researches directed to establishment of analytical dependences between the strength properties of soil and parameters defining their stress state. For establishment of interrelation between strength characteristics of the composing soil and geometry of homogeneous unloaded slope in ultimate states are analysed earlier executed researches. For example, homogeneous, isotropic and linear of the soil slope shows that the strength properties composing the soil are, to a certain mutual dependence, if the stress level is such that priodonta region was in the ultimate state. More detail the dependence of the angle of internal friction from the angle of laying the slope for different values of lateral pressure coefficient. The calculations are made and composed of streamlined table ultimate strength characteristics of soils. Graphical and analytical dependences, allowing to illustrate the regularities.

© PNRPU

Считается очевидным, что физико-механические свойства грунта находятся в некоторой функциональной зависимости от напряженного состояния массива: в зависимости от уровня и вида нагружения происходит изменение упругих и прочностных характеристик грунта, которые в предельном состоянии оказываются существенно больше соответствующих значений, определенных опытным путем [1–3].

При расчете грунтовых массивов по первому предельному состоянию, например при расчете устойчивости откосов, используются прочностные характеристики образцов грунтов, полученные в результате лабораторных испытаний. Однако в зависимости от того, каким способом определяется та или иная прочностная характеристика, ее численное значение может быть разным [4–5]. Это обстоятельство является одним из множества других, указывающих на то, что переход от прочностных и деформационных характеристик, полученных в лабораторных условиях для образцов грунта, к аналогичным характеристикам, соответствующим ненарушенному грунтовому массиву, в настоящее время недостаточно обоснован. Поэтому необходимо проводить исследования, направленные на установление аналитических зависимостей между прочностными свойствами грунтов и параметрами, определяющими их напряженное состояние.

Рассмотрим однородные и изотропные откосы одинаковой высоты и сложенные одинаковым грунтом. Тогда разница напряженных состояний этих откосов будет определяться одним геометрическим параметром – углом заложения откоса β .

В работе [6] представлена формула для вычисления величины коэффициента запаса устойчивости однородного и изотропного прямолинейного откоса при любой имеющей физический смысл величине коэффициента бокового давления грунта ξ_0 .

$$K = \frac{4}{7}(1 + \xi_o) \left(\frac{2ac}{\gamma h} + b \operatorname{tg} \varphi \right), \quad (1)$$

где ξ_o – коэффициент бокового давления грунта; c – удельное сцепление; γ – объемный вес; h – высота откоса; φ – угол внутреннего трения; действительные положительные коэффициенты a и b определяются в зависимости от угла откоса β и находятся по графикам [7] (рис. 1).

Следует отметить, что формула (1) получена на основе аналитического решения первой основной граничной задачи теории упругости для весомой однородной полуплоскости с криволинейной границей и методики построения наиболее опасной поверхности разрушения, положение и форма которой определяются из условия минимальности численного значения коэффициента запаса устойчивости ($K = K_{\min}$) в каждой ее точке. Величина коэффициента запаса устойчивости в точке грунтового массива определяется отношением удерживающих и сдвигающих сил, действующих вдоль наиболее вероятной площадки сдвига, проходящей через эту точку.

Полагая в формуле (1) $K = 1$, что соответствует предельному состоянию приоткосной области, автор работы [6] преобразует ее к виду

$$\frac{c}{\gamma h} = \frac{1}{2a} \left[\frac{7}{4(1 + \xi_o)} - b \operatorname{tg} \varphi \right]. \quad (2)$$

Далее, считая, что $c > 0$, автор утверждает, что

$$\operatorname{tg} \varphi < \frac{7}{4b(1 + \xi_o)}. \quad (3)$$

Далее процитируем автора работы [6]: «Соотношение (2) устанавливает в приоткосных зонах зависимости между предельными значениями физико-механических характеристик различных грунтов. Если считать величины h , γ , ξ_o , a и b известными, то при различных углах откоса β имеем соотношения между c и φ грунтов приоткосных зон, находящихся в предельном состоянии. Неравенство (3) обеспечивает возможность перехода приоткосной зоны в предельное состояние и показывает, что угол φ в данном случае зависит от β и ξ_o и не зависит от величины сцепления грунта».

Исходя из этих соображений, автором работы [6] выполнены расчеты и составлена таблица предельных прочностных характеристик грунтов, которую мы дополнили ячейками значений φ при $\beta = 0$, ранее отсутствовавшими, а столбец значений $(c/\gamma h)$ заменили столбцом значений $\sigma_{\text{св}}$.

Рис. 1. Графики для определения коэффициентов a и b в формуле (1) [8]

Fig. 1. Charts to determine the coefficients a and b in the formula (1) [8]

Такая замена объясняется тем, что в работе [6] указано на то, что формула (3) не учитывает изменение угла φ при увеличении угла β и, следовательно, «количественная оценка изменения сцепления в данном случае не корректна».

Численные значения угла внутреннего трения φ при угле заложения откоса $\beta = 0$ были взяты из наших работ [8, 9], где приведено решение задачи о нахождении величины коэффициента бокового давления для слоя однородного и изотропного грунта бесконечной толщины, находящегося в предельном состоянии.

Рис. 2. Графические зависимости вида $K = f(\xi_0)$ для слоя бесконечной толщины однородного и изотропного грунта при различных значениях угла внутреннего трения φ (а); графические зависимости вида $\varphi = f(\xi_0)$ для слоя бесконечной толщины однородного и изотропного грунта, находящегося в предельном состоянии (б)

Fig. 2. Graphic dependence of the form $K = f(\xi_0)$ for a layer of infinite thickness and an isotropic homogeneous soil for different values of angle of internal friction φ (a); graphic according to the type $\varphi = f(\xi_0)$ for a layer of infinite thickness, homogeneous and isotropic soil in the ultimate state (b)

При решении этой задачи последовательно получены графические зависимости, приведенные на рис. 2; аналитическая аппроксимация второй из них дает выражение, позволяющее вычислять величину угла внутреннего трения грунта φ в зависимости от величины коэффициента бокового давления ξ_0 в момент перехода в предельное состояние:

$$\varphi = -24,709 \ln(\xi_0). \quad (4)$$

Как видно из формул (3) и (4), величина угла внутреннего трения в обоих случаях не зависит от удельного сцепления грунта.

Считаем необходимым отметить еще один результат, приведенный в работе [8]. Теоретически показано, что между углом ориентации [10] наиболее вероятной площадки разрушения, проходящей через рассматриваемую точку грунтового массива, и углом внутреннего трения в предельном состоянии существует зависимость

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что для идеально связного грунта $\alpha = 90^\circ$, а для идеально сыпучего – $\alpha = 45^\circ$, т.е. в бесконечно толстом слое, заполненном идеально связной средой, наиболее вероятная поверхность разрушения совпадает с поверхностью слоя; если среда идеально сыпучая, то наклонена к вертикали под углом 45° .

Для грунтов, обладающим и внутренним трением и сцеплением, величина угла α в зависимости от величины коэффициента бокового давления грунта может быть определена по графику (рис. 3) или вычислена по формуле

$$\alpha = -12,181 \ln(\xi_0) + 45, \quad (6)$$

где коэффициенты имеют размерность [град].

Заполнение столбца значений $\sigma_{св}$ стало возможно после того, как (учитывая, что $\sigma_{св} = c(\gamma h \tan \varphi)^{-1}$) выражение (1) было преобразовано к виду

$$\sigma_{св} = \frac{1}{2a} \left[\frac{7}{4 \tan \varphi (1 + \xi_0)} - b \right]. \quad (7)$$

Беря средние значения коэффициента бокового давления для представленных в таблице четырех видов грунтов, определяя по графикам (см. рис. 1) численные значения коэффициентов a и b и выполняя вычисления по формуле (7), получим соответствующие значения величины $\sigma_{св}$ в предельном состоянии.

Численные значения величины $\sigma_{св}$ при $\beta = 0$ приняты равными нулю ввиду того, что из графиков, представленных в работе [2] (см. рис. 1), следует, что при $\beta \rightarrow 0$ численные значения коэффициента $a \rightarrow \infty$.

Таким образом, если считать численные значения величин h , γ , ξ_0 , a и b известными, то для откосов с различными углами заложения β может быть установлено в явном виде соотношение между прочностными характеристиками c и φ грунтов приоткосных зон, которые находятся в предельном состоянии (таблица).

Для более полного анализа данных, приведенных в таблице, на рис. 4 изображены графические зависимости вида $\varphi = f(\beta)$ при различных значениях величин коэффициента бокового давления ξ_0 для однородных откосов, находящихся в предельном состоянии. Из рис. 4 видно, что при $\xi_0 = 0,75$ эта зависимость практически линейна, однако при уменьшении величины ξ_0 она становится явно не линейной.

И величина коэффициента бокового давления грунта ξ_0 , и угол заложения откоса β оказывают влияние на величины угла внутреннего трения φ и приведенного давления связности $\sigma_{св}$ в предельном состоянии. Причем при изменении угла заложения откоса β от 0 до 60° величина φ при $\xi_0 = 0,75$ увеличивается в 4,87 раза, при $\xi_0 = 0,65$ – в 3,4 раза,

Рис. 3. График зависимости $\alpha = f(\xi_0)$ для однородного, изотропного и бесконечно толстого слоя грунта с горизонтальной границей
Fig. 3. A graph of $\alpha = f(\xi_0)$ for homogeneous, isotropic, and infinitely thick layer of soil with a horizontal border

Пределные прочностные характеристики грунтов

Ultimate strength characteristics of soils

№ п/п	Грунты	ξ_o	β	φ	$\sigma_{св}$
1	Глины	0,75	0	7,1	0
			20	15,7	0,00051
			40	24,9	0,00057
			60	34,6	0,00058
2	Суглинки	0,65	0	10,64	0
			20	16,6	0,0282
			40	26,3	0,0177
			60	36,2	0,0175
3	Супеси	0,55	0	14,77	0
			20	17,6	0,0444
			40	27,7	0,0371
			60	37,9	0,0373
4	Пески	0,42	0	21,44	0
			20	22,10	0,069
			40	29,8	0,0664
			60	40,4	0,0673

Рис. 4. Графические зависимости вида $\varphi = f(\beta)$ при различных значениях величин коэффициента бокового давления ξ_o для однородных откосов, находящихся в предельном состоянии

Fig. 4. Graphic dependence of the form $\varphi = f(\beta)$ at different values of lateral pressure coefficient ξ_o for homogeneous slopes in the ultimate state

при $\xi_o = 0,55$ – в 2,57 раза и при $\xi_o = 0,42$ – в 1,88 раза. Влияние величины коэффициента бокового давления ξ_o на величину приведенного давления связности $\sigma_{св}$ еще более существенно: так, при $\xi_o = 0,75$ и $\beta = 60^\circ$ величина $\sigma_{св} = 0,00058$, а при $\xi_o = 0,42$ и том же значении $\beta = 60^\circ$ величина $\sigma_{св} = 0,0673$, т.е. увеличилась в 116 раз.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что изменение напряженного состояния однородного и изотропного откоса влечет за собой изменение их физико-механических свойств. С повышением значений углов заложения откосов происходят

трансформация полей напряжений и увеличение их интенсивности в приоткосных областях, влекущие за собой значительное повышение предельных значений углов внутреннего трения и приведенного давления связности грунтов.

Библиографический список

1. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1991. – 447 с.
2. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства (Оползни и борьба с ними). – М.: Стройиздат, 1983. – 248 с.
3. Зарецкий Ю.К. Лекции по современной механике грунтов. – Ростов н/Д: Изд-во Ростов. гос. ун-та, 1989. – 608 с.
4. Бугров А.К., Сластенко В.К. Механика грунтов. Методы полевого определения характеристик грунтов. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 71 с.
5. Алексеев В.М., Калугин П.И. Физико-механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения. – Воронеж: Изд-во ВГАСУ, 2009. – 89 с.
6. Цветков В.К. Связь между напряженным состоянием и прочностными характеристиками грунтовых массивов // Естественные науки. Технология строительного производства. Тепло-, газо- и водоснабжение: материалы ежегод. науч.-практ. конф. профессорско-преподавательского состава и студентов: в 3 ч. (ВолгГАСУ, 24–27 апреля 2007 г.). – Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2008. – Ч. 2. – С. 185–187.
7. Цветков В.К. Расчет рациональных параметров горных выработок: справ. пособие. – М.: Недра, 1993. – 291 с.
8. Богомолов А.Н., Шиян С.И., Богомолова О.А. К вопросу о минимальных значениях коэффициента бокового давления грунтов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Естественные науки. – 2007. – Вып. 6 (23). – С. 110–114.
9. Богомолов А.Н., Шиян С.И. К вопросу об определении значений коэффициента бокового давления грунтов // Вестник отделения строительных наук. – 2009. – Вып. 13, т. 1. – С. 50–56.
10. К вопросу об определении угла ориентации площадки наиболее вероятного сдвига в точке грунтового массива / А.Н. Богомолов, М.М. Степанов, О.А. Богомолова, С.И. Шиян // Городские агломерации на оползневых территориях: материалы V Междунар. конф. по геотехнике (Волгоград, 22–24 сентября 2010 г.). – Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2010. – С. 291–297.

References

1. Ivanov P.L. Grunty i osnovaniia gidrotekhnicheskikh sooruzhenii. Mekhanika gruntov [Soils and foundations of hydraulic structures. Soil mechanics]. Mocsow: Vysshiaia Shkola, 1991. 447 p.
2. Maslov N.N. Mekhanika gruntov v praktike stroitel'stva (Opolzni i bor'ba s nimi) [Soil mechanics in construction practice (Landslides and their control)]. Moscow: Stroiizdat, 1983. 248 p.
3. Zaretskii Iu.K. Leksii po sovremennoi mekhanike gruntov [Lectures on modern soil mechanics]. Rostovskii gosudarstvennyi universitet, 1989. 608 p.

4. Bugrov A.K., Slastenkov V.K. Mekhanika gruntov. Metody polevogo opredeleniia kharakteristik gruntov [Soil mechanics. Field methods characterization of soils]. Saint-Petersburg: Politekhnikeskii universitet, 2006. 71 p.
5. Alekseev V.M., Kalugin P.I. Fiziko-mekhanicheskie svoistva gruntov i laboratornye metody ikh opredeleniia [Physical-mechanical properties of soils and laboratory methods of its determination]. Voronezhskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet, 2009. 89 p.
6. Tsvetkov V.K. Sviaz' mezhdu napriazhennym sostoianiem i prochnostnymi kharakteristikami gruntovykh massivov [The relationship between stress state and strength characteristics of soil layers]. *Materialy ezhegodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava i studentov "Estestvennye nauki. Tekhnologiya stroitel'nogo proizvodstva. Teplo-, gazo- i vodosnabzhenie"*. Volgogradskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet, 2008, part 2, pp. 185-187.
7. Tsvetkov V.K. Raschet ratsional'nykh parametrov gornykh vyrabotok [Calculation of rational parameters of mine workings]. Moscow: Nedra, 1993. 291 p.
8. Bogomolov A.N., Shiian S.I., Bogomolova O.A. K voprosu o minimal'nykh znacheniiakh koeffitsienta bokovogo davleniia gruntov [To the question of the minimum values of the coefficient of lateral soil pressure]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*, 2007, iss. 6 (23), pp. 110-114.
9. Bogomolov A.N., Shiian S.I. K voprosu ob opredelenii znachenii koeffitsienta bokovogo davleniia gruntov [To the question of determining the values of the coefficient of lateral soil pressure]. *Vestnik otdeleniia stroitel'nykh nauk*. 2009, iss. 13, vol. 1, pp. 50-56.
10. Bogomolov A.N., Stepanov M.M., Bogomolova O.A., Shiian S.I. K voprosu ob opredelenii ugla orientatsii ploshchadki naibolee veroiatnogo sdviga v tochke gruntovogo massiva [To the question about the definition of the orientation angle of the platform most likely to shear at the point of a soil mass]. *Materialy V Mezhdunarodnoi konferentsii po geotekhnike "Gorodskie aglomeratsii na opolznevnykh territoriiakh"*. Volgogradskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet, 2010, pp. 291-297.