

РАСЧЕТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ФУНДАМЕНТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ ИХ ВОДОНАСЫЩЕНИЯ

DESIGN RESISTANCE OF FOUNDATION SOILS DEPENDING ON THEIR WATER SATURATION DEGREE

ТЕР-МАРТИРОСЯН З.Г.

Заведующий кафедрой механики грунтов, оснований и фундаментов (МГрОиФ) Московского государственного строительного университета (МГСУ), д.т.н., профессор,
г. Москва, mgroif@mail.ru

СИДОРОВ В.В.

Старший преподаватель и аспирант кафедры МГрОиФ МГСУ, г. Москва, vitsid@mail.ru

НГУЕН Х.Х.

Аспирант кафедры МГрОиФ МГСУ, г. Москва, huyhiep_1984@yahoo.com

TER-MARTIROSIAN Z.G.

The head of the department of soil mechanics and foundation engineering of Moscow State University of Civil Engineering (MSUCE), doctor of technical sciences, professor,
Moscow, mgroif@mail.ru

SIDOROV V.V.

A senior lecturer and postgraduate student of MSUCE, Moscow, vitsid@mail.ru

NGUEN H.H.

A postgraduate student of MSUCE, Moscow, huyhiep_1984@yahoo.com

Ключевые слова:

расчетное сопротивление; степень водонасыщения; избыточное поровое давление; газосодержащая вода; критическая нагрузка; растворенный воздух; сжимаемость; поверхностное натяжение.

Key words:

design resistance; water saturation degree; excess pore pressure; gas-containing water; critical load; dissolved air; compressibility; surface tension.

Аннотация

В статье приводится аналитическое и численное решение задачи по определению расчетного сопротивления глинистых грунтов оснований с низким коэффициентом фильтрации в зависимости от степени их водонасыщения. Рассматриваются образование зон предельного равновесия под краями фундамента, осадка его основания и предельная нагрузка в зависимости от степени водонасыщения таких грунтов. Рекомендуется внести дополнения в нормативные документы по определению расчетного сопротивления водонасыщенных оснований указанного типа.

Введение

Известно, что расчеты оснований фундаментов по I и II группам предельных состояний [1, 2] базируются на определении расчетного и предельного сопротивлений слагающих их грунтов, в основе которого лежит решение задачи Пузыревского (рис. 2). Это решение позволяет определить начальное критическое (первую критическую нагрузку p^*) и расчетное (R_p) значения распределенной нагрузки по полосе шириной $b = 2a$ на поверхности грунтового полупространства. При этом не учитывается влияние избыточного порового давления, которое неизбежно возникает в глинистых водонасыщенных грунтах на начальном этапе нагружения и не рассеивается длительное время из-за низкого коэффициента фильтрации.

В настоящей работе на основе рассмотрения напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового полупространства под воздействием собственного веса и распределенной нагрузки p по полосе шириной $b = 2a$ приводится аналитическое решение задачи Пузыревского с учетом избыточного порового давления в зависимости от степени водонасыщения грунтов основания.

Для достоверного определения порового давления необходимо в первую очередь установить коэффициенты сжимаемости газосодержащей поровой воды (K_{wg}) и газовых пузырьков (K_g), т.е. их жесткость, и сравнить их с коэффициентом сжимаемости скелета

Abstract

The article presents analytical and numerical solutions of the task on determination of the design resistance of clayey foundation soils with a low permeability coefficient depending on their water saturation degree. Formation of limit equilibrium zones under foundation edges, foundation bed settlements and critical loads depending on water saturation degree of the soils are considered. The authors recommend to introduce some additions on the design resistance determination for water-saturated foundation soils of the mentioned type into the normative documents.



K_s . От соотношения K_{wg}/K_s и K_g/K_s существенно зависит избыточное поровое давление, т.к. оно определяется в зависимости от среднего напряжения $\sigma = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / 3$ (где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ — главные нормальные напряжения), а коэффициент порового давления — $\beta_0 = K_w / (K_w + nK_s)$ (где K_w — модуль объемной сжимаемости газосодержащей поровой воды; n — пористость грунта), т.е. $u_w = \sigma\beta_0$.

0 сжимаемости поровой воды

Известно, что в глинистых грунтах всегда содержится воздух в растворенном виде и в виде мельчайших пузырьков в поровой воде. Наличие воздуха в поровой воде обуславливает ее сжимаемость, которая отражается на избыточном поровом давлении, возникающем под воздействием внешней нагрузки (рис. 1). С ростом степени водонасыщения растет и модуль объемной сжимаемости газосодержащей поровой воды, следовательно, растет и поровое давление.

Далее будет приведено решение задачи по определению модуля объемной сжимаемости газосодержащей поровой воды (K_w) в зависимости от степени водонасыщения (S_r), модуля объемной деформации воды, содержащей растворенный воздух (K_{wg}), и модуля объемной сжимаемости пузырьков воздуха (K_g).

Известно, что поровое пространство объемом V заполнено водой с растворенным в ней воздухом (объема V_{wg}) и частично нерастворенными пузырьками газа (объема V_g), причем:

$$V = V_{wg} + V_g \tag{1}$$

Изменение объема пузырьков газа V_g при изменении давления в поровой воде от p_1 до p_2 можно определить на основе закона Бойля — Мариотта, согласно которому в изотермическом режиме справедливо соотношение $p_1V_1 = p_2V_2 = \text{const}$. Тогда получаем:

$$\Delta V_g = V_{g1} (1 - p_1 / p_2) \tag{2}$$

Уравнение (2) после преобразования можно представить в следующем виде:

$$\frac{1}{\Delta p} \cdot \frac{\Delta V_g}{V_g} = \frac{1}{p_1 + \Delta p} \tag{3}$$

Отсюда следует, что

$$K_g = p_1 + \Delta p, \tag{4}$$

откуда
$$p_1 = p_a + \gamma_w z, \tag{5}$$

где p_a — атмосферное давление, z — глубина от уровня воды, γ_w — удельный вес воды.

Изменение объема поровой воды в целом (ΔV_m) можно определить как сумму изменений V_{wg} и V_g :

$$\Delta V_m = \Delta V_{wg} + \Delta V_g \tag{6}$$

Разделяя обе части этого уравнения на V_w и учитывая, что $V_g = V_w - V_{wg}$, с учетом формулы (2) получаем

выражение для относительной объемной сжимаемости поровой воды в целом:

$$\frac{\Delta V_w}{V_w} = \frac{\Delta V_{wg}}{V_w} \cdot \frac{V_{wg}}{V_{wg}} + \frac{V_w - V_{wg}}{V_w} (1 - p_1 / p_2), \tag{7}$$

или

$$\varepsilon_w = \varepsilon_{wg} S'_r = (1 - S'_r) (1 - p_1 / p_2), \tag{8}$$

где S'_r — степень водонасыщения грунта на начальном этапе, равная:

$$S'_r = V_{wg} / V_w \tag{9}$$

Из уравнения (6) с учетом формулы (2) следует:

$$\frac{1}{K_w} = \frac{S_r}{K_{wg}} + \frac{(1 - S_r)}{p_1 + \Delta p}, \tag{10}$$

где $\Delta p = p_2 - p_1$ — приращение давления в поровой воде.

После некоторых преобразований получаем модуль объемной сжимаемости газосодержащей поровой воды:

$$K_w = K_{wg} K_g / (K_{wg} (1 - S_r) + K_g S_r), \tag{11}$$

где модуль объемной деформации воды с растворенным в ней воздухом $K_{wg} \cong K^0_w = 2 \cdot 10^6$ кПа (K^0_w — модуль объемной сжимаемости дегазированной воды); модуль объемной сжимаемости пузырьков воздуха $K_g = p_1 + \Delta p$.

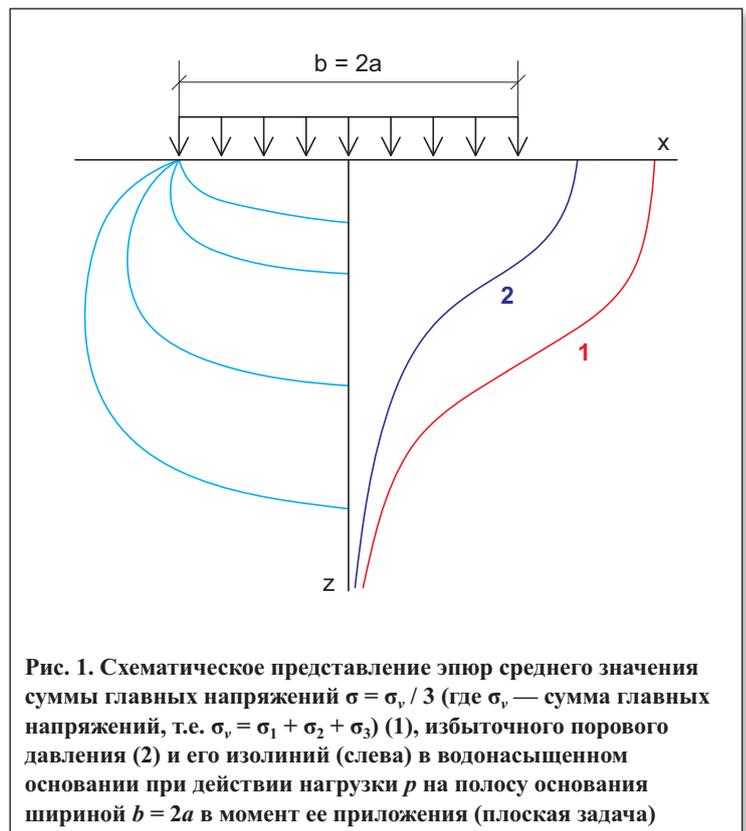


Рис. 1. Схематическое представление эпюр среднего значения суммы главных напряжений $\sigma = \sigma_v / 3$ (где σ_v — сумма главных напряжений, т.е. $\sigma_v = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (1), избыточного порового давления (2) и его изолиний (слева) в водонасыщенном основании при действии нагрузки p на полосу основания шириной $b = 2a$ в момент ее приложения (плоская задача)

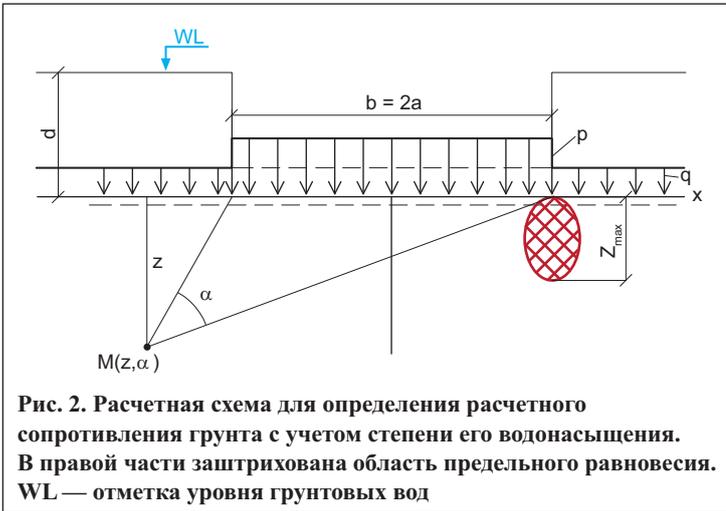


Рис. 2. Расчетная схема для определения расчетного сопротивления грунта с учетом степени его водонасыщения. В правой части заштрихована область предельного равновесия. WL — отметка уровня грунтовых вод

Отсюда следует, что при $S_r \rightarrow 1$ $K_w \rightarrow K_{wg}$, т.е. при полном водонасыщении, модуль объемной сжимаемости поровой воды равен модулю объемной сжимаемости воды, содержащей растворенный воздух. Отметим, что изменение степени водонасыщения при изменении давления в поровой воде или в пузырьках воздуха, если пренебречь поверхностным натяжением воды q в пузырьках: $p_g = u_w + 2q/r$, где r — радиус пузырьков в интервале от p'_g до p''_g , определяется известной [1] зависимостью следующего вида:

$$S''_r = \frac{p''_g / p'_g}{(1 - k_H)(p''_g / p'_g - 1) + (1 - S'_r) / S'_r}, \quad (12)$$

где S'_r — степень водонасыщения грунта на втором этапе; k_H — коэффициент растворимости воздуха в воде (коэффициент Генри), причем $k_H = 0,0205$ при $t = 20^\circ\text{C}$.

Например, если $S'_r = 0,9$ при $p'_g = 0,1$ Па, то $S''_r = 0,957$ при $p''_g = 0,2$ Па, $S''_r = 0,997$ при $p''_g = 0,6$ Па.

0 коэффициенте порового давления

При всестороннем обжатии грунта с интенсивностью среднего тотального напряжения $\sigma = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / 3$ в условиях отсутствия дренажа в нем возникает избыточное давление в поровой воде u_w и напряжение в скелете σ_s , причем

$$\sigma = \sigma_s + u_w, \quad (13)$$

Соотношение σ_s и u_w зависит от соотношения жесткости скелета K_s и поровой воды K_w , а также от пористости грунта, т.к. объемные деформации скелета (ε_s) и поровой воды (ε_w) связаны известной зависимостью следующего вида:

$$\varepsilon_s = n\varepsilon_w, \quad (14)$$

Полагая, что

$$\varepsilon = \sigma / K; \quad \varepsilon_s = \sigma_s / K_s; \quad \varepsilon_w = u_w / K_w, \quad (15)$$

где, напомним, K_s , K_w , K — модули объемной деформации скелета, поровой воды и грунта в целом соот-

ветственно; K_w определяется по формуле (9) с учетом зависимостей (13) и (14), получим:

$$u_w = \sigma \beta_0, \quad (16)$$

$$\text{причем } K = K_s + K_w/n, \quad G_s = G, \quad (17)$$

где G — модуль сдвига грунта в целом; G_s — модуль сдвига скелета грунта;

$$\nu = \frac{K - 2G}{2(K + 2G)}; \quad \nu_s = \frac{K_s - 2G}{2(K_s + G)}, \quad (18)$$

где ν — коэффициент Пуассона грунта в целом; ν_s — коэффициент Пуассона скелета грунта.

Отсюда следует, что $u_w \rightarrow \sigma$, $\nu \rightarrow 0,5$ при $K_w \rightarrow \infty$ и что $\nu > \nu_s$, а также $K > K_s$.

При известном $\sigma(x, y)$, полученном на основе решения задачи об НДС грунтового основания (см. рис. 1), можно определить и избыточное поровое давление $u_w(x, y)$ на основании формулы (16), т.е. в зависимости от степени водонасыщения грунта. Следовательно, можно дать количественную оценку НДС грунтового основания, в т.ч. определить осадку, начальную и критическую нагрузки и расчетное сопротивление грунтов основания.

Расчетное сопротивление грунтов основания с учетом степени их водонасыщения

Известно, что под действием распределенной нагрузки интенсивностью p по полосе шириной $b = 2a$ в грунтовом основании возникает избыточное НДС, которое описывается на основании решения задачи Фламана (рис. 2). Главные эффективные напряжения $\sigma_1(x, z)$ и $\sigma_3(x, z)$ при этом определяются формулой вида:

$$\sigma_{1,3} = (p - q / \pi)(\alpha \pm \sin \alpha) - u_w(\alpha), \quad (19)$$

где α — угол видимости, определяющий местоположение точки $M(\alpha, z)$; q — пригрузка на уровне $z = 0$ от веса вышележащей толщи грунта мощностью d с удельным весом во взвешенном состоянии γ' , т.е. $q = \gamma'd$.

Распределение эффективных напряжений в грунтовом основании от действия пригрузки q в предположении гидростатического распределения можно определить с использованием следующей формулы:

$$\sigma_{zg} = \sigma_{xg} = \gamma'(d + z), \quad (20)$$

где σ_{zg} — вертикальное напряжение от веса грунта; σ_{xg} — горизонтальное напряжение от веса грунта по оси x .

Суммарные значения главных напряжений σ_v и избыточного порового давления u_w в грунтовом основании можно определить с учетом формул (19) и (16) следующим образом:

$$\sigma_v = \frac{2(p - q)}{\pi} \alpha (1 + \nu), \quad (21)$$



где

$$u_w(\alpha) = \frac{(p-q)}{3\pi} \cdot \beta_0 \cdot (1+\nu) \cdot \alpha, \quad (22)$$

где π — математическая константа (число «пи»), приблизительно равная 3,14.

Эффективные напряжения σ_1 и σ_2 можем определить на основе уравнений (19), (20) и (22):

$$u_w(\alpha) = \frac{(p-q)}{3\pi} \cdot \beta_0 \cdot (1+\nu) \cdot \alpha, \quad (22)$$

Условие предельного равновесия в точке М (α, z) можем определить, если напряжения по формуле (23) подставить в известное уравнение предельного состояния следующего вида:

$$\sin \varphi = (\sigma'_1 - \sigma'_3) / (\sigma'_1 + \sigma'_3 + 2c \cdot \text{ctg} \varphi), \quad (24)$$

где c — удельное сцепление, φ — угол внутреннего трения (параметры прочности грунта); σ'_1 и σ'_3 — эффективные напряжения, $\sigma'_1 = \sigma_1 - u_w$, $\sigma'_3 = \sigma_3 - u_w$. Тогда получим:

$$z = \frac{p-q}{\pi\gamma'} \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \varphi} - B\alpha \right) - \frac{c}{\gamma'} \cdot \text{ctg} \varphi - d, \quad (25)$$

где $B = 1 - 2\beta_0(1+\nu)/3$.

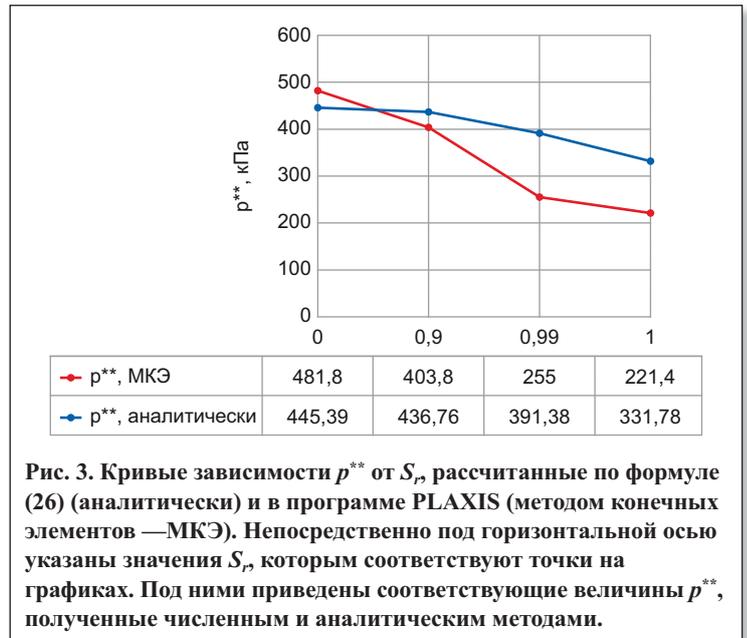


Рис. 3. Кривые зависимости p^{**} от S_r , рассчитанные по формуле (26) (аналитически) и в программе PLAXIS (методом конечных элементов —МКЭ). Непосредственно под горизонтальной осью указаны значения S_r , которым соответствуют точки на графиках. Под ними приведены соответствующие величины p^{**} , полученные численным и аналитическим методами.

ГЕОТЕХНИКА

Международный журнал для изыскателей, проектировщиков и строителей

Цель журнала — знакомство российских специалистов с передовым отечественным и зарубежным опытом в области геотехники

Периодичность в 2012 году: 6 номеров

Стоимость годовой подписки: 3900 рублей

info@geomark.ru

Журнал «Инженерная геология»
 стал одним из наиболее востребованных печатных изданий в нашей профессиональной среде. Сотрудники редакции постоянно работают над дальнейшим повышением качества журнала. Все статьи проходят тщательное экспертное рецензирование. Вы, читатели, можете внести свой вклад в развитие журнала, прислав в редакцию свои статьи, посвященные «Инженерной геологии».

Тел./факс: +7 (495) 366-2684, 366-2693
 E-mail: geomark@yandex.ru

Реклама

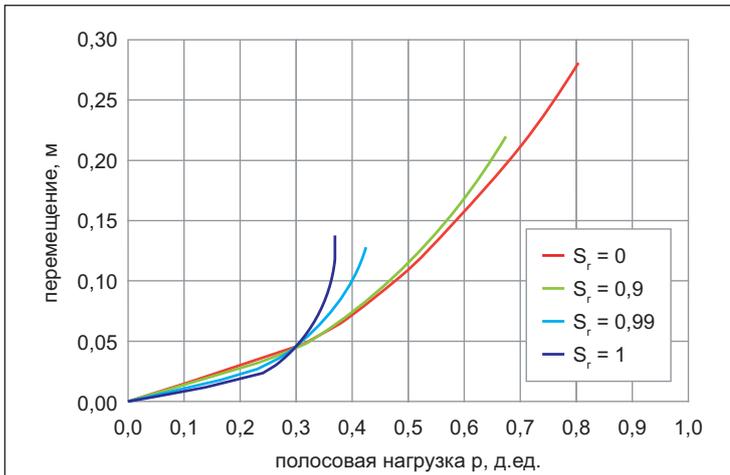


Рис. 4. Графики вертикальных перемещений основания S (м) в зависимости от полосовой нагрузки p (д.ед., причем полная приложенная нагрузка равна единице) при разной степени водонасыщения S_r слагающего его грунта

Уравнение (25) описывает границу (глубину z^*) области предельного равновесия в зависимости от α , то есть $z^* = f(z, \alpha)$. Максимальную глубину этой области z^*_{\max} (см. рис. 2) можно определить из условия $dz^*/d\alpha = 0$. Тогда получаем $\alpha^* = \arccos(B \cdot \sin \varphi)$, или $\cos \alpha = B \cdot \sin \varphi$, (где α^* — угол видимости при $z = z^*_{\max}$). Подставив это выражение для α^* в уравнение (25), после некоторых преобразований получим следующую формулу для критической распределенной нагрузки p^* в зависимости от z^*_{\max} и степени водонасыщения S_r , т.к. $\beta_0 = f(S_r)$ (см. формулы (9) и (16)):

$$p^* = \frac{\pi(\gamma' z^*_{\max} + \gamma' d + c \cdot \text{ctg} \varphi)}{\sin \alpha^* / \sin \varphi - B \alpha^*} + \gamma' d. \quad (26)$$

Это выражение в частном случае, когда поровое давление мало ($S_r < 0,8$) и $\beta_0 \cong 0$; $\beta \cong 1$ совпадает с известным решением задачи Пузыревского:

$$p^* = \frac{\pi(\gamma' z^*_{\max} + \gamma' d + c \cdot \text{ctg} \varphi)}{\text{ctg} \varphi - \pi/2 + \varphi} + \gamma' d. \quad (27)$$

Начальные критические нагрузки, определенные по формулам (26) и (27), существенно различаются. Так, при одинаковых $\gamma' = 20$ кН/м³, $b = 2$ м, $c = 0,1$ МПа, $\varphi = 30^\circ$, $p^* = 5,64$ МПа по (26) и $p^* = 10,2$ МПа по (27). Очевидно, что при одинаковых значениях приложенной нагрузки p в водонасыщенном основании величина z^*_{\max} будет больше, чем в неводонасыщенном. Для снижения этого негативного явления следует под фундаментом устроить песчано-гравелистую дренирующую подушку и снизить темп работ в начале строительства.

На рисунке 3 представлены графики зависимости p^{**} от S_r (при значениях S_r , равных 0,00; 0,90; 0,99; 1,00), рассчитанные по формуле (26) и с помощью программного комплекса PLAXIS при заданных значениях γ' , φ , c , b , d и $z^*_{\max} = b/4$ (задано в соответствии с PLAXIS). Из рисунка видно, что эти зависимости являются нелинейными и имеют максимальные значения при $\beta_0 = 1$, т.е. при полном водонасыщении.

Отметим, что степень водонасыщения влияет также на зависимость осадки S от нагрузки p . Такую зависи-

мость можно получить, используя известное решение Шлейхера в интерпретации Н.А. Цытовича:

$$S = \omega \cdot p_0 \cdot b \cdot (1 - \nu) / 2G, \quad (28)$$

где ω — коэффициент, зависящий от формы в плане и жесткости фундамента; $p_0 = p - \gamma \cdot d$ (где p_0 — дополнительное давление, и γ , d — такие же, как в формуле (27)); $G = G_s$; $\nu > \nu_s$.

Отсюда следует, что осадки водонасыщенного основания больше, чем неводонасыщенного, т.к. $\nu > \nu_s$. При $\nu = 0,5$ и $\nu_s = 0,3$ осадка первого в 1,4 раза больше, чем второго. Аналогичный результат получается при численном решении задачи с помощью программы PLAXIS (рис. 4). Особенно сильно различаются предельные значения напряжений p , т.е. величины второй критической нагрузки p^{**} (см. рис. 5). Учитывая, что расчетное сопротивление находится между p^* и p^{**} , следует предположить, что оно меньше в водонасыщенных грунтах, чем в неводонасыщенных.

Выводы и рекомендации

1. Анализ результатов расчета сопротивления грунтов оснований R_p в зависимости от степени их водонасыщения S_r , полученных аналитическим и численным методами, показал, что влияние S_r на R_p существенное и значения R_p , например при $S_r = 1,0$ и $S_r = 0,8$, могут различаться между собой в несколько раз.

2. Для снижения этого негативного явления следует устраивать под фундаментом песчано-гравийную дренирующую подушку и регулировать темпы его нагружения путем контроля степени уплотнения глинистых грунтов в контактной зоне под ней.

3. Сравнение результатов аналитического и численного решений поставленной задачи по определению R_p в зависимости от S_r показало, что они сходятся. Следовательно, предложенное аналитическое решение может быть рекомендовано для использования в инженерной практике.

4. Осадка основания, обусловленная сдвиговыми деформациями скелета водонасыщенного грунта, больше, чем для неводонасыщенного. Это обусловлено различием между значениями коэффициента Пуассона грунта в этих двух состояниях ($\nu > \nu_s$).

5. Результаты, изложенные в статье, рекомендуются учитывать при разработке последующих редакций нормативного документа [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. М.: АСВ, 2009. 550 с.
2. СП 22.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*). Основания зданий и сооружений. М.: Минрегион России, 2011.
3. Plaxis версия 8: справочное руководство / пер. В.И. Астафьева. М.: Факт, 2006. 182 с. URL: <http://www.diska.net/soft/291-plaxis-versija-8.html>.
4. PLAXIS 2D Version 8. Reference Manual. *plaxis-manual-2d-version8*.

Проектно-изыскательская и строительная компания «Геострой-Ф»



ООО «Геострой-Ф» использует самые современные и достоверные из всех имеющихся способы получения инженерно-геологической информации, что гарантирует высокую степень точности данных для проектирования, включая проведение всех видов опытных работ.

Компания выполняет:

- комплексное проектирование жилых и общественных зданий;
- инженерно-геодезические и инженерно-геологические изыскания в сложных и особо сложных грунтовых условиях;
- проектирование усиления грунтов основания фундаментов деформирующихся и вновь строящихся зданий;
- проекты усиления строительных конструкций;
- проекты шпунтовых рядов и подпорных стен, плитных и свайных фундаментов;
- техническое обследование грунтов, фундаментов и надземных конструкций существующих зданий для их реконструкции, капитального ремонта или надстройки.

На сегодняшний день предприятие оснащено современным буровым и передовым лабораторным оборудованием для выполнения изысканий.

Компания способна выполнить для заказчика весь комплекс работ, связанный с инвестированием в строительство — начиная с изысканий и заканчивая проектом во всех его аспектах и получением разрешения на строительство.



Юридический адрес: 344064 Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Днепроградская, д. 54

Тел.: +7 (863) 201-56-38

Факс: +7 (863) 201-56-39

E-mail: geostroy@aanet.ru

www.geostroy-plus.ru

www.geostroy.irnd.ru

