

УЧЕТ ИЗБЫТОЧНЫХ ПОРОВЫХ ДАВЛЕНИЙ В РАСЧЕТЕ ОГРАЖДЕНИЙ КОТЛОВАНОВ В СЛАБЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ

ACCOUNTING FOR EXCESS PORE PRESSURES IN THE CALCULATION OF EXCAVATION RETAINING STRUCTURES IN WEAK CLAYEY SOILS

Статья посвящена учету избыточных поровых давлений при расчете ограждений котлованов в слабых водонасыщенных глинистых грунтах. Установлена корреляция между коэффициентом Скемптона (A_p) и показателем текучести грунта. Разработано обобщение теории мгновенной прочности и методика расчета активного и пассивного давления. Проведен расчет ограждения котлована с учетом и без учета избыточных поровых давлений. Показано, что их учет позволяет снизить материалоемкость конструкции.

Ключевые слова: избыточные поровые давления, слабые глинистые грунты, ограждение котлованов, теория мгновенной прочности.

The article addresses the accounting of excess pore pressures in the design of excavation supports in weak water-saturated clayey soils. There has been established a correlation between Skempton's coefficient (A_p) and the soil index of liquidity. Generalization of the instantaneous strength theory and a method for calculating active/passive pressure have been developed. A calculation of the excavation pit enclosure design has been carried out with and without considering excess pore pressures. It is shown that accounting for them allows reducing the material intensity of the structure.

Keywords: excess pore pressures, weak clayey soils, excavation pit enclosure, theory of instantaneous strength.

Введение

Интенсивное развитие подземной инфраструктуры в условиях плотной городской застройки требует устройства котлованов значительной глубины [1]. В таких условиях особую актуальность приобретает проектирование надежных и экономичных ограждающих конструкций, испытывающих воздействие со стороны массива грунта. Ключевым параметром при их расчете являются величины активного и пассивного давлений, определяющие усилия в конструкции и ее устойчивость.

Особенностью инженерно-геологических условий таких регионов, как Санкт-Петербург, является залегание значительной толщи слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов [2], характеризующихся низкими прочностными и деформационными характеристиками, а также низкой фильтрационной способностью. Кратковременность производства работ по разработке котлованов (как правило, не превышающего 1–2 года) обуславливает необходимость учета недренированного поведения грунтового массива [3]. В таких условиях приложение

нагрузок приводит к образованию избыточных поровых давлений, существенно влияющих на прочностные свойства грунтов и, как следствие, на величину давления на ограждение.

В современной практике для учета недренированного поведения грунтов применяются два основных подхода:

1. Использование удельного сопротивления недренированному сдвигу (c_u), значение которого сильно зависит от метода определения [4].

2. Применение теории мгновенной прочности, основанной на эффективных прочностных параметрах (c' , φ') [5].

Второй подход, являясь более универсальным, позволяет избежать затруднений при изысканиях, связанных с определением c_u . Однако его применение требует учета влияния избыточных поровых давлений, возникающих как при уплотняющих, так и при сдвиговых нагрузках.

Статья посвящена разработке усовершенствованной методики расчета активного и пассивного давления на ограждение котлована с использованием теории мгновенной прочности, дополненной учетом образования избыточных поровых давлений. На основе лабораторных исследований установлена количественная зависимость между сдвиговыми нагрузками и поровыми давлениями для слабых глинистых грунтов. Предложен практический метод расчета, позволяющий снизить расчетные усилия в ограждающих конструкциях и, как следствие, их материалоемкость.

1. Методы

1.1. Теории прочности с учетом образования избыточных поровых давлений

При оценке прочности водонасыщенных медленно уплотняющихся грунтов наиболее широкое распространение получили методы, основанные на принципе эффективных напряжений Терцаги [6]:

$$\tau_n = (\sigma_n - u) \tan(\varphi') + c', \quad (1)$$

где σ_n — нормальная составляющая полных напряжений, кПа; u — величина поровых

давлений, кПа; φ' , c' — эффективные прочностные параметры, град. и кПа соответственно; τ_n — предельная величина сдвиговых напряжений, кПа.

На основе данного принципа, теории прочности Кулона–Мора и результатов М. Н. Гольдштейна [7] Ю. И. Соловьев сформулировал теорию мгновенной прочности (ТМП) [8] консолидирующегося грунта:

$$\tau = \sigma \cdot \sin(\rho) + k \cdot \cos(\rho), \quad (2)$$

где

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \sigma' + u \quad (3)$$

среднее полное напряжение, кПа;

$$\tau = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (4)$$

максимальное касательное напряжение, кПа;

$$\sin(\rho) = (1 - \beta) \sin(\varphi') \quad (5)$$

недренированный угол трения, град.;

$$k = \frac{1}{\cos(\rho)} (\sigma'_0 \cdot \beta \cdot \sin(\varphi') + c' \cos(\varphi')) \quad (6)$$

недренированное сцепление.

Важнейшими компонентами теории мгновенной прочности являются следующие параметры:

1. Коэффициент мгновенных поровых давлений (β), количественно связывающий приращение избыточных поровых давлений с изменением полных средних напряжений:

$$\beta = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma}. \quad (7)$$

2. Параметр начального напряженного состояния (σ'_0), определяющий начальные средние эффективные напряжения в массиве грунта.

Таким образом, главным преимуществом теории мгновенной прочности является возможность ее непосредственного применения в практических расчетах, так как она позволяет оперировать итоговым законом прочности грунта без выполнения промежуточных вычислений величин избыточных поровых давлений.

При этом в соответствии с формулой (7) ТМП предполагает образование избыточ-

ных поровых давлений в связи с изменением средних напряжений в массиве грунта.

В отличие от этого подхода А. Скемптон предложил более общую концепцию оценки избыточных поровых давлений [9]:

$$\Delta u = B(\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)), \quad (8)$$

где B — коэффициент, отвечающий за развитие избыточных поровых давлений при действии уплотняющих нагрузок; A — коэффициент, отвечающий за развитие избыточных поровых давлений при действии девиаторных (формоизменяющих) нагрузок.

Данный закон образования избыточных поровых давлений был получен А. Скемптоном на основе проведения серии трехосных консолидированно-недренированных (КН) испытаний глинистых грунтов. Рассматривая данный принцип с точки зрения ТМП, когда образование избыточных поровых давлений обуславливается исключительным изменением средних полных напряжений, получим следующее:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta\sigma_1 + 2\Delta\sigma_3}{3},$$

$$\Delta u = B(A\Delta\sigma_1 + (1-A)\Delta\sigma_3). \quad (9)$$

И соответственно, исходя из выражения (7)

$$\beta = B \frac{3(A\Delta\sigma_1 + (1-A)\Delta\sigma_3)}{\Delta\sigma_1 + 2\Delta\sigma_3}. \quad (10)$$

Единственным решением данного уравнения, при котором исключается влияние отдельно взятых приращений главных напряжений, является

$$A = \frac{1}{3}, B = \beta. \quad (11)$$

Данное решение соответствует случаю идеально упругой работы грунта в допредельной стадии деформирования [10]. Отметим также, что в соответствии с результатами КН-испытаний параметр A не является постоянным, в связи с чем в дальнейшем будет применяться его значение при разрушении (A_p), оказывающее прямое влияние на прочность.

Принципиальное значение в данном случае приобретает то обстоятельство, что в со-

ответствии с результатами А. Скемптона [9], а также ряда других авторов [11, 12] при разрушении слабых водонасыщенных глинистых грунтов характерны значения A_f в диапазоне от 0,75 до 1,5.

Такие значения данного коэффициента приводят к значительно большим величинам поровых давлений при расчете по формуле (8), чем в соответствии с (11), а значит, итоговая недренированная прочность по (1) окажется значительно меньше. Таким образом, целесообразно провести экспериментальную оценку значения параметра A_f для слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов.

Необходимо отметить, что данная теория образования избыточных поровых давлений применима исключительно для условий трехосных испытаний ($\sigma_2 = \sigma_3$). Оценка величин избыточных поровых давлений для иных типов НДС, например таких, как условия плоской деформации ($\epsilon_2 = 0, \sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$), требует учета дополнительных факторов. Затруднением в применении формулы (8) в решении задач предельного равновесия является необходимость множества промежуточных вычислений. Данный фактор связан с необходимостью последовательного вычисления полных напряжений, поровых давлений и эффективных напряжений. С практической точки зрения значительно удобнее использовать закон прочности в полных компонентах напряжений, аналогичный полученному Ю. И. Соловьевым (см. формулу (2)).

1.2. Лабораторное исследование зависимости избыточных поровых давлений от приложения сдвиговых нагрузок

Лабораторные исследования коэффициента Скемптона A_f проводились на приборах трехосного сжатия, оборудованных рабочей камерой типа Б с жесткой фиксацией штампа к нагрузочной раме, что обеспечивало точность измерения деформаций и поровых давлений.

Программа экспериментов включала испытания по консолидированно-дренированной (КД) и консолидированно-недренированной (КН) схемам при трех различных уровнях давления консолидации. Значения давлений консолидации соответствовали бытовым давлениям на глубинах отбора образцов. Подготовка образцов включала этап реконсолидации методом восстановления фазового состава грунта при изотропном недренированном нагружении до достижения заданного значения коэффициента порового давления Скемптона V .

В ходе испытаний фиксировались поровые давления на всех стадиях нагружения, что позволило получить детальные данные о полных и эффективных напряжениях в образце. Фотографии использованного оборудования и примера испытанного образца приведены на рис. 1.

После подтверждения влияния сдвиговых напряжений на образование избыточных поровых давлений была проведена обработка данных 125 трехосных КН-испытаний, выполненных на различных объектах Санкт-

Петербурга. Определение параметра A_f выполнялось по формуле

$$A_f = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_1} \quad (12)$$

1.3. Обобщение теории мгновенной прочности грунта

Обобщение теории мгновенной прочности, учитывающее образование избыточных поровых давлений при приложении сдвиговых нагрузок, выполнялось на основании (7), представленной в модифицированном виде:

$$\Delta u = \alpha \beta \Delta \tau + \beta \Delta \sigma_3 \quad (13)$$

где α — коэффициент образования избыточных поровых давлений от приложения сдвиговых нагрузок.

При выполнении математических преобразований итоговая обобщенная теория мгновенной прочности приводилась к виду выражения (2).

Отдельную сложность представляет сопоставление значений коэффициента Скемптона A_f и предложенного коэффициента α . Основная сложность заключается в том, что первый из них применяется

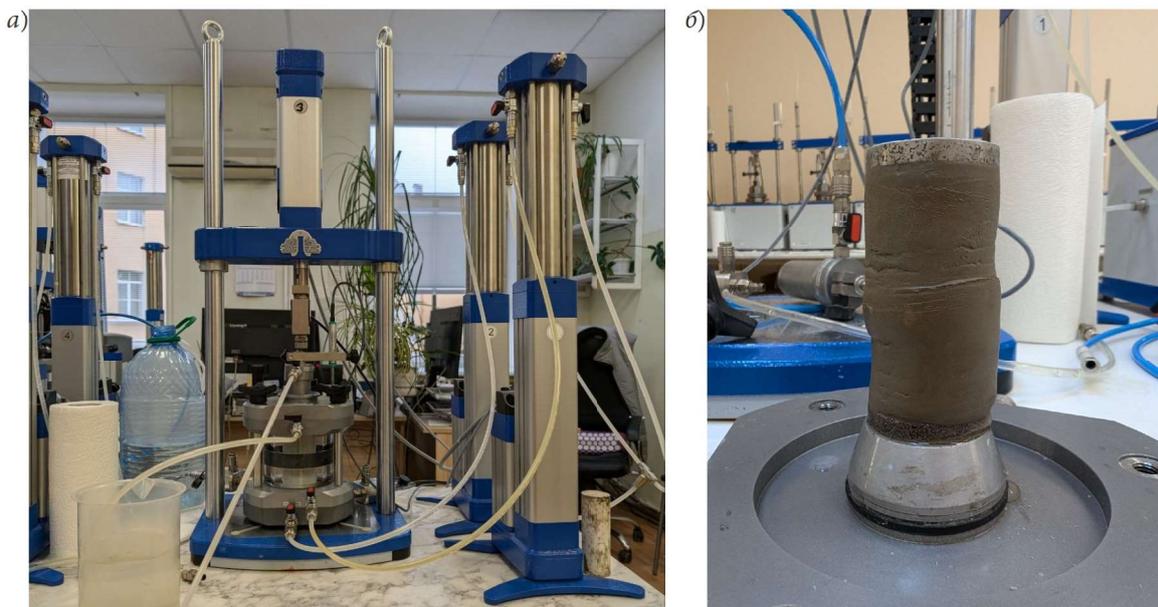


Рис. 1. Фотографии с испытаний: а — прибор трехосного сжатия; б — образец грунта после испытания

в условиях трехосного сжатия, а второй — в условиях плоской деформации. Приближенно зависимость между величинами данных параметров можно получить на основе математической модели упругопластического деформирования грунта МСС (Modified Cam-Clay) [10].

1.4. Разработка метода расчета давления слабого глинистого грунта на ограждение котлована

При расчете ограждений котлованов наиболее значимым фактором являются величины активного и пассивного давления грунта [13, 14]. В общем случае решение данной задачи необходимо выполнять методом характеристик теории предельного равновесия грунта [15], однако наиболее простой случай, при котором рассматривается абсолютно гладкая вертикальная стенка при горизонтальной поверхности грунта за ее пределами, может быть решена аналитически [14].

При решении задачи об активном давлении вертикальные напряжения рассматривались как σ_1 , а непосредственно давление на ограждение котлована — как σ_3 . Соответственно, формула для вычисления активного давления принималась в каноничном виде [15]:

$$P_A(z) = K_{A,\gamma} \gamma_{sb} z + K_{A,q} q - K_{A,c} 2c, \quad (14)$$

где величины коэффициентов могут быть найдены как

$$K_{A,\gamma} = \frac{1}{\gamma_{sb}} \frac{\partial \sigma_3}{\partial z}; K_{A,q} = \frac{\partial \sigma_3}{\partial q}; K_{A,c} = \frac{1}{-2} \frac{\partial \sigma_3}{\partial c}. \quad (15)$$

Дифференцирование в соответствии с выражением (15) может быть выполнено с использованием закона прочности (2). Аналогично выражениям (14) и (15) могут быть получены формулы для вычисления пассивного давления.

2. Результаты

2.1. Результаты лабораторных исследований образования избыточных поровых давлений при приложении сдвиговых нагрузок

На рис. 2 представлены результаты испытаний текучепластичного суглинка (показатель текучести $I_L = 0,87$), демонстрирующие характер развития поровых давлений при сдвиговом нагружении. Среднее значение коэффициента Скемптона при разрушении A_f составило 0,82, что свидетельствует о значительном влиянии девиаторной составляющей нагружения на образование избыточных поровых давлений в слабых глинистых грунтах.

По результатам анализа 125 испытаний слабых глинистых грунтов Санкт-Петербурга было получено, что наилучшим образом величина параметра Скемптона A_f коррелирует с показателем текучести I_L . В связи с этим для возможности практического применения разработанной теории

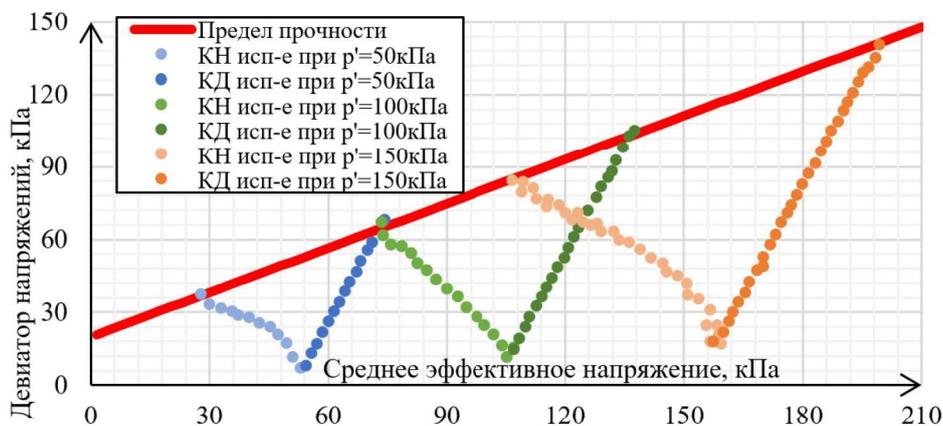


Рис. 2. Сводный график результатов испытаний в координатах $p' - q$

была построена соответствующая корреляционная зависимость.

Построение корреляционной зависимости величины коэффициента Скемптона при разрушении A_f от показателя текучести грунта I_L приведено на рис. 3.

По результатам приведенных испытаний была получена следующая корреляционная зависимость для оценки величины коэффициента Скемптона A_f в зависимости от показателя текучести I_L :

$$A_f = 0,944 \cdot I_L. \quad (16)$$

2.2. Полученное обобщение теории мгновенной прочности

Выполнив ряд математических преобразований, выражение (13) может быть сведено в закон прочности следующего вида:

$$\tau = \sigma \frac{(1-\beta)\sin(\varphi')}{1+(\alpha-1)\beta\sin(\varphi')} + \frac{\sigma'_0\beta\sin(\varphi')(1+(\alpha-1)\frac{1-K_0}{1+K_0}) + c'\cos(\varphi')}{1+(\alpha-1)\beta\sin(\varphi')}, \quad (17)$$

где K_0 — коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя.

Тогда общее уравнение мгновенной прочности может быть также представлено в виде (2), а параметры недренированной прочности (угол трения ρ и сцепление k) примут следующий вид:

$$\sin(\rho) = A(1-\beta)\sin(\varphi'), \quad (18)$$

$$k = \frac{A}{\cos(\rho)}(\sigma'_0\beta\sin(\varphi')B + c'\cos(\varphi')), \quad (19)$$

где

$$A = \frac{1}{1+(\alpha-1)\beta\sin(\varphi')}; \quad (20)$$

$$B = 1+(\alpha-1)\frac{1-K_0}{1+K_0}. \quad (21)$$

Для перехода от значений коэффициента Скемптона A_f к введенному коэффициенту α была получена следующая формула:

$$\alpha = \sqrt{3}(A_f - \frac{1}{3}) + 1. \quad (22)$$

Совместное применение формул (2), (16), (18), (19) и (22) обеспечивает возможность прогнозирования недренированной прочности грунтов на основе материалов стандартных инженерно-геологических изысканий.

2.3. Методика расчета давлений грунта на ограждение котлована

По результатам выполненных математических преобразований были получены следующие расчетные формулы для вычисления величин активного и пассивного давления грунта:

$$P_A(z) = K_{A,\gamma}\gamma_{sb}z + K_{A,q}q - K_{A,c}2c'; \quad (23)$$

$$P_P(z) = K_{P,\gamma}\gamma_{sb}z + K_{P,g}\sigma_{zg,0} + K_{P,q}q + K_{P,c}2c, \quad (24)$$

где $K_{A,\gamma}$, $K_{P,\gamma}$ — коэффициенты активного и пассивного давления грунта от собственного веса грунта; $K_{A,q}$, $K_{P,q}$ — то же от полез-

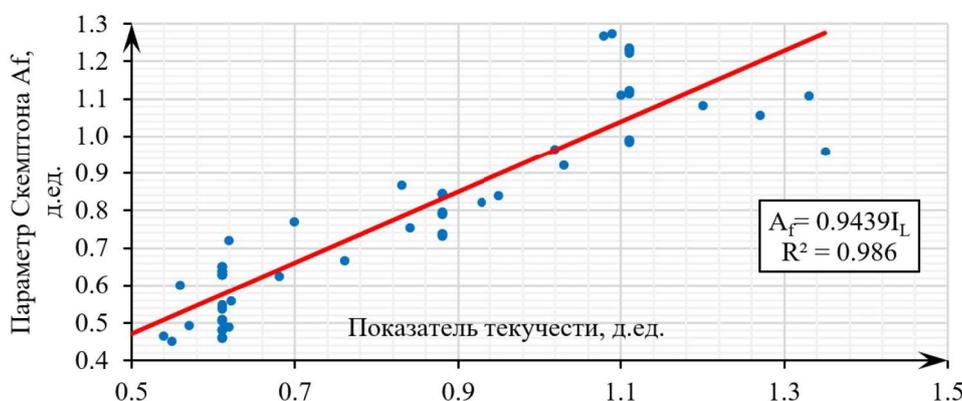


Рис. 3. Зависимость параметра Скемптона A_f от показателя текучести I_L по результатам 125 испытаний слабых глинистых грунтов Санкт-Петербурга

ной нагрузки по бровке или дну котлована соответственно; $K_{A,c}$, $K_{P,c}$ — то же от удельного сцепления грунта; $K_{P,g}$ — коэффициент пассивного давления грунта от веса вынутаго грунта; $\sigma_{zg,0}$ — напряжение от собственного веса грунта в уровне дна котлована до начала производства работ.

Приведенные выше коэффициенты могут быть вычислены в соответствии со следующими формулами:

$$K_{A,\gamma} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right) - (1 + K_0) \frac{AB\beta \sin(\varphi')}{1 + \sin(\rho)}; \quad (25)$$

$$K_{A,q} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right); \quad (26)$$

$$K_{A,c} = \frac{A \cos(\varphi')}{1 + \sin(\rho)}; \quad (27)$$

$$K_{P,\gamma} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2}\right) + (1 + K_0) \frac{AB\beta \sin(\varphi')}{1 - \sin(\rho)}; \quad (28)$$

$$K_{P,q} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2}\right); \quad (29)$$

$$K_{P,c} = \frac{A \cos(\varphi')}{1 - \sin(\rho)}; \quad (30)$$

$$K_{P,g} = \frac{A \sin(\varphi')}{1 - \sin(\rho)} (1 + K_0) B\beta. \quad (31)$$

Влияние коэффициентов избыточных поровых давлений α и β на величины активного и пассивного давления показано на рис. 4.

Для оценки влияния учета избыточных поровых давлений на результаты расчетов ограждения котлована был выполнен расчет консольного ограждения котлована глубиной 4 м при выполнении работ в условиях высокого уровня грунтовых вод (УГВ соответствует дневной поверхности грунта) и залегания слабых глинистых грунтов.

В качестве грунта основания рассматривался суглинок, испытанный в условиях трехосного сжатия в рамках данного исследования (см. рис. 1 и 2). Для такого грунта показатель текучести I_L составляет 0,87. Тогда по формуле (16) $A_f = 0,944 \cdot 0,87 = 0,8213$.

Соответственно, предложенный коэффициент α может быть найден по формуле (22):

$$\alpha = \sqrt{3}(0,8213 - \frac{1}{3}) + 1 = 1,8452.$$

Было рассмотрено два расчетных случая: расчет по стандартной методике (без учета образования избыточных поровых давлений) и по разработанной методике. По результатам расчетов определялись требуемый профиль шпунта и его длина. Результаты выполненных расчетов приведены на рис. 5.

По итогам выполненных расчетов было получено, что по стандартному расчету в качестве ограждения котлована требуется шпунт

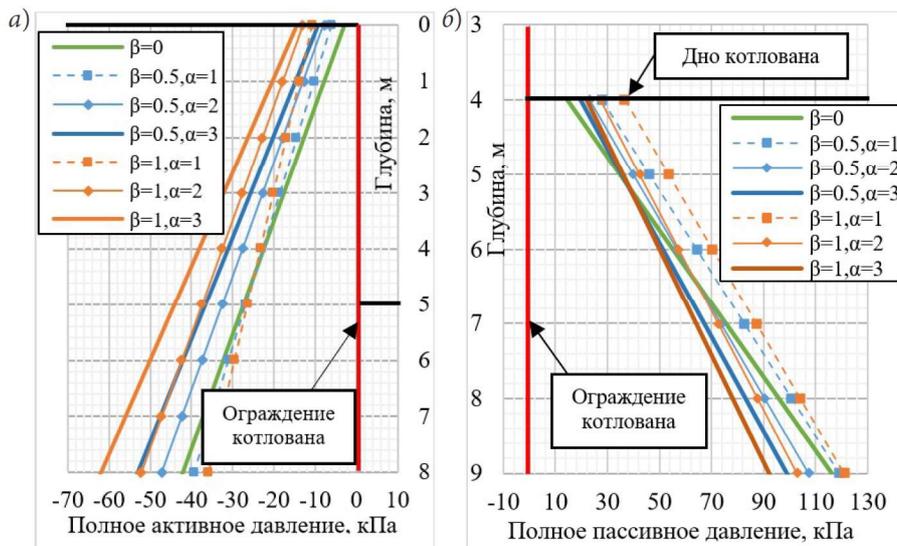


Рис. 4. Графики результатов расчета активного (а) и пассивного (б) давления при образовании избыточных поровых давлений при $\varphi' = 20^\circ$, $c' = 5$ кПа, $q = 20$ кПа

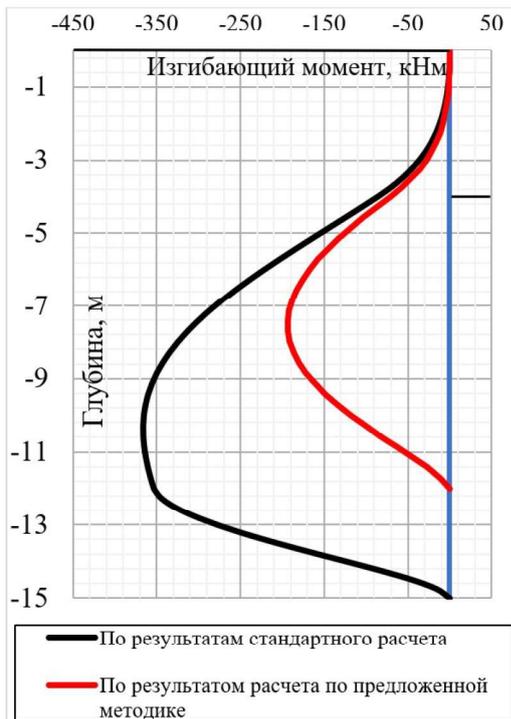


Рис. 5. Расчетные эпюры изгибающих моментов в шпунтовом ограждении по результатам расчетов по стандартной и предложенной методикам

VL 605A длиной 15 м, а по предложенному расчету — VL 603A длиной 12 м (сечения шпунта подобраны для стали класса С235). В рассмотренном случае разработанный метод расчета позволяет снизить расход стали на шпунтовое ограждение на 36 %.

3. Обсуждение

В данной статье приведены результаты построения корреляционной зависимости параметра Скемптона A_f от показателя текучести I_L . При этом на параметр Скемптона могут оказывать существенное влияние и другие физические, механические и фильтрационные свойства грунтов, а также исходное и изменяющееся напряженно-деформированное состояние грунтового массива в процессе разработки котлована. Таким образом, наиболее корректно выполнять определение данного параметра в рамках инженерно-геологических изысканий.

Проведенный анализ выявил ряд особенностей влияния избыточных поровых да-

лений на величины активного и пассивного давления грунта:

1. Наблюдается существенное увеличение влияния нагрузок по бровке котлована на величину активного давления. При полностью недренированном характере работы основания ($\beta = 1$) коэффициент $K_{A,q}$ достигает единицы, что значительно увеличивает нагрузку на ограждающую конструкцию.

2. Зависимость изменения активного давления по глубине от коэффициентов избыточных поровых давлений имеет сложный нелинейный характер. При $\alpha = 1$ прирост давления по глубине обратно пропорционален коэффициенту β , тогда как при $\alpha = 3$ наблюдается прямая пропорциональность. Эффект снижения прироста активного давления по глубине при $\alpha = 1$ обусловлен, главным образом, развитием отрицательных значений избыточных поровых давлений. Данный эффект связан с тем, что развитие активного давления сопровождается снижением горизонтальных напряжений в массиве грунта, т. е. снижением средних эффективных напряжений. Таким образом, избыточное поровое давление будет противодействовать разуплотнению грунта, принимая отрицательные значения.

3. Наибольшее влияние на работу ограждения оказывает дополнительная составляющая пассивного давления, обусловленная весом вынутаго грунта. Данный эффект связан с возникновением отрицательных поровых давлений при разработке котлована и приводит к значительному увеличению пассивного сопротивления.

4. Для остальных компонентов пассивного давления наблюдается обратная пропорциональность их величины относительно коэффициентов избыточных поровых давлений, что свидетельствует о снижении несущей способности грунта при развитии поровых давлений.

Выявленные закономерности подчеркивают необходимость учета избыточных поровых

давлений при проектировании ограждений котлованов в слабых водонасыщенных грунтах.

Как показано на рис. 5, учет образования избыточных поровых давлений позволяет существенно повысить экономическую эффективность проектных решений за счет оптимизации параметров ограждающих конструкций.

В современной инженерной практике расчеты шпунтовых ограждений выполняются главным образом численными методами с применением метода конечных элементов. Основным затруднением в применении разработанной теории к данному типу расчетов является специфика определения величины параметра Скемптона A_f с применением нелинейных моделей деформирования грунта (Mohr–Columb, Hardening Soil, Soft Soil, Modified Cam-Clay). В данных моделях этот параметр зависит от пропорций модулей деформации для первичной и вторичной ветвей загрузки, а также заложенных в модель эмпирических зависимостей [10]. Таким образом, решение поставленной задачи методом конечных элементов требует дополнительных исследований по разработке специализированной математической модели деформирования грунтового основания или специального задания параметров существующих моделей.

Выводы

1. Экспериментально установлена корреляционная зависимость между коэффициентом Скемптона (A_f) и показателем текучести (I_L) для слабых водонасыщенных глинистых грунтов, что позволяет прогнозировать величину избыточных поровых давлений при сдвиговых нагрузках.

2. Разработано обобщение теории мгновенной прочности, учитывающее образование избыточных поровых давлений как при уплотняющих, так и при сдвиговых нагрузках. Предложены модифицированные выражения для определения недренированного сцепления (k) и угла трения (ρ).

3. Показано, что учет избыточных поровых давлений приводит к существенному изменению величин активного и пассивного давления на ограждение котлована. Наибольшее влияние наблюдается для пассивного давления благодаря возникновению дополнительной составляющей от веса вынутого грунта.

4. Предложенная методика расчета позволяет снизить материалоемкость конструкций ограждения котлована за счет более точного учета реальной работы системы «грунт–конструкция». Экономический эффект достигается оптимизацией параметров ограждающих конструкций.

Библиографический список

1. Скворцов К. Д., Мангушев Р. А. Статистическая оценка горизонтального смещения шпунтового ограждения при откопке котлованов на основе вариантов расчетов // Вестник гражданских инженеров. 2024. № 5 (106). С. 59–65.
2. Шашкин А. Г., Шашкин К. Г. О высотном строительстве в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга // Геотехника. 2014. № 1–2. С. 4–16.
3. Дашко Р. Э., Колосова Д. Л. Структура поровой воды в системе: глинистый грунт – ионы – газ – микроорганизмы на основе ядерно-магнитного резонанса – практика применения в гидрогеологии // Подземная гидросфера: материалы XXIV Всерос. совещания по подземным водам Востока России с междунар. участием (Екатеринбург, 21–28 июня 2024 г.). Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2024. С. 101–107.
4. Васенин В. А. Численное моделирование испытаний буронабивной сваи и баретты для строительства высотного здания в г. Санкт-Петербурге // Геотехника. 2010. № 5. С. 38–47.
5. Королев К. В. Промежуточная несущая способность водонасыщенного основания ленточного фундамента // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2014. № 1. С. 2–6.
6. Королев К. В. Начальная несущая способность водонасыщенного основания ленточного фундамента при различных коэффициентах порового давления // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2013. № 1. С. 6–9.
7. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов. М.: Стройиздат, 1979. 304 с.

8. Соловьев Ю. И., Смолин Ю. П. Мгновенная прочность консолидирующихся грунтов // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1976. № 9. С. 33–37.

9. Skempton A. W. The Pore-Pressure Coefficients A and B // *Geotechnique*. 1954. Vol. 4 (4). Pp. 143–147.

10. Mangushev R. A., Bashmakov I. B., Paskacheva D. A., Kvashuk A. V. Mathematical modeling of undrained behavior of soils // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2023. Vol. 19 (1). Pp. 97–111.

11. Luo Lisha, Yang Yang, Shen Zhifu, Zhang Wangcheng, Wang Zhihua, Wang Xudong, Gao Hongmei, Xu Qier. Experimental study on the mechanical behavior of artificially prepared stratified soil in triaxial compression tests // *Acta Geotechnica*. 2025. Vol. 20 (2). Pp. 543–562.

12. Liu Yaxu, Zhuang Liu, Erwin Oh, Dominic Ek Leong Ong. Strength and Microstructural Assessment of Reconstituted and Stabilised Soft Soils with Varying Silt Contents // *Geosciences*. 2021. Vol. 11 (8). 302. DOI 10.3390/geosciences11080302.

13. Сливец К. В. Натурные наблюдения за деформациями ограждающих конструкций опытного котлована и грунтового массива // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2008. № 3 (16). С. 226–234. ISSN: 1815-588X. eISSN: 2658-6851.

14. Караулов А. М., Королев К. В. Статическое решение задачи устойчивости свободно стоящей гладкой шпунтовой стенки // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2017. № 4. С. 2–6.

15. Караулов А. М., Королев К. В., Смолин Ю. П. Определение предельных давлений на ограждения с учетом сейсмических воздействий // Вестник Сибирского гос. ун-та путей сообщения. 2017. № 4 (43). С. 49–53.

References

1. Skvortsov K. D., Mangushev R. A. *Statisticheskaya otsenka gorizontaln'nogo smeshcheniya shpuntovogo ograzhdeniya pri otkopke kotlovanov na osnove variantnykh raschetov* [Statistical evaluation of horizontal displacement of sheet piling during excavation of pits based on variant calculations]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2024, no. 5 (106), pp. 59–65.

2. Shashkin A. G., Shashkin K. G. *O vysotnom stroitel'stve v inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh Sankt-Peterburga* [Regarding high-rise construction in the geotechnical conditions of St. Petersburg]. *Geotekhnika – Geo-engineering*, 2014, no. 1–2, pp. 4–16.

3. Dashko R. E., Kolosova D. L. *Struktura porovoy vody v sisteme: glinistyiy grunt – iony – gaz – mikroorganizmy na osnove yaderno-magnitnogo rezonansa – praktika primeneniya v gidrogeologii* [Structure of pore water in

the system: clay soil – ions – gas – microorganisms based on nuclear magnetic resonance – practice of application in hydrogeology]. *Podzemnaya gidrosfera. Trudy XXIV Vseros. soveshchaniya po podzemnym vodam Vostoka Rossii s mezhdunar. uchastiem (Ekaterinburg, 21–28 iyunya 2024 g.)* [Underground hydrosphere. Proceedings of the XXIV All-Russian workshop on groundwater of the East of Russia with international participation (Ekaterinburg, June 21–28, 2024)]. Ekaterinburg, IGD UrO RAN Publ., 2024, pp. 101–107.

4. Vasenin V. A. *Chislennoye modelirovaniye ispytaniy buronabivnoy svai i baretty dlya stroitel'stva vysotnogo zdaniya v g. Sankt-Peterburge* [Numerical modeling of bored pile and barette tests for construction of a high-rise building in St. Petersburg]. *Geotekhnika – Geo-engineering*, 2010, no. 5, pp. 38–47.

5. Korolev K. V. *Promezhutochnaya nesushchaya sposobnost' vodonasyschennogo osnovaniya lentochnogo fundamenta* [Intermediate bearing capacity of the water-saturated base of the strip foundation]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, Foundations and Soil Mechanics*, 2014, no. 1, pp. 2–6.

6. Korolev K. V. *Nachal'naya nesushchaya sposobnost' vodonasyschennogo osnovaniya lentochnogo fundamenta pri razlichnykh koeffitsientakh porovogo davleniya* [Initial bearing capacity of the water-saturated base of the strip foundation at various pore pressure factors]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, Foundations and Soil Mechanics*, 2013, no. 1, pp. 6–9.

7. Gol'dshteyn M. N. *Mekhanicheskie svoystva gruntov* [Mechanical properties of soils]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979, 304 p.

8. Solov'ev Yu. I., Smolin Yu. P. *Mgnovennaya prochnost' konsolidiruyushchikhsya gruntov* [Instantaneous strength of consolidating soils]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektur – Bulletin of Universities. Construction and Architecture*, 1976, no. 9, pp. 33–37.

9. Skempton A. W. The Pore-Pressure Coefficients A and B. *Geo-engineering*, 1954, vol. 4 (4), pp. 143–147.

10. Mangushev R. A., Bashmakov I. B., Paskacheva D. A., Kvashuk A. V. Mathematical modeling of undrained behavior of soils. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2023, vol. 19 (1), pp. 97–111.

11. Luo Lisha, Yang Yang, Shen Zhifu, Zhang Wangcheng, Wang Zhihua, Wang Xudong, Gao Hongmei, Xu Qier. Experimental study on the mechanical behavior of artificially prepared stratified soil in triaxial compression tests. *Acta Geotechnica*, 2025, vol. 20 (2), pp. 543–562.

12. Liu Yaxu, Zhuang Liu, Erwin Oh, Dominic Ek Leong Ong. Strength and Microstructural Assessment of Reconstituted and Stabilised Soft Soils with Varying Silt Contents. *Geosciences*, 2021, vol. 11 (8), 302. DOI 10.3390/geosciences11080302.

13. Slivets K. V. *Naturnye nablyudeniya za deformatsiyami ograzhdayushchikh konstruktsiy opytnogo kotlovana i gruntovogo massiva* [Field observations of deformations of enclosing structures of the test pit and soil massif]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya – Bulletin of St. Petersburg University of Communication*, 2008, no. 3 (16), pp. 226–234. ISSN 1815-588X. eISSN 2658-6851.

14. Karaulov A. M., Korolev K. V. *Sticheskoe reshenie zadachi ustoychivosti svobodno stoyashchey gladkoy shpuntovoy stenki* [Static solution of the

stability problem of a free-standing smooth sheet pile wall]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, Foundations and Soil Mechanics*, 2017, no. 4, pp. 2–6.

15. Karaulov A. M., Korolev K. V., Smolin Yu. P. *Opreделение predel'nykh davleniy na ograzhdeniya s uchetom seismicheskikh vozdeystviy* [Determination of limiting pressures on fences taking into account seismic impacts]. *Vestnik Sibirskogo gos. un-ta putey soobshcheniya – Bulletin of the Siberian State University of Railways*, 2017, no. 4 (43), pp. 49–53.