

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 624.131.43

МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ОСНОВНОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ОСНОВЕ ТРАДИЦИОННЫХ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ

Лю Сяовэнь, Ван Мэн-цзя, Сюй Фань, Ван Вэньдун, Е Юнь-Сюэ

Наньчанский университет,

E-mail: liuxiaowen@ncu.edu.cn, г. Наньчан, пров. Цзянси, Китай

Рассмотрены три типа грунтов из провинции Цзянси (Китай): латерит, гранитный элювиальный грунт и набухающий грунт. С помощью традиционных геотехнических испытаний получены их основные гидрофизические характеристики. Проведено исследование основных гидрофизических характеристик при осушении и при адсорбции влаги в условиях осевой вертикальной пригрузки образца с помощью специального мембранного прижимного пресса. Эта методика является существенно более простой по сравнению с традиционной. Сравнение результатов показало, что основные гидрофизические характеристики, измеренные в различных методиках, дают близкие результаты.

Усадка грунта, трехосное испытание, метод мембранного пресса, теоретический анализ, основная гидрофизическая характеристика

DOI: 10.15372/FTPRPI20220415

Основная гидрофизическая характеристика (ОГХ) описывает соотношение между капиллярно-сорбционным давлением и влажностью грунта. При увеличении влажности грунта происходит увеличение его объема (набухание). В этом случае прочность на сдвиг уменьшается и под действием нагрузки грунт может перейти в неустойчивое состояние [1]. Если при возведении котлована капиллярно-сорбционное давление в грунте уменьшается в результате повышения влажности почвы из-за выпадения осадков или просачивания влаги, то борта возводимого котлована могут обрушиться. Уменьшение капиллярно-сорбционного давления не только приводит к неустойчивости грунтов и оползневым явлениям, но также влияет на состояние фундамента объектов гражданской инфраструктуры [2]. Это может вызвать оползни, сели и другие катастрофические явления, которые в значительной степени влияют на повседневную жизнь населения, несут угрозу жизни людей и приводят к материальным затратам [3].

Для решения указанных проблем исследование ОГХ является крайней важной и актуальной задачей с инженерно-прикладной точки зрения. Существует два метода определения ОГХ: прямой и косвенный.

В прямом методе используются соответствующие инструменты для прямого измерения ОГХ образца. В [4] измерено капиллярно-сорбционное давление латерита из провинции Цзянси с помощью фильтрующей бумаги, получено ОГХ ненасыщенного латерита при различных значениях сухой плотности и рассмотрено соотношение между капиллярно-сорбционным давлением, влажностью и плотностью образца грунта. С помощью прибора для измерения влагонасыщения почвы HYPROP2 в [5] описан эффективный и точный метод определения ОГХ.

Косвенный метод заключается в использовании для расчета ОГХ существующих теоретических математических моделей. Для измерения ОГХ в лабораторных условиях наиболее распространен метод прямого перехода [6], при котором поровое давление воды трансформируется от нормального атмосферного давления к предельному давлению равновесного состояния. Капиллярно-сорбционное давление может быть точно измерено или отслежено с помощью данной технологии. Для этого применяются следующие инструменты: мембранный прижимной пресс, устройство для трехосного нагружения ненасыщенных грунтов и т. д. В результате испытаний по нагружению образцов, состоящих из смеси грунта и песка, и использования теории Байеса определены параметры ОГХ при различных соотношениях песка и грунта и рассмотрено влияние наличия песка в составе лессового грунта на вид кривой ОГХ [7]. В [8] исследован эффект остаточной пластической пленки в порах грунта и проанализирована ОГХ в процессе извлечения прижимной пластины. В [9] показано влияние возраста отвала и сухой плотности на параметры ОГХ окружающего грунта путем анализа тренда насыщения в рамках “жизненного цикла” отвала. Гигроскопический метод (метод равновесия солевых растворов) заключается в том, что после вакуумного насыщения образец помещается в керамический эксикатор, где образуется раствор соли. Затем раствор перемешивается и по изменению влажности фильтрующей бумаги измеряется давление пара. Когда влажность фильтрующей бумаги перестает меняться, наступает равновесное состояние. Далее в соответствии с калибровочным уравнением рассчитывается значение капиллярно-сорбционного давления при различных значениях влажности [10].

На основе изложенного можно сделать вывод о том, что вне зависимости от выбранного метода всегда необходимо достичь баланса капиллярно-сорбционного давления, т. е. ситуации, когда количество влаги в образце перестает изменяться. В этом случае можно определить содержание влаги, соответствующее капиллярно-сорбционному давлению. Из-за различия свойств различных типов грунтов требуемое время для их испытаний также значительно различается. В общем случае для песка и алевролита равновесное состояние достигается спустя 7–15 сут, тогда как для глинистого грунта это время составляет порядка 1–2 мес.

В [11] для моделирования ОГХ применен метод прерывистой деформации с учетом капиллярной и стесненной воды на микромасштабе; в [12] использована VG-модель и закон изменения коэффициента относительной проницаемости грунтов для описания ОГХ грунта из разломных зон вблизи населенного пункта Дахуа. Метод оценки ОГХ на основе распределения размеров частиц крупнозернистого грунта предложен в [13, 14]. В [15, 16] в качестве быстрого и простого метода оценки ОГХ использованы педотрансферные функции. Метод оценки ОГХ на основе ограниченного набора экспериментальных данных представлен в [17]. В нем использовано 78 наборов экспериментальных данных из научной литературы для определения математического соотношения между тремя ключевыми точками ОГХ. На основе отобранных данных установлено, что указанный метод имеет удовлетворительную эффективность по прогнозированию полной ОГХ всех типов грунтов: от крупно- до мелкозернистых. В [18] использовано шесть датчиков, расположенных на разной глубине и в различных точках в районе обочин

автомагистрали, для измерения объемной влажности грунта и его капиллярно-сорбционного давления. Собранные данные обработаны численно для определения ОГХ с помощью уравнения Фэня Гэньцина [18]. В [19] предложен метод анализа устойчивости ненасыщенного откоса в рамках усредненной байесовской модели.

Ввиду значительного времени достижения равновесного состояния процесс определения ОГХ является трудоемким и финансово затратным, что представляет серьезную проблему при решении прикладных инженерных задач в рамках современных технических условий. Осушение и абсорбция влаги для определения диапазонов изменения капиллярно-сорбционного давления требуют отдельного выполнения множественных испытаний [19]. Таким образом, поиск простого и экономически эффективного метода определения ОГХ, позволяющего получить результат за короткое время и с высокой точностью, является крайне актуальной задачей.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Анализ образцов грунта. Для оценки возможности определения ОГХ и ее точности с помощью традиционных геотехнических испытаний рассмотрены три типа образцов: низкопластичный илистый песок (латерит), гранитный элювиальный грунт (глина) и набухающий грунт. И использованные образцы латерита получены из окрестностей оз. Яоху, г. Наньчан (Цзянси); образцы гранитного элювиального грунта — из борта карьера в округе Юду, г. Ганьджоу (Цзянси), образцы набухающего грунта — из района Пукоу, г. Нанкин (Цзянси). Согласно стандарту проведения геотехнических испытаний, выполнены следующие исследования образцов: фракционный анализ, гранулометрический анализ и анализ нижнего и верхнего пределов текучести. Полученные в результате испытаний основные физические свойства образцов представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Основные показатели физических свойств образцов грунта

Образец грунта	Относительная плотность частиц грунта G_s , г/см ³	Максимальная сухая плотность ρ_d , г/см ³	Оптимальная влажность W_{opt} , %	Верхний предел текучести W_L , %	Нижний предел текучести W_P , %	Индекс пластичности I_p
Латерит	2.71	1.86	16.9	31.5	19.1	12.4
Гранитный элювиальный грунт	2.73	1.67	25.6	42.0	22.9	19.1
Набухающий грунт	2.69	1.66	24.1	76.0	29.0	47.0

Образцы латерита обладают низким нижним пределом пластичности. Индекс пластичности образцов латерита составляет $I_p = 12.4$ и находится в диапазоне $10 < I_p < 17$. Это типичное значение для низкопластичных алевритистых песков, которые широко распространены в провинции Цзянси. Гранитный элювиальный грунт имеет серо-белый цвет, крайне малый размер частиц, т. е. доля частиц с размером менее 0.075 мм превышает 80 %, что является показателем выветренности грунта. Верхний предел пластичности менее 50 %. Индекс пластичности составляет $I_p = 19.1$. Таким образом, данный грунт относится к группе глинистых грунтов. Набухающий грунт имеет серовато-желтый цвет, гладкую структуру зерен и богат гидрофильными минералами. Он обладает очевидным свойством увеличивать свой объем при абсорбции воды и уменьшать объем — при высыхании. Степень свободного набухания образца составляет около 70 %, что относит его к группе средненабухающих грунтов.

Для девяти образцов грунтов с различными значениями размеров частиц, набухаемости и сухой плотности проведены испытания образцов на сжатие прижимной плитой, на усадку образцов при высушивании, на консолидированное дренирование. Схема проведения испытаний представлена в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Схема измерения ОГХ с помощью традиционных геотехнических испытаний

Номер образца	Образец	Исходная массовая влажность, %	Исходная сухая плотность, г/см ³
T1	Латерит	16.9	1.60
T2			1.65
T3			1.70
Y1	Гранитный элювиальный грунт	25.6	1.45
Y2			1.55
Y3			1.60
Z1	Набухающий грунт	24.0	1.42
Z2			1.50
Z3			1.58

Измерительная аппаратура. Учитывая, что традиционный манометр мембранного пресса имеет определенную погрешность [20], в работе использован его усовершенствованный вариант [21]. Усовершенствована также конструкция передачи сжимающего усилия на образец грунта при осевом сжатии, что сделало ее более удобной. В ходе испытаний воздух под давлением нагнетается в камеру из нержавеющей стали, в которой находится образец, с целью создания порового давления в жидкости и выдавливания ее через глиняную плиту. При увеличении давления воздуха объем влаги в измерительной трубке повышается, а содержание влаги в трубке снятия давления уменьшается. После наступления равновесия между капиллярно-сорбционным давлением и давлением воздуха, по значению давления воздуха и количеству дренированной влаги можно получить ОГХ.

В качестве установки для сжатия образцов грунта и дренирования влаги используется аппарат SLB-1, позволяющий осуществлять трехосное сжатие. На данном аппарате возможно проводить испытания неуплотненных и неосушенных грунтов, уплотненных неосушенных грунтов, уплотненных осушенных грунтов, а также выполнять анизотропное и изотропное уплотнение, насыщение образцов водой при сбросе давления, K_0 тест, нагружение по различным траекториям в пространстве напряжений, трехосное испытание на ползучесть [22], исследование проницаемости и т. д. [23]. Система контроля давления позволяет отслеживать поровое давление влаги и дренажный отток в режиме реального времени.

Методика испытаний. Зависимость между коэффициентом пористости e и влажностью (массовая доля влаги w или объемная доля влаги θ), называемая кривой усадки, может быть получена в ходе испытания на усадку при осушении грунта. В процессе осушения насыщенный образец медленно теряет влагу и переходит в ненасыщенное состояние, испытывая деформацию усадки под действием капиллярно-сорбционного давления. По кривой усадки видно, что на стадии нормальной усадки объем удаляемой влаги практически совпадает с изменением объема образца. На этой стадии объем образца меняется, однако его влагонасыщенность остается прежней, т. е. образец находится в состоянии насыщения, степень которой превышает 90 %. На стадии остаточной усадки при уменьшении скорости удаления влаги образец переходит в ненасыщенное состояние, а его объемная деформация уменьшается. На стадии нулевой усадки процесс удаления влаги из образца останавливается и его влажность практически

не меняется [24]. Остаточная влага может быть удалена путем осушения образца. Установлено, что остаточный объем влаги одного и того же типа грунта с различными значениями сухой плотности в конце осушения одинаков для всех образцов [25]. На рис. 1 представлены образы до и после усадки.



Рис. 1. Образцы грунта: до усадки (а); после усадки (б)

Для соответствия напряженному состоянию ненасыщенного образца в процессе осушения выполнено дренажное изотропное уплотнение образца с такими же начальными условиями. Для моделирования влияния капиллярно-сорбционного давления на деформацию грунта к образцу прикладывалось различное всестороннее давление, в ходе чего получены деформация и коэффициент пористости при различных значениях давления. Принято, что всестороннее давление можно считать эффективным напряжением. Изотропное уплотнение и осушение насыщенных образцов проводились с помощью установки, позволяющей осуществлять трех-осное нагружение. К образцам последовательно прикладывались следующие давления: $1 \rightarrow 5 \rightarrow 10 \rightarrow 25 \rightarrow 50 \rightarrow 100 \rightarrow 200 \rightarrow 400 \rightarrow 800$ кПа. Всестороннее давление прикладывалось пошагово до тех пор, пока поровое давление влаги не снижалось более чем на 95 %, при этом фиксировался дренаж влаги и соответствующее давление. Объемная деформация образца характеризуется коэффициентом пористости. Получена зависимость эффективного напряжения от коэффициента пористости.

Ниже представлены этапы расчета ОГХ, где использованы следующие формулы:

$$\sigma' = \sigma - u_w, \quad (1)$$

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + S_e(u_a - u_w), \quad (2)$$

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad (3)$$

где $\sigma - u_a$ — совокупное нормальное напряжение, действующее на грунт; $u_a - u_w$ — капиллярно-сорбционное давление; S_e — параметр эффективной насыщенности; S_r — остаточное насыщение; θ — объемная влажность; θ_s — объемная влажность в насыщенном состоянии; θ_r — остаточная объемная влажность.

Этап 1. Данные взяты из испытания уплотненного осушенного грунта. Так как внешняя нагрузка отсутствует, то поровое давление воздуха $u_a = 0$ и напряженно-деформированное состояние $\sigma - u_a = 0$. По формуле (2) рассчитывается эффективное напряжение образца грунта, равное $\sigma' = S_e(u_a - u_w)$, которое называется матричным или капиллярно-сорбционным давле-

нием. Полагаем, что деформация грунта в основном обусловлена изменением эффективного напряжения, поэтому значение коэффициента пористости на двух различных стадиях усадки при высушивании образца согласуется с соответствующим значением эффективного напряжения.

Этап 2. В ходе изотропного дренажного сжатия насыщенного образца получается кривая зависимости эффективного напряжения от коэффициента пористости. В соответствии с выбранным значением коэффициента пористости точки на кривой усадки образцов с одинаковой начальной сухой плотностью коррелируют между собой. В результате имеем соотношение между капиллярно-сорбционным давлением и объемной влажностью.

Этап 3. По формуле (3) рассчитывается параметр эффективной насыщенности S_e , который соответствует различной объемной влажности в процессе усадки. Капиллярно-сорбционное давление $u_a - u_w$ образца в процессе усадки находится путем подстановки параметров эффективного напряжения и эффективной насыщенности в выражение (2). В результате получаем значения капиллярно-сорбционного давления, соответствующие каждой объемной влажности при отсутствии внешней нагрузки.

Этап 4. По полученным точкам при соответствующих условиях строится кривая ОГХ.

Отметим, что в [26] посредством сравнения ядерного магнитного резонанса, математического моделирования и испытания усадки проанализированы экспериментальные результаты и сделано заключение о том, что испытание усадки является простым и эффективным прямым методом определения остаточной влажности θ_r .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Результаты определения усадки при высушивании. В соответствии со схемой испытаний проведено исследование усадки при высушивании. Получена зависимость между коэффициентом пористости и количеством влаги — кривая усадки. Коэффициент пористости после усадки грунта оказывает определенное влияние на ОГХ [27]. Как показано на рис. 2, при уменьшении влажности коэффициент пористости и сухая плотность уменьшаются. При уменьшении влажности до определенного значения коэффициент пористости далее не меняется.

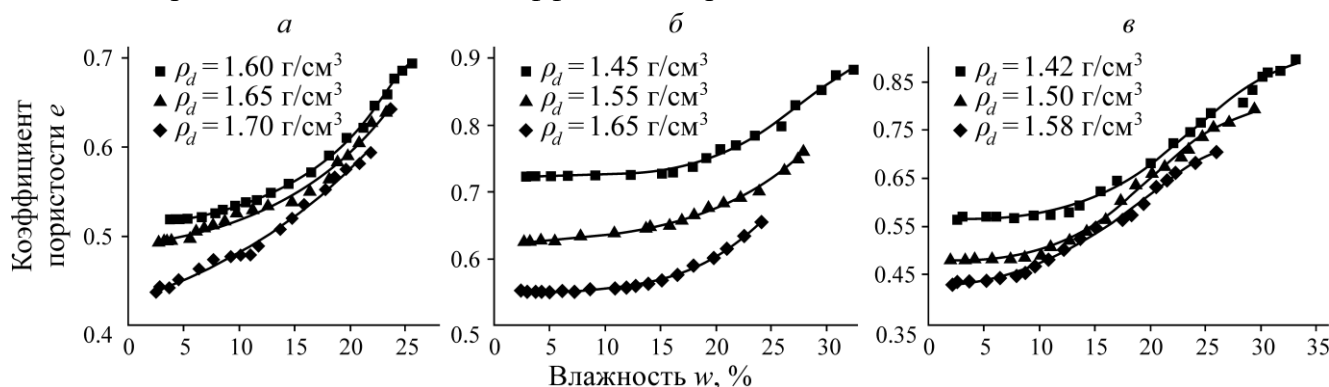


Рис. 2. Кривые усадки: латерита (а); гранитного элювиального грунта (б); набухающего грунта (в)

Результаты испытания уплотненного осушенного грунта. В [28] обсуждалась концепция формирования напряжения в структуре грунта и установлено, что эффективное напряжение во многом обуславливает прочность и деформацию грунта. В [29] рассмотрены ограничения на применимость эффективного напряжения для ненасыщенных грунтов: к образцу прикладывалось всестороннее давление, а в качестве характеристики изменения объема образца использовался коэффициент пористости. Испытания образца при консолидированном дренировании показаны на рис. 3.

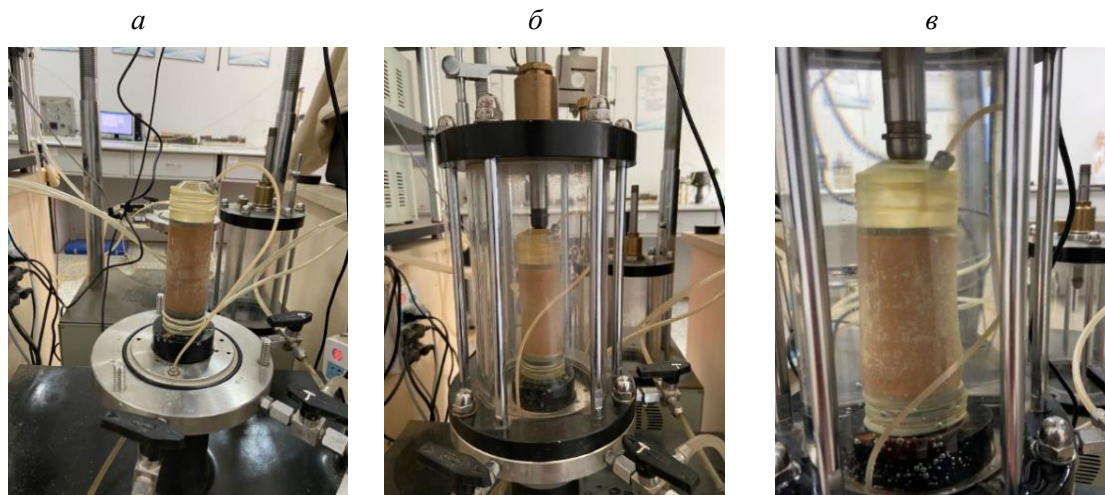


Рис. 3. Испытания на консолидированный дренаж: трехосное уплотнение образца (а); установка камер давления (б); сжатие и дренаж влаги (в)

Зависимость между коэффициентом пористости и эффективным напряжением представлена на рис. 4. Видно, что на начальной стадии приложения давления коэффициент пористости резко уменьшается, при этом объемная деформация растет. По мере увеличения давления скорость деформации образца уменьшается, а кривая коэффициента пористости показывает слабый нисходящий тренд. На этой стадии происходит основное изменение объема образца. Дальнейшее увеличение давления приводит к весьма слабому изменению коэффициента пористости, он остается постоянным и деформация образца прекращается.

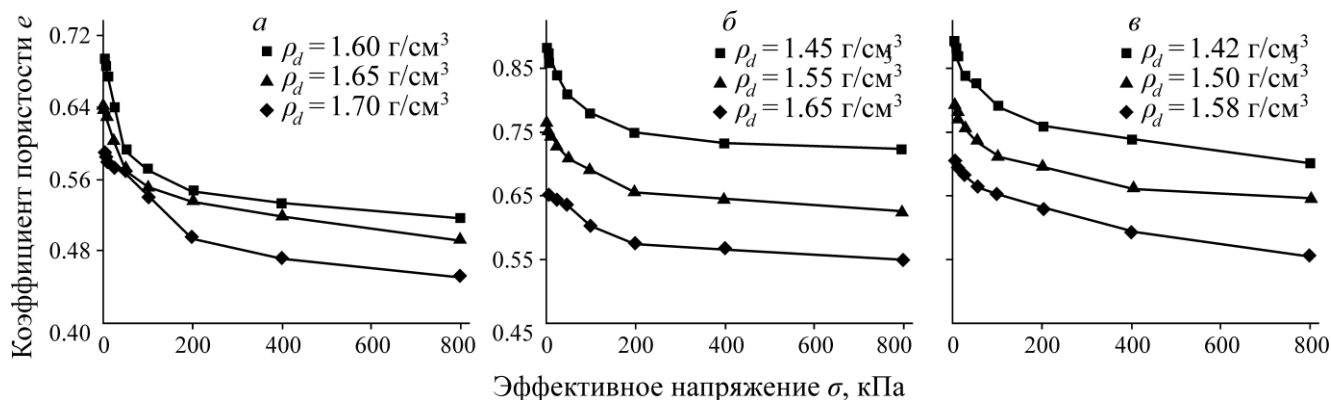


Рис. 4. Зависимость коэффициента пористости от эффективного напряжения: латерита (а); гранитного элювиального грунта (б); набухающего грунта (в)

Когда эффективное напряжение достигает значения 400 кПа, коэффициент пористости латерита перестает заметно изменяться, а его сухая плотность при небольших значениях напряжения оказывает незначительное влияние на коэффициент пористости. Из-за малого размера частиц коэффициент пористости гранитного элювиального грунта остается практически постоянным после достижения давления 200 кПа. Однако коэффициент пористости набухающего грунта продолжает уменьшаться вплоть до значения давления 800 кПа. Чем меньше сухая плотность образца, тем больше начальный коэффициент пористости. При увеличении эффективного напряжения видно, что при большей сухой плотности коэффициент пористости образца грунта меньше.

Построение ОГХ без осевой пригрузки. В случае отсутствия осевой пригрузки проведены испытания на усадку при высушивании и на консолидированный дренаж, в ходе которых получены соответствующие значения коэффициентов пористости и смещений при различных значениях всестороннего давления. Как и прежде, эффективное напряжение совпадает со всесторонним давлением. Можно предположить, что деформация грунта в основном осуществляется за счет изменения эффективного напряжения, поэтому значения коэффициента пористости в двух различных состояниях образца при усадке согласуются с соответствующими значениями эффективного напряжения. В результате по построенной зависимости “коэффициент пористости – эффективное напряжение”, а также с помощью зависимости “капиллярно-сорбционное давление – объемная влажность” построено ОГХ образцов грунта без осевой пригрузки (рис. 5).

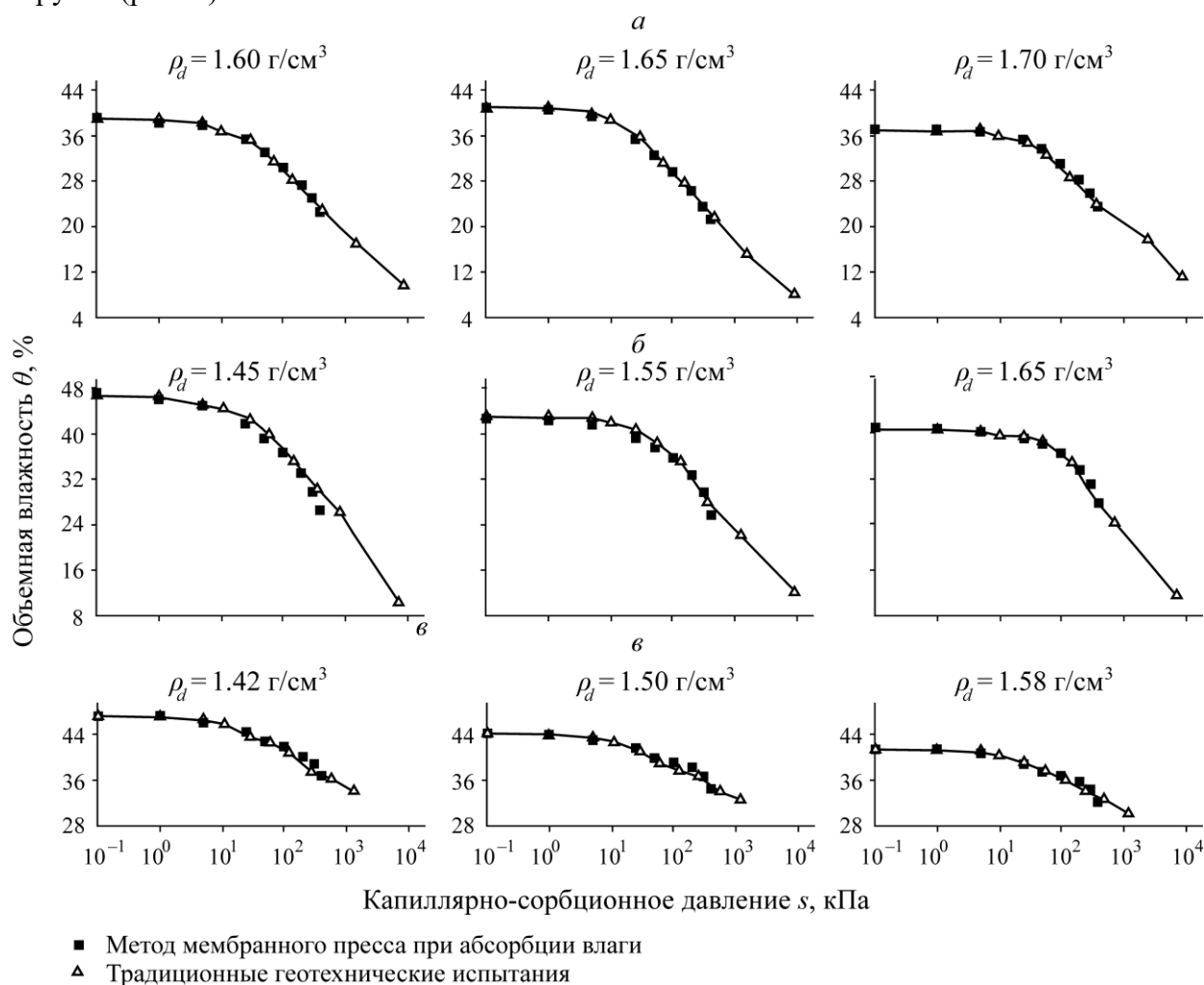


Рис. 5. ОГХ, рассчитанные с помощью традиционных геотехнических испытаний: латерита (а); гранитного элювиального грунта (б); набухающего грунта (в)

Видно, что ОГХ, рассчитанные с помощью традиционных геотехнических испытаний, в рассмотренном диапазоне капиллярно-сорбционного давления хорошо коррелируют с контрольными данными, полученными с помощью предложенной методики с использованием мембранного пресса.

Построение ОГХ в опытах с осевой пригрузкой. На практике, наряду с собственным весом, на грунт зачастую воздействует дополнительная внешняя вертикальная пригрузка. При ее действии поровая структура грунта изменяется, что влияет на его способность удерживать влагу. Таким образом, изучение влияния вертикального осевого поджатия на ОГХ имеет смысл, как в теоретическом, так и в практическом аспектах.

В работе выполнены испытания на усадку при высушивании трех различных видов образцов при действии осевого вертикального поджатия. Консолидированный дренаж с дополнительным осевым поджатием вдоль оси образца проводился на установке SLB-1 таким образом, чтобы напряженное состояние соответствовало усадке с дополнительной пригрузкой. Исходная влажность и сухая плотность латерита, гранитного элювиального грунта и набухающего грунта выбраны для образцов T2, Y2 и Z2 (см. табл. 1). ОГХ с учетом осевой вертикальной пригрузки рассчитаны с помощью формулы эффективного напряжения ненасыщенного грунта. Построенные ОГХ приведены на рис. 6.

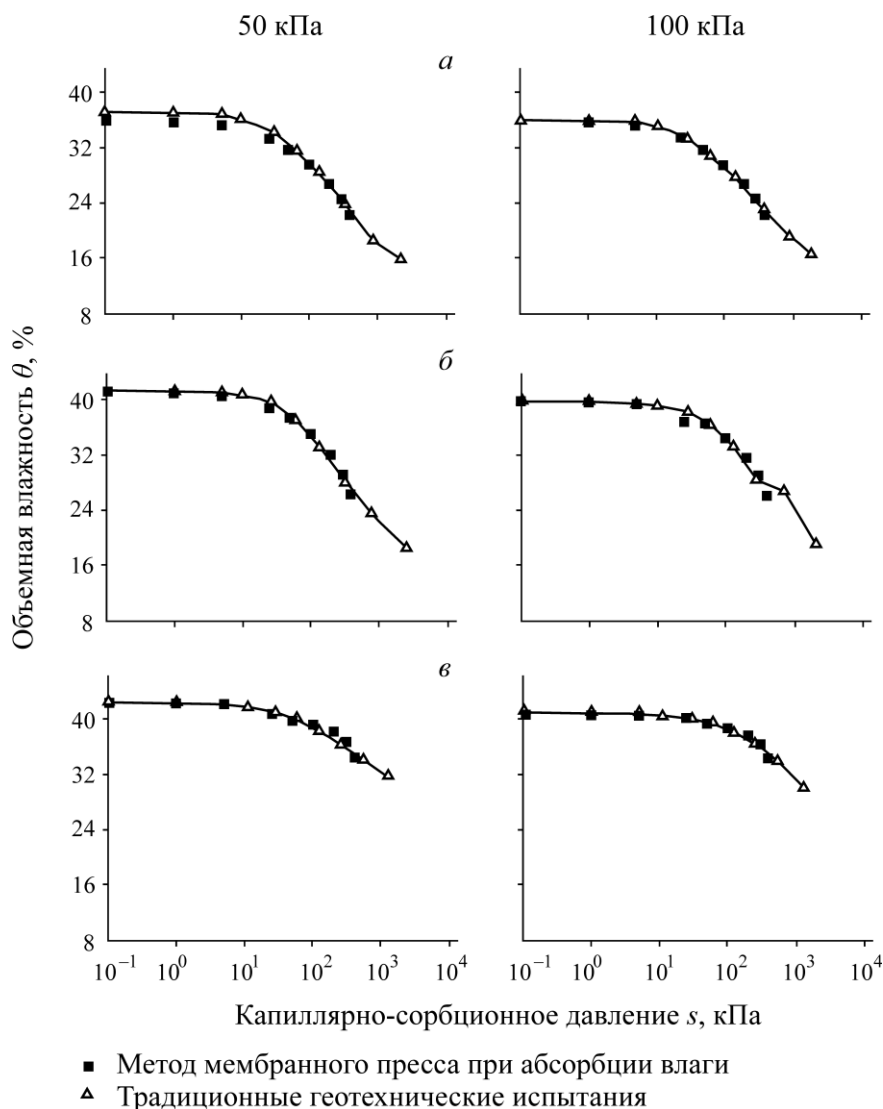


Рис. 6. ОГХ с учетом осевой вертикальной пригрузки, рассчитанные с помощью традиционных геотехнических испытаний: латерита (*a*); гранитного элювиального грунта (*б*); набухающего грунта (*в*)

Выявлено, что при увеличении осевой пригрузки объемная влажность образца в насыщенном состоянии и исходное давление практически не изменяются, однако остаточная объемная влажность увеличивается. Это свидетельствует о том, что в условиях равного капиллярно-сорбционного давления пористость грунта становится меньше в силу дополнительного осевого поджатия. Отметим, что метод измерения ОГХ с использованием традиционных геотехнических испытаний широко применяется и имеет хорошую точность. Он требует меньшего времени на измерения и более простого измерительного оборудования. ОГХ, измеренная таким образом, близка к ОГХ грунта, находящегося под давлением налегающих пластов или под иной внешней нагрузкой.

Построение ОГХ при абсорбции влаги. Имеется ряд различий в случаях, когда измерение ОГХ осуществляется в процессе осушения грунта или же, наоборот, в процессе абсорбции влаги. При одном и том же значении капиллярно-сорбционного давления на стадии высушивания и на стадии абсорбции влаги объем потерянной влаги не равен объему абсорбированной. На графике кривые образуют петлю гистерезиса. Это явление можно назвать сдвигом. При увеличении капиллярно-сорбционного давления влажность осушаемого грунта уменьшается, тогда как при уменьшении капиллярно-сорбционного давления влажность грунта при абсорбции влаги увеличивается. На практике в силу цикличности процессов увлажнения-осушения и постоянно меняющейся влажности устойчивые поверхности грунта могут потерять устойчивость, что может привести к техногенным катастрофам (оползень, обрушение) [30]. Поэтому измерение ОГХ в процессе абсорбции влаги имеет важное значение для изучения напряженного состояния, прочности и деформации ненасыщенных грунтов.

С учетом рассмотренных методик исследовано набухание грунта при его увлажнении в рамках опытов на насыщение с помощью снятия всестороннего давления. На основе полученных данных с помощью формулы эффективного напряжения построены ОГХ в процессе абсорбции влаги. Исходная влажность и сухая плотность латерита, гранитного элювиального грунта и набухающего грунта выбраны для образцов Т2, Y2 и Z2 (см. табл. 1). Результаты показаны на рис. 7.

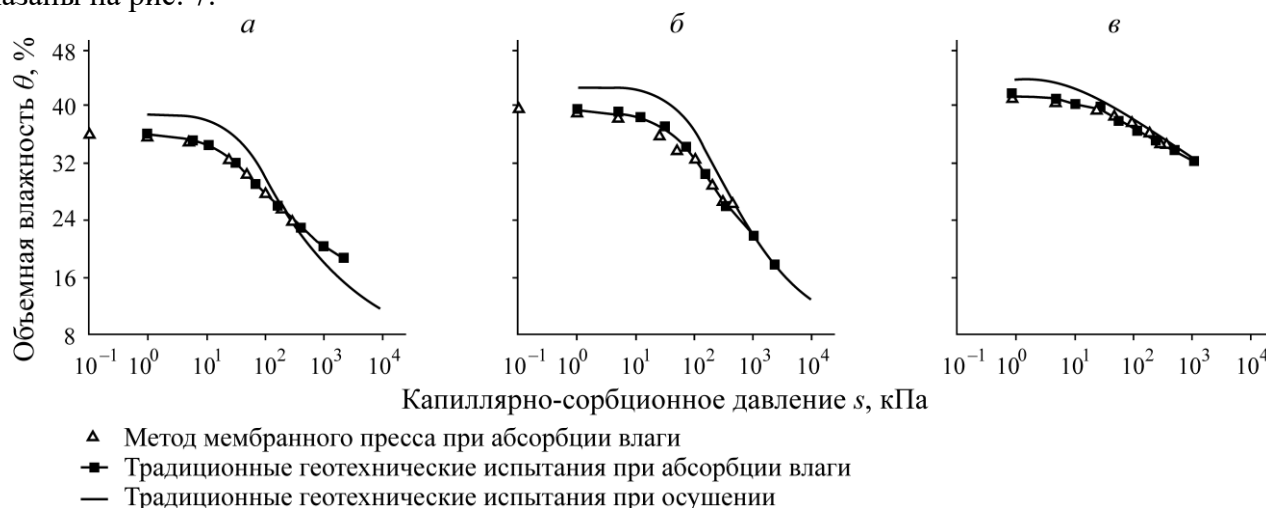


Рис. 7. ОГХ, рассчитанные с помощью традиционных геотехнических испытаний, в ходе гигроскопического процесса: латерита (а), гранитного элювиального грунта (б), набухающего грунта (в)

Полученные данные хорошо коррелируют с контрольными, полученными с помощью мембранного пресса, однако объемная влажность в насыщенном состоянии отличается. В основном это отличие обусловлено тем, что остаточная влага содержится в малых порах грунта в процес-

се абсорбции воды, что блокирует обратный отток влаги и приводит к изменению соотношения “грунт – вода”. При капиллярно-сорбционном давлении, равном нулю, траектории кривой ОГХ при абсорбции влаги и при ее потере не одинаковы, однако значения остаточной объемной влажности близки друг к другу. При стремлении капиллярно-сорбционного давления к бесконечности кривые адсорбции влаги и ее потери сходятся.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В опытах на усадку при высушивании и на консолидированный дренаж влаги при задании осевой дополнительной пригрузки получены основные гидрофизические характеристики образцов трех типов грунтов (латерита, гранитного элювиального грунта и набухающего грунта). Полученные зависимости коэффициента пористости от эффективного напряжения в процессе деформации усадки и соответствующие кривые усадки коррелируют с аналогичными зависимостями, рассчитанными на основе традиционных геотехнических испытаний. Методика определения ОГХ при задании осевой вертикальной пригрузки является более простой и дает удовлетворительную точность измерений.

Представлена методика определения ОГХ с использованием традиционных геотехнических испытаний. На основе всестороннего уплотнения и осушения влагонасыщенного грунта строится зависимость между коэффициентом пористости и эффективным напряжением. Коэффициент пористости используется для описания деформации образца и соотносится с кривой усадки. Строится зависимость капиллярно-сорбционного давления и объемной влажности ненасыщенного грунта, причем давление для различных значений объемной влажности рассчитывается путем подстановки параметра эффективного насыщения в уравнение эффективного напряжения ненасыщенного грунта. Данная методика позволяет за один эксперимент получить ОГХ в широком диапазоне капиллярно-сорбционного давления.

Предложена методика определения ОГХ на стадии абсорбции влаги. Соотношение между коэффициентом пористости и влажностью в процессе абсорбции получено путем регулирования количества добавляемой влаги (осуществляется с помощью шприца) с одновременным измерением геометрических размеров образца (с помощью штангенциркуля). Измерение эффективного давления при насыщении выполнялось на установке трехосного нагружения с регистрацией на компьютере. В результате рассчитана ОГХ образца грунта при абсорбции влаги. Следует отметить, что в рамках данной методики возникают две проблемы. Первая заключается в том, что регулирование влажности грунта с помощью шприца и измерение геометрических размеров образца штангенциркулем могут иметь значительную погрешность. Вторая проблема состоит в том, что для подсчета влажности и насыщения грунта используются аналитические выражения. В процессе приложения внешней нагрузки глиняная пластина может быть только в двух состояниях: проницаемая и непроницаемая, также давление воздуха вокруг образца приводит к небольшим изменениям внутренних пор. Существующее оборудование не позволяет определить изменение коэффициента пористости, вызванное указанными причинами, в результате чего экспериментальные результаты могут иметь некоторую погрешность. Измерительное оборудование, используемое в данной методике, требует совершенствования.

По сравнению с другими методами определения ОГХ, предложенные в работе методики значительно упрощают весь процесс определения ОГХ и имеют перспективы практического использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Jotisankasa A., Coop M., and Ridley A.** The mechanical behaviour of an unsaturated compacted silty clay, *Géotechnique*, 2009, Vol. 59, No. 5.
2. **Vann J. D. and Houston S. L.** Field soil suction profiles for expansive soil, *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, 2021, Vol. 147, No. 9.
3. **Wang S., et al.** Unsaturated creep behaviors and creep model of slip-surface soil of a landslide in Three Gorges Reservoir area, China, *Bull. of Eng. Geology and the Env.*, 2021 (prepublish).
4. **Li-jun.** Experimental research of matric suction with water content and dry density of unsaturated laterite, *Rock and Soil Mech.*, 2009, Vol. 30, No. 11. — P. 3302–3306.
5. **Shokrana M. S. B. and Ghane E.** Measurement of soil water characteristic curve using HYPROP2, *MethodsX*, 2020, Vol. 7. — P. 100840.
6. **Jia H.** A research about the axis-translation testing technology and its application in the SWCC of unsaturated soil, 2016, Tianjin Chengjian University.
7. **Tao Rui et al.** Experimental study and parameter identification of soil water characteristic curve of sandy loess, *Eng. J. Wuhan University*, 2021.
8. **Suozhu F., et al.** Prediction of soil-water characteristic curve based on soil pore size distribution, *J. Geotechnical Eng.*, 2021.
9. **Dang M., et al.** Soil water characteristic curve test and saturated-unsaturated seepage analysis in Jiangcungou municipal solid waste landfill, China, *Eng. Geology*, 2020, Vol. 264.
10. **Agus S. S., Leong E. C., and Rahardjo H.** Soil–water characteristic curves of Singapore residual soils, *Geotechnical and Geological Eng.*, 2001, Vol. 19, No. 3–4.
11. **Guo L., et al.** A bound water model for numerical simulation of SWCC in the wide suction range based on DDA, *Comput. and Geotechnics*, 2021, Vol. 139.
12. **Yue Li, et al.** Experimental study of unsaturated-saturated permeability characteristics of slip soil in landslide deposits, *Rock and Soil Mechanics*, 2021.
13. **Zhai Q., et al.** Estimation of the soil-water characteristic curve from the grain size distribution of coarse-grained soils, *Eng. Geology*, 2020, Vol. 267.
14. **Zhai Q., et al.** Estimation of the wetting scanning curves for sandy soils, *Eng. Geology*, 2020, Vol. 272.
15. **Bayat H., Mazaheri B., and Mohanty B. P.** Estimating soil water characteristic curve using landscape features and soil thermal properties, *Soil & Tillage Research*, 2019, Vol. 189.
16. **Pham K., et al.** Analysis of neural network based pedotransfer function for predicting soil water characteristic curve, *Geoderma*, 2019, Vol. 351.
17. **Ren X., et al.** A method for estimating soil water characteristic curve with limited experimental data, *Geoderma*, 2020, Vol. 360.
18. **Hedayati M., et al.** Evaluation and comparison of in-situ soil water characteristics curve with laboratory SWCC curve, *Transportation Geotechnics*, 2020, Vol. 23.
19. **Li D., Wang Lin, Cao Z., and Qi X.** Reliability analysis of unsaturated slope stability considering SWCC model selection and parameter uncertainties, *Eng. Geology*, 2019, Vol. 260.
20. **Gubiani, P.I., et al.** Assessing errors and accuracy in dew-point potentiometer and pressure plate extractor measurements, *Soil Sci. Society of America J.*, 2013, Vol. 77, No. 1.
21. **Benson C. and Wang X.** Leak-free pressure plate extractor for measuring the soil water characteristic curve, *Geotechnical Testing J.*, 2004, Vol. 27, No. 2.
22. **Long Z., et al.** Study on triaxial creep test and constitutive model of compacted red clay, *Int. J. Civil Eng.*, 2020 (prepublish).
23. **Liu J. and Peng Li-yun.** Experimental study on the unconfined compression of a thawing soil, *Cold Regions Sci. and Technol.*, 2009, Vol. 58, No. 1.

24. **Zhang J.** Experimental study on drying shrinkage of kaolin, 2018, Dalian University Technol.
25. **Shao Long-tan, Guo Xiao-xia, and Guo-feng Z.** Intergranular stress, soil skeleton stress and effective stress, Chinese J. Geotechnical Eng., 2015, Vol. 37, No. 08. — P. 1478–1483.
26. **Tao Gao-liang, et al.** Determination of the residual water content of SWCC based on the soil moisture evaporation properties and micro pore characteristics, Rock and Soil Mech., 2018, Vol. 39, No. 04. — P. 1256–1262.
27. **Wen T., et al.** Experimental investigations of soil shrinkage characteristics and their effects on the soil water characteristic curve, Eng. Geology, 2021, Vol. 284.
28. **Duan X., Zeng L., and Sun X.** Generalized stress framework for unsaturated soil: demonstration and discussion, Acta Geotechnica, 2019, Vol. 14, No. 5.
29. **Zhao C., et al.** Average soil skeleton stress for unsaturated soils and discussion on effective stress, Int. J. Geomechanics, 2015.
30. **Nunes G. B., de Oliveira O. M., Massocco N. S., and Higashi Rafael Augusto dos Reis.** Study of the influence of suction profile seasonal variations in the global sliding safety factor of a granite residual soil slope, Bul. Eng. Geol. Env., 2021 (prepublish).

Поступила в редакцию 08/XII 2021

После доработки 18/V 2022

Принята к публикации 30/VI 2022