БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
СТРОИТЕЛЬНЫЙ ФАКУЛЬТЕТ

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ГЕОТЕХНИКА БЕЛАРУСИ: НАУКА И ПРАКТИКА
(г. Минск, БНТУ — 23–25.10.2013)

УДК 624.131

ПЕСКИ IN SITU: ПОРИСТОСТЬ

Сысоев Ю.А.
ООО «Оренбург Прожект Менеджмент», г. Москва, Россия

Рассматриваются теоретические и практические аспекты оценки коэффициента пористости песков in situ.

Discusses the theoretical and practical aspects of the coefficient of porosity sands estimation in situ.

Наиболее точными и надежными методами оценки пористости песка в естественном залегании остаются методы, применяемые при работе в естественных или искусственных обнажениях и открытых горных выработках. Отбор качественных проб песка ненарушенной структуры из буровых скважин – весьма трудоемкое мероприятие, тем не менее, тщательная подготовка и проведение отбора пробы песка с глубины при отношении к процессу как к серьезной полевой операции, видимо, позволяет добиться приемлемого качества результата для слоев, залегающих выше уровня грунтовых вод. Из насыщенных песков, без специализированных методик отбора, применение которых в подавляющем большинстве случаев не рентабельно, отобрать образец ненарушенной структуры практически невозможно. Мнение авторитетных исследователей на протяжении многих десятилетий остается неизменным на этот счет.

В литературе время от времени предлагаются различные способы определения коэффициента пористости песков, не предполагающие обязательного условия наличия в распоряжении инженера

образца ненарушенной структуры. Некоторые из них весьма экзотичны. Другие основаны на эмпирических данных, не всегда учитывающих все факторы влияния и ограниченных условиями проведения опыта. Именно поэтому при разработке новых способов оценки пористости песков in situ, потенциал следует искать в известных зависимостях. Вот они:

$$I_d = \left(e^{\max} - e\right) / \left(e^{\max} - e^{\min}\right), \quad (1)$$

$$I_d = \frac{p_d^{\max} \times \left(p_d - p_d^{\min}\right)}{p_d \times \left(p_d^{\max} - p_d^{\min}\right)}. \quad (2)$$

В формуле (2) параметр, представляющий собой пару значений ($p_d^{\max}$; $p_d^{\min}$), можно назвать предельной плотностью скелета грунта. Теоретически имеется бесконечное множество значений параметра предельной плотности, соответствующих той или иной влажности и методу укладки грунта в условиях необходимой работы, затрачиваемой на его предельное уплотнение или необходимых усилий, если речь идет о получение наиболее рыхлой структуры. Принимая величину такой работы (усилий) максимальной, с практических позиций наибольший интерес представляют сами методы укладки, в первую очередь, условия, при которых реализуются эти методы [4]: укладка грунта может быть выполнена при его влажном состоянии (M^W), в сухом состоянии при гигроскопической влажности (D) и в условиях водной седиментации (S).

Сравнение значений предельных плотностей одного и того же песка, уложенного максимально плотно и максимально рыхло различными методами, показывает [4, 8]: максимальные и минимальные коэффициенты пористости, входящие в формулу определения степени плотности I_d, следует оценивать через соответствующие значения плотности скелета, полученные на увлажненных образцах. Несмотря на это, в подавляющем большинстве случаев предельную плотность песков определяют при их гигроскопической влажности. При таком положении дел становится ясно, почему в результате получаются не совсем те значения I_d, какие имел в виду К. Терцаги, впервые предложивший классифицировать пес-

ки, используя этот показатель, убежденный в том, что механические свойства несвязных грунтов почти целиком зависят от него [5].

Структура песка, как и любого другого грунта, суть система морфологических, геометрических и энергетических признаков. Степень плотности I_d относится к показателям, характеризующим энергию структуры. Без установления потенциала энергии структуры невозможно представить изыскания на строительной площадке.

Исследования изменения энергии структуры в направлении ее минимальных значений (в направлении $p_d^{\max}$) – задача сложная, но контролируемая, в отличие от исследований в направлении максимальных значений энергии (в направлении $p_d^{\min}$), потенциал которой уже частично реализован под воздействием природных факторов.

До настоящего времени отсутствуют унифицированные методы определения параметра $p_d^{\min}$, при том, что наиболее рыхлый песок может быть получен только методом влажной отсыпки. Создание очень рыхлых структур влажного песка происходит благодаря возникновению капиллярного эффекта между частицами. Явление, представляющее собой увеличение объема влажного песка по отношению к объему сухого песка, Г.П. Чеботарев называл явлением разбухания. Г.П. Чеботарев считал, что в лабораторных условиях при создании наиболее рыхлой структуры песок должен быть совершенно сухим. В противном случае необоснованно возрастает значение $e^{\max}$, а это, в свою очередь, в недопустимой степени увеличивает значение относительной плотности [9]. Главным аргументом в этом вопросе Г.П. Чеботарев называл невозможность разбухания песка в природных условиях, поскольку пески в естественном состоянии откладываются или из текущей воды, когда они полностью насыщены, или под действием ветра, когда они абсолютно сухие.

Принимая во внимание мнение Г.П. Чеботарева, все же представляется, что среда образования природной структуры песка не имеет отношения к оценке его предельных состояний. Условия укладки песка в сухом состоянии или водной седиментациеи важны при физическом моделировании структуры образца, когда генезис и плотность отложений известны. Но при создании рыхлой структуры этими методами укладки нельзя утверждать, что потенциальная энергия уплотнения таких структур будет максимальной.

Образовываясь из флюидов или газа, осадок в процессе своего преобразования, начиная с установления контактов соударения между частицами, проходит различные стадии в направлении к своему устойчивому равновесному состоянию. Этот процесс сопровождается созданием организованных локально равновесных структур с минимумом энтропии внутри системы. Теорема о минимуме производства энтропии, впервые сформулированная И. Пригожиным, выполняется только в окрестностях состояния равновесия – области линейных неравновесных явлений, для которой скорости необратимых процессов являются линейными функциями вызывающих их сил. На границе этой области и следует определять предельные максимальные энергетические признаки структуры грунта. За ее пределами, в системах далеких от равновесия, динамическое поведение "может быть совершенно иным, более того, даже прямо противоположным тому, которое предсказывает теорема о минимуме производства энтропии" [1]. То есть, за пределами области линейных неравновесных явлений грунта как системы морфологических, геометрических и энергетических признаков не существует.

В связи с этим представляется, что подобрать лабораторный аналог структуры грунта, обладающей максимальной энергией сложения, используя различные методы укладки – задача практически неосуществимая, в то время как теоретический эквивалент такой структуры исследован М.Н. Гольдштейном. Он основан на имеющемся сходстве между молекулярными и дисперсными системами: если для первых мерой свободной энергии и объема может служить температура, то для вторых такой мерой служит коэффициент пористости, в своем максимуме эквивалентный температуре кипения молекулярных тел [2].

Определяя предельные значения коэффициентов пористости, М.Н. Гольдштейн ссылается на исследования Х. Винтеркорна, показавшего практическую неизменность соотношений изменений объема вещества абсолютно плотного состояния в зависимости от его критических температур. Рассматривая пористость песков в термодинамическом аспекте, М.Н. Гольдштейн приводит определения предельных состояний грунта, эквивалентных состояниям молекулярного вещества Винтеркорна, которые оно приобретает при температурах, равных температурам абсолютного нуля, плавления

и кипения. Переходя от молекул вещества к частицам грунта и определяя коэффициенты пористости грунта, соответствующие таким предельным состояниям при различной укладке частиц, М.Н. Гольдштейн [2] приводит данные, которые, после ряда преобразований, можно представить как:

$$e^{\max} = 1{,}42 \times \left(1 + e^{\min}\right) - 1, \tag{3}$$

$$e' = 1{,}21 \times \left(1 + e^{\min}\right) - 1, \tag{4}$$

где $e^{\min}$ – коэффициент пористости в абсолютно плотном сложении; $e^{\max}$ – коэффициент пористости в абсолютно рыхлом сложении; e' – критический коэффициент пористости при нулевой нормальной нагрузке ($\sigma_н = \sigma_3 = 0$).

Критический коэффициент пористости песка при нулевой нормальной нагрузке (нулевых сжимающих напряжениях) соответствует, таким образом, песку, находящемуся в состоянии $I_d = 0{,}5$. Поскольку критическая пористость увеличивается с уменьшением сжимающих напряжений, коэффициент пористости при степени плотности $I_d = 0{,}5$ является максимально возможным критическим коэффициентом пористости песка. Максимальное значение критического коэффициента пористости $e'_{\max}$ с дальнейшим его соотнесением с минимальным предельным (остаточным) углом внутреннего трения песка ($\varphi'_{\min}$), следует принять за критерий разделения песков на две основные группы состояний – рыхлое и плотное. А значение плотности скелета, соответствующее максимальному критическому коэффициенту пористости – за третий предельный показатель плотности скелета песка, определяющий его устойчивость – и статическую, и динамическую.

Далее, с учетом выражения (3), представим формулу (1) в виде:

$$e = M_e - I_d \times \left(M_e - e^{\min}\right), \tag{5}$$

где $M_e = 1{,}42$ x $(1 + e^{\min}) - 1$, а коэффициент пористости $e^{\min}$ рассчитывается как:

$$e^{\min} = \frac{p_s - p_d^{\max}\left(M^W\right)}{p_d^{\max}\left(M^W\right)}, \tag{6}$$

где $p_d^{\max}(M^W)$ – максимальная плотность скелета грунта, полученная методом его укладки во влажном состоянии. Рассмотрим этот параметр более подробно.

В трехкомпонентной системе влажность – плотность скелета грунта – работа уплотнения величина $p_d^{\max}(M^W)$ представляет собой предел функции $p_d(M^W) = f(A)$, где A – работа. При фиксированном значении A систему можно рассматривать как двухкомпонентную и график зависимости $p_d(M^W) = f(W)$ приобретает эвтектическую форму с максимумом функции $p_d(M^W)$ при определенном значении аргумента (влажности). Это значение влажности принято называть оптимальным (W_{opt}).

Величина $p_d^{\max}(M^{Wopt})$ является пределом функции $p_d(M^{Wopt}) = f(A)$, в связи с этим не существует возможности определить истинное значении $p_d^{\max}(M^{Wopt})$, поскольку, геометрически, любое значение $p_d(M^{Wopt})$ всегда будет оставаться меньше горизонтальной асимптоты $p_d(M^{Wopt}) = p_d^{\max}(M^{Wopt})$ графика функции $p_d(M^{Wopt}) = f(A)$. Поэтому основным становится вопрос: что следует принимать за максимальную работу уплотнения, и, в более широком смысле – какой методики следует придерживаться при определении $p_d^{\max}(M^W)$ для подстановки этого значения в формулу (6)?

К. Терцаги [8] и вслед за ним Г.П. Чеботарев [9] в качестве метода определения $e^{\min}$ называют метод Проктора: минимальный коэффициент пористости должен отвечать структуре песка, находящейся в самом плотном состоянии, «какое только может быть получено лабораторным путем» [8]. Это утверждение представим в виде:

$$p_d^{\max}\left(M^W\right) = k_A \times p_d^{\max}\left(M^{Wopt}\right), \qquad (7)$$

где k_A ($k_A > 1$) – коэффициент работы, $p_d^{\max}(M^{Wopt})$ – плотность скелета грунта, определенная по стандартной методике Р. Проктора (для песков – по ГОСТ 22733).

Нужно заметить, что определение значения коэффициента k_A, которое без всякого практического ущерба можно было бы принять при расчетах $p_d^{\max}(M^W)$ по формуле (7) – вопрос тщательных лабораторных исследований. На текущем этапе разработки этого вопроса значение коэффициент k_A было бы обоснованным принять равным 1,035 – за счет перехода от стандартной методики испытаний к методике AASHO (в терминологии ГОСТ 22733 – модифициро-

ванной методике Проктора) и 1,5% предельной погрешности определения максимальной плотности, допускаемой ГОСТ 22733 в параллельных опытах.

Таким образом, оценив коэффициент пористости в абсолютно плотном сложении e^{min}, остается найти последнюю неизвестную величину из формулы (5). Это степень плотности I_d.

Для решения большого круга практических задач целесообразно воспользоваться наиболее простой и надежной из имеющихся корреляционных зависимостей, рекомендованной рядом авторитетных отечественных и зарубежных исследователей [3, 4, 6]:

$$I_d = -A + B \times \log\left(q_c \Big/ \sqrt{\sigma_v'}\right), \qquad (8)$$

где $A = 98$ и $B = 66$ – эмпирические коэффициенты; I_d (%), q_c (т/м^2) и σ'_v (т/м^2) – соответственно, степень плотности, удельное сопротивление грунта под конусом зонда и эффективное вертикальное напряжение на глубине Z (м).

Зависимость (8) получена Р. Ланцелоттой для нормально уплотненных песков на основании обработки более чем 140 экспериментов, выполненных разными исследователями на песках различных видов, и впервые опубликована в работе М. Ямиолковского с соавторами в 1985 году [10].

В работе [10], при расчетах I_d, необходимость оценки эффективного вертикального напряжения σ'_v отмечена особенным образом. Тем не менее, вклад этого параметра незначителен по сравнению с вкладом других составляющих зависимости. Кроме того, корректная оценка величины σ'_v представляет собой относительно сложную техническую задачу. Поэтому, при производстве инженерно-геологических изысканий, выполняемых на территории стран СНГ тысячами организаций, не обремененных дорогостоящим СРТ-оборудованием, множеством дополнительных датчиков и программных продуктов, формулу Р. Ланцелотты без какого-либо практического ущерба можно представить в виде:

$$I_d = -A + B \times \log\left(q_c \Big/ \left[a_R \times \sum_{i=1}^{i=n} R_i \times h_i \right]^{0,5} \right), \qquad (9)$$

где обозначения I_d, q_c, A и B – те же, что в формуле (8); a_R – коэффициент размерности, равный 1 т/м^3; R_i – безразмерный параметр, зависящий от разновидности грунта i-го слоя и положения i-го слоя относительно уровня подземных вод; h_i – мощность i-го слоя (м), n – количество расчетных слоев в интервале глубин 0 – Z м.

Неизвестным в формуле (9) является параметр R. Для песков, плотность сложения которых определена тем или иным способом в качественном или полуколичественном выражении, параметр R (табл. 1) может быть получен при фиксированных средних значениях степени водонасыщения на основании общих результатов работы С.И. Синельщикова [7]. Эти результаты заложены в основу таблиц Б.18 ГОСТ 25100, В.2 TDS 609-2003, Б.1 СТБ 947-2007.

Таблица 1

Значения R-параметра для песков

Плотность сложения	**Пески гравелистые, крупные и средней крупности**		**Пески мелкие и пылеватые**	
	ниже УГВ	**выше УГВ**	**ниже УГВ**	**выше УГВ**
Плотный	1,13	1,89	1,09	1,84
Средней плотности	1,02	1,75	0,99	1,71
Рыхлый	0,96	1,68	0,89	1,59

Для глинистых прослоев в толще песчаных отложений R – параметр грунтов, залегающих выше уровня подземных вод, определяется зависимостью:

$$R = \frac{p}{a_R}. \qquad (10)$$

Для полностью насыщенных глинистых разностей, залегающих ниже пьезометрического уровня и испытывающих гидродинамическое давление нижележащих обводненных прослоев, значение R-параметра рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{p_s - 1}{a_R \times (1 + e)}, \qquad (11),$$

где p и p_s, – соответственно природная плотность и плотность частиц глинистого грунта (т/м^3); e – коэффициент пористости; a_R – коэффициент размерности, равный 1 т/м^3.

Представленная выше методика оценки коэффициента пористости песков in situ, несколько оптимизированная в части определения показателя e^{min}, применена на объектах Роснефть, Шлюмберже-Восток, Эксон Нефтегаз Лимитед при изысканиях морских, лагунно-морских и аллювиально-морских песков четвертичного возраста, слагающих периферийные части Северо-Сахалинской равнины.

В рамках проекта «Сахалин-1» коэффициенты пористости песков получены с применением методики в ходе инженерно-изыскательских работ для реконструкции буровой площадки «Чайво». Цель реконструкции – бурение дополнительных эксплуатационных скважин месторождения и строительство инфраструктурных сооружений. Уникальный объект реконструкции – рельсовые пути перемещения крупнейшей в мире буровой установки «Ястреб» с трубными стеллажами общим весом более 4,5 тыс. тонн – проектировался на сваях диаметром 762 мм с проектной глубиной погружения 20 м. Способ погружения свай - забивной. Площадь участка изысканий – 25 га. Разрез основания полностью сложен песками, в том числе насыщенными.

В ходе практического применения методики, с глубины 2,0–6,5 м, из песков, залегающих выше уровня грунтовых вод, с особой тщательностью были отобраны 22 пробы ненарушенной структуры с целью дальнейшего сравнения коэффициентов пористости, полученных расчетным и опытным путем. В качестве первичных инструментов отбора использовались одинарная колонковая труба и грунтонос вдавливающего типа. Опытная проба песка для оценки плотности и коэффициента пористости отбиралась методом режущего кольца после извлечения основной пробы. Следующие физические показатели характеризуют опытные образцы песка: ρ_s = = 2,62-2,66 г/см^3; ρ = 1,49-1,94 г/см^3; W = 2-14%.

За критерии сравнения принимались значения допустимой относительной погрешности параллельных определений физических

характеристик, приведенные в приложении 3 ГОСТ 5180. Максимальная допустимая разница результатов параллельных определений коэффициента пористости, рассчитанная для каждой пробы, лежит в диапазоне абсолютных значений 0,05–0,09. По 5 точкам сравнения из 22 разница в коэффициентах пористости, полученная расчетным и опытным путем, превысила значения из указанного диапазона. Однако определения коэффициента пористости расчетом по представленной методике и стандартным методом лишь весьма условно можно назвать параллельными. В силу объективных причин сравнению должны подвергаться не пары значений, а статистические характеристики выборок, в частности, их нормативные показатели, разница между которыми в абсолютном выражении составила соответственно 0,01 и 0,03.

Таким образом, результаты расчетов коэффициента пористости песков по предложенной методике и по ГОСТ 5180 (ГОСТ 12071) показали хорошую сходимость, возможность использования методики применительно к объектам различного уровня, ее оптимизации и дальнейшего развития.

Литература

1. Гленсдорф, П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости, флуктуаций / П. Гленсдорф, И. Пригожин // – М. : Мир, 1973. – 280 с.

2. Гольдштейн, М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн //– М. : Стройиздат. 1973 г. – 375 с.

3. Зиангиров, Р.С. Статическое зондирование в инженерно-геологических изысканиях / Р.С. Зиангиров, В.И. Каширский // Инженерная геология, ноябрь 2006 г. – С. 13–20.

4. Ишихара, К. Поведение грунтов при землетрясениях / К. Ишихара – СПб. : НПО «Георекнструкция – Фундаментпроект», 2006. – 384 с.

5. Радина, В.В. Об относительной плотности песков / В.В. Радина //В сб.: «Труды Гидропроекта», № 3. – М. : Госэнергоиздат, 1960 г., – С. 163–170.

6. Рожков, И.Б. Статическое зондирование грунтов / И.Б. Рожков, О.Н. Исаев // Монография. – М. : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. – 496 с.

7. Синельщиков, С.И. О предельных плотностях песчаных грунтов / С.И. Синельщиков // Сб. : «Отчетное совещание по научно-исследовательским работам 1954 г.».– М. : НИИОСП, 1956. – С. 159–161.

8. Терцаги, К. Механика грунтов в инженерной практике / К. Терцаги, Р. Пек // – М. : Государственное издательство по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1958. – 608 с.

9. Чеботарев, Г.П. Механика грунтов, основания и земляные сооружения / Г.П. Чеботарев, пер. с англ. // Под общ. ред. Н.Н. Маслова. – Изд. 2-е.– М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 616 с.

10.Jamiolkowski, M., New developments in field and laboratory testing of soils / M. Jamiolkowski, C.C. Ladd, J.T. Germaine and R. Lancellotta // Proc. 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1985, – San Francisco, Vol. 1, pp. 57–153.