УДК 624.1
DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-4-87-97

© *Фам Дык Тиеп*, преподаватель
(Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам)
E-mail: phamductiep@lqdtu.edu.vn
© *Е. В. Федоренко*, д-р техн. наук, научный руководитель
(«НИП-Информатика», Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: Eugeniy.Fedorenko@nipinfor.ru
© *Чинь Хоанг Ань*, студент
(Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам)
E-mail: hoanganhlkzww@gmail.com

© *Pham Duc Tiep*, lecturer
(Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam)
E-mail: phamductiep@lqdtu.edu.vn
© *E. V. Fedorenko*, Dr. Sci. Tech., scientific director
(NIP-Informatics, St. Petersburg, Russia)
E-mail: Eugeniy.Fedorenko@nipinfor.ru
© *Trinh Hoang Anh*, student
(Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam)
E-mail: hoanganhlkzww@gmail.com

КАЛИБРОВКА ОДОМЕТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ КОРАЛЛОВОГО ПЕСКА В МОДЕЛИ HARDENING SOIL ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПРЕССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ

CALIBRATION OF THE OEDOMETRIC DEFORMATION MODULUS OF CORAL SAND IN THE HARDENING SOIL MODEL BASED ON COMPRESSION TEST RESULTS USING AN OPTIMIZATION METHOD

Представлена методика калибровки одометрического модуля деформации Eoed кораллового песка на основе результатов компрессионных испытаний. Испытания были выполнены на образцах в плотном состоянии при относительной плотности D_r = 70 %. Процедура калибровки выполнена с применением метода оптимизации с использованием инструмента Solver в Excel путем минимизации суммы квадратов отклонений между результатами численного моделирования и экспериментальными данными. Полученные результаты позволяют определить рациональное значение модуля Eoed в модели Hardening Soil и повысить достоверность численного моделирования при анализе осадки основания из кораллового песка.

Ключевые слова: коралловый песок, дробление частиц, плотное состояние, модель hardeningsoil (HS), одометрические испытания.

This study presents a methodology for calibrating the oedometric deformation modulus Eoedof coral sand based on results from odometer tests. The tests were conducted on coral sand samples in a dense state with a relative density of D_r = 70 %. The calibration procedure was carried out using an optimization approach with the Solver tool in Excel by minimizing the sum of squared deviations between numerical simulation results and experimental data. The results obtained make it possible to determine the rational value of the Eoed module in the Hardening Soil model and increase the reliability of numerical modeling when analyzing the sediment of the base from coral sand.

Keywords: coral sand, particle breakage, dense state, hardening soil model, oedometric test.

Введение

Коралловый песок представляет собой несвязный зернистый материал биогенного происхождения, образующийся в результате выветривания и разрушения морских организмов, содержащих карбонат кальция. Этот материал широко распространен в тропических морских районах, где многие объекты инфраструктуры, такие как морские порты, берегозащитные сооружения и основания

морских инженерных сооружений, возводятся непосредственно на основании из кораллового песка. Однако вследствие того, что основным минеральным компонентом является $CaCO_3$, а также из-за пористой структуры, угловатой формы частиц и относительно низкой прочности зерен, коралловый песок проявляет механическое поведение, существенно отличающееся от поведения обычных кварцевых песков.

Фундаментальные исследования механических свойств кораллового песка показали, что механизмы деформирования и разрушения этого материала в значительной степени обусловлены процессами дробления зерен. Британский ученый M. R. Coop в 1990 году в статье [1] показал, что несвязный коралловый песок имеет тенденцию к дроблению зерен уже при относительно низких уровнях напряжений, что приводит к изменению напряженно-деформированного состояния и положения линии критического состояния. Позже, в публикации 2004 года M. R. Coop и соавторы [2] продемонстрировали, что процесс дробления зерен существенно усиливается в ходе сдвиговой деформации, оказывая непосредственное влияние на жесткость и сдвиговую прочность материала.

Исследования для условий циклического нагружения [3] показывают, что разрушение зерен продолжает развиваться при повторных нагрузках, одновременно изменяя поровое пространство и деформационные характеристики материала. Исследования в условиях трехосного сжатия показали зависимость дробления зерен от давления обжатия [4].

В последние годы были выполнены исследования, направленные на количественную оценку взаимосвязи между дроблением зерен и работой пластической деформации. В работе [5] установлено, что степень дробления зерен тесно связана с энергией, рассеиваемой в процессе деформирования, что подтверждает доминирующую роль такого механизма в снижении жесткости кораллового песка. Для условий насыщения и циклического нагружения был уточнен механизм циклического разрушения морского кораллового песка и показана зависимость прочности и деформационных характеристик от напряженного состояния и начальных условий уплотнения [6].

Наряду с экспериментальными исследованиями, численное моделирование все шире используется для прогнозирования поведения оснований из кораллового песка при проектировании инженерных сооружений [7–12]. В практике геотехнического проектирования благодаря своей простоте часто применяется линейно-деформируемая модель с критерием прочности Кулона–Мора; однако она предполагает постоянную жесткость и не учитывает зависимость модуля деформации от уровня напряжений. Для преодоления этого ограничения была разработана модель Hardening Soil (HS), предназначенная для описания нелинейного упруго-пластического поведения зернистых грунтов с учетом механизма упрочнения при сжатии и сдвиге. Применение модели HS при анализе оснований из кораллового песка показало возможность повышения точности прогноза осадок и распределения напряжений по сравнению с традиционными линейными моделями. Например, при исследовании свайного фундамента типа CFG на основании из кораллового песка модель HS в программном комплексе PLAXIS 3D была использована для оценки несущей способности композитной фундаментной системы; при этом было получено лучшее соответствие между расчетными результатами и данными полевых испытаний с учетом нелинейной зависимости жесткости от уровня напряжений [13].

Тем не менее большинство современных исследований сосредоточено на сдвиговом поведении или на работе материала при циклическом нагружении, тогда как компрессионное сжатие кораллового песка пока

недостаточно изучено с точки зрения сопоставления различных моделей, учитывающих влияние дробления зерен. В одометре при увеличении вертикального напряжения механизм деформирования плотного коралового песка имеет тенденцию переходить от переупаковки зерен к их дроблению в точках контакта, где возникает концентрация напряжений. В результате кривая «e–log (p)» характеризуется значительным наклоном и проявляет выраженную нелинейность в области высоких напряжений. Если используемая модель грунта не отражает этот механизм, результаты расчета могут приводить к заниженной оценке коэффициента сжимаемости и долговременной осадки основания.

Кроме того, в программных комплексах конечно-элементного анализа, таких как PLAXIS или SiO 2D, модель Hardening Soil широко применяется для описания нелинейного поведения зернистых грунтов посредством модулей деформации, зависящих от уровня напряжений. В этой модели изменение жесткости в зависимости от уровня давления в основном контролируется показателем степени m [14, 15]. Поэтому корректное определение параметров, характеризующих зависимость жесткости от уровня напряжений на основе экспериментальных данных, является важным этапом обеспечения надежности численного моделирования при расчетах осадок и распределения напряжений. В частности, в диапазоне напряжений, характерных для эксплуатационных нагрузок инженерных сооружений, степень зависимости модуля деформации от уровня напряжений и способность модели HS адекватно описывать уплотнение кораллового песка пока изучены недостаточно.

Исходя из изложенного, данное исследование направлено на калибровку одометрического модуля деформации E_{oed} кораллового песка в рамках модели Hardening Soil на основе результатов компрессионных испытаний в диапазоне вертикальных напряжений от 25 до 400 кПа. В отличие от традиционного определения параметра E_{oed} с использованием эмпирических зависимостей, в работе применяется метод обратного анализа (inverse analysis) в сочетании с численным моделированием и процедурой оптимизации. Значение модуля E_{oed} варьируется в пределах расчетного диапазона, а расчетные кривые деформирования сопоставляются с экспериментальными данными на основе критерия минимизации суммы квадратов отклонений. Такой подход позволяет определить рациональное значение параметра E_{oed} для кораллового песка в модели HS и оценить способность модели адекватно воспроизводить поведение материала при уплотнении под нагрузкой. Полученные результаты способствуют повышению достоверности численного моделирования при анализе осадок и прогнозе поведения оснований из кораллового песка при действии статических нагрузок.

1. Эксперимент по определению характеристик сжимаемости образца кораллового песка в плотном состоянии

1.1. *Предварительная оценка физико-механических характеристик кораллового песка*

Смесь кораллового песка была отобрана на одном из островов, расположенных в акватории Восточного моря Вьетнама (рис. 1). Физико-механические характеристики кораллового песка, опубликованные в ранее выполненных исследованиях, приведены в таблице. Следует отметить, что коралловый песок часто характеризуется относительно высоким значением сцепления по сравнению с обычным кварцевым песком. Это объясняется угловатой формой зерен и шероховатой поверхностью частиц кораллового происхождения, что способствует формированию более выраженного механизма зацепления и взаимной блокировки частиц (interlocking) и, как следствие, повышению сопротивления сдвигу материала (пиковая прочность) [16].

По результатам анализа кривой гранулометрического состава (рис. 2) определены коэффициент неоднородности C_u = 6,31 и коэффициент кривизны C_c = 1,11. Согласно классификации TCVN 5747:1993[1] рассматриваемый коралловый песок относится к группе SW (хорошо отсортированный песок). В литературе известна зависимость коэффициента однородности от уровня действующих напряжений, однако она применима только для кварцевого песка [18].

1.2. *Оборудование и методика проведения эксперимента*

Испытание в условиях компрессионного сжатия с фиксированной высотой образца было выполнено с целью определения характеристик сжимаемости кораллового песка в плотном состоянии при относительной плотности D_r = 70 %, которая была определена на основании полевых испытаний. Для обеспечения воспроизводимости и достоверности результатов была применена единая процедура испытаний. Программа нагружения включала следующие ступени вертикального напряжения: 25, 50, 100, 200 и 400 кПа, а также соответствующие ступени разгрузки: 200, 100, 50 и 25 кПа.

Испытания проводились на автоматическом компрессионном приборе ACE EmS (Wykeham Farrance), схема испытания приведена на рис. 3. Образцы формировались при относительной плотности D_r = 70 % непосредственно в компрессионном кольце диаметром D = 6,35 см, высотой h = 2 см. Процесс подготовки включал формирование образца заданной плотности сложения за счет нагружения и добавления объема, после чего образец считался соответствующим заданным условиям.

После подготовки образца компрессионное кольцо устанавливалось в прибор ACE EmS, и начинался процесс испытаний, программа которых включала режим нагружения, соответствующие ступени нагрузки, а также режим выдержки на каждой ступени и частоту регистрации данных. Образец

Физико-механические характеристики кораллового песка [17]

Физико-механические характеристики	Значение
Удельный вес частиц, γ_s, кН/м^3	26,71
Максимальный коэффициент пористости, e_{max}	0,927
Минимальный коэффициент пористости, e_{min}	0,600
Угол внутреннего трения, град.	44,28
Удельное сцепление, кН/м^2	31,29
Угол дилатансии, град.	10,14



Рис. 1. Процесс отбора образцов кораллового песка в шурфе и оценка степени его уплотнения

[1] TCVN 5747–1993. Грунты строительные. Классификация. Вьетнам, 1993.

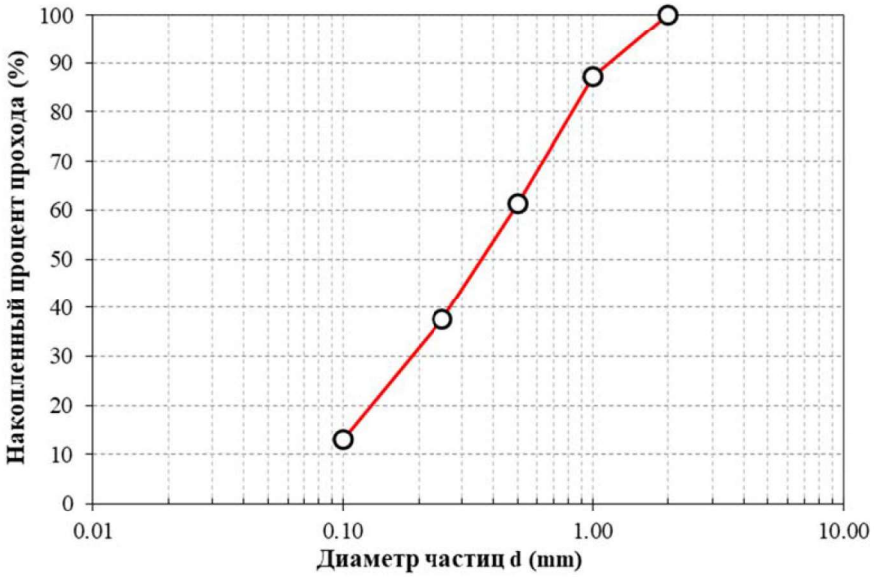

Рис. 2. Кривая гранулометрического состава кораллового песка

предварительно выдерживался под нагрузкой 3 кПа перед началом нагружения для обеспечения предотвращения разуплотнения (набухания) образца в процессе насыщения и сохранения исходной плотности.

Процесс нагружения выполнялся в соответствии с установленной программой. В ходе испытания вертикальная деформация регистрировалась во времени до достижения стабилизации деформации на каждой ступени нагрузки. После завершения цикла нагружения и разгрузки полученные данные экспортировались и обрабатывались для построения зависимостей «*e*–*p*» (коэффициент пористости–вертикальное напряжение) и «p–ε_a» (вертикальное напряжение–вертикальная деформация), а также для определения модуля одометрической деформации E_{oed} для каждого уровня напряжений.

1.3. *Результаты эксперимента*

Результаты компрессионных испытаний, представленные на рис. 4, показывают, что

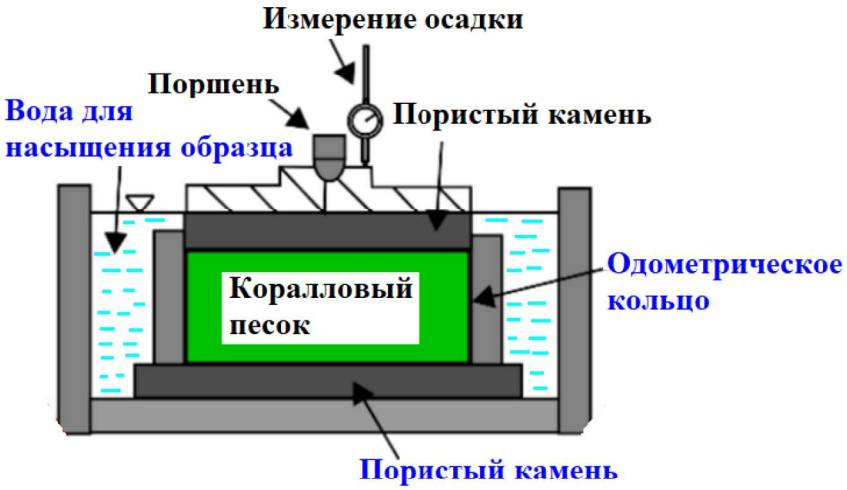

Рис. 3. Схема одометрического испытания кораллового песка

осевая деформация образца кораллового песка возрастает с увеличением приложенного вертикального давления. На начальном этапе нагружения (в диапазоне 0…100 кПа) наблюдается относительно быстрое увеличение деформации, что связано с переупаковкой частиц и уменьшением начальной пористости образца. При дальнейшем увеличении давления до 200…400 кПа скорость нарастания деформации постепенно снижается, что свидетельствует о стабилизации структуры зернового скелета и уменьшении сжимаемости материала.

Результаты трех повторных испытаний демонстрируют небольшое расхождение между измерениями, при этом экспериментальные точки располагаются достаточно близко друг к другу, а средняя кривая четко отражает общую тенденцию деформирования. Это подтверждает надежность экспериментальной методики, а также хорошую воспроизводимость результатов.

Кроме того, при высоких уровнях давления осадка образца продолжает увеличиваться, однако с меньшей скоростью. Такое поведение объясняется угловатой формой частиц кораллового песка и выраженным механизмом взаимного зацепления зерен, что обеспечивает относительно высокую устойчивость материала к деформациям. Полученные результаты могут быть использованы для определения деформационных характеристик, таких как одометрический модуль E_{oed}, а также для калибровки численных моделей грунта.

2. Определение деформационных параметров модели Hardening Soil для кораллового песка методом оптимизации на основе результатов одометрических испытаний

Модель HS описывает нелинейное поведение грунта, зависящее от уровня напряжений, с использованием трех основных параметров жесткости и параметров прочности [19]. Основные параметры модели включают: параметр жесткости при первичном нагружении в трехосном испытании (primary loading stiffness) E_{50}^{ref}; параметр жесткости при первичном нагружении в компрессионном испытании (oedometer stiffness) E_{oed}^{ref}; параметр жесткости при разгрузке и повторном нагружении в трехосном испытании (unloading/reloading stiffness) E_{ur}^{ref}; параметр m, характеризующий зависимость жесткости от уровня напряжений; угол внутреннего трения φ'; удельное сцепление c' и угол дилатансии ψ.

В настоящем исследовании основные параметры прочности и дилатансии кораллового песка были приняты на основе ранее опубликованных экспериментальных данных для материала с аналогичным гранулометрическим составом и относительной плотностью [17]: $\varphi' = 44{,}28°$, $c' = 31{,}29$ кПа и $m = 0{,}7123$.

Основной целью данного исследования является определение трех деформационных модулей $E_{oed}^{ref}, E_{50}^{ref}, E_{ur}^{ref}$ на основе процедуры оптимизации с использованием результатов одометрических испытаний.

2.1. *Формирование базы данных виртуальных экспериментов*

Для построения автоматизированной системы моделирования виртуального одометрического испытания в программном комплексе Plaxis 2D использовался язык программирования Python. Для каждого набора входных параметров программа выполняет численное моделирование и извлекает значения деформации образца при различных уровнях нагрузки.

Процедура перебора параметров $E_{oed}^{ref}, E_{50}^{ref}, E_{ur}^{ref}$ в заданном диапазоне допустимых значений позволила сформировать 13 472 набора результатов виртуальных экспериментов, которые были использованы в качестве базы данных для построения аппроксимирующей модели и последующей оптимизации.

2.2. *Построение многомерной регрессионной модели третьего порядка*

Для снижения вычислительных затрат, связанных с многократным повторени-

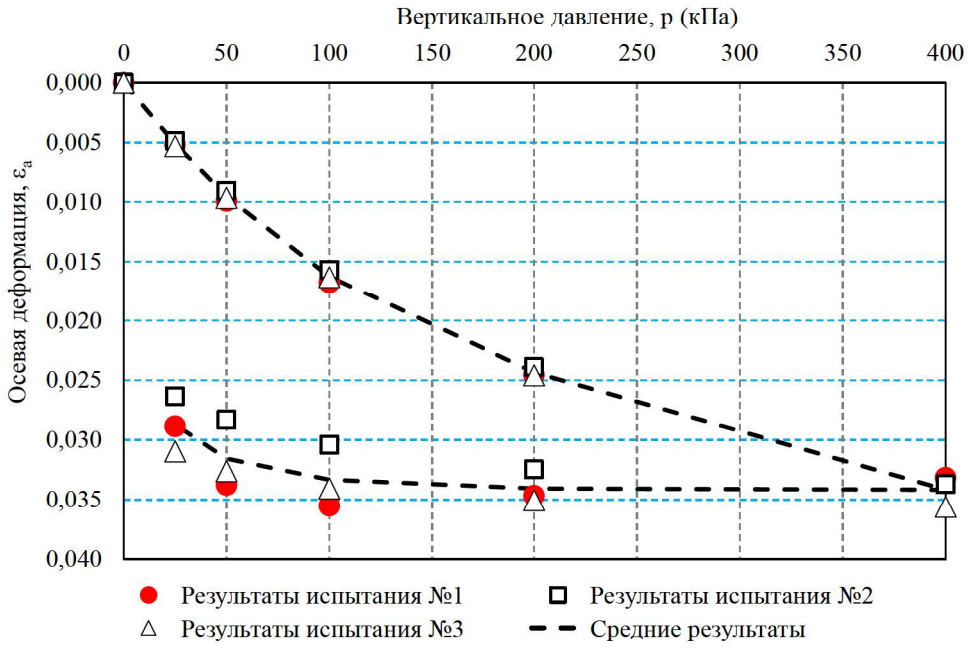

Рис. 4. Зависимость между вертикальным давлением и осевой деформацией образца

ем численного моделирования в процессе оптимизации, была построена аппроксимирующая модель на основе многомерной полиномиальной регрессии третьего порядка с использованием функции LINEST («ЛИНЕЙН») в программной среде Excel. Эта функция позволяет получить параметры линейного приближения по методу наименьших квадратов.

При трех входных переменных полный полиномиальный регрессионный закон третьего порядка включает линейные, квадратичные и кубические члены, а также члены взаимодействия между переменными. В развернутом виде модель содержит 20 регрессионных коэффициентов (включая свободный член), отражающих все возможные комбинации одночленов до третьего порядка для трех входных переменных. Регрессионная модель третьего порядка позволяет с высокой точностью описывать нелинейную зависимость между параметрами жесткости и осевой деформацией в исследуемом диапазоне значений.

Следует отметить, что данная модель носит чисто математический характер и не отражает непосредственно физический механизм поведения материала. Регрессионные коэффициенты не имеют самостоятельного механического смысла и служат лишь параметрами аппроксимации в пределах исследованного диапазона значений. Несмотря на это ограничение, применение регрессионного подхода позволяет существенно упростить вычислительную процедуру по сравнению с прямой калибровкой на основе полной механической модели, а также создает удобную основу для последующего этапа оптимизации.

2.3. *Оптимизация параметров*

Целевая функция была сформулирована на основе принципа минимизации суммы квадратов ошибок (*SSE*) между экспериментальными и прогнозируемыми значениями деформации:

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} \left(\varepsilon_{\exp,i} - \varepsilon_{pred,i} \right)^2, \qquad (1)$$

где n — число ступеней нагрузки в процессе компрессионного испытания образца, включая этапы нагружения и разгрузки; $\varepsilon_{\exp,i}$ — среднее значение деформации, полученное по результатам измерений на трех образцах

в одометрическом испытании; $\varepsilon_{pred,i}$ — значение деформации, рассчитанное по регрессионной модели.

Процедура оптимизации выполнялась с использованием инструмента Solver в Excel при заданных ограничениях:

$$\begin{cases} E_{50}^{ref} \geq E_{oed}^{ref}, \\ 3E_{50}^{ref} \leq E_{ur}^{ref} \leq 5E_{50}^{ref}. \end{cases} \quad (2)$$

После завершения процесса оптимизации были получены следующие значения параметров:

$$\begin{cases} E_{oed}^{ref} = 6374 \text{ кН/м}^2, \\ E_{50}^{ref} = 10637 \text{ кН/м}^2, \\ E_{ur}^{ref} = 53185 \text{ кН/м}^2. \end{cases} \quad (3)$$

Коэффициент детерминации составил R^2 = 9891. Полученная расчетная кривая демонстрирует очень высокую степень согласования со средней экспериментальной кривой (рис. 5).

Значение коэффициента детерминации R^2 = 0,9891 показывает, что откалиброванная модель HS способна практически полностью воспроизводить характер деформирования кораллового песка в одометрическом испытании. Расхождение между результатами численного моделирования и экспериментальными данными в основном наблюдается на стадии высоких нагрузок, где начинает проявляться влияние дробления частиц. Отношение $\frac{E_{50}^{ref}}{E_{oed}^{ref}} = 1,67$ является относительно высоким, что указывает на то, что жесткость кораллового песка при условиях компрессионного сжатия значительно ниже, чем при эквивалентном уровне напряжений в условиях трехосного сжатия. Это может быть связано с высокой пористостью структуры и процессами переупаковки зернового скелета под действием вертикального давления.

Выводы

На основе результатов компрессионных испытаний кораллового песка в плотном состоянии (D_r = 70 %) в диапазоне вертикальных напряжений 25…400 кПа, а также процедуры калибровки параметров методом обратного анализа можно сделать следующие основные выводы:

1. Результаты эксперимента показывают, что зависимость между напряжением и деформацией кораллового песка имеет ярко выраженный нелинейный характер. Одометрический модуль деформации увеличивается с ростом уровня напряжений, что отражает влияние зерновой структуры материала. При высоких уровнях нагрузки кривая деформирования демонстрирует тенденцию к увеличению крутизны, что может быть связано с перестройкой зернового скелета и локальным дроблением частиц.

2. Оптимальные параметры жесткости модели Hardening Soil определены следующим образом: E_{oed}^{ref} = 6374 кН/м², E_{50}^{ref} = 10 637 кН/м², E_{ur}^{ref} = 53 185 кН/м² при коэффициенте корреляции R^2 = 0,9891, что свидетельствует о высокой степени согласования между результатами численного моделирования и экспериментальными данными.

3. Отношение $\frac{E_{50}^{ref}}{E_{oed}^{ref}} = 1,67$ показывает, что жесткость при эквивалентных напряжениях в условиях трехосного нагружения значительно выше, чем при компрессионном сжатии. Это отражает различие механизмов взаимодействия частиц при деформациях объемного уплотнения и формоизменения при сдвиговом деформировании, а также соответствует особенностям пористой структуры и способности кораллового песка к перестройке зернового каркаса под действием вертикальной нагрузки.

4. Полученные результаты подтверждают, что модель Hardening Soil после соответствующей калибровки способна адекватно описывать процесс компрессионного сжатия кораллового песка и может быть использована при анализе осадок оснований в условиях обычных статических нагрузок.

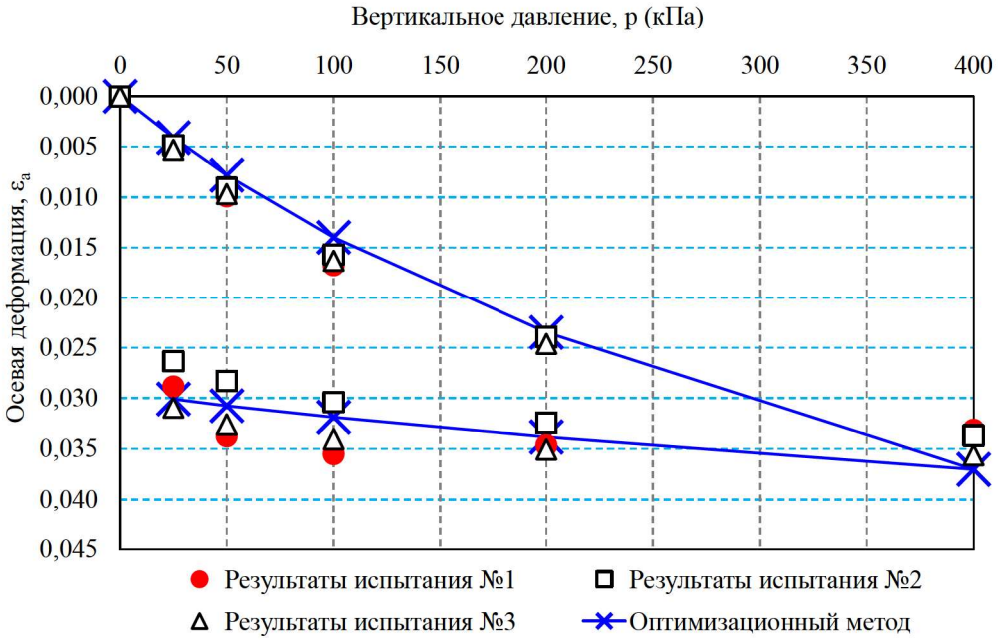

Рис. 5. Сравнение экспериментальной и оптимизированной расчетной зависимостей «вертикальное давление–осевая деформация»

Рекомендации

Полученные деформационные параметры в основном определены на основе результатов одометрических испытаний, поэтому они хорошо отражают механизм компрессионного сжатия. Для обеспечения согласованности параметров модели HS при решении задач со сложным напряженным состоянием, особенно в условиях сдвига, рекомендуется дополнительно проверить и уточнить данные параметры на основе трехосных испытаний в дальнейших исследованиях.

Библиографический список

1. *Coop M. R.* The mechanics of uncemented carbonate sands // Géotechnique. 1990. Vol. 40 (4). Pp. 607–626.

2. *Coop M. R., Sorensen K. K., Bodas Freitas T., Georgoutsos G.* Particle breakage during shearing of a carbonate sand // Géotechnique. 2004. Vol. 54 (3). Pp. 157–163.

3. *Donohue S., O'Sullivan C., Long M.* Particle breakage during cyclic triaxial loading of a carbonate sand // Géotechnique. 2009. Vol. 59 (5). Pp. 477–482.

4. *Yamamuro J. A., Lade P. V.* Drained sand behavior in axisymmetric tests at high pressures // Journal of Geotechnical Engineering. 1996. Vol. 122 (2). Pp. 109–119.

5. *Gao R., Ye J.* Mechanical behaviors of coral sand and relationship between particle breakage and plastic work // Engineering Geology. 2023. Vol. 316 (7). 107063.

6. *Ma W., Qin Y., Wu Q., Zhang G., Chen G.* Cyclic failure mechanisms of saturated marine coral sand under various consolidations // Applied Ocean Research. 2023. Vol. 131. 103450.

7. *Daouadji A., Hicher P. Y.* An enhanced constitutive model for crushable granular materials // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2010. Vol. 34 (6). Pp. 555–580.

8. *Engin H. K., Jostad H. P., Rohe A.* On the modelling of grain crushing in hypoplasticity // Proceedings of 8th European conference on numerical methods in geotechnical engineering. Delft, the Netherlands, 2014. Pp. 33–38.

9. *Fukumoto T.* Particle breakage characteristics of granular soils // Soils and foundations. 1992. Vol. 32 (1). Pp. 26–40.

10. *Hu W., Yin Z., Dano C., Hicher P.-Y.* A constitutive model for granular materials considering grain breakage // Science China Technological Sciences. 2011. Vol. 54 (8). Pp. 2188–2196.

11. *Phuong N. T. V., Rohe A., Brinkgreve R. B. J., van Tol A. F.* Hypoplastic model for crushable sand // Soils and foundations. 2018. Vol. 58 (3). Pp. 615–626.

12. *Russell A. R., Khalili N.* A bounding surface plasticity model for sands exhibiting particle crushing //

Canadian Geotechnical Journal. 2004. Vol. 41 (6). Pp. 1179–1192.

13. *Li X., Zhang R., Yang Z., Chen P., Ji F., Wen B.* Mechanical behavior analysis and bearing capacity calculation of CFG pile composite foundation on coral sand site // Frontiers in Earth Science. 2023. Vol. 11. 1204989.

14. *Konyushkov V. V., Penkov D., Fedorenko E.* Initial data for Hardening Soil model // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2023. Vol. 371. 12 p., 02019.

15. *Brinkgreve R. B. J., Vermeer P. A.* PLAXIS (Version 8). Material Models Manual. Delft: PLAXIS bv, 2002.

16. *Федоренко Е. В.* Интерпретация результатов испытаний при определении прочностных характеристик грунтов. История и состояние вопроса // Грунтоведение. 2023. № 1 (20). С. 34–46. DOI 10.53278/2306-9139-2023-1-20-34-46.

17. *Hoa C., Vu A.-T., Sang N. T., Lai N. T., Tiep P. D.* Effect of grain size on shear strength of coral gravel sand // Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainability in Civil Engineering (ICSCE 2020). 26–27 November, Hanoi, Vietnam. Singapore: Springer Singapore, 2021. Pp. 87–95.

18. *Nakata Y., Hyodo M., Hyde A. F. L., Kato Y., Murata H.* Microscopic particle crushing of sand subjected to high pressure one-dimensional compression // Soils and foundations. 2001. Vol. 41 (1). Pp. 69–82.

19. *Тер-Мартиросян А. З., Анжело Г. О., Ермошина Л. Ю., Боков И. А., Манукян А. В.* Влияние коэффициента неравномерности расширения грунтового образца на механические характеристики // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18, № 10. С. 1574–1586.

References

1. Coop M. R. The mechanics of uncemented carbonate sands. *Géotechnique*, 1990, vol. 40 (4), p. 607–626.

2. Coop M. R., Sorensen K. K., Bodas Freitas T., Georgoutsos G. Particle breakage during shearing of a carbonate sand. *Géotechnique*, 2004, vol. 54 (3), pp. 157–163.

3. Donohue S., O'Sullivan C., Long M. Particle breakage during cyclic triaxial loading of a carbonate sand. *Géotechnique*, 2009, vol. 59 (5), pp. 477–482.

4. Yamamuro J. A., Lade P. V. Drained sand behavior in axisymmetric tests at high pressures. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, vol. 122 (2), pp. 109–119.

5. Gao R., Ye J. Mechanical behaviors of coral sand and relationship between particle breakage and plastic work. *Engineering Geology*, 2023, vol. 316 (7), 107063.

6. Ma W., Qin Y., Wu Q., Zhang G., Chen G. Cyclic failure mechanisms of saturated marine coral sand under various consolidations. *Applied Ocean Research*, 2023, vol. 131, 103450.

7. Daouadji A., Hicher P. Y. An enhanced constitutive model for crushable granular materials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2010, vol. 34 (6), pp. 555–580.

8. Engin H. K., Jostad H. P., Rohe A. On the modelling of grain crushing in hypoplasticity. *Proceedings of 8thEuropean conference on numerical methods in geotechnical engineering,* Delft, the Netherlands, 2014, pp. 33–38.

9. Fukumoto T. Particle breakage characteristics of granular soils. *Soils and foundations,* 1992, vol. 32 (1), pp. 26–40.

10. Hu W., Yin Z., Dano C., Hicher P.-Y. A constitutive model for granular materials considering grain breakage. *Science China Technological Sciences,* 2011, vol. 54 (8), pp. 2188–2196.

11. Phuong N. T. V., Rohe A., Brinkgreve R. B. J., van Tol A. F. Hypoplastic model for crushable sand. *Soils and foundations*, 2018, vol. 58 (3), pp. 615–626.

12. Russell A. R., Khalili N. A bounding surface plasticity model for sands exhibiting particle crushing. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, vol. 41 (6), pp. 1179–1192.

13. Li X., Zhang R., Yang Z., Chen P., Ji F., Wen B. Mechanical behavior analysis and bearing capacity calculation of CFG pile composite foundation on coral sand site. *Frontiers in Earth Science*, 2023, vol. 11, 1204989.

14. Konyushkov V. V., Penkov D., Fedorenko E. Initial data for Hardening Soil model. *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*, 2023, vol. 371, 12 p., 02019.

15. Brinkgreve R. B. J., Vermeer P. A. PLAXIS (Version 8). *Material Models Manual,* Delft, PLAXIS bv, 2002.

16. Fedorenko E. V. *Interpretatsiya rezul'tatov ispytaniy pri opredelenii prochnostnykh kharakteristik gruntov. Istoriya i sostoyanie voprosa* [Interpretation of test results in determining strength characteristics of soils. History and status of the issue] *Gruntovedenie – Soil science*, 2023, no. 1 (20), pp. 34–46. DOI 10.53278/2306-9139-2023-1-20-34-46.

17. Hoa C., Vu A.-T., Sang N. T., Lai N. T., Tiep P. D. Effect of grain size on shear strength of coral gravel sand. *Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainability in Civil Engineering (ICSCE 2020)*, 26–27 November, Hanoi, Vietnam, Singapore, Springer Singapore, 2021, pp. 87–95.

18. Nakata Y., Hyodo M., Hyde A. F. L., Kato Y., Murata H. Microscopic particle crushing of sand subjected

to high pressure one-dimensional compression. *Soils and foundations*, 2001, vol. 41 (1), pp. 69–82.

19. Ter-Martirosyan A. Z., Anzhelo G. O., Ermoshina L. Yu., Bokov I. A., Manukyan A. V. *Vliyanie koeffitsienta neravnomernosti rasshireniya gruntovogo obraztsa na mekhanicheskie kharakteristiki* [Influence of non-uniformity coefficient of soil sample expansion on mechanical characteristics]. *Vestnik MGSU – MGSU Bulletin*, 2023, vol. 18, no. 10, pp. 1574–1586.