

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

LABORATORY STUDIES OF A STRESS STATE EFFECT ON SAND DEFORMATION CHARACTERISTICS

О. А. ШУЛЯТЬЕВ, канд. техн. наук

О. Н. ИСАЕВ, канд. техн. наук

Р. Ф. ШАРАФУТДИНОВ, канд. техн. наук

В. С. МОРОЗОВ

Д. С. ЗАКАТОВ

Приводятся результаты лабораторных исследований влияния напряженного состояния на деформационные характеристики грунтов на примере песчаных отложений. Исследования выполнены по результатам испытаний грунтов в условиях трехосного сжатия. Установлено, что деформационные характеристики существенно зависят от давления всестороннего обжатия и в меньшей степени – от плотности сложения. Выявлена эмпирическая зависимость, позволяющая оценивать начальный модуль деформации E_0 из текущего E_{50} . Полученные зависимости позволяют учитывать дополнительные факторы при расчетах осадок аналитическими методами.

Ключевые слова:

Модуль деформации, песок, трехосные испытания

Paper presents the results of laboratory studies of stress state effect on deformation characteristics in course of sand. The studies are based on the triaxle soil test results. It was found that deformation characteristics basically depend on the hydrostatic compression pressure and lesser – on the density. An empirical relationship, which allows to estimate an initial strain module E_0 from secant E_{50} was revealed. The obtained dependencies allow to take into account additional factors in course of settlement calculation by analytical methods.

Key words:

Deformation module, sand, triaxle test

Введение

Известно, что деформационные характеристики грунта зависят от напряженно-деформированного состояния (НДС) грунта, причем в большей степени, чем от плотности [1]. Более того, на основе этой зависимости, присущей исключительно пластичным материалам, разработаны методы управления осадкой фундамента путем регулирования НДС массива грунта [2-8], за что группа специалистов, в том числе НИИОСП им. Н. М. Герсванова под руководством В. П. Петрухина, получила премию правительства РФ [8].

При проектировании подземных частей сооружений и зданий на переуплотненных грунтах, учет напряженного состояния в сочетании с современными моделями позволяет получить достоверные результаты расчетов [9]. В условиях наличия жесткого ограждения котлована (например, «стены в грунте») возникает особое напряженное состояние, существенно влияющее на развитие осадок [10].

Вместе с тем в практике проектирования зависимость деформационных характеристик грунта от напряженного состояния не учитывается. Сдерживает активное применение её в практике геотехнических расчётов отсутствие в России полномасштабных исследований в этой области, с выбором требуемых параметров грунта и разработкой методики их определения с целью вычисления деформационных характеристик грунта для различных напряженных состояний, возникающих в массиве грунта, а также в связи с разработкой методики расчета осадки с учетом полученных зависимостей.

Исследование влияния напряженного состояния на деформационные свойства грунтов наиболее полно может быть выполнено в лабораторных условиях. Лабораторные испытания позволяют также выполнить исследования влияния различных факторов (физических свойств, напряженного состояния) на деформационные и прочностные характеристики грунтов, используемых в расчетах.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований зависимости деформационных характеристик песков от напряженного состояния, полученные в процессе стабилметрических испытаний.

Работа выполнена по заказу ФАУ «ФЦС».

Методика экспериментальных исследований

В качестве экспериментальных данных использовались результаты испытаний песчаных грунтов в условиях трехосного сжатия.

Испытания выполнялись в приборе трехосного сжатия (стабилметре) GDS ELDDYN (рис. 1), дающем возможность бокового расширения образца грунта в условиях трехосного осесимметричного нагружения при $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$, с одновременным дополнительным вертикальным нагружением, где σ_1 – максимальное главное напряжение; σ_3 – минимальные, σ_2 – промежуточные (равные минимальным) главные напряжения.

Особенность прибора состоит в том, что датчик измерения вертикального давления на образец (датчик силы) расположен внутри камеры трехосного сжатия, что позволяет измерять вертикальные напряжения с высокой точностью, исключая погрешность на трение штока.

Образцы грунтов отбирались в 2018 г. на строительных площадках объектов НИИОСП в московском регионе. Исследованы пески средней крупности, мелкие

и пылеватые, плотные и средней плотности, со степень неоднородности $C_u = 2,1 \dots 2,8$ (т.е. пески относятся к однородным по ГОСТ 25100). На рис. 2 приведена кумулятивная кривая гранулометрического состава.



Рис. 1. Прибор трехосного сжатия GDS ELDYN в процессе испытания

Испытания образцов песчаного грунта в приборе трехосного сжатия выполнялись в условиях открытого дренажа по схеме консолидированно-дренированного (КД) испытания по п. 5.3.4 ГОСТ 12248-2010. В процессе испытаний грунтов фиксировали вертикальное давление на образец и его деформацию.

Для песков средней крупности испытания выполнялись при коэффициентах пористости $e = 0,65$ и $0,50$; для мелких и пылеватых песков $e = 0,70, 0,60$ и $0,50$.

Испытания песчаных грунтов в условиях трехосного сжатия выполняли по двум ветвям (с разгрузкой и с повторным нагружением) при не менее трех различных давлений бокового обжатия грунта: 100, 200 и 500 кПа. Для отдельных видов песков выполняли дополнительные испытания при давлениях обжатия 1000 и 1500 кПа для уточнения влияния высокого бокового давления на результаты испытаний. На рис. 3 приведены фотографии образцов песка до и после испытания.

Обработка результатов испытаний выполнялась по ГОСТ 12248-2010.

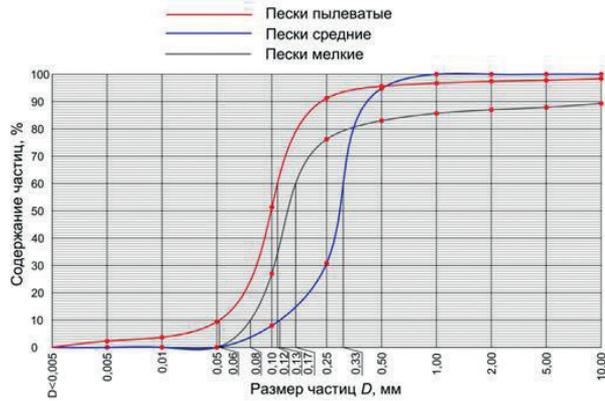


Рис. 2. Кумулятивная кривая гранулометрического состава



Рис. 3. Образец песчаного грунта до (а) и после (б) испытания

Основные результаты лабораторных испытаний песков приведены на рис. 4 и 5.

По результатам трехосных испытаний определялись следующие параметры:

- секущий модуль деформации грунта при нагружении E_{50} ;
- модуль деформации при разгрузке и повторном нагружении E_{ur} ;
- модуль деформации (начальный) при сжатии E_0 ;
- ν_{ur} – коэффициент Пуассона при разгрузке/повторном нагружении.

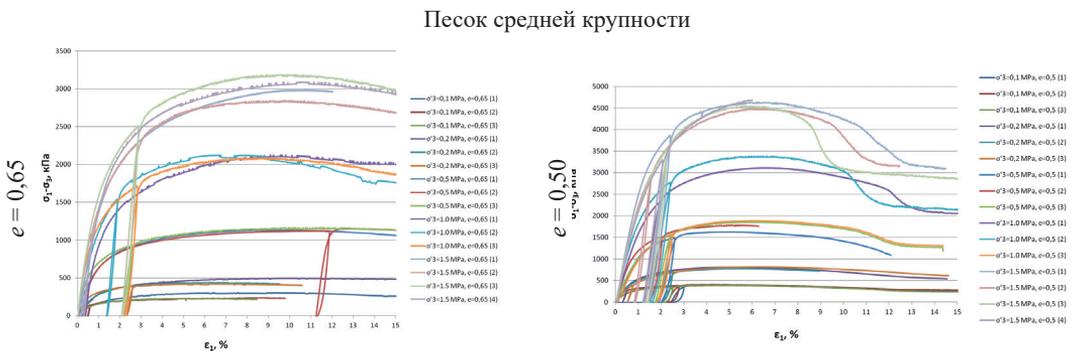


Рис. 4. Диаграммы одноосного нагружения при постоянном боковом давлении песка средней крупности

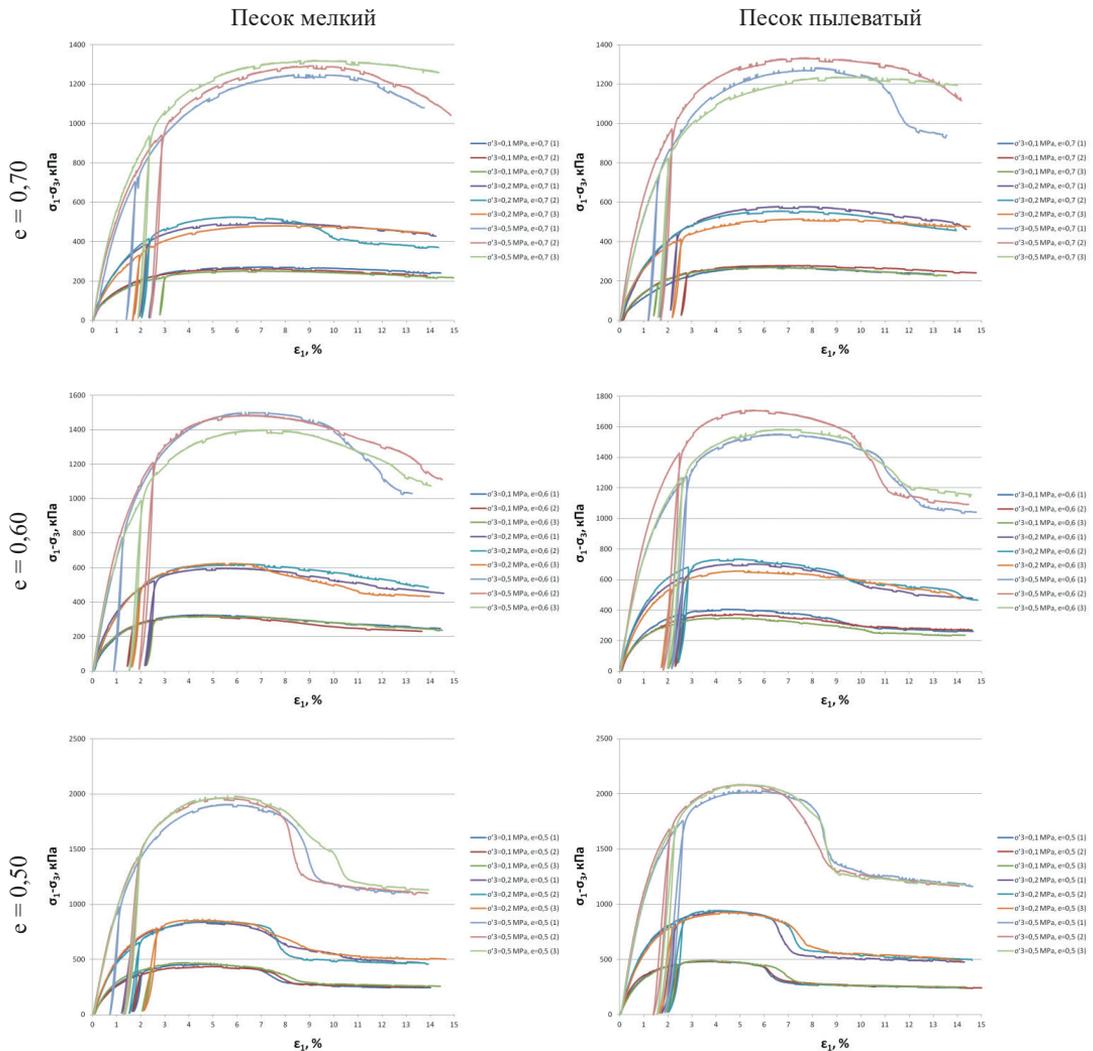


Рис. 5. Диаграммы одноосного нагружения при постоянном боковом давлении песка мелкого и пылеватого

Результаты экспериментальных исследований

Исследования влияния напряженного состояния на деформационные характеристики песчаных грунтов выполнялось на основе корреляционно-регрессионного анализа.

Методика экспериментальных исследований состояла в следующем.

На первом этапе выделяли фактор напряженного состояния, способный влиять на деформационные характеристики E_{50} , E_{ur} , E_0 , ν_{ur} . В качестве такого фактора рассматривалось боковое давление σ_3 при трехосных испытаниях. Дополнительно исследовали влияние деформационных параметров E_{50} , E_{ur} , E_0 для анализа их взаимного влияния.

На втором этапе для общей выборки (независимости от гранулометрического состава грунта) оценивали тесноту статистических связей выделенных факторов и параметров моделей с применением аппарата корреляционного анализа. В процес-

се статистических расчетов оценивали выборочный коэффициент корреляции ρ и его значимость по критерию $T_{\text{набл}}$ [11].

Линейная зависимость между двумя параметрами считалась значимой, если выполнялось условие

$$T_{\text{набл}} > t_{\alpha}, \quad (1)$$

где t_{α} – квантиль Стьюдента, определяемый в зависимости от доверительной вероятности α (в описываемом исследовании $\alpha = 0,85$ при двусторонней доверительной вероятности) и числа степеней свободы $k = n - 2$, где n – число точек выборки.

В табл. 1 представлены результаты вычислений выборочных коэффициентов корреляции между деформационными характеристиками и σ_3 и деформационными параметрами для всей выборки.

Таблица 1

**Результаты вычислений выборочных коэффициентов корреляции
и их значимости**

Параметр грунта	Объем выборки	Фактор			
		σ_3	E_{50}	E_{ur}	E_0
E_{50}	92	$\frac{0,87}{16,89}$	–	–	–
E_{ur}	83	$\frac{0,93}{22,44}$	$\frac{0,92}{21,72}$	–	–
E_0	92	$\frac{0,89}{18,52}$	$\frac{0,96}{33,38}$	$\frac{0,92}{32,97}$	–
ν_{ur}	83	$\frac{-0,22}{2,03}$	$\frac{-0,14}{1,31}$	$\frac{-0,23}{2,16}$	$\frac{-0,14}{1,25}$

В числителе – ρ , в знаменателе – $T_{\text{набл}}$.

– наличие корреляционной связи при $\alpha = 0,85$;

– отсутствие корреляционной связи при $\alpha = 0,85$.

На основе выполненных статистических расчетов по общей выборке можно отметить следующее.

Выявлена устойчивая тенденция к увеличению модулей деформации E_{50} , E_{ur} , E_0 с увеличением бокового давления ($\rho = 0,87 \dots 0,93$). Коэффициент Пуассона ν_{ur} статистически не зависит от модулей деформации E_{50} , E_0 (коэффициент корреляции статистически незначим) и имеет слабую тенденцию к снижению с ростом бокового давления ($\rho = -0,20 \dots -0,22$) и с увеличением E_{ur} ($\rho = -0,23$).

В целом на основании выполненного анализа общей выборки данных по трехосным испытаниям грунтов можно сделать следующие выводы:

– модули деформации песчаных грунтов существенно зависят от бокового давления обжатия; а также величины модулей деформации тесно связаны между собой;

– коэффициент Пуассона при разгрузке/повторном нагружении слабо зависит от бокового давления и не зависит от величин модулей деформации.

На третьем этапе с целью исследования деформационных параметров в зависимости от бокового давления выполнен детальный анализ с разделением на виды

грунтов. Для них подбирали как линейные, так и нелинейные аппроксимирующие зависимости с целью выбора наиболее достоверной.

В табл. 2-4 и на рис. 6-8 представлены результаты статистических расчетов для деформационных параметров в зависимости от бокового давления обжатия с разбивкой на виды грунтов и коэффициенты пористости. Установлено, что для зависимостей E_{50} , E_{ur} , E_0 , v_{ur} , наибольшее значение коэффициента детерминации имеет линейная и степенная зависимость ($R^2 = 0,73 \dots 0,99$). Получено, что начальный модуль деформации E_0 в песках от крупных до пылеватых при различной плотности и при увеличении давления со 100 до 1500 кПа изменяется в 5 раз (см. рис. 8).

В случае обжатия песка средней плотности средней крупности всесторонней нагрузкой (без девиаторного нагружения) можно отметить, что с увеличением σ_3 с 0,1 до 2 МПа величина e изменяется с 0,5 до 0,497, т.е. менее чем на 1% (рис. 9). Это подтверждает вывод о том, что при увеличении напряженного состояния в условиях отсутствия сдвиговых деформаций, коэффициент пористости не меняется. Аналогичная картина была получена и при испытании песков крупных и пылеватых при различных коэффициентах пористости.

В целом, выполненные исследования показывают существенную зависимость деформационных параметров E_{50} , E_{ur} , E_0 от напряженного состояния. В первом приближении зависимость можно охарактеризовать как линейную.

Таблица 2

Корреляционно-регрессионный анализ зависимостей текущего модуля деформации E_{50} от бокового давления σ_3

Вид исследуемой зависимости	e	Статистические показатели			
		n	r	R^2	Уравнение регрессии
Песок средней крупности					
$E_{50}(\sigma_3)$	0,65	16	0,925	0,856	$y = 70x + 25$
			–	0,928	$y = 100x^{0,63}$
	0,5	16	0,95	0,906	$y = 111x + 47$
			–	0,892	$y = 162x^{0,53}$
Песок мелкий					
$E_{50}(\sigma_3)$	0,7	9	0,985	0,971	$y = 77x + 9$
			–	0,981	$y = 74x^{0,68}$
	0,6	9	0,989	0,977	$y = 107x + 13$
			–	0,973	$y = 101x^{0,637}$
	0,5	9	0,992	0,985	$y = 150x + 18$
–			0,987	$y = 149x^{0,683}$	
Песок пылеватый					
$E_{50}(\sigma_3)$	0,7	9	0,975	0,950	$y = 97x + 5$
			–	0,960	$y = 99x^{0,861}$
	0,6	9	0,975	0,951	$y = 119x + 18$
			–	0,946	$y = 116x^{0,612}$
	0,5	9	0,990	0,981	$y = 160x + 29$
			–	0,987	$y = 160x^{0,574}$
Примечания: n – объем выборки; r – коэффициент корреляции; R^2 – коэффициент детерминации.					

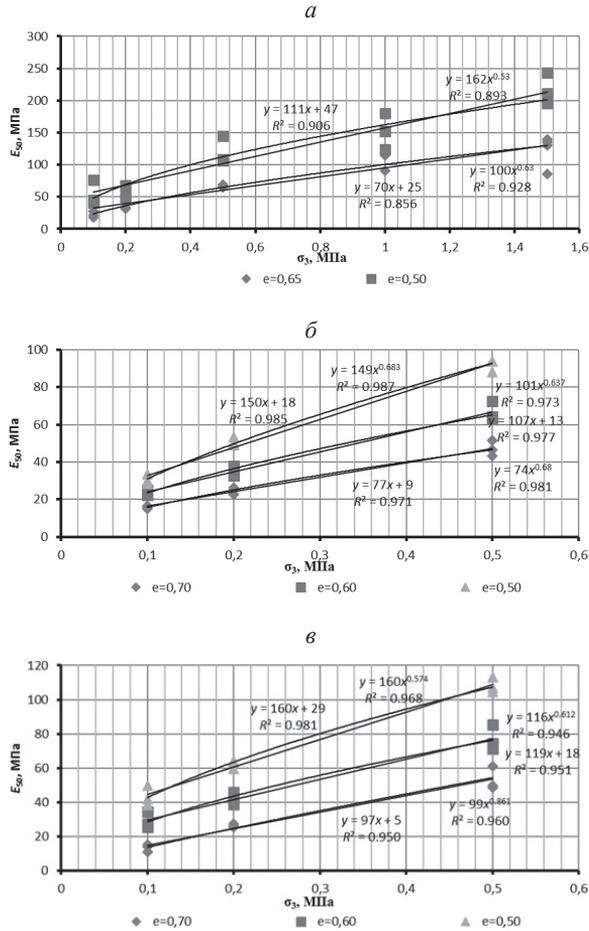


Рис. 6. Влияние бокового давления σ_3 на секционный модуль деформации E_{50} для песка средней крупности (а), мелкого (б) и пылеватого (в)

Таблица 3

Корреляционно-регрессионный анализ зависимостей модуля деформации разгрузки/повторного нагружения E_{ur} от бокового давления σ_3

Вид исследуемой зависимости	e	Статистические показатели			
		n	r	R^2	n
Песок средней крупности					
$E_{ur}(\sigma_3)$	0,65	16	0,939	0,881	$y = 146x + 111$
			–	0,836	$y = 261x^{0,365}$
	0,5	16	0,947	0,896	$y = 187x + 126$
			–	0,968	$y = 335x^{0,483}$
Песок мелкий					
$E_{ur}(\sigma_3)$	0,7	9	0,961	0,923	$y = 210x + 81$
			–	0,874	$y = 237x^{0,382}$
	0,6	9	0,989	0,978	$y = 237x + 80$
			–	0,973	$y = 259x^{0,412}$

Вид исследуемой зависимости	e	Статистические показатели			
		n	r	R^2	n
$E_{ur}(\sigma_3)$	0,5	9	0,989	0,976	$y = 304x + 83$
			–	0,985	$y = 326x^{0,480}$
Песок пылеватый					
$E_{ur}(\sigma_3)$	0,7	9	0,956	0,915	$y = 217x + 79$
			–	0,927	$y = 248x^{0,414}$
	0,6	9	0,926	0,857	$y = 146x + 94$
			–	0,855	$y = 204x^{0,295}$
	0,5	9	0,991	0,982	$y = 344x + 76$
			–	0,992	$y = 353x^{0,524}$

Примечания:
 n – объем выборки;
 r – коэффициент корреляции;
 R^2 – коэффициент детерминации.

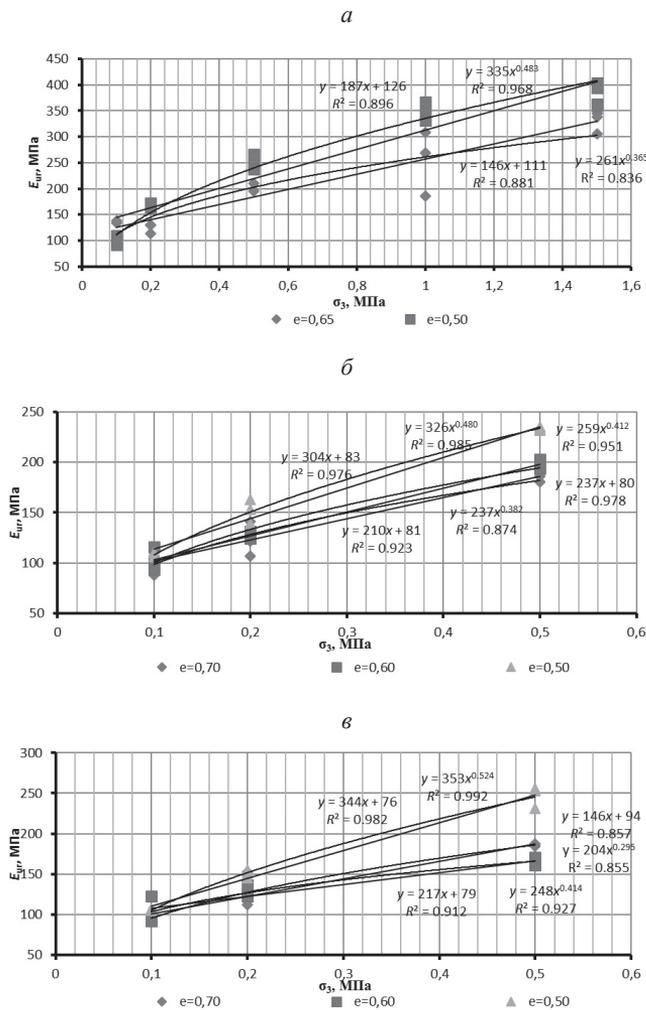


Рис. 7. Влияние бокового давления σ_3 на модуль деформации при разгрузке/повторном нагружении E_{ur} для песка средней крупности (а), мелкого (б) и пылеватого (в)

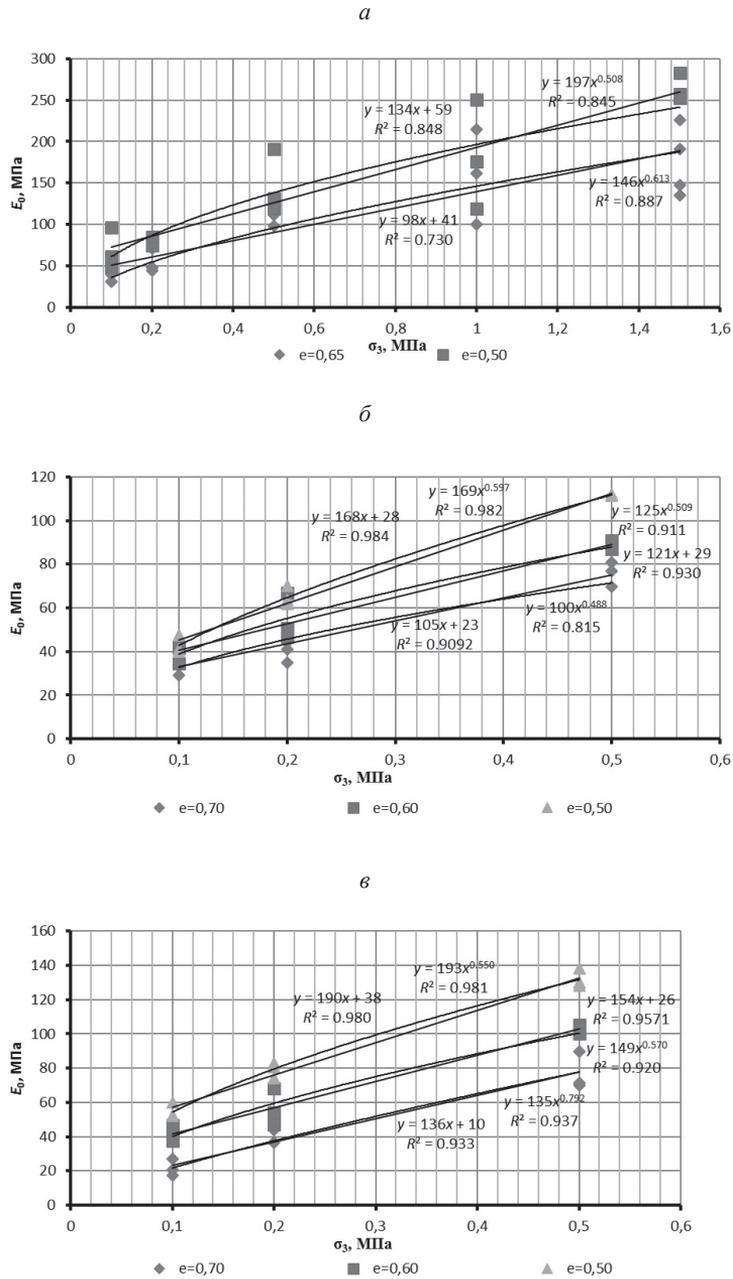


Рис. 8. Влияние бокового давления σ_3 на начальный модуль деформации E_0 для песка средней крупности (*a*), мелкого (*б*) и пылеватого (*в*)

Таблица 4

Корреляционно-регрессионный анализ зависимостей начального модуля деформации E_0 от бокового давления σ_3

Вид исследуемой зависимости	e	Статистические показатели			
		n	r	R^2	n
Песок средней крупности					
$E_0(\sigma_3)$	0,65	16	0,9853	0,730	$y = 98x + 41$
			–	0,887	$y = 146x^{0,613}$
	0,5	16	0,921	0,848	$y = 134x + 59$
			–	0,845	$y = 197x^{0,508}$
Песок мелкий					
$E_0(\sigma_3)$	0,7	9	0,954	0,909	$y = 105x + 23$
			–	0,815	$y = 100x^{0,488}$
	0,6	9	0,965	0,930	$y = 121x + 29$
			–	0,911	$y = 125x^{0,509}$
	0,5	9	0,992	0,984	$y = 168x + 28$
			–	0,982	$y = 169x^{0,597}$
Песок пылеватый					
$E_0(\sigma_3)$	0,7	9	0,966	0,933	$y = 136x + 10$
			–	0,937	$y = 134x^{0,792}$
	0,6	9	0,978	0,957	$y = 154x + 26$
			–	0,920	$y = 149x^{0,570}$
	0,5	9	0,990	0,980	$y = 190x + 38$
			–	0,981	$y = 193x^{0,550}$
Примечания: n – объем выборки; r – коэффициент корреляции; R^2 – коэффициент детерминации.					

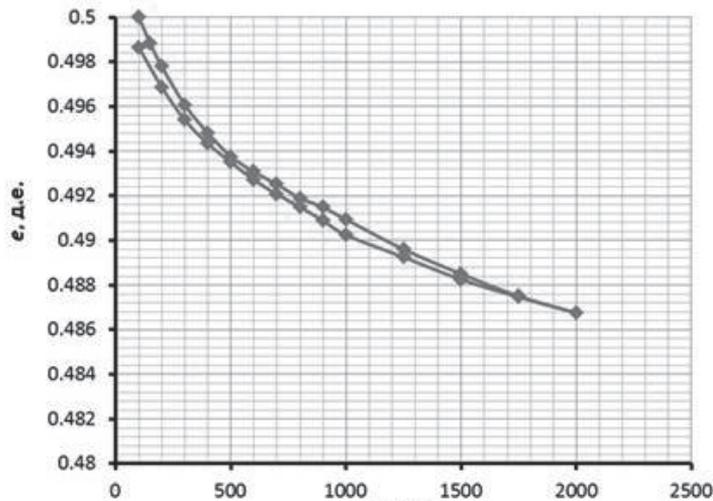


Рис. 9. Диаграмма измерения коэффициента пористости e в процессе трехосных испытаний для песков средней плотности

Практическое применение результатов экспериментальных исследований

В геотехнической практике эталонным можно считать модуль деформации, полученный по результатам штамповых испытаний в полевых условиях. Этот модуль применяется в «стандартизированных» моделях грунтов и характеризует линейную деформацию штампа на начальном (линейном) участке. Используемый выше начальный модуль деформации E_0 – модуль деформации, получаемый из трехосных испытаний грунтов на начальном линейном участке. Этот модуль деформации с определенной долей условности можно считать близким к штамповому.

По мнению авторов статьи, наиболее достоверно E_0 может быть получен в приборах трехосного сжатия с кинематическим режимом нагружения образцов. При нагружении образцов ступенчатой нагрузкой необходимо применение малых ступеней нагрузки для фиксации E_0 , что не всегда возможно. В дальнейшем необходимо разработать требования по определению начального модуля деформации, что также актуально в силу всё большего применения моделей грунтов, учитывающих жесткость при пороговых деформациях грунта.

На основе регрессионного анализа получено, что модули деформации исследованных песков связаны между собой линейно и могут быть описаны зависимостью (рис. 10):

$$E_{50} = 0,75E_0. \quad (2)$$

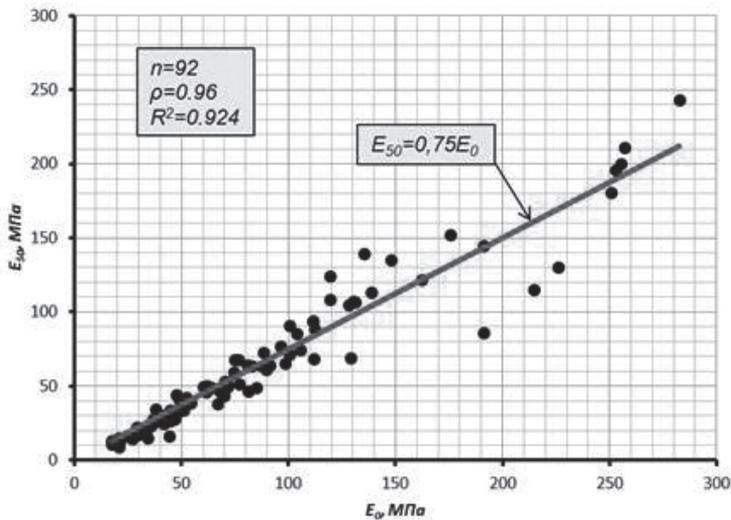


Рис. 10. Зависимость касательного модуля деформации E_{50} от начального E_0

Полученная эмпирическая зависимость позволяет оценивать начальный модуль деформации E_0 из текущего E_{50} .

Практическое применение результатов исследований заключается в следующем.

При выполнении аналитических расчетов фундаментов (метод послойного суммирования по СП 22.133330) подразумевает применение штампового модуля деформации. Для грунтов, где в силу технических причин выполнение штамповых испытаний

невозможно (например, грунты на большой глубине – основания высотных зданий), в расчетах может быть применен начальный модуль деформации E_0 , определяемый в процессе стабилметрических испытаний. Правомерность такого определения базируется на том, что для зданий на плитных или свайных фундаментах (наиболее широко применяемых для высотных зданий) деформация массива грунта линейно зависит от приложенной нагрузки. Это связано с незначительным развитием зон пластических деформаций, формирующихся в зоне под краем фундамента.

Полученные зависимости позволяют также учитывать дополнительные факторы при расчетах осадок аналитическими методами. Это дает возможность определять модуль деформации с учетом напряженного состояния и открывает возможность рассчитывать осадку аналитическим методом послойного суммирования для переуплотненных неоднородных анизотропных грунтов.

Выводы

1. В статье приведены результаты экспериментальных исследований влияния напряженного состояния на деформационные характеристики грунта на примере песков. Исследования выполнены по результатам испытаний грунтов в условиях трехосного сжатия.

2. В результате выполненного корреляционного анализа установлено, что модули деформации песчаных грунтов существенно зависят от бокового давления обжатия и в меньшей степени – от коэффициента пористости; величины модулей деформации также тесно связаны между собой. Получено, что начальный модуль деформации E_0 в песках от крупных до пылеватых при различной плотности и повышении бокового давления обжатия со 100 до 1500 кПа изменяется в 5 раз. Влияние физических характеристик на деформационные свойства грунтов происходит в меньшей степени. В целом выполненные исследования показывают существенную зависимость деформационных параметров E_{50} , E_{ur} , E_0 от напряженного состояния. В первом приближении зависимость можно охарактеризовать как линейную.

3. Для грунтов, где в силу технических причин выполнение штамповых испытаний невозможно (например, грунты на большой глубине – основания высотных зданий), в расчетах может быть применен начальный модуль деформации E_0 , определяемый в процессе стабилметрических испытаний. Правомерность такого определения базируется на том, что для зданий на плитных или свайных фундаментах (наиболее широко применяемых для высотных зданий), деформация массива грунта линейно зависит от приложенной нагрузки. Это связано с незначительным развитием зон пластических деформаций, формирующихся в зоне под краем фундамента.

4. Получена эмпирическая зависимость, позволяющая оценивать начальный модуль деформации E_0 из секущего E_{50} . Эта зависимость может быть использована для предварительных расчетов осадок с применением аналитических методик СП 22.13330.

5. Полученные зависимости позволяют при расчетах осадок аналитическими методами учитывать дополнительные факторы. Это дает возможность определять мо-

дуть деформации, с учетом напряженного состояния и открывает возможность рассчитывать осадку аналитическим методом послойного суммирования для переуплотненных, неоднородных, анизотропных грунтов.

6. Необходима разработка требований по определению начального модуля деформации. Это также актуально в силу всё большего применения моделей грунтов, учитывающих жесткость при пороговых деформациях грунта.

Библиографический список

1. Шулятьев О. А. Изменение напряженно-деформированного состояния массива грунта или его уплотнение при инъекции // Основание, фундаменты и механика грунтов. 2016. №3. С. 39-40.
2. Шулятьев О. А. Основания и фундаменты высотных зданий: Научное издание. М.: Изд. АСВ. 2016.
3. Крыжановский А. Л., Бокижанов Х. И.-М. Потанов В. Н Уменьшение осадки и крена сооружений методом предварительного напряжения их оснований/Энергетическое строительство. 1990. №5. С. 40-43.
4. Шулятьев О. А. Искусственное изменение напряженно-деформированного состояния грунта для решения геотехнических задач/Тр. НИИОСП им. Н. М. Герсеванова, 2001. С. 149-161.
5. Тер-Мартirosян З. Г. Напряженно-деформированное состояние анизотропного водонасыщенного основания/Вестн. МГСУ. 2006. №1. С. 28-37.
6. Schanz T., Vermeer P. A., Bonnier P. G. The Hardening Soil Model: Formulation and verification. Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Balkema, Rotterdam. 1999.
7. Burland J. B., Standing J. R., Jardine F. M. Building Response to Tunneling. Case Studies from Construction of the Jubilee Extension Line, London/. – L., 2001.
8. Петрухин В. П., Шулятьев О. А., Мозгачева О. А. Новые способы геотехнического проектирования и строительства: Научное издание. М.: Изд. АСВ, 2015..
9. Oleg Shulyatiev, Oleg Isaev, Rafael Sharafutdinov, Galina Gordyshina, Sergey Sereda. Geotechnical Aspects of the Reconstruction of the Moscow Luzhniki Stadium. Proc. of the 19th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 17-22 september 2017. Seoul, Korea. Pp. 2049-2052.
10. Шулятьев О. А., Исаев О. Н., Наятов Д. В., Шарафутдинов Р. Ф. Прогноз развития деформаций основания многофункционального жилого комплекса // Геотехника. 2017. №2. С. 4-15.
11. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособ. для вузов. – М.: Высш. шк., 2003.

Авторы:

Олег Александрович ШУЛЯТЬЕВ, канд. техн. наук, заместитель директора НИИОСП им. Н. М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

Oleg SHULJATJEV, Ph. D. in Engineering, Deputy Technical Director of NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: niiosp35@yandex.ru

Олег Николаевич ИСАЕВ, канд. техн. наук, заведующий сектором геотехники подземных линейных сооружений, НИИОСП им. Н. М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

Oleg ISAEV, Ph. D. in Engineering, Head of Underground Linear Structures Geotechnical Division, NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

Рафаэль Фаритович ШАРАФУТДИНОВ, канд. техн. наук, старший научный сотрудник сектора геотехники подземных линейных сооружений НИИОСП им. Н. М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

Rafael SHARAFUTDINOV, Ph. D. in Engineering, Senior researcher of Underground Linear Structures Geotechnical Division, NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: r.f.sharaf@gmail.com
тел.: +7 (903) 518-73-10

Владимир Сергеевич МОРОЗОВ, инженер сектора геотехники подземных линейных сооружений НИИОСП им. Н. М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
Vladimir MOROSOV, engineer of Underground Linear Structures Geotechnical Division, NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

Денис Сергеевич ЗАКАТОВ, инженер сектора геотехники подземных линейных сооружений НИИОСП им. Н. М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
Denis ZAKATOV, engineer of Underground Linear Structures Geotechnical Division, NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow