

Соотношение параметров прочности песчаных грунтов при испытаниях в компрессионном одометре с измерением боковых напряжений и в приборе одноплоскостного среза

Е.И. Петрукович, О.В. Хрянина

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Аннотация: В статье рассмотрены методы и результаты определения показателей деформационных и прочностных свойств грунтов с использованием различных технологий лабораторных испытаний. Приведены результаты испытаний песка мелкого, залегающего в основании проектируемого спортивно-оздоровительного комплекса на одной из площадок строительства в г.Пензе. Показано влияние используемых методов испытаний на получаемые значения характеристик прочности и деформируемости. Выявлены корреляционные показатели и даны соответствующие выводы и предложения.

Ключевые слова: песок, лабораторные методы испытаний; одноплоскостной срез, одометрические испытания, прочностные характеристики, деформативные характеристики.

Известно, что достоверность проектных решений оснований и фундаментов зависит не только от методов расчета, но и от качества проведения изысканий на площадке строительства [1]. При этом, качество инженерно-геологических изысканий зависит от множества факторов - технологий бурения, отбора монолитов, подготовки образцов, правильного выбора методов лабораторных и полевых испытаний грунтов, а также от опытности исследователей и требований нормативных документов [2, 3].

С целью получения параметров грунтов основания необходимых для последующего расчета и проектирования фундаментов спортивно-оздоровительного комплекса по двум группам предельных состояний проведены исследования на приборах конструкции НПП «Геотек» [4] с использованием измерительно-вычислительного комплекса АСИС – автоматизированной системы для определения прочностных и деформационных свойств грунта [5, 6].

Задача исследований - удостовериться в методологической верности результатов, полученных из испытаний в экспериментальной камере

компрессионного одометра с возможностью измерений боковых напряжений (рис.1). С технической точки зрения данный прибор представляет собой камеру компрессионного одометра, модифицированную вмонтированным внутрь датчиком напряжений в виде тензометрического кольца [7-9]. Ранее в работах [10, 11] была показана возможность определения ряда механических свойств грунтов в компрессионном приборе с измерением боковых напряжений. Актуальность данной разработки заключается в возможности заменить данным прибором проведение испытаний на определение прочностных характеристик грунта в срезных приборах (табл. 1).

Однако, для должного научного обоснования справедливости предлагаемого метода, необходимо убедиться в тождестве или строгой корреляционной зависимости результатов испытаний на предлагаемом приборе и результатов классических методик государственных стандартов, в частности – одноплоскостного среза. В качестве эталонных применяются результаты испытаний того же грунта, но проведенные в установке одноплоскостного среза по ГОСТ 12248-2010 "Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости" (рис.1).

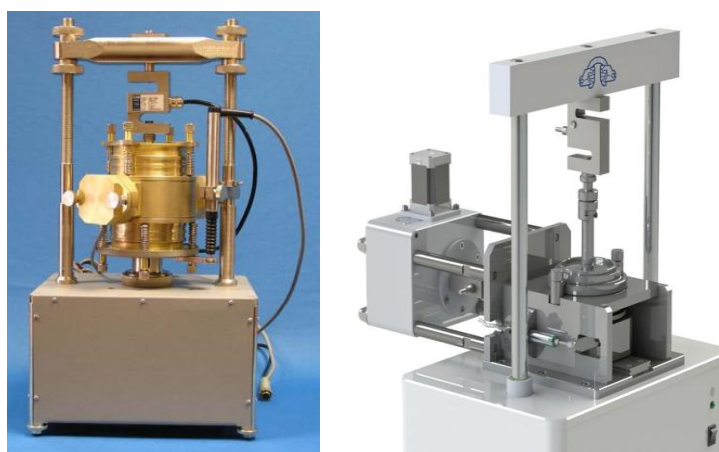


Рис. 1. – Приборы конструкции НПП «Геотек» [4]:

- (а) компрессионный с измерением боковых напряжений;
- (б) одноплоскостного среза со статическим нагружением

Таблица 1

Возможность определения механических характеристик грунта в приборах

Грунт	Прибор	Одноплоскостной срез		Компрессионный одометр с измерением боковых напряжений			
		φ	c	φ	c	E_k	E_{ord}
Песок мелкий рыхлый в воздушно-сухом состоянии	Механические прочностные хар-ки	+	+	+	+		
	Механические деформац. хар-ки					+	+
Песок мелкий плотный в воздушно-сухом состоянии	Механические прочностные хар-ки	+	+	+	+		
	Механические деформац. хар-ки					+	+

В связи с этим необходимо проведение серий опытов с разными образцами грунта. В данной статье в качестве проверяемых характеристик используются прочностные характеристики песка мелкого средней крупности – угол внутреннего трения и удельное сцепление.

Лабораторные испытания проводились на образцах-близнецах песчаного грунта в воздушно-сухом состоянии при коэффициенте пористости $e=0,58$ и $e=1,03$ (табл.2). Для получения статистически верных результатов необходимо проведение установленного в ГОСТ и СП необходимого количества опытов. Данные требования отражены в таблице 3.

Таблица 2

Физико-механические характеристики грунта

Прибор	Весы, линейки				Набор сит					
	$\gamma_s, \frac{гр}{см^3}$	$\gamma, \frac{гр}{см^3}$	$\omega, \%$	e	A5,%	A2,%	A1,%	A0,5	A0,25	A0,1
Песок мелкий рыхлый в воздушно-сухом состоянии										
Физические хар-ки	2,65	1,3	0	1,03						
Гранулометрический состав					1,6	4,6	8,2	6,9	22,4	56,3
Песок мелкий плотный в воздушно-сухом состоянии										
Физические хар-ки	2,65	1,7	0	0,56						
Гранулометрический состав					1,6	4,6	8,2	6,9	22,4	56,3

Таблица 3

Виды и количество испытаний

№	Прибор	Описание грунта	Вид нагружения/схема испытания	Стандарт	Кол-во испытаний
1	Одометр измерением боковых напряжений	с Песок мелкий рыхлый ($e=1,03$) в воздушно-сухом состоянии	Ступенчатое нагружение при 50-100-200-400 кПа	Стандарт предприятия, ГОСТ-12248	6
2	Одометр измерением боковых напряжений	с Песок мелкий плотный ($e=0,56$) в воздушно-сухом состоянии	Ступенчатое нагружение при 50-100-200-400 кПа	Стандарт предприятия, ГОСТ-12248	6
3	Одометр измерением боковых напряжений	с Песок мелкий рыхлый ($e=1,03$) в воздушно-сухом состоянии	Нагружение непрерывное при 100 кПа	Стандарт предприятия, ГОСТ-12248	3
4	Одометр измерением боковых напряжений	с Песок мелкий плотный ($e=0,56$) в воздушно-сухом состоянии	Нагружение непрерывное при 100 кПа	Стандарт предприятия, ГОСТ-12248	3
5	Одометр измерением боковых напряжений	с Песок мелкий рыхлый ($e=1,03$) в воздушно-сухом состоянии	Нагружение непрерывное при 800 кПа	Стандарт предприятия, ГОСТ-12248	3
6	Одометр измерением боковых напряжений	с Песок мелкий плотный ($e=0,56$) в воздушно-сухом состоянии	Нагружение непрерывное при 800 кПа	Стандарт предприятия, ГОСТ-12248	3
7	Прибор одноплоскостного среза	Песок мелкий рыхлый ($e=1,03$) в воздушно-сухом состоянии	Вертикальное нагружение при 100,200,300,400 кПа, срез с постоянной скоростью	ГОСТ-12248	6
8	Прибор одноплоскостного среза	Песок мелкий плотный ($e=0,56$) в воздушно-сухом состоянии	Вертикальное нагружение при 100,200,300,400 кПа, срез с постоянной скоростью	ГОСТ-12248	6

В качестве образцов-близнецов грунта, моделирующих напряженное состояние основания под строящимся спортивно-оздоровительным комплексом, использовался просеянный песок фракции 0,1 – 0,2 мм без посторонних примесей, в сухом состоянии, полученный методом высушивания до постоянной массы в духовом шкафу. Формирование

образцов-близнецов грунта происходило весовым методом непосредственно в рабочей камере приборов. Данная методика подготовки описана в [12].

Методика испытаний в компрессионном одометре с возможностью измерения боковых напряжений

Рассмотрим методику испытаний на примере образцов-близнецов песка, моделирующих состояние грунта в основании спортивно-оздоровительного комплекса с коэффициентом пористости $e_0 = 0,56$, что соответствует плотному сложению для песков мелких согласно ГОСТ 25100-2011 "Грунты. Классификация (с Поправками)". Начальный коэффициент пористости e_0 определялся по известной формуле:

$$e_0 = \frac{(1+w) \cdot \gamma_s}{\gamma} - 1 = \frac{(1+0) \cdot 2.65}{1.7} - 1 = 0,56$$

где w – весовая влажность образца; γ_s – удельный вес частиц образца; удельный вес грунта $\gamma = m/V = 255/148,5 = 1,7$ г/см³.

В результате обработки данных получен журнал испытаний в электронном формате в виде сводной таблицы и построены следующие зависимости: между вертикальным напряжением и вертикальной деформацией (рис.2) и между вертикальным напряжением и боковыми напряжениями (рис.3). Согласно ГОСТ 12248-2010 "Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости", рис.3 описывается уравнением Кулона:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c$$

Анализируя график, получаем следующие значения удельного сцепления $c = 0,225$ кПа (допустимое значение для песков, принимаем $c = 0$ кПа); $\operatorname{tg} \varphi = 0,509$; угол внутреннего трения $\varphi = 27^\circ$.

Зная начальный коэффициент пористости e_0 и коэффициенты, соответствующие каждой ступени давления грунта e_i , можно приступить к построению компрессионной кривой – графика зависимости изменения

коэффициента пористости от вертикальных напряжений (рис.4, 5, 6):

$$e_i = e_0 - \frac{(1 + e_0)S_i}{h} \quad \text{— коэф. пористости при ступени нагружения } i$$

где h – первоначальная высота образца, мм; S_i – осадка образца, мм.

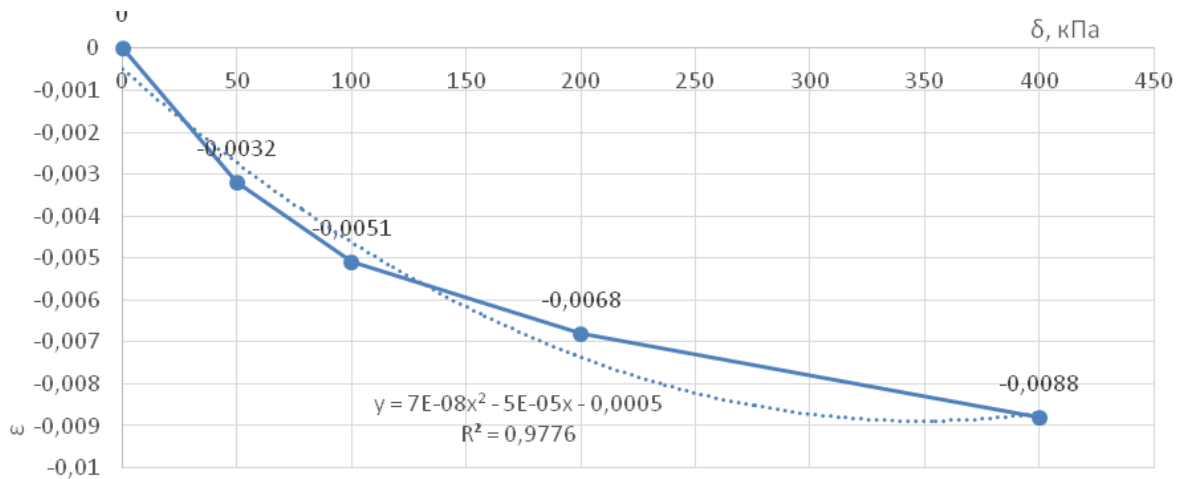


Рис.2. – Зависимость между вертикальным напряжением σ и вертикальной деформацией ε

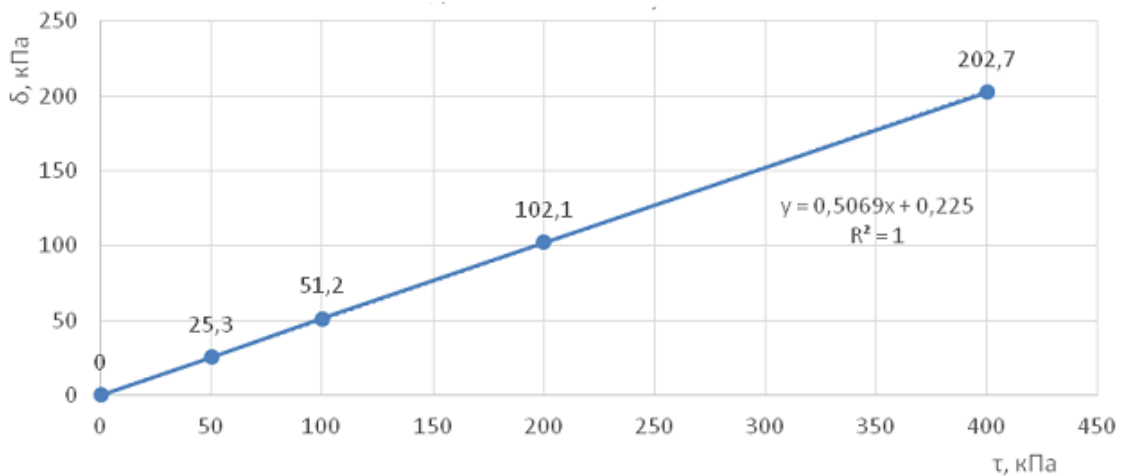


Рис.3. – Зависимость между вертикальным напряжением σ и боковыми напряжениями τ

Построив данные графики, можно определить коэффициент сжимаемости грунта m_0 , МПа⁻¹; компрессионный модуль деформации E_k , МПа и одометрический модуль деформации E_{ord} , МПа (табл. 4):

$$m_0 = \frac{e_i - e_{i+1}}{\delta_{i+1} - \delta_i}, \quad E_k = \frac{1 + e_0}{m_0} \beta, \quad E_{ord} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}$$

где β – коэффициент, учитывающий отсутствие поперечного расширения грунта в приборе для песков $\beta=0,8$.

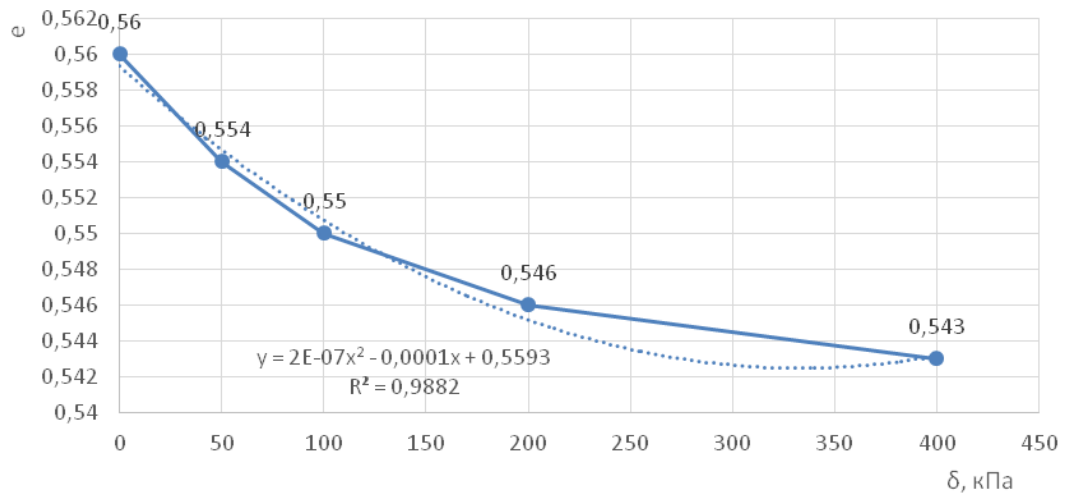


Рис. 4. – Компрессионная кривая

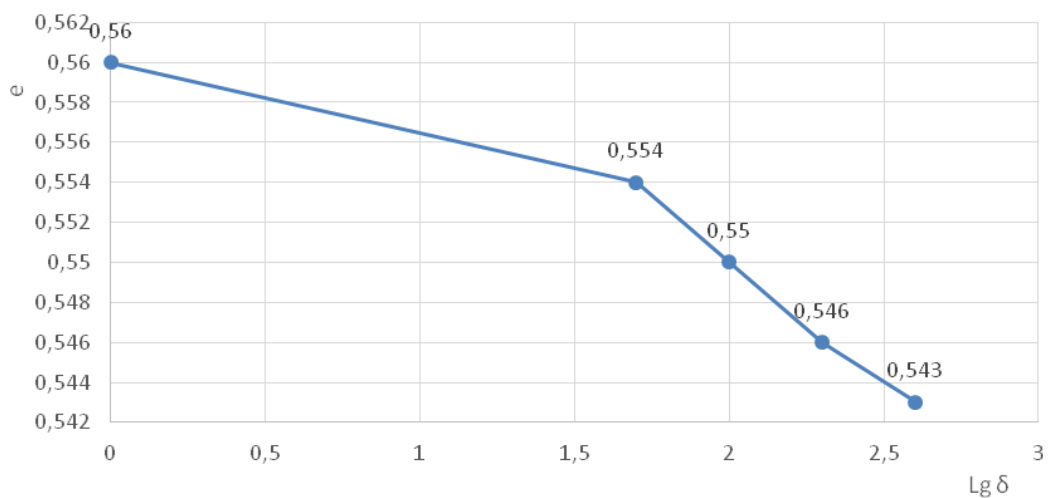


Рис.5. – Компрессионная кривая в полулогарифмическом виде

Между компрессионным и одометрическим модулями деформации существует следующая связь:

$$E_k = \beta \cdot E_{ord}$$

Таким образом, осредненный коэффициент $\beta = 0,66$, полученный опытным путем, отличается от нормированного значения $\beta = 0,8$ для песков.

Таблица 4

Результаты определения деформативных характеристик в одометре

Интервал давлений, кПа	m_0 , МПа ⁻¹	E_k , МПа	E_{ord} , МПа	β
0-50	0,12	10,4	15,6	0,67
50-100	0,08	15,6	26,3	0,59
100-200	0,04	31,2	58,8	0,53
200-400	0,015	83,2	100	0,832

Таблица 5

Результаты определения прочностных характеристик в одометре

Схема испытания: ступени 50-100-200-400 кПа.	φ , град	c , кПа
Серия опытов 1 (рыхлый песок)	18,1	- 2,74
Серия опытов 2 (плотный песок)	27	0,225

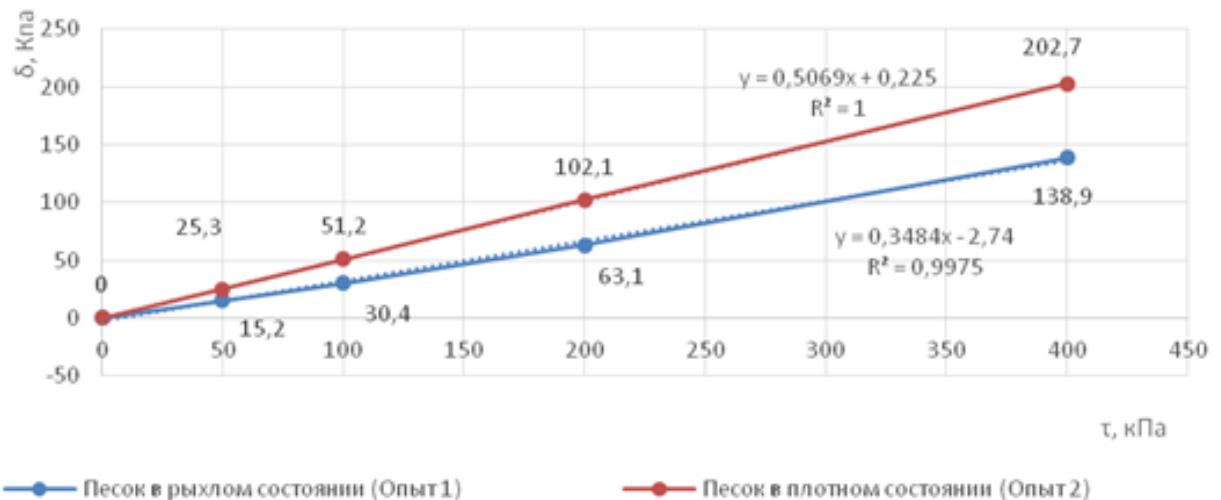


Рис.6. – Сводный график зависимостей по двум сериям опытов между вертикальными и боковыми напряжениями

Методика испытания в приборе одноплоскостного среза

Испытания в приборе одноплоскостного среза проводятся с целью установить истинные прочностные характеристики испытуемого грунта для сверки данных, полученных после обработки испытаний в экспериментальном компрессионном одометре.

Согласно ГОСТ 12248-2010 для получения прямой зависимости боковых напряжений от нормальных напряжений (без учета статистической обработки) необходимо минимум три опыта с разными значениями прикладываемого вертикального давления. Для каждого состояния песка (рыхлый $e_0=1,03$, плотный $e_0=0,56$) было проведено четыре испытания с соответствующими значениями вертикальной нагрузки: 100-200-300-400 кПа.

По результатам испытаний сформирована таблица 6, состоящая из значений σ , кПа и τ , кПа на момент максимальной прочности образца и построены график зависимости между вертикальными σ и боковыми τ напряжениями (рис.7). Анализируя график, который описывается уравнением Кулона, получаем параметры прочности песка φ и c (табл. 6).

Таблица 6

Значения испытаний на одноплоскостной срез для песка мелкого

Наименование грунта	σ , кПа	τ , кПа	φ , град	c , кПа
Песок мелкий рыхлый $e_0=1,03$	100	74,5	32	1,8
	200	137,2		
	300	164,1		
	400	277,2		
Песок мелкий плотный $e_0=0,56$	100	105,6	42,35	14,56
	200	227,1		
	300	287,9		
	400	365,5		

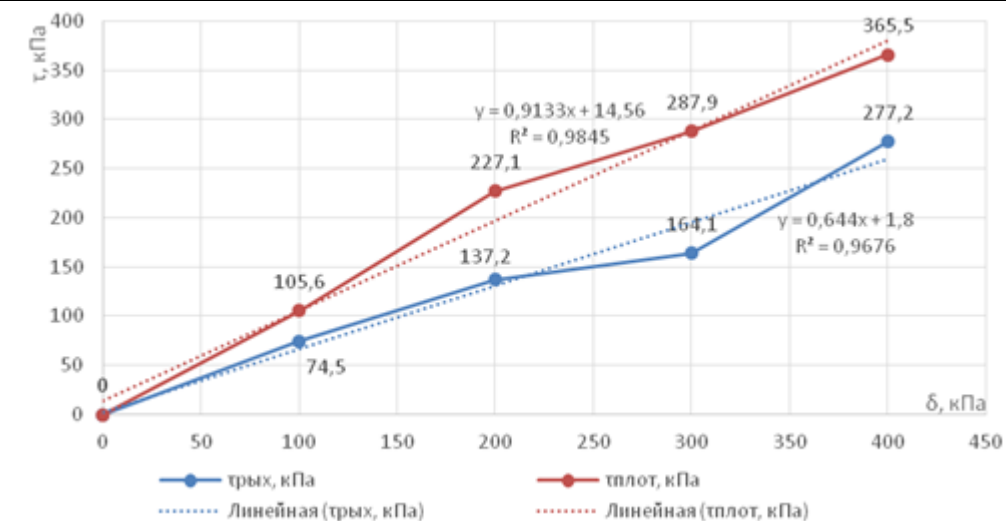


Рис.7. – Зависимость между вертикальными и боковыми напряжениями

Сравнение и интерпретация результатов

Целью данных исследований является выявление строгой корреляции результатов определения характеристик грунта φ и c между экспериментальными (одомер с измерением боковых напряжений) и стандартными (одноплоскостной срез) методиками проведения испытаний. Сравним результаты испытаний в табличном (табл.7, 8) и графическом видах (рис.8, 9).

Таблица 7

Сводная таблица прочностных характеристик для песка рыхлого

Песок $e_0=1.03$	Одометр с измерением боковых напряжений	Одноплоскостной срез	Корреляционный коэффициент
φ , град	18,1	32	1,7
c , кПа	-2,74	1,8	

Таблица 8

Сводная таблица прочностных характеристик для песка плотного

Песок $e_0=0.56$	Одометр с измерением боковых напряжений	Одноплоскостной срез	Корреляционный коэффициент
φ , град	27	42,35	1,5
c , кПа	0,225	14,56	

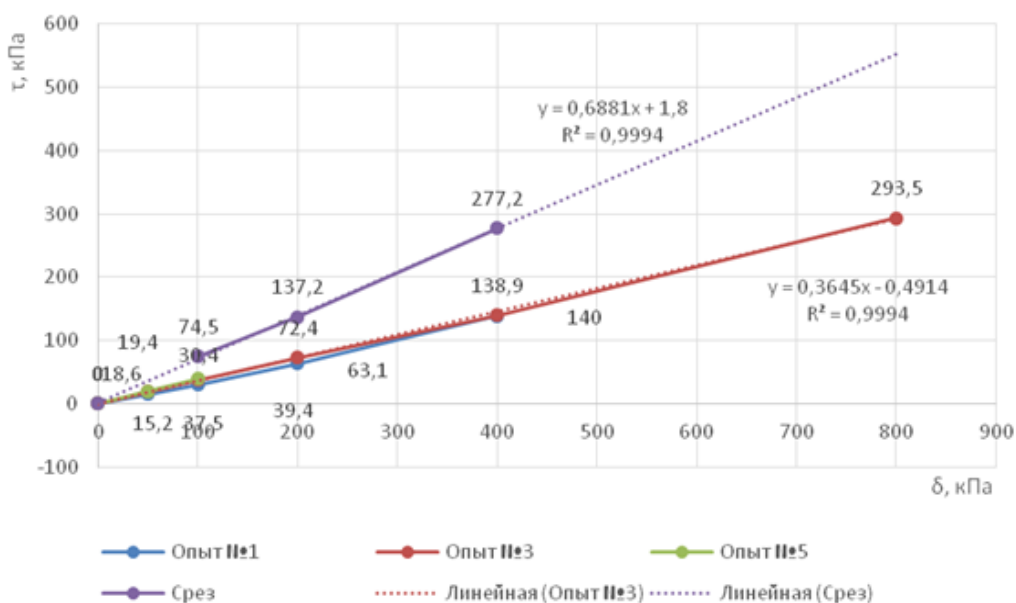


Рис.8. – Зависимость между нормальными σ и боковыми τ напряжениями в песке сухом рыхлом ($e=1,03$)

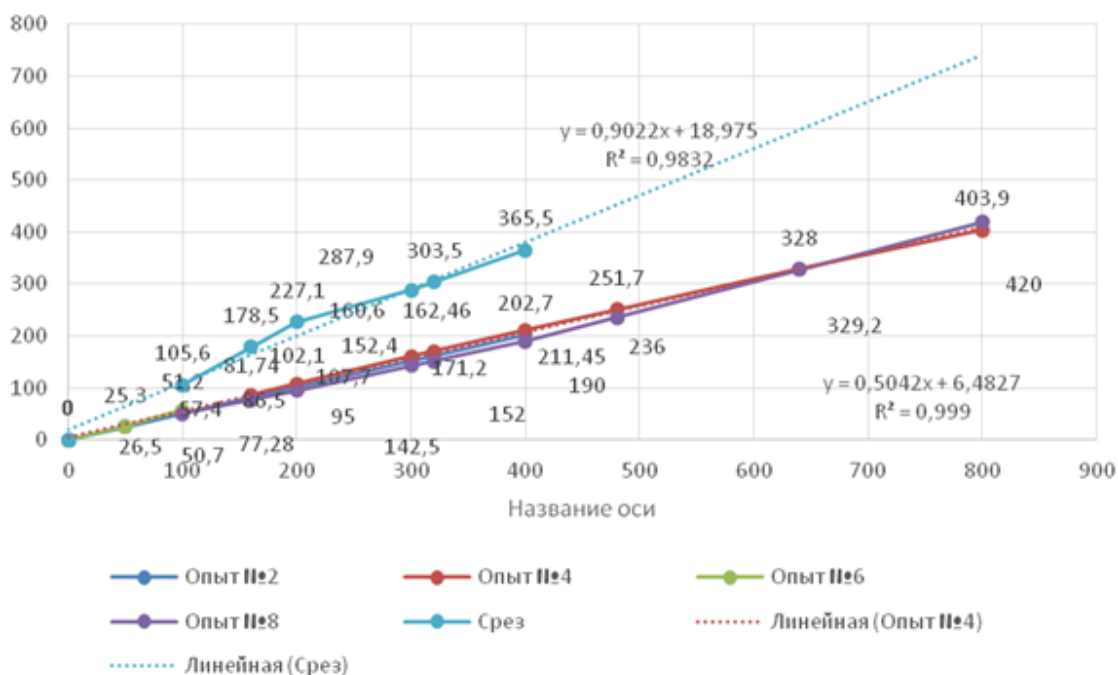


Рис.9. – Зависимость между нормальными σ и боковыми τ напряжениями в песке сухом плотном ($e=0,56$)

В результате проведенных экспериментов сделаны следующие выводы:

- результаты, полученные при испытании в экспериментальном одометре, не совпадают с результатами, полученными в классической методике испытания одноплоскостным срезом;
- выявлена корреляция результатов для песка мелкого в сухом состоянии: в рыхлом сложении ($e_0=1.03$) коэффициент перехода к значениям среза составляет 1,7; в плотном сложении ($e_0=0,56$) коэффициент перехода к значениям среза – 1,5.

Таким образом, целесообразность использования одометра с измерением боковых напряжений не может быть подтверждена или опровергнута. Существует вероятность того, что метод справедлив при использовании некоторых корреляционных коэффициентов. Следовательно, в дальнейшем необходимо проведение испытаний на разных видах грунта с возможным составлением таблиц переходных коэффициентов.

Литература

1. Болдырев Г.Г., Барвашов В.А., Идрисов И.Х., Хрянина О.В. Комплексная технология инженерно-геологических изысканий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8. №3. С. 22-33.
 2. Калошина С.В., Шаламова Е.А., Безгоднов М.А. Особенности инженерных изысканий и геотехнического моделирования объектов в условиях плотной городской застройки // Академический Вестник УралНИИпроект РААСН. 2016. №3. С. 72-78.
 3. Шеина С.Г., Крикунов Ф.А., Соболевский А.И. Исследования возведения объектов строительства в сложных инженерно-геологических условиях (на примере г. Ростова-на-Дону) // Инженерный вестник Дона, 2018, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4626.
 4. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010. М.: ООО «Прондо», 2014. 812 с.
 5. Пыхтеева Н.Ф., Миронова В.И., Львов Д.О. Испытания грунтов в Уральском федеральном университете // Академический Вестник УралНИИпроект РААСН. 2014. №2. С.87-91.
 6. Кудашева М.И., Загитдинова Т.В., Калошина С.Б. Результаты лабораторных исследований характеристик глинистого грунта // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2018. Т.1. С.71-80.
 7. Dyvik R., Laclasse S., Martin R. Coefficient of Lateral Stress from Oedometer Cell // Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 1985. Vol. 2, pp. 1003-1006.
 8. Davison L.R., Atkinson J.H. Continuous Loading Oedometer Testing of Soils // Quarterly Journal of Engineering Geology. 1990. Vol. 23. pp.347-355.
-

9. Onitsuka, K., Hong, Z., Yoshitake, S. Interpretation of Oedometer Test Data for Natural Clays // Soils and Foundations. 1995. Vol. 35. No. 3. P.61-70.

10. Маклаков С.Ф., Мишин В.А. Экспериментальное определение предела прочности грунта на сдвиг при динамическом нагружении // Инженерный вестник Дона, 2017, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4476.

11. Mayne P.W. Determining OCR in Clays from Laboratory Strength // ASCE Journal of Geotechnical Engineering. 1988. Vol. 114. No. 1. P.76-92.

12. Хрянина, О.В. Экспериментально-теоретическая оценка совместной работы конструкции гибкого фундамента с армированным основанием: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01/О.В. Хрянина. Пенза, 2005. 223 с.

References

1. Boldyrev G.G., Barvashov V.A., Idrisov I.Kh., Hryanina O.V. Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura. 2017. T. 8. №3. pp. 22-33.

2. Kaloshina S.V., Shalamova E.A., Bezgodov M.A. Akademicheskij vestnik UralNIIproekt RAASN. 2016. № 3. pp. 72-78.

3. Sheina S.G., Krikunov F.A, Sobolevskij A.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4626.

4. Boldyrev G.G. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov s kommentariyami k GOST 12248-2010 [Methods for determining the mechanical properties of soils with comments to GOST 12248-2010]. M.: ООО «Prondo», 2014. 812 p.

5. Pyhteeva N.F., Mironova V.I., L'vov D.O. Akademicheskij Vestnik UralNIIproekt RAASN. 2014. №2. pp.87-91.

6. Kudasheva M.I., Zagitdinova T.V., Kaloshina S.B. Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika. 2018. T.1. pp.71-80.



7. Dyvik R., Laclasse S., Martin R. Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco. 1985. Vol. 2. pp. 1003-1006.
8. Davison L.R., Atkinson J.H. Quarterly Journal of Engineering Geology. 1990. Vol. 23. pp.347-355.
9. Onitsuka K., Hong Z., Yoshitake S. Soils and Foundations. 1995. Vol. 35. No. 3. pp.61-70.
10. Maklakov S.F., Mishin V.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4476.
11. Mayne P.W. ASCE Journal of Geotechnical Engineering. 1988. Vol. 114. No. 1. pp.76-92.
12. Hryanina O.V. Eksperimentalno-teoreticheskaya otsenka sovmestnoy raboty konstruktsii gibkogo fundamenta s armirovannym osnovaniyem [Experimental and theoretical evaluation of the joint work of a flexible foundation structure with a reinforced base]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.01/O.V. Khryanina. Penza. 2005. 223 p.