

УДК 624.131

ОБ ОЦЕНКЕ СЛУЧАЙНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СЖИМАЕМОСТИ ГРУНТОВ

ASSESSMENT RANDOM ERROR DEFINITIONS SOIL PARAMETERS COMPRESSIBILITY

Денисенко Виктор Викторович

кандидат технических наук, доцент кафедры
Кадастра и геоинженерии,
Кубанский государственный
технологический университет
Тел.: +7(861) 27-41-935, +7(961) 52-50-278
Devivi@yandex.ru

Ляшенко Павел Алексеевич

профессор кафедры Оснований и фундаментов,
Кубанский государственный аграрный университет
Тел.: +7(861) 22-15-945, +7(918) 48-82-840
lyseich1@yandex.ru

Аннотация. Приведен анализ погрешностей, которые имеют место при определении показателей сжимаемости грунтов. Отмечено, что существующий стандартный метод испытания грунтов ступенчато возрастающей нагрузкой (метод СВН) не позволяет оценить случайную погрешность определения показателей сжимаемости грунтов. Проведены результаты экспериментов по установлению эффективности метода постоянно возрастающей нагрузки (метода ПВН) для оценки случайной погрешности определения показателей сжимаемости грунтов в сравнении с методом СВН при испытании серии образцов-близнецов различных грунтов с помощью автоматических компрессионных приборов конструкции СевКавТИСИЗа, работающих по методу ПВН и СВН. Установлено, что случайная погрешность определения показателей сжимаемости грунтов зависит от величины сжимающей нагрузки и свойств грунтов. Ее значение может достигать десятков процентов (более 20) и составлять основную часть общей погрешности определения показателей сжимаемости грунтов, поэтому должна учитываться в конечных результатах. Оценить ее в единичном испытании можно методом ПВН.

Ключевые слова: показатели сжимаемости грунтов, случайная погрешность, систематическая погрешность, единичное испытание, точки наблюдений.

Denisenko Viktor Viktorovich

the senior lecturer of chair of
the Cadastre and geoengineering,
Kuban State University of Technology
Ph.: +7(861) 27-41-935,
+7(961) 52-50-278
Devivi@yandex.ru

Ljashenko Pavel Alekseevich

professor of the Department of
the foundations,
Kuban State Agrarian University
Ph.: +7(861) 22-15-945,
+7(918) 48-82-840
lyseich1@yandex.ru

Annotation. The analysis of errors that occur when determining the indicators in the compressibility of the soil. Noted that the existing standard method of soil testing stepwise increasing load (method SVN) can not estimate the random error in determining the exponentlei compressibility of soils. The results of experiments carried out on the mouthment of the effectiveness of the method is constantly increasing load (methods da PVN) to estimate the random error in determining the parameters of the compressibility of soils in comparison with the method of SRI in testing a series of samples of different soils twin with automatic someone pressionnyh instrument design SevKavTISIZ working for metod PVN and SVN. It was found that the random error in determining the parameters of the compressibility of soil depends on the magnitude of the compressive load and soil properties. Its value can reach tens of percent (more than 20) and constitute the bulk of the total error in determining the parameters of the compressibility of soil, so should be included in the final results. Rate it can be in a single test method PVN.

Keywords: indicators of soil compressibility, the error randomness, systematic error, unit testing, observation points.

При определении показателей сжимаемости грунтов, как и при любых испытаниях по определению механических показателей различных материалов, имеют место случайные и систематические погрешности [1]. Систематическая (инструментальная) погрешность $\delta_{и}$ оценивается по конструктивным параметрам используемого при испытаниях грунтов оборудования и ее определение не вызывает сложностей. Случайная погрешность $\delta_{с}$, например, при компрессионных испытаниях есть следствие измерения деформационной способности грунтов под действием постоянной или изменяю-

щейся нагрузки. Для оценки случайной погрешности δ_c необходимо иметь соответствующее количество точек наблюдений, достаточное для аппроксимации экспериментальных данных аналитическими функциями. Однако в настоящее время полевые и лабораторные испытания грунтов на сжимаемость производят главным образом методом ступенчато возрастающей нагрузки (методом СВН), принятым за стандартный в нашей стране [2, 3] и во многих зарубежных странах и позволяющим оценить только систематическую погрешность $\delta_{\text{и}}$ [4, 5] в единичном испытании конкретного грунта. При методе СВН случайная погрешность δ_c может быть оценена лишь по результатам достаточно большого числа испытаний одного и того же грунта из исследуемого инженерно-геологического элемента [6–8], что практически не всегда возможно и требует значительных дополнительных затрат.

Любое количество точек наблюдений в единичном испытании конкретного грунта может быть получено при его испытании методом постоянно возрастающей нагрузки (методом ПВН) [9, 10].

При методе ПВН точки наблюдений могут быть получены через любой по величине интервал увеличения ΔP . В результате можно получать набор из десятков точек наблюдений, следующих одна за другой через произвольно малый интервал

$$\Delta P = V \cdot \Delta t. \quad (1)$$

Это позволяет задавать требуемую величину интервала ΔP и применять аппроксимацию экспериментальных значений показателей сжимаемости (коэффициента сжимаемости a_i и модуля деформации E_i), соответственно функциями $a(P)$ или $E(P)$.

Тогда случайная погрешность δ_c определяется как среднеквадратическое отклонение экспериментальных данных, отнесенное к наименьшему значению аппроксимирующей функции на рассматриваемом интервале нагрузки

$$\delta_c = \frac{\sigma_a}{\min\{\bar{a}_i; \bar{a}_{i+1}\}} \cdot 100, \%, \quad (2)$$

аналогично

$$\delta_c = \frac{\sigma_E}{\min\{\bar{E}_i; \bar{E}_{i+1}\}} \cdot 100, \%, \quad (3)$$

где \bar{a}_i и \bar{a}_{i+1} , \bar{E}_i и \bar{E}_{i+1} — аппроксимирующие значения соответственно a и E в начале и в конце i -го интервала приращения нагрузки ΔP , 1/МПа; σ_a и σ_E — среднеквадратическое отклонение соответственно к a и E , 1/МПа.

Аппроксимирующими могут быть параметрические функции или полиномы. В последнем случае порядок полинома должен быть меньше, чем число экспериментальных точек наблюдений, чтобы аппроксимация не превращалась в интерполяцию. При больших изменениях приближаемых величин целесообразно проводить аппроксимацию по участкам, содержащим представительное число экспериментальных точек наблюдений (не менее пяти).

С целью проверки эффективности метода ПВН для оценки случайной погрешности δ_c в единичном испытании конкретного грунта нами проведена серия компрессионных испытаний 16-ти различных образцов-близнецов грунтов методами ПВН и СВН до одинаковой конечной нагрузки. Испытания проводились на автоматических компрессионных приборах конструкции СевКатИСИЗа с постоянно и ступенчато возрастающим нагружением соответственно АКП-4Н и АКП-3С, имеющими одинаковые конструкции и параметры одометра и системы измерения деформации грунта. Для каждого испытания методами ПВН и СВН определялись случайная погрешность δ_c и систематическая погрешность $\delta_{\text{и}}$.

Для проведенных экспериментов систематическая погрешность $\delta_{и}$ состоит из погрешности определения величины нагрузки δ_p и погрешности определения относительной деформации грунта δ_{ϵ} , т.е.

$$\delta_{и} = \delta_p + \delta_{\epsilon}. \quad (4)$$

В свою очередь

$$\delta_p = \delta_p^H + \delta_p^D + \delta_p^Ш, \quad (5)$$

$$\delta_{\epsilon} = \delta_{\epsilon}^A + \delta_{\epsilon}^K, \quad (6)$$

где δ_p^H — погрешность приложения нагрузки, %; δ_p^D — погрешность средства измерения, которым осуществляется измерение нагрузки, %; $\delta_p^Ш$ — погрешность определения площади штампа одометра, %; δ_{ϵ}^A — погрешность измерения осадки грунта, %; δ_{ϵ}^K — погрешность измерения высоты рабочего кольца одометра, %.

Методика определения погрешности приложения нагрузки δ_p^H заключалась в сравнении нагрузки, фактически передаваемой нагрузочными механизмами приборов АКП-4Н и АКП-3С, с расчетной. Фактическая нагрузка определялась по среднему значению 5-ти кратных измерений, выполненных с помощью динамометра типа ДОСМ, устанавливаемого вместо одометра на столе-основании приборов АКП-4Н и АКП-3С.

Полученные погрешности приложения нагрузки δ_p^H не превышают $\pm 3,0$ % (табл. 1). Поэтому для расчетов принимаем для приборов АКП-4Н и АКП-3С погрешность средства измерения, которым осуществляется измерение нагрузки, равную $\delta_p^D = \pm 3$ %.

Для образцовых динамометров типа ДОСМ согласно ГОСТ 9500 [11] погрешность средства измерения составляет $\delta_p^D = \pm (0,5-0,3)$ %.

Таблица 1 — Погрешность передачи нагрузки в приборах АКП-4Н и АКП-3С

Нагрузка		Среднее значение фактической нагрузки в приборе, кгс		Погрешность передачи нагрузки в приборе, δ_p^H , %	
удельная, кПа	осевая, кгс	АКП-4Н	АКП-3С	АКП-4Н	АКП-3С
12,5	7,5	7,71	7,72	2,8	2,9
25	15	15,23	15,27	1,5	1,8
50	30	30,45	30,48	1,5	1,6
100	60	60,72	60,78	1,2	1,3
200	120	121,32	121,08	1,1	0,9
300	180	181,44	181,26	0,8	0,7
400	240	240,72	240,72	0,3	0,3
500	300	300,30	298,50	0,1	0,5
600	360	361,08	—	0,3	—
700	420	421,26	—	0,3	—
800	480	480,96	—	0,2	—
900	540	542,16	—	0,4	—
1000	600	603,00	—	0,5	—

Принимаем погрешность средства измерения $\delta_p^p = \pm 0,5 \%$.

При измерении штангенциркулем с ценой деления 0,05 мм диаметра штампа одометра с номинальным размером 87,4 мм — погрешность определения площади штампа одометра составляет $\delta_p^u = \pm 0,2 \%$, а высоты рабочего кольца одометра с номинальным размером 25 мм — погрешность измерения высоты рабочего кольца одометра составляет $\delta_\varepsilon^k = \pm 0,4 \%$.

Допускаемая погрешность измерения осадки грунта не превышает $\pm 2 \%$. Принимаем погрешность измерения осадки грунта $\delta_\varepsilon^d = \pm 2 \%$.

Подставляя значения всех погрешностей в формулу (4) получаем величину систематической погрешности $\delta_{\text{и}}$

$$\delta_{\text{и}} = (\pm 3,0) + (\pm 0,5) + (\pm 0,2) + (\pm 2,0) + (\pm 0,4) = \pm 6,1 \%$$

Таким образом, для приборов АКП-4Н и АКП-3С систематическая погрешность $\delta_{\text{и}}$ имеет одинаковую величину, следовательно, систематическая погрешность $\delta_{\text{и}}$ не зависит от метода приложения нагрузки.

Оценку случайной погрешности δ_c рассмотрим, например, по значениям коэффициента сжимаемости α при сравнительных испытаниях 2-х образцов-близнецов № 35 суглинка твердого с плотностью $\rho = 1,82 \text{ г/см}^3$, коэффициентом пористости $e = 0,783$ и коэффициентом водонасыщения $S_r = 0,69$ методами ПВН и СВН.

Значения коэффициента сжимаемости α рассчитаем через равные интервалы приращения нагрузки, например $\Delta P = 10 \text{ кПа}$ при методе ПВН, а при методе СВН через стандартные интервалы $\Delta P = 50$ и 100 кПа .

Для упрощения сокращения расчетов экспериментальные значения коэффициента сжимаемости a , полученные при методе ПВН, разобьем на интервалы нагрузки 0–190, 190–250, 250–500 кПа (табл. 2 и 3) и аппроксимируем их функциями (рис. 1):

а) в интервале $P = 0–190 \text{ кПа}$

$$\bar{a} = \frac{1}{5,902 - 1,460 \cdot P} \quad (7)$$

со среднеквадратическим отклонением $\sigma_a = 0,014 \text{ 1/МПа}$;

б) в интервале $P = 250–500 \text{ кПа}$

$$\bar{a} = \frac{1}{-0,9795 + 15,08 \cdot P} \quad (8)$$

со среднеквадратическим отклонением $\sigma_a = 0,033 \text{ 1/МПа}$.

В интервале $P = 190–250 \text{ кПа}$ аппроксимацию значений a не производим, т.к. здесь имеет место резкий подъем $a(P)$, говорящий о разрушении структурных связей грунта на этом интервале и недостаточное количество экспериментальных точек наблюдений.

При методе СВН определить случайную погрешность δ_c невозможно из-за малого числа значений коэффициента сжимаемости a , отделенных один от другого большим интервалом нагрузки. Поэтому случайная погрешность δ_c остается неизвестной, хотя реально существует, как проявление неоднородной сжимаемости грунта при увеличении нагрузки.

Рассмотренный пример показывает, что случайная погрешность δ_c может достигать более 20 % (см. табл. 2 и 3) и, следовательно, оказывает влияние на точность определения показателей сжимаемости грунтов при компрессионных испытаниях.

Влияние случайной погрешности δ_c на точность определения показателей сжимаемости грунтов, например, на коэффициент сжимаемости a , рассмотрим на резуль-

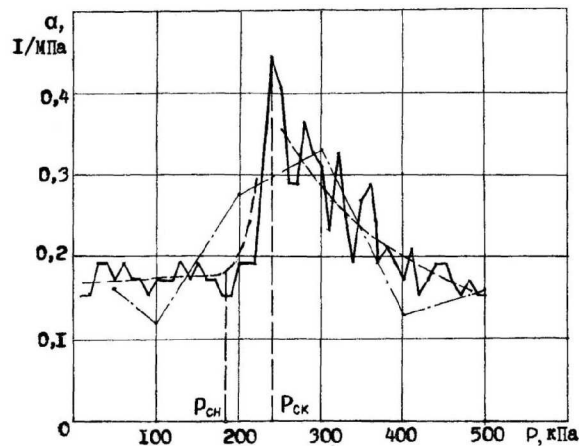
Таблица 2 — Аппроксимация экспериментальных значений коэффициента относительной сжимаемости образца грунта № 35 при методе ПВН в интервале сжимающей нагрузки от 0 до 220 кПа

Сжимающая нагрузка, P , кПа	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
Коэффициент сжимаемости, $1/kPa$	0,154	0,154	0,192	0,192	0,192	0,173	0,173	0,173	0,154	0,173	0,173	0,173	0,192	0,173	0,192	0,173	0,173	0,154	0,154
Относительная случайная погрешность, δ_c , %	8,24	8,24	8,24	8,19	8,19	8,19	8,14	8,14	8,09	8,09	8,04	8,04	8,00	8,00	8,00	7,95	7,95	7,91	7,91

Таблица 3 — Аппроксимация экспериментальных значений коэффициента относительной сжимаемости образца грунта № 35 при методе ПВН в интервале сжимающей нагрузки от 250 до 500 кПа

Сжимающая нагрузка, P , кПа	250	269	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	
Коэффициент сжимаемости, $1/kPa$	0,403	0,289	0,289	0,365	0,327	0,309	0,230	0,327	0,250	0,192	0,269	0,289	0,192	0,212	0,212	0,173	0,212	0,154	0,173	0,192	0,192	0,173	0,154	0,173	0,154	0,154	0,154
Относительная случайная погрешность, δ_c , %	9,22	9,22	9,71	10,22	11,19	11,70	12,18	12,69	13,20	13,69	14,16	14,67	15,21	15,71	16,18	16,67	17,19	17,65	18,13	18,64	19,19	19,64	20,12	20,62	21,15	21,71	21,71

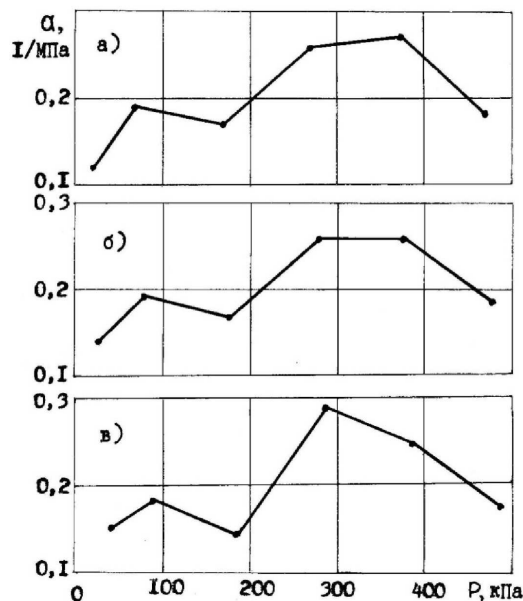
татах испытания 3-х образцов-близнецов № 35 методом СВН с различной величиной 1-ой ступени нагрузки $\Delta P_1 = 20, 30$ и 40 кПа, имитирующей случайный фактор, и одинаковой величиной остальных ступеней нагрузки $\Delta P_2 = 50$ кПа, $\Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = \Delta P_6 = 100$ кПа.



- по экспериментальным значениям коэффициента сжимаемости при методе ПВН;
 - - - по аппроксимирующей функции экспериментальных значений коэффициента сжимаемости при методе СВН;
 - · - · по экспериментальным значениям коэффициента сжимаемости при методе СВН;
- $P_{сн}$ и $P_{ск}$ — нагрузка, соответствующая началу и окончанию разрушения структурных связей грунта

Рисунок 1 — Изменение коэффициента сжимаемости α при различных методах компрессионных испытаний образцов-близнецов № 35

В результате эксперимента получено три варианта изменения коэффициента сжимаемости α (рис. 2), в которых при одинаковых значениях нагрузки наблюдается значительное различие величины коэффициента сжимаемости α , достигающее 20 % при $P = 200$ кПа, что свидетельствует о существенном влиянии случайных факторов на показатели сжимаемости грунтов и необходимости их учета.



а) $\Delta P_1 = 20$ кПа; б) $\Delta P_1 = 30$ кПа; в) $\Delta P_1 = 40$ кПа

Рисунок 2 — Изменение коэффициента сжимаемости α при компрессионных испытаниях образцов-близнецов № 35 в зависимости от величины первой ступени нагрузки

Оценим в единичном испытании конкретного грунта погрешности определения коэффициента сжимаемости a и модуля деформации E .

Обозначим через δ_a и δ_E погрешности определения соответственно коэффициента сжимаемости a и модуля деформации E .

Тогда значения δ_a и δ_E определяются по формуле

$$\delta_a = \delta_E = \sqrt{\delta_I^2 + \delta_C^2}. \quad (9)$$

При методе ПВН, например, при $P = 300$ кПа

$$\delta_a = \delta_E = \sqrt{6,14^2 + 11,7^2} = \pm 13,2 \text{ (\%)}. \quad (9)$$

При методе СВН δ_a и δ_E можно оценить с меньшей достоверностью без случайной погрешности δ_c

$$\delta_a = \delta_E = 6,14 \text{ \%}.$$

Следовательно, метод ПВН по сравнению с методом СВН позволяет определять случайную погрешность δ_c и получать более достоверные показатели сжимаемости грунтов.

Таким образом, установлено, что:

- случайная погрешность определения показателей сжимаемости грунтов зависит от величины нагрузки и свойств грунтов. Ее значение может достигать десятков процентов (более 20) и составлять основную часть общей погрешности определения показателей сжимаемости грунтов, поэтому должна учитываться в конечных результатах;
- оценить случайную погрешность определения показателей сжимаемости конкретного грунта в единичном испытании можно с помощью метода ПВН;
- систематическая погрешность определения показателей сжимаемости грунтов не зависит от метода приложения нагрузки.

Литература:

1. Метрологическое обеспечение производства. Конспект лекций. Госстандарт, ВИСМ / Под ред. А.А. Тупиченкова. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 248 с.
2. ГОСТ 12248-2010 Грунты. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
3. ГОСТ 20276-2012 Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости.
4. Разоренов В.Ф. Методика учета систематических погрешностей при компрессионных испытаниях глинистых пород // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. – М. : Госгеолотехиздат. 1961, вып.19. – С. 136–148.
5. Саватеев С.С. Систематические погрешности лабораторных исследований деформируемости просадочных грунтов. –1972. – № 3. – С. 8–10.
6. Дмитриев В.В. Оптимизация лабораторных инженерно-геологических исследований. – М. : Недра, 1989. – 184 с.
7. Кравченко Э.В., Будагов И.В., Кравченко Е.С. Методика обработки экспериментальных данных прямых измерений при изучении физических свойств грунтов // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2013. – № 3. – С. 29–30.
8. Кравченко В.С., Кравченко Э.В., Будагов И.В. Статистические методы оценки физических свойств грунтов // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2013. – № 1–2. – С. 40–42.
9. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Компрессионные испытания грунтов постоянно возрастающей нагрузкой // Проектирование и инженерные изыскания. – 1990. – № 4. – С. 26–28.
10. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Исследование природы сжимаемости глинистых грунтов // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2013. – № 3. – С. 65–68.
11. ГОСТ9500-84 Динамометры образцовые переносные. Общие технические требования.

References:

1. Metrological support of production. Lecture notes. State Standard, Wisma / Ed. A.A. Tupichenkova. – M. : Publishing House of Standards, 1982. – 248 p.
2. GOST 12248-2010 Soils. Soils. Laboratory methods for determining the characteristics of strength and deformability.
3. GOST 20276-2012 Soils. Field methods for determining the strength and deformability.
4. Razorenov V.F. The treatment of systematic errors in the compression tests of clay rocks // Problems of Hydrogeology and Engineering Geology. – M. : Gosgeolotekhnizdat. 1961. – Vyp.19. – P. 136–148.
5. Savateev S.S. Systematic errors in laboratory investigations is-deformability of soil subsidence. – 1972. – № 3. – P. 8–10.
6. V.V. Dmitriev Optimization of laboratory engineering geologists studies. – M. : Nedra, 1989. – 184 p.
7. Kravchenko E.V., Budagov I.V., Kravchenko E.S. The technique of the experimental data of direct measurements in the study of the physical properties of soil // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2013. – № 3. – P. 29–30.
8. Kravchenko V.S., Kravchenko E.V., Budagov I.V. Statistical methods for evaluation of physical properties of soil // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2013. – № 1–2. – P. 40–42.
9. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Compression test soil constantly increasing load // Design and engineering survey. – 1990. – № 4. – P. 26–28.
10. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Study of the nature of the compressibility of clay soils // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2013. – № 3. – P. 65–68.
11. GOST 9500-84 Dynamometers exemplary portable. General technical requirements.