

О ЦИКЛИЧНОСТИ СЖИМАЕМОСТИ ГРУНТОВ ПРИ КОМПРЕССИОННЫХ ИСПЫТАНИЯХ

В.В. ДЕНИСЕНКО¹, П.А. ЛЯШЕНКО²

¹*Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2,
электронная почта: devivi@yandex.ru*

²*Кубанский государственный аграрный университет,
350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, 13,
электронная почта: lyseich1@yandex.ru*

Описаны сравнительные испытания образцов-близнецов грунтов методами постоянно возрастающей нагрузки и ступенчато возрастающей нагрузки. Испытания проводились с помощью автоматических компрессионных приборов АКП-4Н с постоянно возрастающей нагрузкой и АКП-3С со ступенчато возрастающей нагрузкой. Оба прибора обеспечивают непрерывное измерение вертикальной деформации образца грунта с дискретностью 0,005 мм и её непрерывную регистрацию на диаграммной ленте в масштабе 0,0025 мм вертикальной деформации образца грунта на 1 мм диаграммной ленты. Экспериментально подтверждено явление циклического изменения скорости сжатия грунта в компрессионном приборе. Цикл скорости сжатия состоит из упругого сжатия и разрушения структуры грунта. Получена формула для вычисления коэффициента поперечной деформации при упругом сжатии. Модуль общей деформации, вычисленный с учетом объемного сжатия и значений коэффициента поперечной деформации, в 1,7-4,3 раза превышает значения, полученные по общепринятой методике.

Ключевые слова: постоянно возрастающая нагрузка, ступенчато возрастающая нагрузка, вертикальная деформация образца грунта, сжимаемость грунтов.

Определение сжимаемости грунтов в компрессионных приборах производят главным образом методом ступенчато возрастающей нагрузки (методом СВН), принятым в нашей и во многих зарубежных странах за стандартный [1]. Метод СВН прост в реализации, но имеет ряд существенных недостатков, основным из которых является: несоответствие режимов приложения нагрузки на испытываемый грунт режимам нагружения грунтов оснований зданий и сооружений при строительстве, при которых нагрузка увеличивается практически плавно; приложение ступеней нагрузки в приборе производится практически мгновенно, а сами ступени слишком велики (от 12,5 до 100 кПа), что не позволяет наблюдать за вертикальной деформацией грунта в небольших интервалах нагрузки 5-10 кПа [2-6].

Кроме того компрессионные испытания глинистых грунтов дают значения модуля деформации, немного меньшие, чем полевые испытания штампом тех же грунтов в массиве. Причиной этого является, помимо неизбежных нарушений образцов грунтов при отборе и транспортировке, игнорирование при лабораторном опыте тех превращений структуры грунта, которые происходят при сжатии в одометре компрессионного прибора: разрушение внутренних связей за пределом структурной прочности. В одометре компрессионного прибора грунт сжимается под действием осевого и бокового давлений. Деформирование грунта в жестком кольце одометра компрессионного прибора становится объемным.

Рассмотрим механическую работу A , совершаемую при осевом сжатии образца грунта в компрессионном приборе. Предположим, что она полностью переходит в энергию деформации образца грунта. Тогда верно уравнение

$$A = \frac{1}{2} \cdot \sigma_z \cdot \varepsilon_z \cdot V, \quad (1)$$

где σ_z – осевое напряжение в образце грунта;

ε_z – осевая деформация образца грунта;

V – объем образца грунта.

При объемном сжатии среднее напряжение σ в образце грунта и объемная деформация образца грунта ε_V связаны между собой отношением

$$\sigma = \frac{\varepsilon_V \cdot E_0}{3(1 - 2\nu)}, \quad (2)$$

которое, в нашем случае, принимает вид

$$\sigma_z = \frac{\varepsilon_z \cdot E_0}{3(1 - 2\nu)}, \quad (3)$$

где E_0 – модуль общей деформации образца грунта;

ν – коэффициент поперечной деформации образца грунта (коэффициент Пуассона).

Подставляя уравнение (3) в (1), получаем

$$A = \frac{\varepsilon_z^2 \cdot E_0}{6(1 - 2\nu)}, \quad (4)$$

откуда выводим формулу для вычисления модуля общей деформации:

$$E_0 = \frac{6A \cdot (1 - 2\nu)}{\varepsilon_z^2 \cdot V}, \quad (5)$$

где A – удельная работа сжатия образца грунта, приходящаяся на единицу объема грунта;

ε_z – относительная деформация образца грунта.

Значения модуля общей деформации грунтов, рассчитанные по формуле (5) в 1,7-4,3 раза больше, чем полученные при стандартной методике расчета [1] по формуле

$$E = \frac{\Delta\sigma_z}{\Delta\varepsilon_z} \cdot \beta, \quad (6)$$

где β – коэффициент, учитывающий отсутствие поперечного расширения образца грунта в одометре компрессионного прибора.

$$\beta = 1 - \frac{2\nu^2}{1 - \nu}. \quad (7)$$

Первые оказываются близкими к значениям, определяемым в грунтовом массиве штамповыми испытаниями (таблица 1).

Работа сжатия грунта является аддитивной величиной, зависящей от пути, который проходит величина ε при постоянной скорости изменения давления на образец грунта p или который проходит величина p при постоянной скорости деформации образца грунта $d\varepsilon/dt$.

В нашем случае, испытания образцов грунтов проводились при постоянно возрастающем давлении на образец $P = V_\sigma \cdot t$, поэтому работа вычислялась по формуле

$$A(t) = \int_0^t V_\sigma \cdot \varepsilon(\theta) \cdot d\theta, \quad (8)$$

где V_σ – скорость увеличения давления на образец грунта, задаваемая по характеристикам физических свойств грунтов так, чтобы консолидация образцов происходила за время нагружения.

Исследования сжимаемости грунтов при компрессионных испытаниях проводились нами методом постоянно возрастающей нагрузки (методом ПВН),

который из известных методов компрессионных испытаний в наибольшей степени соответствует режимам нагружения оснований зданий и сооружений при строительстве [2-5].

Реализация метода ПВН осуществлялась с помощью автоматического компрессионного прибора АКП-4Н [7], обеспечивающего проведение испытания образцов грунтов полностью в автоматическом режиме с любой постоянной скоростью возрастания нагрузки от 1 до 1000 кПа/ч до любой конечной нагрузки от 25 до 1000 кПа с непрерывным измерением вертикальной деформации образца грунта с дискретностью 0,005 мм и непрерывной её регистрацией на диаграммной ленте в масштабе 0,0025 мм вертикальной деформации образца грунта на 1 мм диаграммной ленты (рисунок 1). Графики вертикальной деформации образцов грунтов, получаемые на приборе АКП-4Н, позволяют определять значения вертикальной деформации образцов грунтов через каждые 5-10 кПа увеличения вертикального давления на грунт.

В качестве сравнения был принят метод ступенчато возрастающей нагрузки (метод СВН), который строго определен по граничным условиям оценки сжимаемости испытываемых грунтов, стандартизирован [1] и наиболее распространен на практике [8].

Реализация метода СВН осуществлялась с помощью автоматического компрессионного прибора АКП-3С [6], обеспечивающего проведение испытания образцов грунтов полностью в автоматическом режиме до любого конечного значения нагрузки от 25 до 500 кПа любыми ступенями 12,5; 25, 50, 100, 150, 200, 300, 400 или 500 кПа с выдержкой каждой ступени нагрузки до условной стабилизации вертикальной деформации образцов грунтов по ГОСТ 12248 [1], с непрерывным измерением вертикальной деформации образца грунта с дискретностью 0,005 мм и непрерывной её регистрацией на диаграммной ленте в масштабе 0,0025 мм деформации образца грунта на 1 мм диаграммной ленты (рисунок 2).

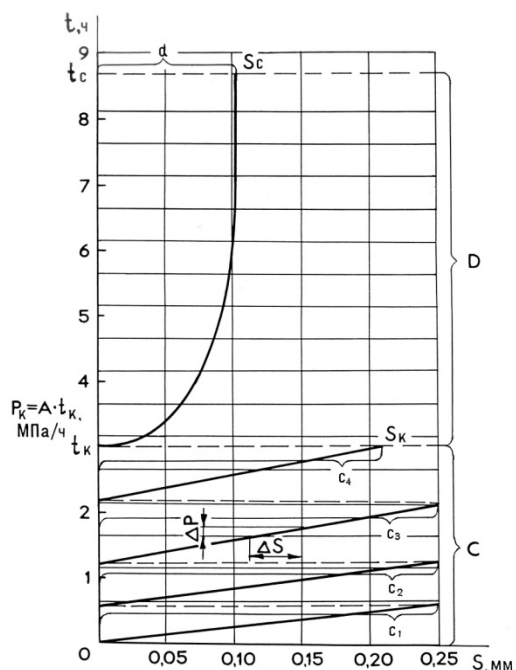


Рисунок 1 – График регистрации вертикальной деформации грунта на диаграммной ленте прибора АКП-4Н

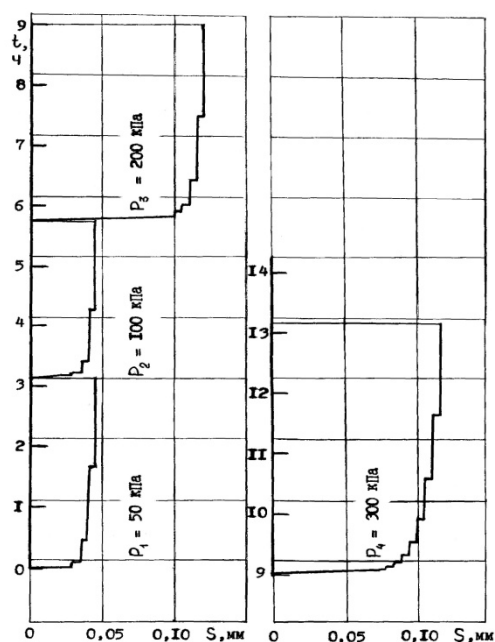


Рисунок 2 – График регистрации вертикальной деформации грунта на диаграммной ленте прибора АКП-3С

Сравнительные компрессионные испытания грунтов методами ПВН и СВН производились на 88 образцах-близнецах глинистых грунтов природного сложения различной консистенции: глинах твердых и полутвердых (с коэффициентом пористости $e = 0,578 \div 1,014$ и природной влажностью $W = 8-43 \%$); суглинках твердых, полутвердых, туго- и мягкопластичных ($e = 0,494-1,279$ и $W = 11-35 \%$); супесях твердых и пластичных ($e = 0,658-0,921$ и $W = 6-27 \%$).

Образцы-близнецы грунтов с одинаковыми значениями плотности и влажности отбирались одним и тем же работникам парами и группами из 3-5 штук. Физические характеристики грунтов определялись по ГОСТ 5180.

Монолиты грунтов для образцов-близнецов отбирались на объектах Краснодарского края из шурфов-дудок по 2-5 штук с одной глубины механическим боковым грунтоносом [9-11], который обеспечивает сохранность природного сложения грунтов в монолитах при коэффициенте корреляции по плотности скелета просадочных грунтов 0,954 в сравнении с монолитами, отобранными вручную [11-12].

Пары образцов-близнецов грунтов испытывались до одинаковой конечной нагрузки от 300 до 500 кПа по одинаковой схеме:

- с водонасыщением грунта до начала приложения нагрузки;
- при природной влажности грунта без водонасыщения в процессе испытания.

Из каждой пары образцов близнецов грунтов один образец испытывался методом ПВН, а другой – методом СВН. Скорость ПВН для образцов грунтов каждой пары близнецов задавалась произвольно и в различных опытах имела различную величину. Диапазон скоростей ПВН при сравнительных испытаниях пар образцов-близнецов грунтов методами ПВН и СВН составил от 1 до 1000 кПа/ч. Приложение СВН до конечного значения нагрузки осуществлялась ступенями, последовательно принимающими значения 50, 100, 150, 200, 300, 400 и 500 кПа с выдержкой каждой до условной стабилизации осадки образцов грунтов по ГОСТ 12248.

В результате исследований установлено, что непрерывное измерение вертикальной деформацией образцов грунтов с дискретностью 0,005 мм и ее непрерывная регистрация при нагружении образцов грунтов по методу ПНВ позволяют наблюдать явление неравномерной, а точнее, скачкообразной деформации грунтов [13]. При нагружении образцов грунтов по методу СВН, при котором ступени нагрузки имеют большую величину и прикладываются мгновенно, даже при непрерывном измерении вертикальной деформации образцов грунтов с дискретностью 0,005 мм и ее непрерывной регистрации скачкообразность деформации грунтов не фиксируется.

Скорость деформации образца грунта уменьшается на некотором интервале увеличения давления Δp_e , а затем возрастает на следующем интервале давления Δp_c . Далее явление повторяется, в общих чертах, на следующих отрезках $\Delta p = \Delta p_e + \Delta p_c$.

Таким образом, скорость деформации образца грунта изменяется циклически, а длинами циклов может служить соответствующие отрезки оси давления Δp (рисунок 3).

Длины циклов увеличиваются с ростом давления до некоторого значения $p_{ск}$, а потом медленно уменьшаются, по мере увеличения давления до конечного значения в данном опыте (рисунок 3). Эта общая закономерность выявлена для всех испытанных образцов грунтов, хотя для каждого из них имеет свои особенности: значения $p_{ск}$, длин циклов и амплитуды колебаний скорости деформации. Длины циклов присущи испытываемому грунту и отражают объективно существующий ритм разрушения его структуры при сжатии непрерывно возрастающей нагрузкой. Это подтверждается устойчивой тенденцией изменения длин циклов. Очевидно, что деформационные характеристики образцов грунтов должны быть согласованы с этим ритмом.

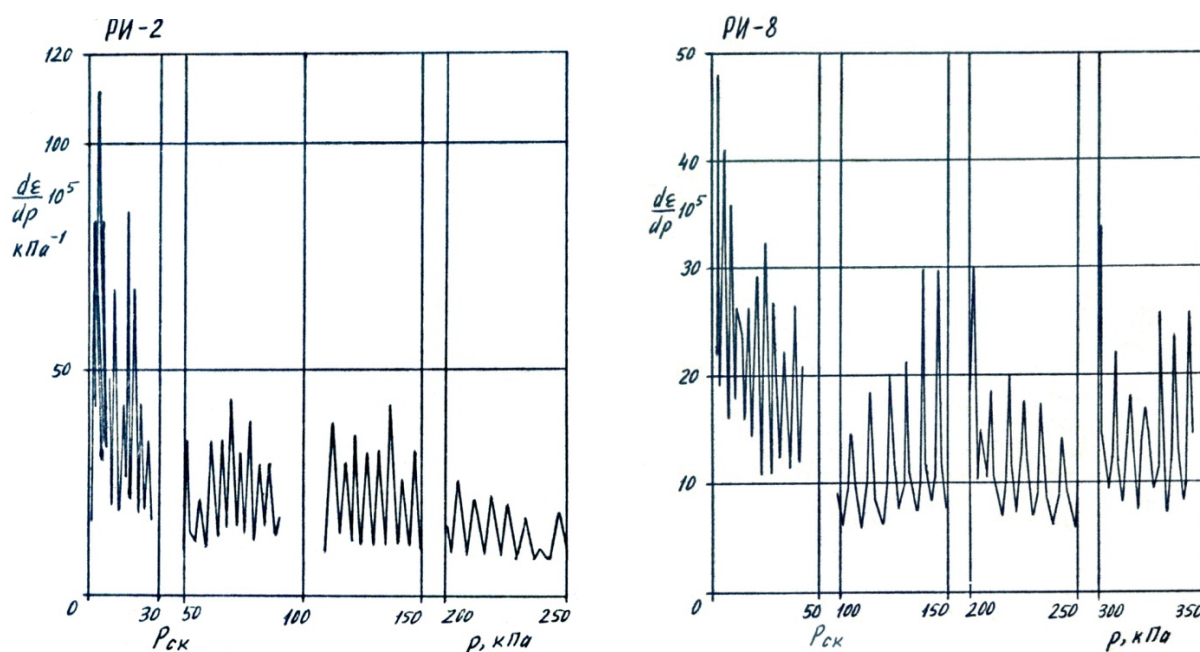


Рисунок 3 – Графики вертикальной деформации образцов грунтов через 10 кПа увеличения давления при постоянно возрастающей нагрузке

В таблице 1 приведены значения модуля общей деформации грунтов, рассчитанные по формуле (6) на интервале давления 10 кПа (E_1) для восьми значений сжимающего давления и на интервалах, совпадающих с циклами изменения скорости деформации, в которые попали те же восемь значений давления (E_2). Отношение E_1/E_2 изменяется незакономерно, в обе стороны от единицы. Это происходит потому, что интервал давления в 10 кПа является случайным для свойства сжимаемости грунтов и не дает его объективной

характеристики. Расчеты деформационных характеристик грунтов, не согласованные с природным ритмом их разрушения при сжатии, дают искаженные результаты.

Таблица 1 – Деформационные характеристики грунтов, рассчитанные на основе цикличности сжимаемости грунтов

Показатели	p , МПа							
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
Образец РИ-2а: $I_p = 10,1; I_L = -0,30; e = 0,545$								
E_1 , МПа	13,27	27,65	13,83	9,22	11,00	13,75	9,17	9,12
E_2 , МПа	11,77	11,32	10,16	9,75	11,57	7,50	7,80	8,57
E_1/E_2	1,13	2,44	1,36	0,94	0,95	1,83	1,17	1,06
ν	0,381	0,374	0,374	0,375	0,375	0,375	0,375	0,376
E_0 , МПа	30,85	32,85	31,00	30,07	28,41	27,86	27,35	26,68
E_0/E_2	2,62	2,90	3,05	3,08	2,45	3,71	3,51	3,11
Образец РИ-20: $I_p = 13,3; I_L = 0,23; e = 0,454$								
E_1 , МПа	3,45	4,08	4,39	3,76	2,76	4,33	4,72	6,49
E_2 , МПа	3,62	3,71	6,06	5,52	3,84	5,05	6,23	7,27
E_1/E_2	0,95	1,10	0,72	0,68	0,72	0,86	0,76	0,89
ν	0,385	0,381	0,382	0,382	0,383	0,384	0,385	0,385
E_0 , МПа	25,43	16,62	22,45	18,48	21,97	19,42	21,99	21,85
E_0/E_2	7,03	4,48	3,70	3,35	5,72	3,85	3,53	3,01
Образец РИ-2: $I_p = 13,9; I_L = 0,37; e = 0,629$								
E_1 , МПа	2,43	3,22	3,36	4,08	5,65	–	–	–
E_2 , МПа	3,28	3,26	3,93	3,99	5,09	–	–	–
E_1/E_2	0,74	0,99	0,85	1,02	1,11	–	–	–
ν	0,364	0,365	0,368	0,368	0,370	–	–	–
E_0 , МПа	7,14	7,59	9,00	10,41	10,70	–	–	–
E_0/E_2	2,17	2,33	2,29	2,61	2,10	–	–	–
Образец РИ-14а: $I_p = 14,1; I_L = 0,49; e = 0,630$								
E_1 , МПа	3,72	5,89	7,36	7,36	4,14	4,81	4,76	4,74
E_2 , МПа	3,35	5,60	8,83	7,84	4,19	5,05	3,92	5,06
E_1/E_2	1,11	1,05	0,83	0,94	0,99	0,95	1,21	0,94
ν	0,360	0,362	0,362	0,362	0,365	0,366	0,368	0,369
E_0 , МПа	18,00	16,04	16,96	18,33	14,32	14,12	14,95	14,61
E_0/E_2	5,37	2,86	1,92	2,34	3,42	2,80	3,81	2,89
Образец РИ-12: $I_p = 14,4; I_L = 0,15; e = 0,416$								
E_1 , МПа	3,19	6,44	4,26	3,19	3,63	5,05	5,05	6,26
E_2 , МПа	3,80	3,22	3,44	3,90	4,82	4,71	4,59	5,52
E_1/E_2	0,84	2,00	1,24	0,82	0,75	1,07	1,10	1,13
ν	0,387	0,386	0,387	0,387	0,388	0,389	0,389	0,390
E_0 , МПа	13,64	20,58	16,56	18,69	16,43	15,85	18,16	17,70
E_0/E_2	3,59	6,38	4,82	4,79	3,41	3,36	3,95	3,20
Образец РИ-1: $I_p = 15,3; I_L = 0,18; e = 0,667$								
E_1 , МПа	4,21	5,18	5,75	7,03	7,40	5,05	4,21	3,62
E_2 , МПа	4,54	6,22	6,91	5,81	6,73	4,70	4,42	3,74
E_1/E_2	0,93	0,83	0,83	1,21	1,10	1,07	0,95	0,97
ν	0,376	0,385	0,385	0,371	0,361	0,356	0,347	0,365

Показатели	p , МПа							
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
E_0 , МПа	12,62	17,14	17,42	19,28	20,38	22,58	21,77	21,87
E_0/E_2	2,78	2,76	2,52	3,32	3,03	4,81	4,93	5,85
Образец РИ-5а: $I_p = 15,5$; $I_L = 0,54$; $e = 0,742$								
E_1 , МПа	3,48	10,47	7,75	7,75	5,12	7,61	1,35	10,01
E_2 , МПа	5,32	8,15	7,92	9,70	7,16	5,47	2,26	5,13
E_1/E_2	0,65	1,28	0,98	0,80	0,71	1,39	0,63	1,95
ν	0,349	0,348	0,351	0,351	0,353	0,355	0,360	0,358
E_0 , МПа	6,50	9,82	11,61	13,40	14,54	7,92	7,94	7,89
E_0/E_2	1,22	1,20	1,47	1,38	2,03	1,45	3,51	1,54
Образец РИ-9а: $I_p = 15,9$; $I_L = 0,13$; $e = 0,492$								
E_1 , МПа	5,31	8,90	8,96	8,90	8,90	8,90	26,70	9,06
E_2 , МПа	6,29	7,69	9,68	10,03	12,01	11,04	11,99	13,22
E_1/E_2	0,84	1,16	0,92	0,89	0,74	0,81	2,23	0,68
ν	0,381	0,380	0,379	0,380	0,380	0,380	0,380	0,377
E_0 , МПа	18,79	18,94	20,53	21,05	22,25	23,42	24,22	25,52
E_0/E_2	2,98	2,46	2,12	2,10	1,85	2,12	2,02	1,93
Образец РИ-5: $I_p = 16,1$; $I_L = 0,11$; $e = 0,446$								
E_1 , МПа	4,34	6,51	8,74	6,56	6,51	4,32	6,44	6,39
E_2 , МПа	4,74	6,13	8,45	6,68	4,61	5,88	6,44	5,46
E_1/E_2	0,91	1,06	1,03	0,98	1,41	0,73	1,00	1,17
ν	0,384	0,384	0,383	0,383	0,384	0,385	0,386	0,387
E_0 , МПа	13,84	14,05	19,72	20,01	19,12	20,50	19,69	18,94
E_0/E_2	2,92	2,29	2,33	3,00	4,14	3,48	3,06	3,47
Образец РИ-13а: $I_p = 16,5$; $I_L = 0,36$; $e = 0,720$								
E_1 , МПа	10,25	10,33	10,33	7,75	7,72	7,61	5,05	6,04
E_2 , МПа	10,16	9,70	8,54	7,06	6,64	5,61	5,13	6,02
E_1/E_2	1,01	1,06	1,21	1,10	1,16	1,36	0,98	1,00
ν	0,353	0,351	0,351	0,351	0,352	0,355	0,356	0,357
E_0 , МПа	26,46	28,08	27,30	25,64	24,08	21,82	20,66	19,69
E_0/E_2	2,60	2,89	3,20	3,63	3,62	3,89	4,02	3,27
Образец РИ-11а: $I_p = 17,2$; $I_L = 0,53$; $e = 0,831$								
E_1 , МПа	2,98	2,18	2,40	3,54	3,94	3,68	3,82	3,82
E_2 , МПа	3,27	2,38	3,07	2,41	2,87	2,71	2,91	3,67
E_1/E_2	0,91	0,92	0,78	1,47	1,37	1,36	1,31	1,04
ν	0,338	0,338	0,341	0,345	0,347	0,349	0,354	0,354
E_0 , МПа	12,30	8,64	10,16	9,66	9,51	9,61	9,75	9,85
E_0/E_2	3,76	3,62	3,31	4,01	3,31	3,54	3,35	2,68
Образец РИ-10а: $I_p = 17,8$; $I_L = 0,57$; $e = 0,776$								
E_1 , МПа	4,01	7,99	6,39	7,92	7,89	10,47	4,39	4,35
E_2 , МПа	5,46	6,79	6,96	7,13	8,30	11,79	3,83	4,36
E_1/E_2	0,73	1,18	0,92	1,11	0,95	0,89	1,15	1,00
ν	0,343	0,344	0,344	0,346	0,347	0,248	0,253	0,255
E_0 , МПа	20,04	13,64	14,96	16,24	17,29	18,33	15,00	14,27
E_0/E_2	1,84	2,01	2,15	2,38	2,08	1,55	3,91	3,30
Образец РИ-35а: $I_p = 18,4$; $I_L = 0,11$; $e = 0,753$								
E_1 , МПа	7,89	10,61	10,52	15,77	10,52	7,86	10,43	7,75
E_2 , МПа	11,27	11,05	10,90	9,61	9,46	7,25	7,22	7,18

Показатели	<i>p</i> , МПа							
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
E_1/E_2	0,70	0,96	0,96	1,64	1,11	1,08	1,44	1,08
ν	0,347	0,345	0,347	0,347	0,347	0,348	0,349	0,351
E_0 , МПа	26,75	29,29	29,55	29,36	28,53	28,43	27,48	26,62
E_0/E_2	2,37	2,65	2,71	3,05	3,01	3,92	3,80	3,71
Образец РИ-17: $I_p = 19,1$; $I_L = 0,53$; $e = 0,801$								
E_1 , МПа	2,09	2,92	3,55	2,88	3,32	3,89	4,47	4,41
E_2 , МПа	2,59	2,18	3,30	4,65	3,40	4,36	5,50	5,07
E_1/E_2	0,80	1,34	1,08	0,62	0,98	0,89	0,81	0,87
ν	0,341	0,343	0,344	0,346	0,347	0,350	0,349	0,352
E_0 , МПа	13,47	10,24	12,54	14,34	15,77	14,84	16,28	15,72
E_0/E_2	5,20	4,69	3,80	3,08	4,63	3,40	2,96	3,10
Образец РИ-8: $I_p = 19,7$; $I_L = 0,29$; $e = 0,831$								
E_1 , МПа	3,52	7,96	6,55	6,52	6,50	3,55	5,28	–
E_2 , МПа	3,64	6,51	6,30	5,32	7,30	4,15	5,01	–
E_1/E_2	0,97	1,22	1,04	1,23	0,89	0,85	1,05	–
ν	0,346	0,345	0,338	0,339	0,340	0,344	0,346	–
E_0 , МПа	9,01	15,05	16,63	19,62	19,45	17,25	16,64	–
E_0/E_2	2,47	2,31	2,64	3,68	2,66	4,15	3,32	–
Образец РИ-33а: $I_p = 20,0$; $I_L = 0,11$; $e = 0,514$								
E_1 , МПа	8,96	9,06	9,06	9,06	9,06	6,76	6,72	8,90
E_2 , МПа	9,18	8,85	8,96	8,24	6,83	6,74	6,65	6,62
E_1/E_2	0,97	1,02	1,01	1,10	1,33	1,00	1,01	1,34
ν	0,379	0,377	0,377	0,377	0,377	0,378	0,378	0,380
E_0 , МПа	33,98	29,18	27,25	26,66	25,40	23,94	22,81	21,95
E_0/E_2	3,70	3,30	3,04	3,23	3,72	3,55	3,43	34,31
Примечания: p – давление штампа прибора на образец грунта; E_1 – значения модуля общей деформации грунта, рассчитанные на интервале давления 10 кПа; E_2 – значения модуля общей деформации грунта, рассчитанные на интервале давления, совпадающих с циклами изменения скорости деформации; ν – коэффициент поперечной деформации образца грунта (коэффициент Пуассона); E_0 – значения модуля общей деформации грунта, рассчитанные с учетом перестройки структуры грунта по формуле (5)								

Если принять, что циклическое изменение скорости деформации грунтов отражает процесс разрушения их структуры, то анализ циклов приводит к новым результатам. На интервале давления Δp_e происходит упругое сжатие образцов грунтов с замедлением скорости их деформации ($d^2\varepsilon/dt^2 < 0$), а на интервале давления Δp_c – разрушение структуры с уплотнением грунтов и, как следствие, ускорение скорости их деформации ($d^2\varepsilon/dt^2 > 0$), наблюдающееся в опыте.

На участке упругого сжатия образцов грунтов совершается механическая работа ΔA_e . Предполагая равномерное распределение напряжений по объему образца, выразим приращение упругой энергии в этом объеме при $p \in \Delta p_e$:

$$\Delta U_e = \sigma_z \cdot \Delta \varepsilon_z - \sigma_z \cdot \Delta \varepsilon_x - \sigma_z \cdot \Delta \varepsilon_y, \quad (9)$$

или, представляя $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \nu \cdot \varepsilon_z$, $\sigma_x = \sigma_y$, получаем

$$\Delta U_e = (\sigma_z - 2\nu \cdot \sigma_x) \cdot \Delta \varepsilon_z, \quad p \in \Delta p_e. \quad (10)$$

Перепишем уравнение (10) в виде

$$\Delta U_e = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} \cdot \beta. \quad (11)$$

Это приращение энергии в точности равно внешней работе на том же участке цикла $\Delta U_e = \Delta A_e$.

Пользуясь наблюдениями, примем, что

$$\Delta A_e = a_0 + a_1 \cdot P, \quad p \in \Delta p_e, \quad (12)$$

где a_0 и a_1 – постоянные коэффициенты.

Продифференцируем обе части уравнения (12) по p :

$$\left(\frac{d\sigma_z}{dp} - 2\nu \frac{d\sigma_x}{dp}\right) \cdot \Delta \varepsilon_z + (\sigma_z - 2\nu \cdot \sigma_x) \cdot \frac{d(\Delta \varepsilon_z)}{dp} = \frac{d(\Delta A_e)}{dp}. \quad (13)$$

Очевидно, что $\frac{d\sigma_z}{dp} = 1$, $\frac{d\sigma_x}{dp} = \frac{\sigma_x}{\sigma_z} = \frac{\nu}{1-\nu}$, так как величина ν мало

изменяется с ростом давления при упругом сжатии.

Тогда с учетом того, что при достаточно малых значениях U_e можно принять $\frac{d\varepsilon_z}{dp} = \frac{d\varepsilon}{dp}$, из уравнения (13) получаем

$$\beta \cdot \Delta \varepsilon_z + \beta \cdot \sigma_z \cdot \Delta \left(\frac{d\varepsilon_z}{dp}\right) = \Delta \left(\frac{dA_e}{dp}\right), \quad (14)$$

откуда

$$\beta = \frac{\Delta(dA_e / dp)}{\Delta \varepsilon_z + \sigma_z \cdot \Delta(d\varepsilon_z / dp)}. \quad (15)$$

Значения β и ν могут быть вычислены для каждого цикла изменения скорости деформации, в который попадает заданное значение давления p . Как

видно из таблицы 1, величина ν действительно мало изменяется при увеличении давления, что послужило допущением при выводе формулы (15).

Выводы:

1 Экспериментально подтверждено явление циклического изменения скорости деформации образцов грунтов в компрессионном приборе.

2 Величины β и ν обладают большой стабильностью для каждого из испытанных образцов грунтов. Это указывает на то, что на интервале давления Δp_e действительно происходит упругое сжатие грунта и что упругие свойства грунта мало зависят от процессов перестройки его структуры.

3 Значение модуля общей деформации грунта определяется, в основном, затраченной на сжатие образца грунта механической работой. Последняя зависит в значительной степени от свойств структуры грунта, так как в каждом цикле изменения скорости деформации происходит потеря внутренней энергии структуры, по сравнению с упругим сжатием.

4 Рассмотренная методика расчета модуля общей деформации грунта основана на использовании дискретных элементов, выявленных в процессе разрушения грунта при сжатии, что является новым подходом к трактовке результатов компрессионных испытаний. Такой подход учитывает природные свойства грунта и обеспечивает всю необходимую информацию для расчета его деформационных характеристик в одном опыте.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.

2. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Новые результаты компрессионных испытаний грунтов / Проект. – М., 1995, № 2-3. – С. 76-77.

3. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Вычисление характеристик микроструктуры грунта в опыте с компрессионным сжатием образца / Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2009, № 45 (1). – С. 66-82. – <http://ej.kubagro.ru/2009/01/pdf/03.pdf>.

4. Ляшенко П.А. Сопротивление и деформации глинистого грунта: монография. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – 163 с.

5. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Анализ методов компрессионных испытаний грунтов // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. – Краснодар: КубГТУ, 2015, № 2. – С. 104-125. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/337>.

6. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Контактное взаимодействие элементов микроструктуры глинистого грунта / Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – Краснодар: КубГАУ, 2012, № 78 (04). – С. 291-318. – <http://ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/25.pdf>.

7. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Об экспериментальных компрессионных приборах для исследования сжимаемости грунтов постоянно возрастающей нагрузкой / Научные труды Кубанского государственного технологического университета. 2015, № 9 – С. 363-384. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/539>.

8. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Экспериментальное обоснование правомерности сравнения компрессионных испытаний грунтов методом постоянно возрастающей нагрузки и методом ступенчато возрастающей нагрузки / Научные труды Кубанского государственного технологического университета. 2015, № 11. – С. 416-429. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/649>.

9. Авт. св. СССР № 1084250 G01N 1/04, E21B 49/06. Боковой грунтонос / Денисенко В.В., Байков О.Н. // Открытия. Изобретения. – М., 1984, № 13.

10. Авт. св. СССР № 1188240 E02D 1/00, E21B 49/06. Боковой грунтонос / Денисенко В.В., Байков О.Н. // Открытия. Изобретения. – М., 1985, № 40.

11. Денисенко В.В., Байков О.Н., Михайлов Ю.К. Боковой грунтонос для отбора монолитов грунтов // Проектирование и инженерные изыскания. – 1984, № 2. – С. 32-34.

12. Денисенко В.В. Совершенствование конструкции грунтоприёмной гильзы бокового грунтоноса для отбора просадочных грунтов из стенок дудок / Научные труды Кубанского государственного технологического университета. 2014, № 5. – С. 158-169. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/234>.

13. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Совершенствование компрессионных испытаний грунтов на основе цикличности сжимаемости / Библиографический указатель депонированных рукописей. – М.: ВНИИТПИ, 1993, вып. 1, № 11335. – 17 с.

REFERENCES

1. GOST 12248-2010 Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya kharakteristik prochnosti i deformiruемости.

2. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Novye rezultaty kompressionnykh ispytaniy gruntov / Proekt. – M., 1995, № 2-3. – S. 76-77.

3. Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Vychislenie kharakteristik mikrostruktury grunta v opyte s kompressionnym szhatiem obraztsa / Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2009, № 45 (1). – S. 66-82. – <http://ej.kubagro.ru/2009/01/pdf/03.pdf>.

4. Lyashenko P.A. Soprotivlenie i deformatsii glinistogo grunta: monografiya. – Krasnodar: KubGAU, 2014. – 163 s.

5. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Analiz metodov kompressionnykh ispytaniy gruntov // Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. – Krasnodar: KubGTU, 2015, № 2. – S. 104-125. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/337>.

6. Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Kontaktnoe vzaimodeystvie elementov mikrostruktury glinistogo grunta / Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – Krasnodar: KubGAU, 2012, № 78 (04). – S. 291-318. – <http://ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/25.pdf>.

7. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Ob eksperimentalnykh kompressionnykh priborakh dlya issledovaniya szhimaемости gruntov postoyanno vozrastayushchey nagruzkoy / Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. 2015, № 9 – S. 363-384. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/539>.

8. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Eksperimentalnoe obosnovanie pravomernosti sravneniya kompressionnykh ispytaniy gruntov metodom postoyanno vozrastayushchey nagruзки i metodom stupenchato vozrastayushchey nagruзки / Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. 2015, № 11. – S. 416-429. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/649>.

9. Avt. sv. SSSR № 1084250 G01N 1/04, E21V 49/06. Bokovoy gruntonos / Denisenko V.V., Baykov O.N. // Otkrytiya. Izobreteniya. – M., 1984, № 13.

10. Avt. sv. SSSR № 1188240 E02D 1/00, E21V 49/06. Bokovoy gruntonos / Denisenko V.V., Baykov O.N. // Otkrytiya. Izobreteniya. – M., 1985, № 40.

11. Denisenko V.V., Baykov O.N., Mikhaylov Yu.K. Bokovoy gruntonos dlya otbora monolitov gruntov // Proektirovanie i inzhenernye izyskaniya. – 1984, № 2. – S. 32-34.

12. Denisenko V.V. Sovershenstvovanie konstruktsii gruntopriemnoy gilzy bokovogo gruntonosa dlya otbora prosadochnykh gruntov iz stenok dudok / Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014, № 5. – S. 158-169. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/234>.

13. Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Sovershenstvovanie kompressionnykh ispytaniy gruntov na osnove tsiklichnosti szhimaemosti / Bibliograficheskiy ukazatel deponirovannykh rukopisey. – M.: VNIINTPI, 1993, vyp. 1, № 11335. – 17 s.

ABOUT COMPRESSIBILITY ROCK CYCLE DURING COMPRESSION TESTS

V.V. DENISENKO¹, P.A. LYASHENKO²

¹*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072,
e-mail: devivi@yandex.ru*

²*Kuban State Agrarian University,
13, Kalinina st., Krasnodar, Russian Federation, 350044,
e-mail: lyseich1@yandex.ru*

Described comparative tests twin samples of soils methods are constantly increasing load and stepwise increasing load. Tests were carried out by automatic compression devices ACP-4H with an ever increasing workload and the ACP-3C with stepwise increasing load. Both devices provide a continuous measurement of the vertical deformation of the soil sample in increments of 0,005 mm and its continuous record on a chart tape on a scale of 0.0025 mm vertical deformation of soil samples at 1 mm chart lenty. Eksperimentalno confirmed the phenomenon of cyclic izmeneniya soil compression rate in the compression device. Speed compression cycle consists of uprugogo compression and destruction of soil structure. The formula for calculating the coefficient of transverse deformation uprugom compression. Module total strain, calculated taking into account the volume of compression and shear deformatsii coefficient values in 1,7-4,3 times higher than the values obtained by the usual method.

Key words: constantly increasing load stepwise increasing load, the vertical deformation of the soil sample, the compressibility of the soil.