DOI: 10.15593/2224-9826/2015.2.09

УДК 624.13

Л.Ю. Колегова, В.Г. Офрихтер

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

МЕТОД УСКОРЕНИЯ СРОКОВ КОМПРЕССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ

В настоящее время проводятся различные виды компрессионных испытаний, в зависимости от вида решаемой инженерной задачи. Распространенные в нашей стране испытания осуществляются по стандартному методу, описанному в ГОСТ 12248, который имеет ряд недостатков. Компрессионные испытания грунтов относятся к наиболее продолжительным видам лабораторных испытаний. Учеными предложен ускоренный метод компрессионных испытаний – метод релаксации напряжений. Высокая продолжительность опытов по методике, рекомендованной ГОСТ 12248, обусловлена необходимостью проведения длительно протекающих процессов фильтрационной консолидации под действием статической нагрузки, что в методе релаксации напряжения не требуется. Метод релаксации грунта не описан в государственных стандартах, но представлен в патенте А.Н. Труфанова «Метод релаксации напряжений Труфанова» или «Способ лабораторного определения деформационных характеристик грунтов» (действующий патент № 2272101), и положен в основу сотрудниками ООО «Новосибирского инженерного центра» при разработке прибора – автоматического компрессионного релаксметра АКР-2. Рассмотрены основные отличия данных компрессионных испытаний, определены достоинства и недостатки методов компрессионных лабораторных испытания грунтов. Приведены сравнения результатов испытаний грунтов методом компрессионного сжатия по ГОСТ 12248 и методом релаксации напряжения.

Ключевые слова: компрессионное сжатие, релаксация, стабилизация напряжений, метод релаксации напряжений, компрессионная кривая, результаты испытаний.

L.Iu. Kolegova, V.G. Ofrikhter

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

METHOD OF IMPROVING THE SPEED OF COMPRESSION TESTS OF SOILS

Now various types of compression perform tests, depending on the type of engineering task solved. The most common tests in our country are carried out according to the standard method described in GOST 12248, which has a number of drawbacks. Compression testing of soils belong to the longest species of laboratory tests. Also scientists have proposed an accelerated method of compression test – a method of stress relaxation. Long duration tests according to the procedure recommended by State Standard 12248, due to the need for long-running processes of filtration consolidation under static load that in the method of stress relaxation is required. Relaxation method is

not described in the ground state standards, but it is presented in the patent A.N. Trufanova "method of stress relaxation Trufanova" or "Process laboratory determination of deformation characteristics of soils" (valid patent № 2272101), and on the basis of its development staff of "Novosibirsk Engineering center" developed a device – an automatic compression relaxometer AKR-2. The article presents the main differences between the data of compression test, the advantages and disadvantages of methods of laboratory testing of soils. The results of laboratory tests of soils on the methods of compression compression according to State Standard 12248–2010 and by the method of stress relaxation.

Keywords: confined compression, relaxation, voltage regulation, method stress relaxation, compression curve, test data.

В современном строительстве одним из главных лабораторных испытаний грунтов являются компрессионные испытания.

В настоящее время проводятся различные виды компрессионных испытаний, в зависимости от типа решаемой инженерной задачи. В монографии Г.Г. Болдырева (2008 г.) приведены основные типы компрессионных приборов, методы испытаний грунтов в этих приборах и их особенности (табл. 1) [1].

Таблица 1

Типы компрессионных приборов

Тип компрессионного прибора	Методы испытаний	Особенности
Прибор со статическим нагружением	ГОСТ 12248 ASTM D2435	Измерение вертикальной деформации и нормального давления
Прибор с постоянной скоростью деформации (Метод CRS был предложен Smith and Wahls) [2]	ASTM D4186	Изменение порового давления
Прибор с изменением релаксации напряжений (А.Н. Труфанов, патент № 2272101)	Релаксация напряжений	Изменение скорости волны сдвига
Автоматический компрессионный релаксометр АКР2 (Методика ООО «НИЦ»)		Создание обратного давления Изменение давления набухания
Приборы с измерением боковых напряжений (приборы Лазебника, Brooker and Ireland [3], Dyvik et al., конструкция МИСИ и др.)	–	Дополнительно к предыдущему – измерение боковых напряжений
Компрессионно-фильтрационные приборы	ГОСТ 12248	Измерение проницаемости грунтов

Наиболее распространенным методом компрессионных испытаний грунтов является испытание образца грунта при нагружении ступенями, с выдерживанием до стабилизации вертикальной деформации. Стандартное испытание грунта методом компрессионного сжатия проводят по ГОСТ 12248.

Компрессионные испытания по классическому методу длятся значительное количество времени, в зависимости от программы испытаний – от нескольких дней до недель, иногда и месяцев. Поэтому возникает необходимость сократить время испытаний [4].

Учеными предложен ускоренный метод компрессионных испытаний – метод релаксации напряжений.

Рассмотрим подробнее распространенные в нашей стране испытания по стандартному методу, описанному в ГОСТе, и сравним с методом релаксации напряжений в грунте.

1. Классическое компрессионное испытание

При стандартном компрессионном испытании на образец грунта подается заданная нагрузка с помощью подвижного штампа в одометре, в образце грунта под воздействием внешней нагрузки возникают напряжения. В компрессионном приборе давление подается на образец постоянно, до тех пор пока не будет достигнута условная стабилизация образца (приращение относительной деформации $\xi \leq 0,01$ в течение заданного временного интервала, в зависимости от типа грунта) [4].

При испытании по стандартной методике ГОСТ 12248–2010 использовался измерительно-вычислительный комплекс АСИС-1 (рис. 1).

Рис. 1. Измерительно-вычислительный комплекс АСИС-1

Устройство АСИС-1 обеспечивает испытание немерзлого грунта методом компрессионного сжатия для определения следующих характеристик деформируемости: коэффициента сжимаемости, модуля деформации, структурной прочности на сжатие, коэффициента фильтрационной консолидации, давления набухания прямым и косвенным методами.

Измерительно-вычислительный комплекс оснащен тензометрическим датчиком силы для измерения вертикальной нагрузки и датчиком линейных перемещений для измерения вертикальной деформации. Вертикальная нагрузка на образец грунта подается ступенями при помощи сжатого воздуха.

2. Методы релаксации напряжения

Явления релаксации и стабилизации напряжений в грунтах приводят в своих работах многие ученые, такие как К. Терцаги [5], Н.А. Цытович [6], Г.Г. Болдырев и др. Теория релаксации была разработана Максвеллом и изложена в его известной книге «О динамической теории газов» (1868) [7].

Термин релаксации происходит от латинского *relaxation*, что означает «ослабление». Под релаксацией понимают процесс постепенного перехода при длительном действии нагрузки упругой деформации в пластическую (необратимую остаточную). Подобное явление означает понижение с течением времени в деформированном материале предела упругости, т.е. его расслабление [8].

Явление релаксации напряжений объясняется на примере реологических моделей упруго-вязкой жидкости Максвелла, модель Ньютона для идеальной вязкой жидкости, реологическая модель Бингама – Шведова для упруго-вязкопластичной среды и модели Маслова применительно к глинистым грунтам [9].

Релаксация является следствием перераспределения упругой и пластической деформаций. Суммарная деформация упруговязкого тела складывается из упругой (ϵ) и вязкой, остаточной (p) частей:

$$\gamma_i = \gamma_i^e + \gamma_i^p. \quad (1)$$

Поскольку деформация γ_i^p возрастает во времени, для соблюдения условий $\gamma_{i(0)} = \text{const}$ должно уменьшаться γ_i^e ; учитывая, что $\gamma_i^e = \tau_i / G$, указанное условие принимает вид

$$\gamma_{i(0)} = \tau_i / G + \gamma_i^p. \quad (2)$$

Отсюда следует, что постоянство деформаций $\gamma_{i(0)} = \text{const}$ обеспечивается за счет уменьшения во времени напряжения $\tau_i = \tau_i(t)$.

Испытания на релаксацию заключаются в задании образцу некоторой начальной деформации $\gamma_{i(0)}$, которой соответствует начальное напряжение $\tau_{i(0)}$ [10].

При испытании по методу релаксации напряжения образцу задается некоторая начальная деформация, которой соответствует начальное напряжение. Затем, когда эта деформация сохраняется постоянной, измеряют изменяющееся во времени напряжение [4].

К образцу грунта с начальным напряжением σ_0 прикладывается нагрузка, образец деформируется и в нем возникает определенное напряжение σ_1 . Напряжение измеряется датчиками, и при уменьшении до некоторого начального значения σ_2 происходит релаксация напряжения в грунте (рис. 2) [4].

Рис. 2. Релаксация напряжений в грунте: σ_0 – начальное напряжение; σ_1 – напряжение, возникающее при приложении нагрузки P ; σ_2 – значение напряжения в грунте после релаксации напряжения

Испытания грунтов по методу релаксации напряжения описаны в следующих источниках:

1. Патент А.Н. Труфанова «Метод релаксации напряжений Труфанова» или «Способ лабораторного определения деформационных характеристик грунтов» (действующий патент № 2272101). По данному методу прикладывается нагрузка для придания образцу определенной деформации, затем фиксируют изменение значений напряжений и вертикальной деформации, рассчитывается скорость изменения напряжения. Завершением этапа релаксации является снижение скорости изменения напряжений до определенного значения.

2. Разработка ООО «Новосибирский инженерный центр» – автоматический компрессионный релаксометр АКР-2. В приборе АКР-2 на образец грунта прикладывается нагрузка, задаваемая в программе испытаний. После каждой ступени в грунте напряжения релаксируются до некоторого значения и прикладывается следующая нагрузка

Испытания по методу релаксации напряжений проводились на автоматическом компрессионном релаксометре АКР2 (рис. 3).

Рис. 3. Автоматический компрессионный релаксометр АКР2

Назначение прибора АКР2:

- исследование механических характеристик грунтов;
- определение параметров компрессионного сжатия структурно-устойчивых и посадочных грунтов, в том числе на ветви разгрузки;

- определение давления набухания грунтов при их замачивании в случае нулевых деформаций;
- исследование сжимаемости и коэффициента оттаивания мерзлых грунтов;
- предварительное уплотнение грунтов перед сдвигом.

3. Проведение испытаний

Для проведения испытаний был отобран песчаный грунт однородного сложения. Определены плотность грунта и плотность твердых частиц грунта пикнометрическим методом по расчетам ГОСТ 5180–84. Характеристики грунта следующие:

Наименование грунта	лабораторный песок
Плотность грунта	1,57 т/м ³
Плотность твердых частиц грунта	2,66 т/м ³
Влажность	8 %

Перед изготовлением каждого образца для испытания грунт был высушен в сушильной камере до воздушно-сухого состояния, и путем добавления воды грунту придавалась определенная влажность – 8 %. Расчетное количество воды определялось по ГОСТ 30416–96.

Одометры приборов АСИС-1 и АКР2 взвешивались, на перфорированные поршни помещались бумажные фильтры и на них укладывался и уплотнялся грунт. Для изготовления двух образцов-близнецов грунт брался из одной пробы с заданной влажностью. Из грунта изготавливались два стандартных образца-близнеца грунта диаметром 87,4 и высотой 25 мм. Размеры образцов соответствуют требованиям ГОСТ 12248–2010. Затем одометры с грунтом повторно взвешивались и определялся вес образца грунта до испытания.

Образцы параллельно загружались на приборы, в которых задавалась одинаковая программа нагружения ступенями давления P – 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 и 0,4 МПа.

После проведения испытания грунт с одометром повторно взвешивается, для определения влажности грунта.

4. Обработка результатов

По результатам испытания определяются следующие характеристики деформируемости грунтов³:

³ При расчете характеристик использовались формулы согласно ГОСТ 12248–2010 «Грунты. Методы лабораторного определения прочности и деформируемости».

1. Коэффициент сжимаемости m_o , МПа^{-1} , на каждой ступени нагрузки от p_i до p_{i+1} вычисляют с точностью $0,001 \text{ МПа}^{-1}$ по формуле

$$m_o = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i}, \quad (3)$$

где e_i и e_{i+1} – коэффициенты пористости, соответствующие давлениям p_i и p_{i+1} .

2. Одометрический модуль деформации E_{oed} :

$$E_{oed} = \frac{\Delta p}{\Delta \varepsilon}. \quad (4)$$

3. Компрессионный модуль деформации по данным компрессионных испытаний E_k , МПа :

$$E_k = E_{oed} \cdot \beta, \quad (5)$$

где β – коэффициент, учитывающий отсутствие поперечного расширения грунта в компрессионном приборе, который допускается принять равным: 0,8 – для песков; 0,7 – для супесей; 0,6 – для суглинков и 0,4 – для глин.

5. Результаты лабораторных испытаний

По результатам лабораторных испытаний определялись деформации образцов-близнецов. Далее высчитывалась относительная деформация. Определялись характеристики деформируемости грунтов – коэффициент сжимаемости, одометрический и компрессионный модуль деформации. Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Определение деформационных характеристик грунта.

Испытание на нагрузку № 1

Давление P , МПа	Коэффициент пористости e		Относительная вертикальная деформация образца ε		Коэффициент сжимаемости m_o , МПа^{-1}		Одометрический модуль деформации E_{oed} , МПа		Компрессионный модуль деформации E_k , МПа	
	АСИС-1	АКР2	АСИС-1	АКР2	АСИС-1	АКР2	АСИС-1	АКР2	АСИС-1	АКР2
0,1	0,689807	0,688479	0,000114	0,0009	0,01545	0,01352	10,935	12,50	8,748	10
0,3	0,686717	0,685775	0,001943	0,0025						

Зависимость между давлением, приложенным ступенями, и относительной деформацией изображено в виде компрессионной кривой на рис. 4–6.

Рис. 4. Компрессионная кривая. Испытание на нагрузку № 1

Рис. 5. Компрессионная кривая. Испытание на нагрузку № 2

Рис. 6. Компрессионная кривая. Испытание на нагрузку № 3

Проведены три испытания на нагрузку и разгрузку образцов-близнецов. Результаты компрессионных испытаний в режиме нагрузки-разгрузки представлены на рис. 7–9.

Рис. 7. Компрессионная кривая. Испытание на нагрузку и разгрузку № 1

Рис. 8. Компрессионная кривая. Испытание на нагрузку и разгрузку № 2

Рис. 9. Компрессионная кривая. Испытание на нагрузку и разгрузку № 3

Выводы

Стабилизация напряжения в образцах песчаных грунтов при стандартном компрессионном испытании на приборе АСИС-1 каждой степени нагружения равнялась 4 ч, соответственно продолжительность одного компрессионного испытания достигала порядка 28 ч.

Стабилизация напряжения в образцах при испытании на приборе АКР2 по методу релаксации напряжения каждой ступени нагружения равнялась 60 с для песков. Но для загрузки нагружения на образец и

выдержки ступени требовалось еще некоторое время. В итоге аналогичные лабораторные испытания песка на релаксометре длились в среднем 21–22 мин.

При испытании в режиме нагрузки-разгрузки песчаных образцов лабораторные испытания на приборе АСИС-1 заняли 67 ч, на релаксометре АКР2 – 37 мин 25 с.

По результатам компрессионных испытаний установлено, что продолжительность испытаний при нагрузке на образец грунта на релаксометре АКР2 в среднем в 80 раз короче времени проведения испытаний по стандартной методике ГОСТ на измерительно-вычислительном комплексе АСИС-1. Испытания при нагрузке и разгрузке сократились более чем в 100 раз.

Метод релаксации напряжений рекомендуется использовать в практике изыскательских организаций страны. Это позволит значительно сократить сроки проведения инженерно-геологических изысканий и существенно повысить их конкурентоспособность.

Библиографический список

1. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса: моногр. – Пенза: Изд-во ПГУАС, 2008. – 696 с.
2. Smith R.E., Wahls H.E. Consolidation Under Constant Rates of Strain // Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE. – 1969. – Vol. 95, no. SM2. – P. 519–539.
3. Brooker E.N., Ireland H.O. Earth Pressure at Rest Related to Stress History // Canadian Geotechnical Journal. – 1965. – Vol. 2, no. 1. – P. 1–15.
4. Колегова Л.Ю., Офрихтер В.Г. Методы сокращения сроков компрессионных испытаний грунтов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2015. – № 1. – С. 37–50.
5. Terzaghi K. Theoretical soil mechanics. – New York: John Wiley & Sons, 1943. – 510 p.
6. Цытович Н.А. Механика грунтов: учебник для строит. вузов. – Л.: Гос. изд-во строит. лит-ры, 1940. – 389 с.
7. Maxwell J.C. The Scientific Papers. Cambridge: University Press, 1890. Vol. 2. – 850 p.
8. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.

9. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними): учеб. пособие для вузов. – М.: Стройиздат, 1977. – 320 с.

10. Гольштейн М. Н. Механические свойства грунтов. – М.: Изд-во лит. по строительству, 1971. – 368 с.

References

1. Boldyrev G.G. Metody opredeleniia mekhanicheskikh svoistv gruntov. Sostoianie voprosa [Methods for the determination of mechanical properties of soils. The state of the question]. Penza: Penzenskii gosudarstvennyi universitet arkhitektury i stroitel'stva, 2008. 696 p.

2. Smith R.E., Wahls H.E. Consolidation Under Constant Rates of Strain. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 1969, vol. 95, no. SM2, pp. 519-539.

3. Brooker E.N., Ireland H.O. Earth Pressure at Rest Related to Stress History. *Canadian Geotechnical Journal*, 1965, vol. 2, no. 1, pp. 1-15.

4. Kolegova L.Iu., Ofrikhter V.G. Metody sokrashcheniia srokov kompressionnikh ispytanii gruntov [Method of reducing the time compression testing of soils]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2015, no. 1, pp. 37-50.

5. Terzaghi K. Theoretical soil mechanics. New York: John Wiley & Sons, 1943. 510 p.

6. Tsytoovich N.A. Mekhanika gruntov [Soil mechanics]. Leningrad: Gosudarstvennoe izdatel'stvo stroitel'noi literatury, 1940. 389 p.

7. Maxwell J.C. The Scientific Papers. Cambridge, University Press, 1890. Vol. 2. 850 p.

8. Vialov C.C. Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov [Rheological fundamentals of soil mechanics]. Moscow: Vysshaia shkola, 1978. 447 p.

9. Maslov N.N. Mekhanika gruntov v praktike stroitel'stva (opolzni i bor'ba s nimi) [Soil mechanics in construction practice (landslides and their control)]. Moscow: Stroiizdat, 1977. 320 p.

10. Golshtein M.N. Mekhanicheskie svoistva gruntov [Mechanical properties of soils]. Moscow: Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, 1971. 368 p.

Получено 13.04.2015

Об авторах

Колегова Лиана Юрьевна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры строительного производства и геотехники Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: lia-kolegova@yandex.ru).

Офрихтер Вадим Григорьевич (Пермь, Россия) – доцент кафедры строительного производства и геотехники Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ofrikhter@mail.ru).

About the authors

Liana Iu. Kolegova (Perm, Russian Federation) – Master student, Department of Building Production and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: lia-kolegova@yandex.ru).

Vadim G. Ofrikhter (Perm, Russian Federation) – Associate Professor, Department of Building Production and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ofrikhter@mail.ru).