

*АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОМПРЕССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ***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*

Проведен анализ известных методов компрессионных испытаний грунтов. Отмечено, что в настоящее время компрессионные испытания грунтов производятся главным образом методом ступенчато возрастающей нагрузки (методом СВН), принятым в нашей и во многих зарубежных странах за стандартный. Метод СВН прост в реализации, но имеет ряд существенных недостатков, основным из которых является несоответствие режимов испытаний режимам нагружения грунтов оснований при строительстве, снижающее достоверность и точность определения показателей сжимаемости грунтов и увеличивающее длительность их испытаний. Из известных методов компрессионных испытаний наибольшее соответствие режимам нагружения грунтов оснований при строительстве обеспечивает метод постоянно возрастающей нагрузки (метод ПВН), который повышает достоверность и точность определения показателей сжимаемости грунтов и сокращает длительность их испытаний.

Ключевые слова: компрессионные испытания, возрастающая нагрузка, сжимаемость, консолидация, показатели сжимаемости грунтов.

Компрессионные испытания грунтов представляют собой испытания их на сжимаемость равномерно распределённой по торцевой поверхности цилиндрического образца сжимающей нагрузкой в условиях невозможности бокового расширения. Получаемые при компрессионных испытаниях показатели сжимаемости грунтов (коэффициент относительной сжимаемости m_v , модуль компрессионной деформации E_k , структурная прочность P_c и коэффициент консолидации C_v имеют исключительную важность при проектно-изыскательских работах, т.к. используются в расчётах оснований зданий и сооружений. При исследовании сжимаемости грунтов определяют их относительную сжимаемость ε , во-первых, как функцию увеличивающейся нагрузки P (компрессионные испытания), и, во-вторых» как функцию времени t действия постоянной нагрузки (консолидационные испытания).

В процессе компрессионного сжатия грунтов фиксируется конечная величина их относительной деформации ε , отражающая новое состояние равновесия, вызванное действием приложенной сжимающей нагрузки P и не зависящее от хода деформирования грунтов.

Результаты компрессионных испытаний представляют в виде графика зависимости относительной деформации от увеличивающейся нагрузки $\varepsilon(P)$, называемой компрессионной кривой.

Каждая точка компрессионной кривой соответствует состоянию грунта, при котором поровое давление в образце равно нулю ($u = 0$) и вся нагрузка передаётся на скелет грунта, т.е. нагрузка является эффективной ($P = P^l$).

1. СТАНДАРТНЫЙ МЕТОД КОМПРЕССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ

Компрессионные испытания были применены для исследования сжимаемости грунтов в 1910 г. Фронтаром [1] и заключались в приложении через штамп на образец грунта ступенчато возрастающей нагрузки (метод СВН) с выдержкой каждой ступени до стабилизации осадки штампа (консолидации грунта). В дальнейшем метод СВН был применен К. Терцаги и используется в настоящее время как стандартный при подавляющем большинстве компрессионных испытаний в нашей стране [2] и за рубежом. В частности, в практике американских изыскателей он закреплен стандартом ASTM Test For One Dimensional Consolidation Properties of Soil (D2435).

При испытании грунтов методом СВН ступени нагрузки задаются так, чтобы каждое последующее значение нагрузки было в два раза больше, чем предыдущее [2].

Приложение нагрузки отдельными ступенями с выдержкой каждой до стабилизации осадки грунта придаёт методу СВН определённую и позволяет сравнивать между собой результаты испытаний одного грунта при разных начальных условиях и разных грунтов при одинаковых начальных условиях. Метод СВН позволяет сравнительно просто получать характеристики

сжимаемости и консолидации грунтов, т.к. процессы сжатия и консолидации под приложенной нагрузкой технологически разделимы между собой.

Несмотря на простоту реализации и широкое распространение, метод СВН имеет ряд существенных недостатков:

- приложение ступеней нагрузки производится практически мгновенно, а сами ступени слишком велики (от 12,5 до 100 кПа). Резкое приложение ступеней нагрузки вызывает необратимые изменения природной структуры грунтов, сказывающиеся на показатели их сжимаемости: сжимаемость грунтов с поврежденной структурой увеличивается [3]. Большие по величине ступени нагрузки увеличивают уплотнение грунтов [4];

- каждая ступень нагрузки выдерживается до стабилизации осадки грунтов, т.е. до его полной консолидации [2], что существенно увеличивает длительность испытаний и, кроме того, не соответствует условиям нагружения грунтов основаниях при строительстве, при котором нагрузка увеличивается практически постоянно [5]. В действительности скорость увеличения нагрузки на подошве фундамента не контролируется. В связи с этим возможны случаи, когда в ходе строительства грунта основания полностью не консолидируются и осадка грунтов происходит некоторое время после окончания передачи проектной нагрузки на основание [5, 6]. Поэтому при проектировании основания должен быть решен вопрос о том, какую часть осадки сооружение получит в процессе возведения, а какую – после окончания строительства. Метод СВН не даёт ответа на этот вопрос;

- точность расчёта коэффициента относительной сжимаемости и модуля компрессионной деформации ограничена невозможностью оценить случайную погрешность измерений в единичном испытании конкретного образца грунта, т.к. стандартные ступени нагрузки большие по величине, а их число мало. Случайную погрешность здесь можно оценить лишь по результатам испытаний достаточно большого числа образцов одного и того же грунта из исследуемого инженерно-геологического элемента [7], что практически не всегда возможно и требует значительных дополнительных затрат;

- позволяет получать значение структурной прочности грунтов [1, 2], соответствующее окончанию разрушения их структурных связей, которое определяется весьма приблизительно.

Действительно, в реальных условиях при строительстве нагружение грунтов оснований зданий и сооружений осуществляется сравнительно мелкими ступенями нагрузки без выдержки до консолидации грунтов и фактически может рассматриваться как постоянно возрастающее во времени, отмечают С.В. Россихин и А.Г. Битайнис [5]. В основаниях строящихся зданий и сооружений процессы сжатия и консолидации грунтов неразделимы, не всегда есть условия для завершения стабилизации осадки грунтов при постоянной нагрузке, поэтому не всегда есть возможность правильно прогнозировать изменение осадки основания в процессе его нагружения. Метод СВН позволяет определять стабилизированную осадку или развитие осадки при постоянной нагрузке. Применение этой схемы к плавно нагружаемому основанию не всегда даёт достоверные результаты. Следовательно, стандартный метод СВН недостаточно моделирует условия работы грунтов в основаниях строящихся зданий и сооружений, что в определённой степени сказывается на получаемых результатах.

Несоответствие условий лабораторных испытаний грунтов методом СВН условиям их работы в основаниях строящихся зданий и сооружений отмечал также и Д. Тейлор [8], который считал, что при лабораторных компрессионных испытаниях нагрузку следует увеличивать постоянно, так как при строительстве она никогда не прикладывается ступенями.

С.В. Crawford [9] отмечает, что скорость нагружения основания в процессе строительства меньше в сравнении с лабораторными условиями, что делает стандартный метод СВН менее надёжным.

С.Р. Месчаном [10] показано, что деформации глинистых грунтов и соответствующие им модули деформации зависят от величины и временных интервалов приложения ступеней сгрузки. М.Ю. Абелевым [11] установлено, что в зависимости от величины ступеней нагрузки значения модуля

деформации могут отличаться более чем в 4 раза. С.В. Crawford [9] наблюдал изменение величины структурной прочности до 2 раз одних и тех же грунтов, при различных интервалах времени приложения ступеней нагрузки.

М.Н. Гольдштейн [1] отмечает, что разрушение структурных связей в грунтах при увеличении внешней нагрузки происходит не сразу и не одновременно, так как их прочность не одинакова. При этом разрушение одних связей вызывает увеличение напряжений в других за счёт перераспределения внешней нагрузки. Поэтому разрушение структурных связей происходит в некотором интервале внешней нагрузки. Установить этот интервал методом СВН невозможно.

Длительность испытаний грунтов методом СВН значительно увеличивается при испытании мягкопластичных глин, для которых на достижение стабилизации осадки на каждой ступени нагрузки требуется до нескольких суток, а на весь опыт – до нескольких недель. Увеличение числа ступени нагрузки также значительно увеличивает длительность испытаний.

С целью сокращения длительности испытаний исследователями разработаны соответствующие способы, заключающиеся в окончании испытания на действующей ступени нагрузки до стабилизации осадки грунта в момент, начиная с которого стабилизированная осадка грунта может быть определена каким-либо путём.

Известные способы сокращения длительности определения стабилизированной осадки грунтов при постоянной нагрузке не нашли широкого применения, так как основаны на некоторых допущениях, оказывающих влияние на конечные результаты.

Так, способ В.М. Веселовского [12] предполагает, что: длительность осадки грунта не зависит от величины нагрузки; через определённый промежуток времени осадка грунтов достигает 85-95 % от её конечной величины время уплотнения пропорционально высоте сжимаемого слоя. Очевидно, что указанные допущения не всегда отвечают действительности и это сильно сужает возможности способа. А так как при любом объёме

испытаний невозможно заранее обосновать эти допущения, то способ применим лишь в случаях большого числа испытаний одного и того же грунта.

Способ S_y и способ ДИИТа [1] экстраполяции экспериментальных данных построены на предположении, что кривые консолидации описываются вполне определёнными аналитическими выражениями, которые выведены при некоторых весьма жестких допущениях. Кроме того, способ S_y предусматривает перевод полученных результатов к обычным кривым компрессии с предположением, что 24-м часам действия ступени нагрузки соответствует 150 % теоретической фильтрационной консолидации, что может относиться лишь к узкой (по показателям сжимаемости) группе грунтов.

Существенным недостатком описанных способов сокращения длительности испытаний является то, что они не учитывают свойств испытываемых грунтов.

Более свободным от ограничений является способ сокращения длительности определения стабилизированной осадки грунтов, разработанный в ПНИИСе [13], основанный на экстраполяции кривых консолидации по трём экспериментальным точкам, полученным после завершения фильтрационной консолидации на этапе вторичной консолидации. Однако и он имеет предположения, заключающиеся в следующем: осадка грунтов лучше аппроксимируется экспонентой; наиболее пригодными для аппроксимации являются точки наблюдения при длительности 5-10 % от времени стабилизации осадки. Получение трёх экспериментальных точек в указанный интервал времени ограничивает применение способа для различных грунтов, а определение момента окончания фильтрационной консолидации во время испытаний требует дополнительных трудозатрат.

Анализ известных способов сокращения длительности определения стабилизированной осадки грунтов показал, что они предусматривают задание параметров сокращения длительности испытаний до начала опыта без учёта физических свойств грунтов. Такой подход ограничивает применение известных способов сокращения длительности определения стабилизированной

осадки грунтов. Наиболее универсальными могут быть способы, обеспечивающие наилучшую экстраполяцию экспериментальных данных для любого грунта во время испытания. Суть такого подхода заключается в поиске момента испытаний, начиная с которого стабилизированная осадка может быть определена по аппроксимирующей функции, выведенной по экспериментальным данным в ходе испытания конкретного грунта или заданной заранее, обеспечивающей наилучшее приближение к экспериментальным данным. Главным при таком подходе является отсутствие предположений о свойствах грунтов.

Наличие перечисленных недостатков метода СВН побудило исследователей к разработке более совершенных альтернативных методов компрессионных испытаний грунтов.

2. АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МЕТОДЫ КОМПРЕССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ

Кроме метода СВН известны следующие методы компрессионных испытаний грунтов:

- метод постоянной скорости деформации (ПСД);
- метод контролируемого градиента (КГ);
- метод постоянной скорости нагружения (ПСН) или постоянно возрастающей нагрузки (ПВН);
- метод непрерывного нагружения (НН);
- фильтрационный метод (Ф);
- метод релаксации (Р).

Метод ПСД заключается в принудительном деформировании (сжатии) испытываемого грунта с заданной скоростью и одновременным измерением нагрузки на грунт. Опыты с постоянной скоростью деформирования впервые провел С.В. Crowford [9]. Метод изучен теоретически и экспериментально [14, 15] и стандартизирован за рубежом ATSM (D4186).

Известны четыре подхода к интерпретации результатов испытаний грунтов методом ПСД [16, 17], отличающихся между собой характером

построения математической модели, в основу которой заложена теория конечной деформации. Все эти подходы не лишены недостатков, заложенных в основных допущениях при построении моделей. Так, в модели R.E. Smith, H.E. Wahls [14] функция $e(t)$ принимается линейной, в моделях A.E. Wissa et al [17] и Y. Umeschara, K. Zen [16] компрессионный модуль деформации E_k принимается постоянным. Кроме того, во всех подходах интерпретации результатов испытаний грунтов методом ПСД принимается постоянным и коэффициент консолидации C_v .

Метод КГ заключается в поддержании в грунте при нагружении постоянного градиента давления поровой жидкости. Опыты по испытанию грунтов методом КГ производили J. Lowe et al [18].

Путём решения уравнения фильтрационной консолидации

$$-C_v \cdot (d^2u/dx^2) = dP/dt \quad (1)$$

для граничных условий

$$du/dx = 0; x = 0; \quad (2)$$

$$u = u_1; x = 0; \quad (3)$$

$$u = 0; x = H \quad (4)$$

получают параболическое распределение порового давления в образце

$$u = u_1 \cdot [1 - (x^2/H^2)]. \quad (5)$$

Подставляя уравнение (5) в (1), вычисляют коэффициент консолидации

$$C_v = (dP/dt) \cdot (H^2/2u_1). \quad (6)$$

Ограничения по методу вносят предположения, что грунт является линейно деформируемым материалом. Метод КГ позволяет получать зависимость $P^l(e)$ путём вычисления деформации и соответствующей средней эффективной нагрузки в любой момент испытаний. Результаты испытаний грунтов, полученные методом КГ, вполне надёжны, если в процессе их нагружения возникает небольшой градиент порового давления, что позволяет считать пористость испытываемых грунтов постоянной.

Однако сложность аппаратуры для реализации метода КГ, которая позволяла бы при нагружении грунтов поддерживать постоянный градиент

давления поровой жидкости, ограничивает его применение при производстве изыскательских работ, кроме того, метод предназначен для испытания только водонасыщенных грунтов.

Метод ПВН заключается в приложении на испытываемый грунт постоянно возрастающей нагрузки. Впервые метод ПВН применили Н. Aboshi et al [19], более полно исследовали N. Janbu et al [20], К.Ф. Fay, С.Е. Cotton [21] и в последствии обосновал R.L. Schiffman [22].

Принимая постоянными коэффициенты фильтрации и консолидации, получают основное уравнение для метода ПВН

$$du/dt = C_V \cdot (d^2u/dx^2) + (dP/dt). \quad (7)$$

Для постоянной скорости нагружения $dP/dt = \text{const}$, а граничные условия соответствуют

$$u = 0; x = 0; \quad (8)$$

$$du/dx = 0; x = H; \quad (9)$$

$$u = 0; t = 0. \quad (10)$$

В результате решения уравнения (7) получают соотношение u/P^1 , в котором P^1 соответствует фактору времени $T = C_V \cdot t/H^2$.

Для определения средней эффективной нагрузки P^1 на грунт во время испытания оценивают соотношение величины фактора времени T и степени консолидации грунта U . Таким образом, для любого фактора времени устанавливается степень консолидации и средняя эффективная нагрузка.

Показатели сжимаемости грунтов, полученные методом ПВН, вполне надёжны, если их пористость в процессе нагружения меняется мало, что ограничивает величину скорости нагружения.

Метод НН по существу является модификацией методов ПСД и ПВН и заключается в создании такого режима нагружения испытываемого грунта, который обеспечивает поддержание отношения избытка порового давления и величины прикладываемой нагрузки λ на постоянном уровне [20]

$$\lambda = du_B/dP = \text{const}. \quad (11)$$

Основное уравнение для метода НН имеет вид

$$C_V \cdot (d^2u/dx^2) = (du/dt) - (dP/dt), \quad (12)$$

а граничные условия выражены следующими уравнениями

$$u = 0; x = 0; \quad (13)$$

$$u = u_B; x = H; \quad (14)$$

$$du/dx = 0; x = H. \quad (15)$$

В результате решения уравнения (12) и некоторых математических преобразований получают коэффициенты относительной сжимаемости m_V , консолидации C_V и фильтрации k_ϕ как функции деформации образца, его высоты и замеренных величин u_B и P [20].

Основным недостатком метода НН является неудобство его осуществления из-за сложности оборудования, необходимого для поддержания условия постоянства отношения du_B/dP . Помимо собственно величин деформации, перового давления и прикладываемой нагрузки для определения показателей сжимаемости грунта следует определять их производные по времени, что делает интерпретацию данных громоздкой. Остаётся и ограничение по скорости нагружения (аналогично методу ПВН) для поддержания условия постоянства пористости испытываемого грунта.

Фильтрационный метод (Ф) заключается в изменении эффективной нагрузки в испытываемом образце грунта фильтрационным давлением, что имитирует процесс консолидации [23].

Для получения соотношений эффективная нагрузка-пористость ($P^l - e$) и пористость-проницаемость ($e - k_\phi$), необходимо определить распределение пористости в образце. Это более удобно реализовать не после окончания испытания, а в процессе фильтрации, применяя, например, рентгеновские или какие-либо другие установки, что достаточно сложно и применимо лишь в исследовательских целях.

Метод релаксации (Р), предложенный К. Terzaghi [24], выполняется после того, как грунт приведён в неустойчивое состояние. Это является исходным действием для релаксационных испытаний. Неустойчивое состояние может быть достигнуто либо путём нагружения грунта за короткий период времени,

либо при его деформировании с большой скоростью до определённой величины относительной деформации, или каким либо другим образом (фильтрацией, циклическим нагружением). Соответствующая величина относительной деформации фиксируется и является неизменной в течение всего релаксационного испытания. При этом часть образца разуплотняется, часть консолидируется, что нарушает условия монотонного нагружения. Кроме того, для данного метода не определены начальные граничные условия, не выяснено реальное соотношение времени релаксации нагрузки и возможность её фиксации. Теоретически при мгновенном прекращении деформирования грунта после приложения нагрузки давление в нем должно мгновенно падать до нуля.

Таким образом, все рассмотренные методы компрессионных испытаний грунтов основаны на теории конечных или бесконечно малых деформаций (табл. 1), не лишены определённых недостатков и сложны в реализации.

Так, метод ПСД основан на режиме принудительного деформирования, что приводит, в какой-то мере, к перенапряжению структурных свойств грунта. Видимо, поэтому метод ПСД даёт большую сжимаемость, чем метод ПВН, для того же грунта [15], особенно, при большой скорости деформации и большой доле порового давления.

Значительные сложности возникают при обеспечении скорости нагружения методами КГ и НН, задаваемой из соотношения:

для метода КГ

$$du/dt = 0, \text{ т.е. } u = \text{const}, \quad (16)$$

для метода НН

$$\lambda = (du/dt)/(dP/dt) = du/dP = \text{const}. \quad (17)$$

Сложнее этот вопрос стоит в методах ПСД и ПСН. Связывая предельно допустимое значение скорости нагружения с поровым давлением, исследователи принимают разные критерии: R.E. Smith, H.E. Wahls [14] предлагают поддерживать поровое давление на уровне 50 % от внешней нагрузки, A.E. Wissa et al [17] – 2-5 % K.F. Fay, C.E. Cotton [21] – 3-34 %, но допускают, что приемлемый результат может дать и значение 50 %. По

сообщению Semdbakkon испытания многих глин в Норвежском Геотехническом институте проводились со скоростью деформации 2×10^{-6} 1/с, что было достаточно для поддержания порового давления в диапазоне 2-7 % от нагрузки.

Таблица 1. Признаки известных методов компрессионных испытаний грунтов

Авторы метода	Применяемая теория	Форма представления показателей сжимаемости		
		Принятое соотношение $\varepsilon - P$	Компрессионный модуль деформации $E_k(P)$	Коэффициент консолидации $C_v(P)$
Метод ступенчато возрастающей нагрузки (СВН)				
Terzaghi	Конечных деформаций	Кусочно-линейное	Кусочно-постоянный	Кусочно-постоянный
Метод постоянной скорости деформации (ПСД)				
Crawford, Smith, Wahls	Бесконечно малой деформации	Нелинейное	Непрерывный	Непрерывный
Wissa et al Umehara, Zen	Конечных деформаций	Кусочно-линейное	Кусочно-постоянный	Кусочно-постоянный
Метод контролируемого градиента (КГ)				
Lowe et al	Бесконечно малой деформации	Линейное	Непрерывный	Непрерывный
Метод постоянной скорости нагружения (ПСН, ПВН)				
Aboshi et al	Бесконечно малой деформации	Нелинейное	Непрерывный	Непрерывный
Метод непрерывного нагружения (НН)				
Janbu et al	Бесконечно малой деформации	Нелинейное	Непрерывный	Непрерывный

Авторы метода	Применяемая теория	Форма представления показателей сжимаемости		
		Принятое соотношение $\varepsilon - P$	Компрессионный модуль деформации $E_k(P)$	Коэффициент консолидации $C_v(P)$
Фильтрационный метод (Ф)				
Jmai	Неконсолидационная	Нелинейное	Кусочно-постоянный	–
Метод релаксации (Р)				
Terzaghi	Конечных деформаций	Кусочно-линейное	Кусочно-постоянный	Кусочно-постоянный

Согласно стандарту ASTM (D4186) на метод ПСД скорость деформирования испытываемого грунта задаётся по верхнему пределу пластичности (пределу текучести грунта) при значениях порового давления $u = (0,03-0,20)P$.

D.W. Armour, V.P. Drnevich [25] предложили вычислительный метод определения скорости деформирования грунтов, основанный на функциональной связи проницаемости грунтов, показателя консистенции и максимального отношения u/P . Для его применения необходимо измерять проницаемость грунтов в начале испытания и затем через произвольные интервалы времени, скорости деформирования грунтов, определённые вычислительным методом, отличались от скоростей по стандарту ASTM (D4186).

Ограничения скорости деформирования грунтов многие исследователи связывают прежде всего с ограничением величины или роста порового давления, полагая, что оно должно успевать рассеиваться. В противном случае, результаты определения сжимаемости грунтов будут искажены.

Все рассмотренные методы компрессионных испытаний грунтов предусматривают измерение порового давления u в грунтах, возникающего в процессе их нагружения. Величина u , её изменение либо соотношение с

действующей или эффективной нагрузкой фигурирует в формулах математической модели и, несомненно, является одной из наиболее важных характеристик процесса сжатия грунта, т.к. позволяет оценивать напряженное состояние и степень консолидации грунта. Однако, до настоящего времени у исследователей нет единого мнения о критерии выбора скорости нагружения грунтов, основанного на контролировании порового давления, не установлена зависимость скорости нагружения от физических свойств грунтов, которая позволила бы задавать скорости нагружения различных грунтов до начала их испытаний. Кроме того, определение порового давления значительно усложняет технологию и аппаратуру для испытания грунтов, что ограничивает применение рассматриваемых методов компрессионных испытаний грунтов в массовом производстве. Следует также отметить, что интерпретация результатов испытаний грунтов, полученных с помощью рассмотренных методов, связана с определёнными допущениями, которые вносят погрешности в величины показателей сжимаемости грунтов.

Из приведённого анализа известных методов компрессионных испытаний следует, что наибольшее соответствие режимам нагружения грунтов оснований при строительстве обеспечивает метод ПВН, у которого определяющим параметром является нагрузка, точнее скорость её увеличения, а сжимаемость грунтов обусловлена только их свойствами. Метод ПВН более выгоден экономически, т.к. сокращает длительность испытаний грунтов [21] и повышает точность определения величины структурной прочности [20].

При изучении метода ПВН К.Ф. Fay, С.Е. Cotton [21] установили зависимость скорости нагружения грунтов от их влажности на границе текучести (рис. 1).

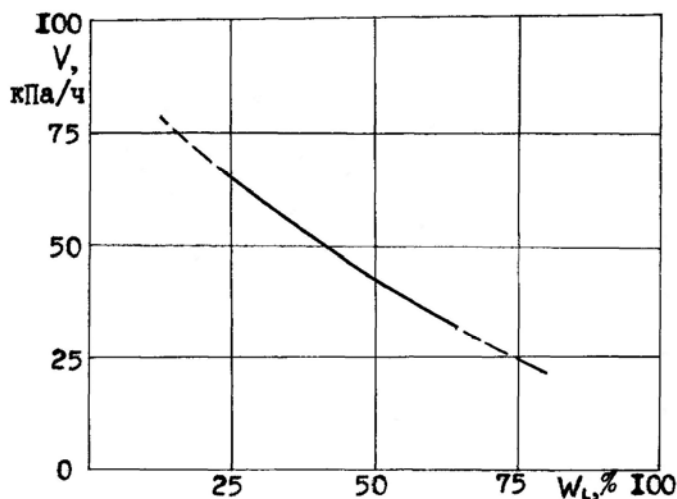


Рис. 1. Зависимость скорости нагружения грунта от его влажности на границе текучести (К.Ф. Фай, С.Е. Коттон)

N. Janbu et al [20] вывели формулу, связывающую коэффициент консолидации грунтов при нагружении со скоростью приложения ПВН и поровым давлением, а также выделили на графике $E_k(P)$ интервал нагрузки, в котором происходит разрушение структуры грунтов (рис. 2). Точку окончания резкого снижения и начала увеличения значений E_k на этом графике они принимают за окончание разрушения структуры, проходящего в некотором интервале внешней нагрузки, начинающемся с резкого снижения значений E_k после некоторого их увеличения в начале графика.

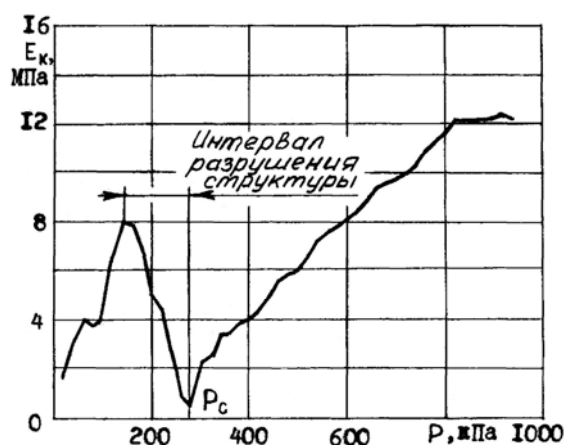


Рис. 2. График $E_k(P)$, полученный при испытании грунта методом ПВН (N. Janbu et al)

R. Larsson, G. Sällfors [15] установили, что при малых значениях отношения $u/P \sim 0,1$ метод ПВН даёт компрессионные кривые, близкие с методом ПСД, и совпадающие, в целом, результаты определения структурной прочности грунтов. Особенно хорошо совпадают первые значения (начала разрушения структуры), вторые – хуже. Причём метод ПСД даёт меньшие значения, чем метод ПВН, что связано, по-видимому, с более быстрым разрушением структуры при принудительном деформировании грунтов методом ПСД.

Хорошую сходимость компрессионных модулей деформации грунтов, полученных методами ПВН и ПСД, установил N. Janbu et al [20] при отношении скорости увеличения порового давления к скорости увеличения нагрузки λ от 0 до 0,5.

При сравнительных испытаниях грунтов методами ПВН и ПСД другими исследователями получены несколько отличающиеся результаты [21, 26]. Однако, по мнению авторов исследований, различия результатов находятся в допустимых пределах, особенно при небольших скоростях нагружения.

Исследованиями [21, 20, 26] выявлена основная закономерность, заключающаяся в том, что, чем выше скорость нагружения, тем больше отличаются результаты испытаний грунтов различными методами.

При сжатии грунтов постоянно возрастающей нагрузкой фильтрационная составляющая процесса консолидации присутствует на протяжении всего периода нагружения. Доля этой составляющей зависит от физических свойств грунтов и от скорости нагружения: чем больше скорость приложения ПВН, тем меньше доля фильтрационной составляющей. Влияние скорости нагружения на сжимаемость грунтов наблюдали К. Терцаги и Р. Пек [27], которые установили, что, чем больше скорость нагружения грунтов, тем меньше их осадка при нагружении.

ВЫВОДЫ

1. Компрессионные испытания грунтов в настоящее время производятся главным образом методом ступенчато возрастающей нагрузки (методом СВН), принятым в нашей и во многих зарубежных странах за стандартный.

Метод СВН прост в реализации, но имеет ряд существенных недостатков, основным из которых является несоответствие режимов испытаний режимам нагружения грунтов оснований при строительстве, снижающее достоверность и точность определения показателей сжимаемости грунтов и увеличивающее длительность их испытаний.

2. Известные способы сокращения длительности определения стабилизированной осадки грунтов при постоянной нагрузке имеют ограниченное применение, так как предусматривают задание параметров сокращения длительности испытаний до начала опыта без учёта физических свойств грунтов. Наиболее эффективными могут быть способы, основанные на использовании фактических данных испытаний конкретного грунта в ходе опыта.

3. Известные в настоящее время методы компрессионных испытаний грунтов, альтернативные методу СВН, не нашли широкого практического применения, так как основаны на непрерывно изменяющихся параметрах и предусматривает измерение порового давления в грунтах в течение испытания.

4. Из известных методов компрессионных испытаний наибольшее соответствие режимам нагружения грунтов оснований при строительстве обеспечивает метод постоянно возрастающей нагрузки (метод ПВН), который повышает достоверность и точность определения показателей сжимаемости грунтов и сокращает длительность их испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гольдштейн М.Н.** Механические свойства грунтов (Напряженно-деформативные и прочностные характеристики). – М., Стройиздат, 1979. – 304 с.

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

3. **Чеботарев Г.П.** Механика грунтов, основания и земляные сооружения. – М., Стройиздат, 1968. – 616 с.

4. **Денисов Н.Я.** Природа прочности и деформации грунтов. – М., Изд-во литературы по строительству, 1972. – 279 с.

5. **Россихин Ю.В., Битайнис А.Г.** Осадки строящихся сооружений. – Рига, Зинатне, 1980. – 339 с.

6. **Швец В.Б., Капустин В.К., Бадек Е.А.** и др. Осадки сооружений АЭС // Основания и фундаменты. – Киев, Будивельник, 1987, вып 20. – С. 96-99.

7. **Дмитриев В.В.** Оптимизация лабораторных инженерно-геологических исследований. – М., Недра, 1989. – 184 с.

8. **Тейлор Д.** Основы механики грунтов. – М., Госстройиздат, 1960. – 298 с.

9. **Crawford C.B.** Interpretation of the Consolidation Test // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. – September, 1964, V. 90, N SM5. – P. 87-102.

10. **Месчян С.Р.** Экспериментальная реология глинистых грунтов. – М., Недра, 1985. – 344 с.

11. **Абелев М.Ю.** Слабые водонасыщенные грунты как основания сооружений. – М., Стройиздат, 1973. – 288 с.

12. **Веселовский В.М.** Осадки сооружений во времени. – М.-Л. Стройиздат, 1940. – 80 с.

13. **Аветикян Ю.А., Снежкин Б.А.** Сокращение длительности лабораторных определений сжимаемости грунтов путем экстраполяции кривых консолидации // Технология и техника полевых испытаний грунтов (труды ПНИИИСа). – М., 1986. – С. 25-33.

14. **Smith R.E., Wahls H.E.** Consolidation Under Constant Rates of Strain // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ACE. – March, 1969, V. 95, N SM2. – P. 519-539.

15. **Larsson R., Salfors G.** Automatic continuous consolidation testing in Sweden // Consolidation of Soils: Testing and Evaluation (Symposium, Ft. Lauderdale, Florida, 24 January, 1985). – Philadelphia, Pa, 1986. – P. 299-328.

16. **Umechchara Y., Zen K.** Constant Rate of Strain Consolidation for Very Soft Clayey Soils // Soils and Foundations. – June 1980, V. 20, N 2. – P. 79-95.

17. **Wissa A.E.Z., Christian I.T., Davis E.N., Hetlger S.** Analysis of Consolidation at Constant Strain Rate // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. – October 1971, V. 97, N SM 10. – P. 1393-1413.

18. **Lowe J., Jonas E., Obrccian V.** Controlled Gradient Consolidation Test // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Proceedings of the American Society of civil Engineers. – 1969, V. 95, N SM1. – P. 77-97.

19. **Aboshi H., Joshikumi H., Maruyama S.** Constant loading rate consolidation test // Soils and Foundations. – 1970, V. 10, N 1. – P. 43-56.

20. **Janbu N., Tokheim O., Senneset K.** Consolidation test with continuous loading // Tenth International Conference (Stockholm, 15-19 June, 1981). – Rotterdam, 1981, V. 1. – P. 645-654.

21. **Fay K.F, Cotton C.E.** Constant-rate-of loading (CRL) consolidation test // Consolidation of Soils: Testing and Evaluation (Symposium, Ft. Lauderdale, Florida, 24 January, 1985). – Philadelphia, Pa, 1986. – P. 236-256.

22. **Schiffman R.L.** Finite and Infinitesimal strain Consolation // Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. – February, 1980, V. 106, N QT2.

23. **Imai G.** Development of a New Consolidation Test Procedure Using Seepage Force // Soils and Foundations. – September, 1979, V. 19, N 3. – P. 45-60.

24. **Terzaghi K.** Die Berechnung der Durchlassig-Keittisziffer des Tones aus dem verlauf der Hydrodynamischen Spannungser-scheidungen // Akademie der Wissenschaften in Wien, Sitzungsberichte, Mathematisch-naturwissenschaft. – 1923, V. 132, N 314. – P. 125-138.

25. **Armour D.W., Drnevich V.P.** Improved techniques for the constant-rate-strain consolidation test // Consolidation of Soils: Testing and Evaluation (Symposium, Ft. Lauderdale, Florida, 24 January, 1985). – Philadelphia, Pa, 1986. – P. 170-183.

26. **Leroueil S., Kabbaj M.** General discussion on consolidation theory and testing // Consolidation of Soils: Testing and Evaluation (Symposium, Ft. Lauderdale, Florida, 24 January, 1985). – Philadelphia, Pa, 1986. – P. 719-723.

27. **Терцаги К. и Пек Р.** Механика грунтов в инженерной практике. – М., Госстройиздат, 1958. – 607 с.

REFERENCES

1. **Goldstein M.N.** Mechanical properties of soils (voltage-deformability and strength characteristics). – М., Stroyizdat, 1979. – 304 p.

2. GOST 12248-2010 Soils. Laboratory methods for determining the characteristics of strength and deformability.

3. **Chebotarev G.P.** Soil mechanics, foundation and earthworks. – М., Stroyizdat, 1968. – 616 p.

4. **Denisov N.Y.** Nature of strength and deformation of soils. – М., Publishing House of the literature on the construction, 1972. – 279 p.

5. **Rossikhin Y.V., Bitaynis A.G.** Precipitation built structures. – Riga, Zinatne, 1980. – 339 p.

6. **Shvets V.B. Kapustin V.K., Badek E.A.** et al. Precipitation structures NPP // Foundations. – Kiev, Budivelnik, 1987, No. 20. – P. 96-99.

7. **Dmitriev V.V.** Optimization of laboratory geotechnical studies. – М., Nedra, 1989. – 184 p.

8. **Taylor D.** Fundamentals of soil mechanics. – М., Gosstroizdat, 1960. – 298 p.

9. **Crawford C.B.** Interpretation of the Consolidation Test // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. – September, 1964, V. 90, N SM5. – P. 87-102.

10. **Meschyantsev S.R.** Experimental rheology of clay soils. – М., Nedra, 1985. – 344 p.

11. **Abelev M.Y.** Weak saturated soil as base structures. – М., Stroyizdat, 1973. – 288 p.

12. **Veselovskii V.M.** Precipitation structures in time. – М.-Л. Stroyizdat, 1940.

– 80 p.

13. **Avetikyan Y.A., Snezhkin B.A.** Shorter laboratory determinations of the compressibility of soil consolidation by extrapolating the curves // Technology and engineering field tests of soils (works PNIIS). – M., 1986. – P. 25-33.

14. **Smith R.E., Wahls H.E.** Consolidation Under Constant Rates of Strain // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ACE. – March, 1969, V. 95, N SM2. – P. 519-539.

15. **Larsson R., Salfors G.** Automatic continuous consolidation testing in Sweden // Consolidation of Soils: Testing and Evaluation (Symposium, Ft. Lauderdale, Florida, 24 January, 1985). – Philadelphia, Pa, 1986. – P. 299-328.

16. **Umechchara Y., Zen K.** Constant Rate of Strain Consolidation for Very Soft Clayey Soils // Soils and Foundations. – June 1980, V. 20, N 2. – P. 79-95.

17. **Wissa A.E.Z., Christian I.T., Davis E.N., Hetlerg S.** Analysis of Consolidation at Constant Strain Rate // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. – October 1971, V. 97, N SM 10. – P. 1393-1413.

18. **Lowe J., Jonas E., Obrccian V.** Controlled Gradient Consolidation Test // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Proceedings of the American Society of civil Engineers. – 1969, V. 95, N SM1. – P. 77-97.

19. **Aboshi H., Joshikumi H., Maruyama S.** Constant loading rate consolidation test // Soils and Foundations. – 1970, V. 10, N 1. – P. 43-56.

20. **Janbu N., Tokheim O., Senneset K.** Consolidation test with continuous loading // Tenth International Conference (Stockholm, 15-19 June, 1981). – Rotterdam, 1981, V. 1. – P. 645-654.

21. **Fay K.F, Cotton C.E.** Constant-rate-of loading (CRL) consolidation test // Consolidation of Soils: Testing and Evaluation (Symposium, Ft. Lauderdale, Florida, 24 January, 1985). – Philadelphia, Pa, 1986. – P. 236-256.

22. **Schiffman R.L.** Finite and Infinitesimal strain Consolation // Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. – February, 1980, V. 106, N QT2.

23. **Imai G.** Development of a New Consolidation Test Procedure Using Seepage Force // Soils and Foundations. – September, 1979, V. 19, N 3. – P. 45-60.

24. **Terzaghi K.** Die Berechnung der Durchlassig-Keittisziffer des Tones aus dem verlauf der Hydrodynamischen Spannungser-scheidungen // Akademie der Wissenschaften in Wien, Sitzungsberichte, Mathematisch-naturwissenschaft. – 1923, V. 132, N 314. – P. 125-138.

25. **Armour D.W., Drnevich V.P.** Improved techniques for the constant-rate-strain consolidation test // Consolidation of Soils: Testing and Evaluation (Symposium, Ft. Lauderdale, Florida, 24 January, 1985). – Philadelphia, Pa, 1986. – P. 170-183.

26. **Leroueil S., Kabbaj M.** General discussion on consolidation theory and testing // Consolidation of Soils: Testing and Evaluation (Symposium, Ft. Lauderdale, Florida, 24 January, 1985). – Philadelphia, Pa, 1986. – P. 719-723.

27. **Terzaghi K. and Peck R.** Soil mechanics in engineering practice. – M., Gosstroizdat, 1958. – 607 p.

ANALYSIS METHODS OF COMPRESSION TESTS OF SOILS

V.V. DENISENKO¹, P.A. LYASHENKO²

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

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

The analysis of the known methods of compression tests of soils. It is noted that at the present time compression test soils are mainly produced by stepwise increasing load (by SBH) adopted in our country and in many foreign countries for a standard. SRI method is simple to implement, but it has some significant drawbacks, the main of which is the mismatch mode test mode of loading foundation soils during construction, reduces the reliability and accuracy of the performance of the compressibility of soil and increases the duration of the test. Of the known methods of compression tests most appropriate mode of loading foundation soils during construction provides a method of continuously increasing load (method DID), which increases the reliability and accuracy of the indicators of the compressibility of soil and reduces the duration of their trials.

Key words: Tags: compression test, increasing the load, compressibility, consolidation, indicators of soil compressibility.