

НАЧАЛЬНАЯ ОСАДКА СИЛЬНО СЖИМАЕМЫХ ГРУНТОВ

Степень осадки сильно сжимаемых грунтов зависит от величины уплотняющей нагрузки и плотности скелета из твердых частиц. Длительность осадки связана с водопроницаемостью и размерами сжимаемой области. В связи с этим полная осадка может завершаться достаточно быстро (зернистые грунты) или же протекать годами (высокодисперсные водонасыщенные). В процессах уплотнения сильно сжимаемых грунтов различают два основных вида осадки [1]: условно мгновенную или начальную, а также длительную или консолидационную. Консолидационную осадку подразделяют на две стадии: первичную (фильтрационную) и вторичную (ползучести). Тогда полную осадку можно представить суммой величин (рис.1):

$$s = s_n + s_k = s_n + s_{k1} + s_{k2} \quad (1)$$

Консолидационная осадка достаточно хорошо исследована. Описана ее природа, даются рекомендации для определения ее численных значений и сроков. Известно, что у зернистых дренированных грунтов осадка невелика (скелет жесткий) и завершается быстро, у высокодисперсных зависит от расстояния между мельчайшими твердыми частицами и взаимодействия между ними. Если такой грунт хорошо дренирован, то первичная осадка протекает сравнительно быстро, а вторичная продолжается с затухающей интенсивностью. В случае слабой водопроницаемости грунтов обе фазы консолидации могут растягиваться на длительные сроки.

Начальная осадка в отличие от консолидационной протекает при переменной, т.е. все возрастающей нагрузке. Она начинается сразу же, как только нагрузка коснется грунта, и заканчивается в момент полного приложения нагрузки. У твердых тел — это равновесный процесс, в течение которого завершается деформация. У грунтов, особенно у высокодисперсных с малой водопроницаемостью, этот процесс считают неравновесным, т.е. неустановившимся. В связи с тем, что часть давления от нагрузки воспринимается поровой водой, реакция скелета грунта отстает от роста нагрузки. Только в процессе первичной консолидации это отставание постепенно восполняется.

Для решения задачи по определению величины начальных осадок в зернистых грунтах используются два подхода [2]: при-

менение методов теории упругости или использование полуэмпирических методов, основанных на наблюдениях, свидетельствующих о возрастании сопротивляемости грунтов деформированию с повышением ограничивающего (бокового) давления по боковой поверхности образцов. Оба подхода, несмотря на различия, основаны на линейной зависимости осадки от нагрузки и снижении осадки при повышении модуля деформации грунта. В свою очередь модуль неразрывно связан с показателем сжимаемости (компрессии). Это означает, что начальная осадка всегда больше у грунтов с высокими показателями сжимаемости.

Приведем результаты экспериментального определения начальной осадки в некоторых сильно сжимаемых грунтах. Для опытов брались грунты с различной сжимаемостью и водопроницаемостью. Основные характеристики их даны в табл.1.

Испытания образцов проводили в компрессионно-фильтрационных приборах с замерами порового давления, что позволило получить для этих грунтов численные значения коэффициентов сжимаемости, фильтрации и начального порового давления в долях от полной нагрузки на образец (табл.1). Поскольку образцы, вырезанные из одного морфолита грунта, несколько отличались друг от друга, для них получены не совсем одинаковые значения характеристик. Это видно из определенных интервалов величин. Нулевые значения нижней границы интервалов порового давления у торфа и ила получены для образцов под

Таблица 1

Грунт	Влажность, %	Коэффициент пористости	Коэффициент сжимаемости	Коэффициент фильтрации, см/с	Начальное поровое давление P_w/p	Максимальная начальная осадка	
						A_0	A_p
Сапропель тонкодетритовый	880—1090	13,1—15,7	2,6—3,2	(1,3—5,2) $\times 10^{-6}$	0,85—0,95	0,10	0,87
Торф гипсовый R=25%	650—800	11,4—13,9	2,3—3,0	(5,2—17,2) $\times 10^{-4}$	0—0,4	0,72	0,82
Ил элювиальный	140—160	3,38—3,87	0,5—0,6	(1,8—7,2) $\times 10^{-5}$	0—0,4	0,27	0,49

малыми уплотняющими нагрузками. При этом грунты сжимались незначительно, водопроницаемость оставалась достаточно высокой, отжимаемая из образцов вода успевала быстро фильтроваться. Под большими нагрузками образцы заметно уплотнялись, отжатие воды затруднялось и к моменту окончания загрузки развивалось начальное поровое давление, которое затем постепенно снижалось в процессе фильтрационной консолидации.

Численные значения начальной осадки определяли в опытах по показаниям мессур к моменту завершения нагружения. Они отличались по величине не только у разных грунтов и под различными нагрузками, но зависели также от принятой схемы приложения нагрузок на образец — большими или малыми ступенями. Самые большие начальные осадки наблюдались, когда припотовленный к опыту образец естественной структуры нагружали сразу (непосредственно) заданной нагрузкой. В таких случаях грунт имел наименьшую плотность и испытывал минимальные (уравновешенные атмосферным) внутренние давления.

Если нагрузки той же величины добавляли к уже ранее нагруженному (меньшей нагрузкой) образцу, то дополнительная начальная осадка зависела от нового состояния плотности образца и от общей величины давления в нем к моменту догрузки. Начальные осадки почти не отмечались приборами, если дополнительные нагрузки были меньше общих ранее примененных нагрузок. В связи с неоднородностью исследуемых грунтов и большой изменчивостью их свойств под нагрузкой строгий количественный учет начальной осадки при частичных догрузках требует дальнейших исследований.

Проанализируем результаты измерения начальной осадки для двух вариантов нагружения. В первом нагрузку заданной величины прикладывали к свободному образцу, во втором применили ступенчатое догружение. Величину догрузки принимали примерно равной суммарной величине нагрузок предшествующих ступеней. За начальную осадку при втором варианте нагружения принимали суммарную осадку образца к моменту завершения догружения, т.е. с учетом осадки на предыдущих ступенях нагружения.

Процессы осадки для обоих вариантов показаны (рис. 1) на примере опытов с образцами сапропеля. Сплошные кривые (3 и 5) начинаются почти вместе, так как получены после испытаний двух одинаковых образцов различными нагрузками. Начальная осадка у каждого зависела только от величины приложенной

нагрузки. Штриховыми кривыми представлены результаты испытаний одного образца по варианту догружения. Каждая кривая начинается в новом месте, т.е. не ранее, чем заканчивается кривая осадки предшествующей ступени. Начальная осадка каждой ступени здесь дополнительно зависит от величины и длительности действия предшествующей нагрузки.

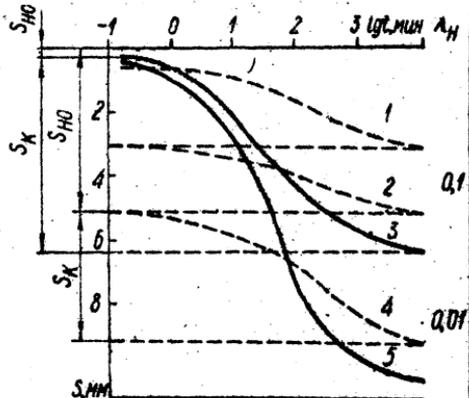


Рис. 1. Осадка образцов сапропеля с последовательным и разовым нагружением:

1— $p = 0,1$; 2, 3 — $0,21$;
4, 5 — $0,5 \text{ кг/см}^2$.

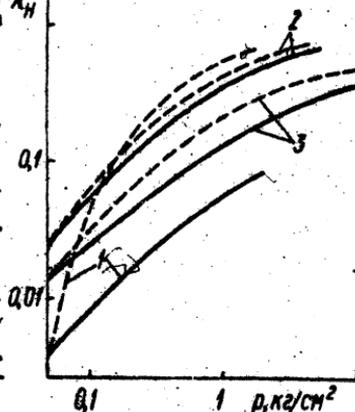


Рис. 2. Зависимость относительной начальной осадки от нагрузки: 1—сапропель, 2—торф, 3—ил; сплошные линии—непосредственное приложение нагрузки; штриховые — ступенчатое.

Численные значения замеренной относительной начальной осадки приведены на рис.2. Сплошные линии аппроксимируют результаты опытов с образцами сапропеля, торфа, ила при непосредственном загрузении образцов естественного состояния различными по величине нагрузками (от $0,05$ до 10 кг/см^2). Штриховые линии характеризуют начальную осадку образцов по второму варианту нагружения. Следует отметить, что штриховые линии разместились в соответствии с их степенью сжимаемости, поскольку включают консолидационные осадки предшествующих ступеней, сплошные — в соответствии с их значениями водопроницаемости. Штриховая линия 1 пересекла все линии и оказалась выше других, поскольку коэффициент пористости образцов сапропеля был выше других грунтов.

Это свидетельствует о том, что коэффициент сжимаемости грунтов характеризует консолидированную осадку. Вводить его

в расчеты начальной осадки для случая непосредственного нагружения можно только при очень высокой водопроницаемости грунтов, когда консолидационная осадка незначительна. Линии 2 (рис. 2) оказались рядом, поскольку образцы торфа малых размеров и относительно высокой водопроницаемости способны были быстро отвести отжимаемую воду, и начальная осадка была во много раз выше консолидационной. Независимо от вариантов нагружения начальная осадка у торфа отличалась мало.

У образцов ила, несмотря на самую низкую сжимаемость, значения начальной осадки в двух вариантах опытов (кривые 3) оказались различными. В связи с малой водопроницаемостью грунта консолидационная осадка была ощутимой. Отмеченные факты свидетельствуют о том, что для грунтов с малой водопроницаемостью наиболее рациональным способом безопасного достижения равновесного состояния является второй вариант нагружения. В этом случае отжатие поровой воды происходит в основном на первых ступенях нагружения при сравнительно малых нагрузках, когда длительное неравновесное состояние не столь опасно для прочности и устойчивости грунтов.

Для аппроксимации опытных численных значений начальной осадки наиболее подходящим оказалось уравнение вида

$$\lambda_n = A \frac{p}{p_0 + p} \quad (2)$$

где $\lambda_n = \frac{s}{s_n} \lambda$ — относительная осадка; p_0 — начальное давление в грунте; A — параметр, численно равный относительной начальной осадке при бесконечно большой нагрузке на образец.

После преобразований уравнение (2) можно представить в виде прямой

$$p = A \frac{p}{\lambda_n} - p_0 \quad (3)$$

По результатам опытов построены прямые вида (3) для каждого исследуемого грунта и обоих вариантов нагружения. По ним получены численные значения параметров A и p_0 . Начальное давление p_0 , как видно из рис. 3, можно принять равным 1 кг/см^2 для всех образцов и для всех исследуемых грунтов. Численные значения параметра A , полученные в опытах, приведены в табл. 1 (для первого варианта нагружения — A_0 и для второго — A_p).

На рис. 3 показаны зависимости (3), построенные по результатам испытаний образцов из торфа. Поскольку в этих опытах начальная деформация в обоих вариантах отличалась незначительно, масштаб графиков оказался одинаковым. Опытные точки прямой 1 почти не имеют разброса, так как найдены после испытаний одного образца. Опытные точки линии 2 получены по результатам испытаний серии образцов одного грунта. В связи с тем, что свойства оказались не совсем одинаковыми, точки имеют некоторый разброс.

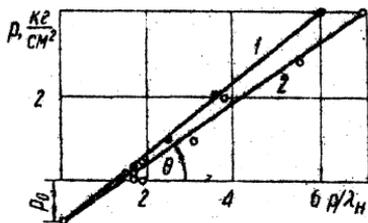


Рис. 3. Графическое определение параметров формулы (2).

Анализ результатов экспериментов позволил установить, что аналитическое определение величины начальной осадки методами теории упругости возможно для грунтов с жестким скелетом и большой водопроницаемостью. У сильно сжимаемых грунтов с малой водопроницаемостью к этим расчетам необходимы значительные поправки, вытекающие из результатов экспериментов. Достоверность таких расчетов будет более приемлемой, если в них использовать численные значения модуля начальной деформации, найденные по зависимости

$$E_n = \frac{p_0 + p}{A} \quad (4)$$

Величина A здесь является экспериментальной. Для испытанных грунтов можно пользоваться значениями из табл. 1.

Л и т е р а т у р а

1. Цитович Н.А. Механика грунтов. М., 1963.
2. Харр М.Е. Основы теоретической механики грунтов. Пер. с англ. М., 1971.