

В. Н. Заяц

УРАВНЕНИЕ КОМПРЕССИОННОЙ КРИВОЙ ДЛЯ БОЛОТНЫХ ГРУНТОВ

Практика гидромелиоративного строительства богата примерами возведения сооружений (особенно земляных) на слабых основаниях, сложенных различными болотными образованиями. Во всех случаях ввиду сильной сжимаемости болотных грунтов, имели место большие осадки сооружений. При этом грунты в основании уплотнились, несущая способность их значительно повышалась.

Способность слабых грунтов улучшать под нагрузкой свои несущие свойства позволяет использовать их в качестве оснований, даже при возведении сооружений с достаточно большими давлениями на основание. В таких случаях рекомендуется применять поэтапное строительство. На каждом этапе назначается безопасная для основания нагрузка и выдерживается до завершения консолидации уплотнения слабых грунтов. Нагрузка последующего этапа выбирается с учетом улучшения свойств основания в результате уплотнения грунтов под нагрузками предыдущих этапов.

Решение подобных и других задач возможно только при наличии у проектировщика характеристик строительных свойств грунтов основания. Одной из важнейших характеристик в этом случае является компрессионная зависимость. Для ее получения в лабораториях выполняются компрессионные испытания образцов каждой прослойки будущего основания. Это весьма кропотливые и для высокопористых грунтов очень длительные опыты. Снятие одной кривой продолжается не менее полугодом. Следует добавить, что полученная экспериментальная зависимость имеет ограниченное применение из-за невозможности совместного аналитического решения общей задачи. При использовании счетно-решающих устройств она совсем неприменима.

Перечисленные задачи решаются, если вместо экспериментальных зависимостей использовать аппроксимирующие их функции. Такие попытки за последние десятилетия делались неоднократно. Только для торфяных грунтов предлагались параболические, логарифмические, экспоненциальные и другие виды уравнений. Причем каждое из них находило свою область применения, ограниченную значениями нагрузки, видом грунта или другими факторами.

Территория Белоруссии изобилует различными по степени сжимаемости болотными образованиями органического и органо-минерального строения. Нами проведено большое количество компрессионных испытаний образцов, взятых на различных болотных массивах и с разных глубин. Значения коэффициентов пористости исследованных грунтов колебались от 0,7 до 36. Получены экспериментальные компрессионные

зависимости для образцов естественного и нарушенного состояния в условиях полного водонасыщения.

Анализ экспериментального материала позволяет отметить, что независимо от происхождения и состава грунта характер сжимаемости образцов под нагрузкой во всех случаях оставался одинаковым. Получена только различная степень сжимаемости в зависимости от начального состояния плотности грунта. Такая оценка работы грунтов под уплотняющими нагрузками позволяет выбрать для аппроксимации экспериментальных зависимостей один вид уравнения.

Тщательное сопоставление результатов эксперимента с ранее предлагаемыми уравнениями позволило отдать предпочтение логарифмической функции, имеющей вид [1]

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - a_k \ln \frac{p}{p_0}, \quad (1)$$

где ε — коэффициент пористости грунта, соответствующий нагрузке p , H/m^2 ; ε_0 — начальный коэффициент пористости; a_k — коэффициент полной компрессии; p_0 — нагрузка, соответствующая структурной прочности грунта.

Для функции (1) были найдены значения параметров a_k и p_0 в зависимости от начального коэффициента пористости, что позволило использовать ее в качестве уравнения для построения компрессионных кривых без проведения опытов. Полученная из нее расчетная формула осадки оснований под насыпями была рекомендована для практического применения [2]. Проверка формулы на материалах осадки дорожных насыпей на торфяных основаниях показала достаточную для практики пригодность.

Существенный недостаток функции (1) заключается в том, что она аппроксимирует экспериментальную компрессионную кривую только на определенном участке L (рис. 1, а). Этот участок, хотя и соответствует наиболее часто встречающимся в практике значениям нагрузок, в ряде случаев занимает только часть кривой. Начало и конец кривой уравнением не определяются. Начало экспериментальной кривой характеризуется более низкими значениями коэффициентов пористости, а конец — более высокими по сравнению с расчетными.

В работе [2] рекомендуется применять расчетные формулы, основанные на функции (1), при нагрузках не менее $2p_0$. В ряде случаев, особенно в заиленных грунтах с коэффициентом пористости, близким к

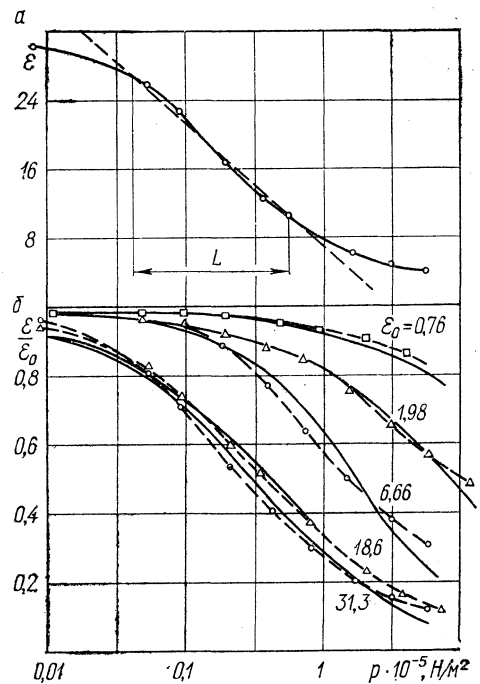


Рис. 1. Компрессионные зависимости в полулогарифмических координатах: L — участок логарифмической функции.

единице, p_0 достигает значений $(0,3-0,5) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$. Это соответствует давлению на основание в зависимости от веса земляной насыпи высотой 2 м. Если осадка такой насыпи на отмеченных грунтах окажется не столь опасной для нее, то этого нельзя сказать о других, более ответственных сооружениях. Кроме того, невозможность учета начального участка затрудняет аналитические расчеты осадки слоистых оснований, составление прогнозов поэтапной технологии и, что самое важное, сводит на нет применение счетно-решающих устройств.

Экспериментальные компрессионные зависимости представляют собой плавно убывающие кривые. Начальные участки кривых характеризуются более высокой интенсивностью убывания. Причем в тщательно выполненных экспериментах с очень малыми ступенями нагрузки можно отметить некоторое возрастание интенсивности на начальном участке кривой. Это означает, что экспериментальные кривые могут иметь точку перегиба. До этой точки кривая обращена выпуклостью вверх. Остальная (значительно большая) часть такой кривой имеет выпуклость вниз.

Этим требованиям отвечает математическая функция [3] вида

$$y = \frac{1}{ax^2 + bx + c}, \quad (2)$$

которая именуется кривой третьего порядка. Она симметрична относительно вертикальной прямой $x = -b/2a$ и имеет асимптотами ось x . Поведение функции зависит от знаков постоянной a и параметра $\Delta = 4ac - b^2$. Рассмотрим случай положительных a и Δ .

Поскольку экспериментальная компрессионная кривая является убывающей, то максимум функции должен находиться на оси ординат. Тогда абсцисса максимума $x = -b/2a = 0$. Из этого следует, что $b = 0$. Функция (2) приобретает более простой вид:

$$y = \frac{1}{ax^2 + c}. \quad (3)$$

Для функции (3) параметр $\Delta = 4ac$. Так как a и Δ приняты положительными, то и c — величина положительная. Ордината максимума функции $y_0 = 4a/\Delta = 1/c$. Отсюда $c = 1/y_0$. Функция (3) приводится к виду

$$y = \frac{y_0}{1 + ay_0x^2}. \quad (4)$$

Значение постоянной a находится из экспериментальных данных. Для этого функция (4) приводится к удобному для логарифмирования виду

$$Y = Ax^2, \quad (5)$$

где $Y = \frac{y_0}{y} - 1$; $A = ay_0$.

На рис. 2 приведены графики, построенные по опытным данным применительно к уравнению (5), которое в логарифмических координатах выражается прямой. Линии на графике можно считать прямыми. Только угол наклона прямых Θ оказался неодинаковым. Это означает,

Таблица 1

Вид грунта	Коэффициент пористости	Постоянные функции (6)	
		a	n
Торф верховой	28—36	0,089—0,104	0,62—0,85
Торф низинный	4—19	0,084—0,118	0,65—1,00
Заторфованные грунты	3,2—6,6	0,075—0,087	0,90—1,00
Зайленные грунты	0,7—2,0	0,073—0,136	0,57—0,95
Мергеля	3,8—5,1	0,074—0,097	0,92—1,12
Запрпель тонкодетритовый (органический)	9,8—18,6	0,085—0,130	0,64—0,90
известковый (зайленный)	4—4,2	0,048—0,095	0,88—1,15
известковый	8—10	0,20—0,21	0,57—0,65

что в функции (4) необходимо вместо постоянного ввести переменный показатель степени $n = \operatorname{tg} \theta$. Тогда уравнение компрессионной кривой в координатах p и ϵ можно представить в виде

$$\epsilon = \frac{\epsilon_0}{1 + a\epsilon_0 (10^{-5} p)^n} \quad (6)$$

После графоаналитической обработки опытных данных получены значения постоянной a и показателя степени n для большого числа эк-

спериментальных компрессионных кривых, характеризующих различные виды болотных грунтов (табл. 1). Результаты обработки позволили принять постоянную $a=0,1$ для всех болотных грунтов, находящихся в естественном состоянии. Исключение составили образцы известкового сапрпеля, у которого можно считать $a=0,2$. Этот грунт отличался от других тем, что представлял светлую (почти белую) студенистую массу с очень слабой водопроницаемостью. Под нагрузкой свободная вода отжималась с большим трудом, поэтому деформации образцов были меньшими, чем деформации других грунтов одинаковой плотности.

Наглядным доказательством оценки достоверности величины $a=0,1$ может служить график (рис. 3), где точками отмечены значения коэффициента пористости ϵ_1 , полученные из компрессионных испытаний образцов под уплотняющей нагрузкой $p=10^5 \text{ Н/м}^2$. Сплошная линия построена по уравнению

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_0}{1 + 0,1\epsilon_0} \quad (7)$$

полученному из уравнения (6) при $a=0,1$ и для случая $p=10^5 \text{ Н/м}^2$. Точки для упомянутых образцов известкового сапрпеля обособились.

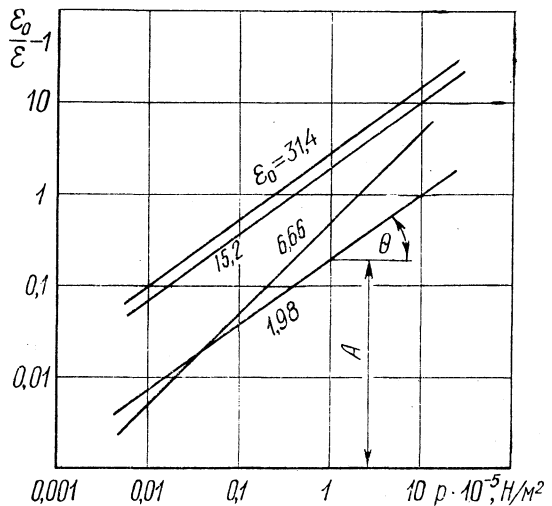


Рис. 2. Графическое определение постоянных аналитической функции.

Крестиками на этом графике показаны результаты графоаналитической обработки опытных данных, опубликованных А. Ф. Печуровым [4].

Значения показателей степени n для всех болотных грунтов укладываются в зону 0,5—1. Причем размеры этой зоны определяются для каждого вида грунта в естественном состоянии. Разброс значений n связан с какими-то случайными факторами. Была сделана попытка проследить влияние на величину n изменения влажности образца, нарушения естественной структуры. Оказалось, что не только для перемятого или подсушенного торфа, но даже для сухой торфяной крошки показатель степени n попадает в ту же зону. Зона значений постоянной n достаточно устойчива для всех болотных грунтов в различных их состояниях, а постоянная a при изменении состояния грунта в отличие от естественного залегания сильно изменяется.

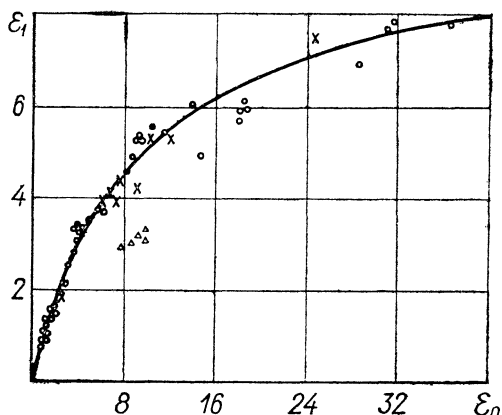


Рис. 3. Зависимость коэффициентов пористости болотных грунтов под нагрузкой $p=10^5 \text{ Н/м}^2$ от начальных.

Несмотря на достаточную устойчивость зоны показателей степени n , значения их для практического использования оказываются неопределенными, поскольку отклонения показателя степени, даже на небольшую величину, сильно влияют на результаты расчетов. В большей степени это заметно для грунтов с высокими показателями коэффициентов пористости, когда единица в знаменателе становится не столь существенной. В то же время, при нагрузках, близких к 10^5 Н/м^2 , отклонения в результатах расчетов снижаются.

Так, если принять нагрузку $p=10^4 \text{ Н/м}^2$, то для грунта с начальным коэффициентом пористости $\epsilon_0=30$ получим расчетные значения $\epsilon=15,3; 19,6$ и $23,0$ при показателях степени $n=0,5; 0,75$ и $1,0$ в уравнении (6). Как видно, отклонения от среднего значения могут достигать 20% и более. При нагрузках, достигающих $5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, отклонения расчетных значений от среднего для этого же грунта могут превысить 25%. Для обычных осушенных болот с низинным торфом, отличающимся от приведенного (нетипичного) грунта тем, что начальные коэффициенты пористости не превышают 10—12%, такие отклонения расчетных значений от среднего не выйдут за пределы 10—15%. В случае грунтов с более низкими значениями начального коэффициента пористости, а также при нагрузках, близких к 10^5 Н/м^2 , указанные отклонения значительно снизятся.

Предварительные расчеты на начальной стадии проектирования можно выполнять, используя осредненные значения показателя n . Можно также смещать значения к границам зоны, сообразуясь с требуемой степенью надежности расчетов. В случае необходимости уточнения предварительных расчетов желательно выполнить испытания образцов по сокращенной методике, ибо при известном законе изменения достаточно иметь три-четыре опытные точки, чтобы построить график в ко-

ординатах $\lg \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} - 1 \right)$ и $\lg p$ и получить необходимые частные значения a и n .

Построенные затем по этим параметрам компрессионные кривые достаточно хорошо описывают экспериментальные зависимости. На рис. 1, б приведено сопоставление аналитических кривых с экспериментальными точками для ряда грунтов с различными начальными коэффициентами пористости. Для удобства построения их на общем графике значения коэффициентов пористости взяты в долях по отношению к начальному.

Предлагаемая аналитическая функция описывает экспериментальные компрессионные зависимости на большом протяжении, включая и начальные участки. С осредненными табличными или уточненными в опытах значениями постоянных она может быть применима во всех видах расчетов, связанных с использованием экспериментальных кривых.

Применение в расчетах осадки оснований аналитической функции позволит ускорить вычислительную работу, так как дает возможность построить расчетные графики, номограммы или же составить алгоритмы для вычислительных машин. При использовании осредненных значений постоянных функций отпадает необходимость в проведении компрессионных испытаний.

Литература

1. Н. А. Цитович. Механика грунтов. М., 1963.
2. П. А. Дрозд, В. Н. Заяц. Расчет осадки насыпей на болотах. «Гидротехника и мелиорация», 1968, № 3.
3. И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. Справочник по математике. М., 1956.
4. А. Ф. Печкуров. Устойчивость русел рек и каналов. Минск, 1964.