

В.С. Морозов

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Морозов Владимир Станиславович родился в 1955 г., окончил в 1978 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор кафедры строительной механики и сопротивления материалов Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Имеет более 70 печатных работ в области строительства и эксплуатации зимних лесовозных дорог.
E-mail: v.morozov@agtu.ru



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЖИМАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОСНОВАНИИ ИЗ МЕРЗЛОГО ТОРФА

Рассмотрена методика расчета напряженно-деформированного состояния оснований из мерзлого торфа (или грунта) с учетом нелинейности его модуля деформации.

Ключевые слова: мерзлый торф, напряжения, прочность, модуль упругости.

Промышленное строительство в северных районах России зачастую ведется на заторфованных территориях. Поэтому для повышения несущей способности торфяных грунтов при устройстве временных дорог, складских площадок, оснований временных сооружений и т. п. используют естественное и искусственное промораживание болот. Это обуславливает необходимость исследования прочностных и деформационных свойств мерзлых торфяных грунтов и их работы под нагрузкой.

Для определения напряженного состояния массива мерзлого торфа можно использовать зависимость относительной деформации ε от напряжения σ [1]:

$$\varepsilon = \varepsilon(\sigma).$$

Учитывая, что модуль деформации

$$dE = d\sigma/d\varepsilon,$$

после соответствующих преобразований получаем

$$E = D(T, t)\sigma^k, \quad (1)$$

где $D(T, t) = mA^{1/m}$;

m – коэффициент упрочнения, характеризующий связь между σ и ε ;

A – коэффициент, характеризующий деформационные свойства грунта в зависимости от его температуры T и времени действия нагрузки t ;

$$k = \frac{m-1}{m}.$$

Уравнение (1) в общем виде выражает зависимость модуля деформации мерзлого торфа от действующих в грунтовом массиве напряжений σ , характера распределения температурного поля T и времени действия нагрузки t .

Деформации мерзлых грунтов и торфов можно определить, применяя положения общей теории упруго-пластичных деформаций [2], например метод конечных элементов, дающий решение нелинейной системы уравнений в численном виде. Однако в общем случае пространственной нелинейной задачи решение пока не доведено до практического применения ввиду сложности вычислений, поэтому наряду с точными методами расчета допустимо использовать и приближенные.

Ниже рассмотрен сравнительно простой приближенный метод определения напряженно-деформированного состояния основания из мерзлого торфа, сущность которого заключается в том, что нелинейная задача сводится к линейной. Для этого грунтовый массив в соответствии с эпюрой распределения напряжений $\sigma(z)$, полученной при решении линейной задачи (первое приближение), и видом зависимости $E(\sigma_z)$ разбивается на несколько слоев. Далее предполагается, что в каждом из них грунт обладает линейно-деформируемыми свойствами и модуль деформации определяется уровнем действующих в слое напряжений.

Расчет ведется по методу последовательных приближений.

В первом приближении однородный грунтовый массив рассматривается как однослойный.

При воздействии на него внешней равномерно-распределенной нагрузки интенсивностью p напряжения σ_z в массиве изменяются от p до 0. В этом диапазоне зависимость (1) аппроксимируем уравнением прямой $E = E_c = \text{const}$. Используя интегральный метод наименьших квадратов, получаем

$$E_c = \frac{D(T,t)}{k+1} p^k. \quad (2)$$

При $E = E_c = \text{const}$ грунтовый массив представляет собой линейно-деформируемое тело, для которого нетрудно определить зависимость распределения напряжений σ_z по оси, проходящей через центр основания (рис. 1).

Такое решение является еще слишком грубым. Для его уточнения необходимо выполнить второе и последующие приближения. С этой целью разобьем массив на несколько слоев произвольной толщины. Используя решение, полученное в первом приближении, находим значения σ_z на границе каждого слоя. Это позволяет определить расчетные модули деформации грунта для каждого слоя. Формула для вычисления E_c , полученная с помощью способа наименьших квадратов, имеет следующий вид:

$$E_c = \frac{D(T,t)}{k+1} \frac{\sigma_{i-1}^{k+1} - \sigma_i^{k+1}}{\sigma_{i-1} - \sigma_i}.$$

При условии, что температурное поле в массиве грунта является однородным ($T = \text{const}$), а деформации затухающими ($d\varepsilon/dt \approx 0$), имеем $D(t) = D = \text{const}$, т.е.

$$E_c = \frac{D}{k+1} \frac{\sigma_{i-1}^{k+1} - \sigma_i^{k+1}}{\sigma_{i-1} - \sigma_i}.$$

Замена однородного грунтового массива многослойным при определении модуля деформации грунта для каждого слоя в зависимости от уровня действующих в нем напряжений равносильна замене фактической зависимости $E(\sigma_z)$ ступенчатой линией (рис. 2). Увеличивая число слоев и уменьшая их толщину, можно добиться хорошей степени аппроксимации фактической зависимости $E = E(\sigma_z)$ расчетной.

Второе приближение заканчивается расчетом напряженно-деформированного состояния многослойного основания, что позволяет уточнить значения σ_z на границе каждого слоя и вычислить по ним новое значение E_{c_i} . Затем переходим к третьему и последующим приближениям. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока E_{c_i} каждого слоя не достигнет практически постоянной величины. Как показали наши вычисления, для этого обычно достаточно трех приближений.

Метод последовательных приближений достаточно прост. Он позволяет использовать программы расчета линейно-деформируемого многослойного полупространства и хорошо учитывает нелинейные свойства среды.

Для проверки степени соответствия предлагаемого метода расчета фактическим условиям расчетные значения σ_z сравнивали с опытными данными при $t = \text{const}$, когда $d\varepsilon/dt \approx 0$.

Опыты проводили в массиве мерзлого торфа размером $100 \times 100 \times 50$ см. Лоток с грунтом находился в морозильной камере, где во время опытов поддерживали постоянную температуру. Внешнюю нагрузку на массив создавали при нагружении его силой 3140 Н через круглый штамп диаметром 20 см. Средняя интенсивность давления по подошве штампа составляла 0,1 МПа, абсолютная влажность торфа – 740 %, степень разложения – 13 %.

Напряжения определяли с помощью датчиков давления мембранного типа, расположенных по оси штампа и на расстоянии 10 и 20 см от его оси. Датчики устанавливали во

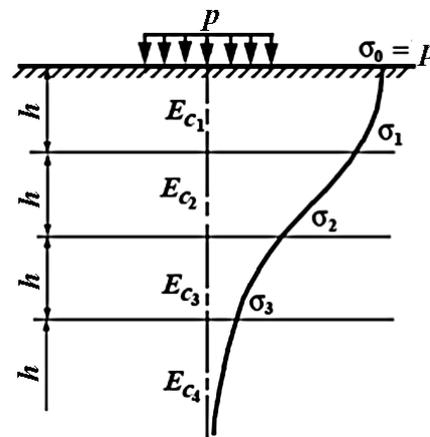


Рис. 1. Схема разбивки грунтового массива на слои

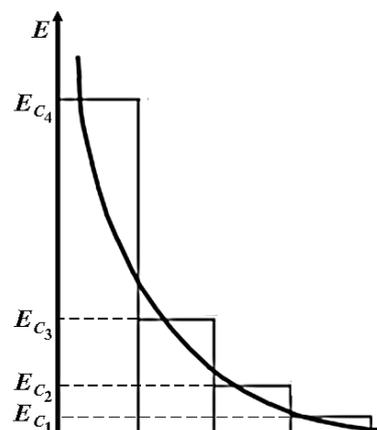


Рис. 2. Аппроксимация зависимости $E = E(\sigma_z)$ ступенчатой линией

время послойного загрузки торфа в лоток. Нижний ряд был уложен на дне лотка, остальные – на расстоянии 10 см один от другого по глубине. Верхний ряд датчиков находился на расстоянии 2 см от поверхности массива.

Перед началом опытов массив торфа промораживали в течение 10 дней. Температуру слоев определяли с помощью терморезисторов. В ходе экспериментов температура в слоях торфа составляла от -10 до -12 °С, т.е. температурное поле массива было примерно однородным.

В качестве регистрирующей аппаратуры использовали цифровой измерительный мост ЦТМ. Показания снимали один раз в сутки в течение 7 дней (к этому времени деформации ползучести торфа практически затухали).

Расчетные значения σ_z определяли для условий опытов. Влияние днища лотка имитировали слоем бетона неограниченной толщины. Результаты опытов и расчетов приведены на рис. 3, где точками показаны опытные данные, а сплошными линиями – расчетные эпюры для 1-, 2-, 3-го циклов итераций. Степень приближения оценивали по способу наименьших квадратов. Были найдены отклонения Δ_i расчетных значений σ_z от экспериментальных и вычислена сумма квадратов отклонений $\sum \Delta_i^2$, которая для 1-го цикла равнялась 0,00619, для 2-го – 0,00591, для 3-го – 0,00474. Отсюда видно, что по мере увеличения числа циклов итераций расчетная эпюра σ_z приближается к экспериментальной, это же наглядно показывают и кривые на рис. 3. При увеличении числа слоев точность расчета возрастает.

Таким образом, предлагаемая приближенная методика позволяет уточнить расчет напряженно-деформированного состояния оснований из мерзлого торфа (или грунта) с учетом нелинейности его модуля деформации $E(\sigma_z)$ при $T = \text{const}$ и $d\varepsilon/dt \approx 0$.

С помощью данного метода можно учесть и влияние неоднородности температурного поля, если использовать серию кривых, выражающих зависимость $E(\sigma_z)$ от температуры T_i .

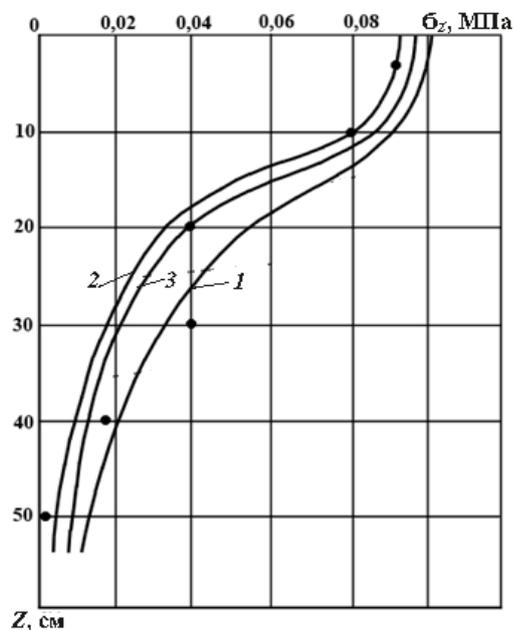


Рис. 3. Расчетные и фактические напряжения в массиве мерзлого торфа для 1-, 2- и 3-го циклов приближения (номер кривой совпадает с номером цикла)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов в расчете ледогрунтовых ограждений /С.С. Вялов [и др.]. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 356 с.
2. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высш. шк., 1978. 243 с.

Поступила 20.10.11

V.S. Morozov

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

Distribution of Compression Stresses in a Frozen Peat Substructure

Design procedure for deflected mode of a frozen peat (or soil) substructure subject to nonlinearity of its modulus of deformation has been considered.

Key words: frozen peat, strain, durability, modulus of elasticity.