

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПОДОШВЫ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ

Жарницкий В.Я. – к.т.н., доцент

*ФГОУП ВПО «Московский государственный университет природообустройства»,
г. Москва, Россия*

Надежность и безопасность плотины из грунтовых материалов определяется степенью её устойчивости, прочностью и, конечно, деформируемостью её тела и основания. Расчеты осадок (деформаций) плотины производят не только для прогнозирования неравномерностей осадки, определения требуемой величины строительного запаса (строительного подъема), но и для уточнения общего количества грунта, укладываемого в сооружение. Для расчета осадок плотины в ней выделяют характерные поперечные и продольные сечения, и в каждом таком сечении намечают несколько расчетных вертикалей, проходящих в различных элементах плотины (в ядре, в переходной зоне, в упорной призме). По намеченным расчетным вертикалям и производят определение осадок.

Сложность расчетов напряженно-деформируемого состояния двухфазных и трехфазных грунтов в плотинах из грунтовых материалов и их основаниях пока еще не позволяет учесть в этих расчетах все факторы, влияющие на деформацию грунта [1-7].

Наиболее распространенными в настоящее время являются схемы (модели) линейно – и нелинейно-деформируемого грунта, позволяющие применить теорию упругости для расчета напряжений и деформаций земляных плотин. Такие расчеты выполняются с использованием метода сеток или метода конечных элементов. Принятая в этих расчетах идеализация грунта как упругого квазиоднороднофазного тела приводит к определенным погрешностям в результатах расчета. Величины этих погрешностей зависят от методики установления эквивалентных «характеристик упругости» по результатам экспериментальных исследований деформационных свойств грунтов. Причем, разными исследователями применяются свои методики определения этих характеристик грунтов /А.Л. Гольдин, А.П. Троицкий, Л.А. Эйслер, Г.С. Толкачев, З. Домашик, Н.А. Вейд и др./.

Другой, широко используемой схемой расчета, является схема одномерной деформации. Принимается, что деформация грунта под действием полного нормального напряжения происходит без бокового расширения. Нередко эта схема деформаций и напряжений используется при расчетах консолидации грунта.

Использование сложных и трудоемких универсальных методик, учитывающих особенности конструкций, воздействий и нюансы поведения грунтов тела плотин и оснований, часто оказывается неэффективным из-за большого разнообразия свойств грунта. Кроме того, в определенных случаях в период строительства и эксплуатации грунтовых напорных сооружений возникает необходимость в прогнозных оценках. Такие расчеты можно выполнять на основе решения линейного уравнения, не прибегая к трудоемким решениям нелинейных уравнений уплотнения грунтов, путем введения упрощающих предположений при схематизации свойств грунта и его деформации.

В основном практические методы расчета конечной величины осадки основания построены на основе таких схем, которые отличаются от реальных условий работы системы «основание – грунтовая насыпь». Причем, это отличие состоит либо в использовании схемы одометрического сжатия, либо в замене сложной эпюры нагрузки простой. В частности, замену трапецидальной эпюры прямоугольной при определении нормальных вертикальных напряжений σ_z . Если величина нормальных вертикальных

напряжений в основании по оси симметрии может быть с достаточной для практики таких расчетов точностью определена по формуле для равномерно распределенной нагрузки, но, изменив только вертикаль, по которой рассматриваются эти напряжения, условия замены одной эпюры другой могут также измениться, не говоря о том, что в отношении других компонентов напряжений (σ_x или σ_y) – замена одной эпюры другой без значительных погрешностей вообще может оказаться невозможной [2].

Для определения перемещения подошвы насыпи или перемещения поверхности грунтового основания от действия симметричной трапецеидальной нагрузки сначала определяется перемещение (деформация) грунта в произвольной точке M (рис. 1) основания насыпи. При этом считаем, что:

1. Области с предельным напряженным состоянием грунта в основании насыпи отсутствуют вообще или занимают минимальный объем, так как в этих областях зависимость между напряжениями и деформациями нелинейная;
2. В рассматриваемом объеме грунта отсутствует перераспределение его фаз во времени, то есть решения будут отвечать начальному и конечному стабилизированному состоянию грунта;
3. Основание насыпи – однородное полупространство;
4. Трение по контакту насыпи с основанием не учитывается;
5. Деформация грунта происходит только в пределах загруженной полосы, то есть в точках 1 и 4 (рис. 1) – отсутствует.

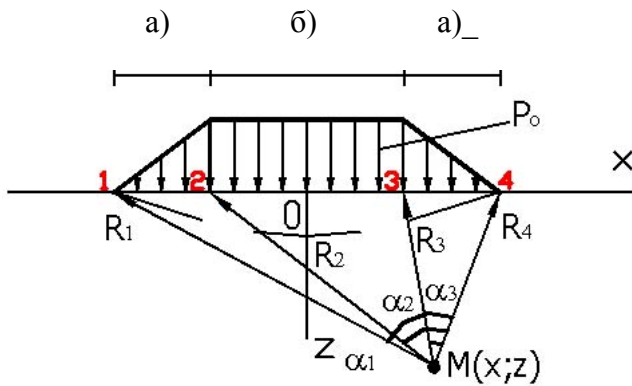


Рис. 1. Схема к определению перемещения подошвы грунтовой насыпи

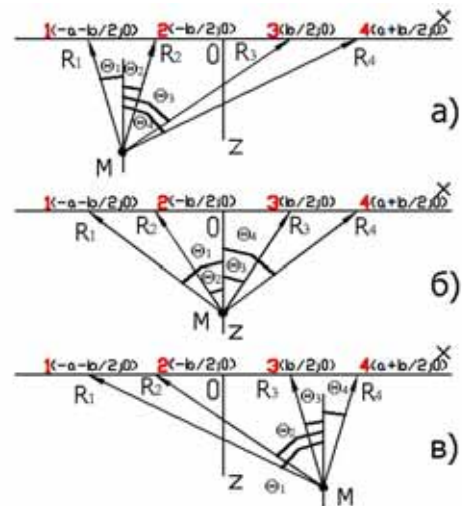


Рис. 2. Схема к определению углов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$

Используя известные в теории линейно-деформируемых тел уравнения, выражающие связь между напряжениями и деформациями, для условия плоской задачи объемная относительная деформация грунта в произвольной точке M может быть представлена как

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_z = \partial S_v / \partial z = [(1 - \nu - 2\nu^2) / E] \cdot (\sigma_x + \sigma_z), \quad (1)$$

где S_v – деформация грунта в произвольной точке M в плоскости « $x-z$ »; $\varepsilon_x, \varepsilon_z$ – составляющие относительных деформаций по направлениям соответствующих осей Ox, Oz ; σ_z – нормальное вертикальное напряжение; σ_x – нормальное горизонтальное напряжение по направлению Ox ; E – модуль деформации грунта; ν – коэффициент поперечного расширения грунта (коэффициент Пуассона).

Тогда
$$S_v = [(1 - \nu - 2\nu^2) / E] \cdot \int (\sigma_x + \sigma_z) dz. \quad (2)$$

Для решения выражения (2) воспользуемся формулами, полученными для напряженного состояния грунта от распределенной трапецеидальной нагрузки [2; 8]:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= (P_0/\pi \cdot n) \cdot [n(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + (\alpha_1 + \alpha_3) + d(\alpha_1 - \alpha_3)]; \\ \sigma_x &= (P_0/\pi \cdot n) \cdot [n(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + (\alpha_1 + \alpha_3) + d(\alpha_1 - \alpha_3) - 2\beta \ln(R_1 \cdot R_4)/(R_2 \cdot R_3)],\end{aligned}\quad (3)$$

где $n = 2a/b$ – характеристика формы эпюры нагрузки (или поперечного профиля насыпи); a – заложение откоса; b – ширина поверху; $d = 2x/b$ и $\beta = 2z/b$ – относительные координаты рассматриваемой точки M ; R_1 - R_4 – расстояния от точки M (см. рис. 1) до точек 1-4; α_1 - α_3 – углы между лучами R_1 - R_4 (см. рис. 1).

Выражения для лучей R_1 ; R_2 ; R_3 и R_4 , представляющих расстояния от точки M до точек 1(- a - $b/2$; 0); 2(- $b/2$; 0); 3($b/2$; 0); 4($a+b/2$; 0), могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned}R_1 &= \sqrt{z^2 + (a + b/2 + x)^2}; \\ R_2 &= \sqrt{z^2 + (b/2 + x)^2}; \\ R_3 &= \sqrt{z^2 + (b/2 - x)^2}; \\ R_4 &= \sqrt{z^2 + (a + b/2 - x)^2}.\end{aligned}\quad (4)$$

Выражения для углов α_1 ; α_2 ; α_3 , образованных лучами R_1 ; R_2 ; R_3 ; R_4 , могут быть представлены через вводимые углы θ_1 ; θ_2 ; θ_3 ; θ_4 :

□ на участке «1-2» (см. рис. 2):

$$\alpha_1 = \theta_1 + \theta_2; \quad \alpha_2 = \theta_3 - \theta_2; \quad \alpha_3 = \theta_4 - \theta_3;\quad (5)$$

□ на участке «2-3» (см. рис. 2):

$$\alpha_1 = \theta_1 - \theta_2; \quad \alpha_2 = \theta_2 + \theta_3; \quad \alpha_3 = \theta_4 - \theta_3;\quad (6)$$

□ на участке «3-4» (см. рис. 2):

$$\alpha_1 = \theta_1 - \theta_2; \quad \alpha_2 = \theta_2 - \theta_3; \quad \alpha_3 = \theta_4 - \theta_3;\quad (7)$$

где $\theta_1 = \arctg[(a+b/2+x)/z]$; $\theta_2 = \arctg[|b/2+x|/z]$; $\theta_3 = \arctg[|b/2-x|/z]$; $\theta_4 = \arctg[(a+b/2-x)/z]$.

Интеграл в выражении (2) вычисляется почленным интегрированием. Подставив результаты интегрирования в (2), получим выражение для определения деформации грунта в произвольной точке M в плоскости « x - z » (см. рис. 1):

$$\begin{aligned}S_v &= [(1-\nu \cdot 2\nu^2)/E] \cdot (P_0/\pi \cdot n) \cdot [(n+1+d)[2z \cdot \arctg((a+b/2+x)/z) + (a+b/2+x) \cdot \\ &\cdot \ln(z^2 + (a+b/2+x)^2)] \mp (1+d)[2z \cdot \arctg(|b/2+x|/z) + |b/2+x| \cdot \ln(z^2 + (b/2+x)^2)] \mp \\ &(1-d)[2z \cdot \arctg(|b/2-x|/z) + |b/2-x| \cdot \ln(z^2 + (b/2-x)^2)] + (n+1-d) \cdot \\ &[2z \cdot \arctg((a+b/2-x)/z) + (a+b/2-x) \cdot \ln(z^2 + (a+b/2-x)^2)] - [(z^2 + (a+b/2+x)^2)/b] \cdot - \\ &(\ln(z^2 + (a+b/2+x)^2) - 1) - [(z^2 + (a+b/2-x)^2)/b] \cdot (\ln(z^2 + (a+b/2-x)^2) - 1) + \\ &[(z^2 + (b/2+x)^2)/b] \cdot (\ln(z^2 + (b/2+x)^2) - 1) + [(z^2 + (b/2-x)^2)/b] \cdot (\ln(z^2 + (b/2-x)^2) - 1) + C].\end{aligned}\quad (8)$$

Тогда перемещение подошвы грунтовой насыпи или, соответственно, поверхности грунтового основания от симметричной трапецеидальной нагрузки (для точек с ординатой $Z=0$) будет определяться выражением:

$$\begin{aligned}S_v &= [(1-\nu \cdot 2\nu^2)/E] \cdot (P_0/\pi \cdot n) \cdot [(n+1+d) \cdot (a+b/2+x) \cdot \ln(a+b/2+x)^2 \mp (1+d) \cdot \\ &\cdot (|b/2+x| \cdot \ln(b/2+x)^2) \mp (1-d) \cdot (|b/2-x| \cdot \ln(b/2-x)^2) + (n+1-d) \cdot (a+b/2-x) \cdot \\ &\ln(a+b/2-x)^2 - [(a+b/2+x)^2/b] \cdot (\ln(a+b/2+x)^2 - 1) - [(a+b/2-x)^2/b] \cdot \\ &(\ln(a+b/2-x)^2 - 1) + [(b/2+x)^2/b] \cdot (\ln(b/2+x)^2 - 1) + [(b/2-x)^2/b] \cdot (\ln(b/2-x)^2 - 1) + C].\end{aligned}\quad (9)$$

Здесь: знак «+» перед слагаемым «(1+d)...» имеет место при положении точек в зоне «1-2», а перед слагаемым «(1-d)...» – при положении точек в зоне «3-4».

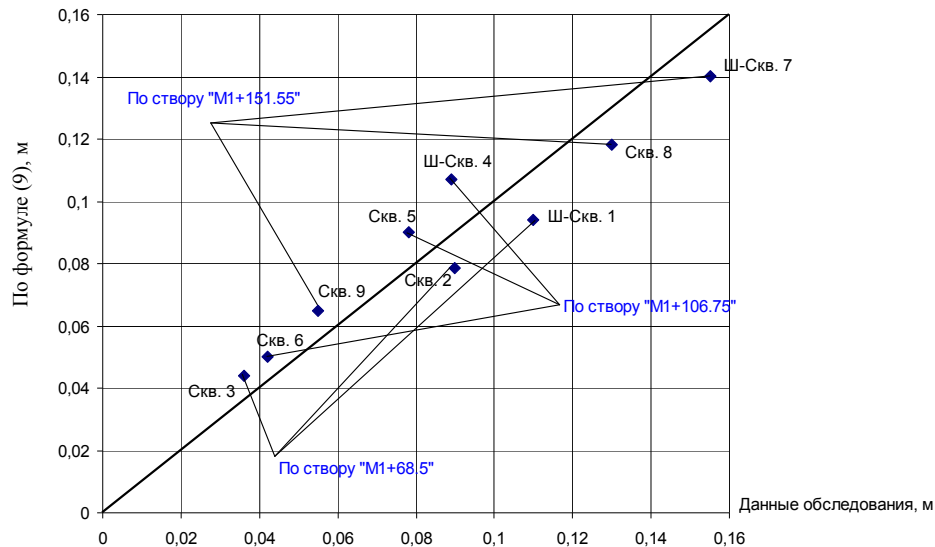


Рис. 3. Плотина «AL Arouse»: сопоставление перемещений подошвы насыпи по формуле (9) и данным обследования

Постоянная величина «С» устанавливается из условия $S_v = 0$ в точках «1» и «4» (см. рис. 1) с проверкой полученного выражения для точек «2» и «3»:

$$C = (2a^2/b) \cdot \ln a + [2(a+b)^2/b] \cdot \ln(a+b) - [2(2a+b)^2/b] \cdot \ln(2a+b) - 2a^2/b - 2a. \quad (10)$$

В реальности насыпи могут иметь сложное очертание: различную крутизну откосов, несимметричность. В этом случае для определения перемещений подошвы грунтовой насыпи следует прибегать к суммированию результатов от различных простых симметричных трапецидальных эпюр, на которые можно разбить фактическую сложную эпюру.

Выполненная математическая проверка выражения (9) подтвердила корректность полученного решения. Кроме того, формулы (9) и (10) нашли достаточное подтверждение в данных сравнения с перемещениями подошвы однородной грунтовой плотины «AL Arouse» (САР). Несмотря на имеющийся разброс, нанесенные точки вполне определенно концентрируются вокруг диагонали (см. рис. 3), что свидетельствует о приемлемости полученного решения для прогноза перемещений подошвы грунтовой насыпи.

Библиографический список

1. Горелик Л.В. Расчеты консолидации оснований и плотин из грунтовых материалов. – Л.: Энергия, 1975.
2. Евгеньев И.Е., Казарновский В.Д. Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах. – М.: Транспорт, 1976.
3. Маслов Н.Н. Прикладная механика грунтов. – М.: Машстройиздат, 1949.
4. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. – М.: Высшая школа, 1968.
5. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства. – М.: Стройиздат, 1977.
6. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Общие зависимости и напряженное состояние оснований сооружений. – Л.-М.: Госстройиздат, 1959. Т.1.
7. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Т.2. Деформация и устойчивость оснований сооружений. – М.-Л.: Госстройиздат, 1961. Т.1.
8. Шахунянц Г.М. Земляное полотно железных дорог. – М.: Трансжелдориздат, 1953.