

Оценка методов расчета устойчивости откосов грунтовых плотин

Богославчик П. М.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Дана оценка существующих методов расчета устойчивости откосов грунтовых плотин. Выполнены расчеты с помощью Delfi-программы, результаты которых наглядно демонстрируют особенности рассмотренных методов с целью выбора метода для практических расчетов.

В настоящее время расчеты устойчивости откосов грунтовых плотин всех классов в соответствии с действующими нормативными документами [1, п. 6.5.8] следует выполнять по методу круглоцилиндрических поверхностей сдвига. Существует ряд методов с таким названием. Выбор метода задача непростая. Экспериментальная проверка практически невозможна. Единственный путь – более глубокий анализ с учетом результатов многочисленных расчетов, которые стали возможны после разработки соответствующих компьютерных программ.

Суть методов по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения представлена на рис. 1. Задача расчета – определить коэффициент запаса устойчивости k_y массива 1 на кривой скольжения 2, который равен отношению действующих по кривой скольжения моментов сил удерживающих или реактивных к моментам сил сдвигающих или активных, то есть

$$k_y = \frac{M_p}{M_a} = \frac{R \sum \tau_p \Delta l}{R \sum \tau_a \Delta l} = \frac{\sum \tau_p \Delta l}{\sum \tau_a \Delta l},$$

где τ_a – активное касательное напряжение в плоскости кривой скольжения на участке длиной Δl ; τ_p – реактивное касательное напряжение на том же участке; l – длина кривой скольжения в пределах рассматриваемого участка.

Для удобства определения сил, действующих на призму обрушения, она делится на отдельные отсеки (рис. 1). Определяются силы, действующие на каждый отсек, которые затем суммируются. Такая разбивка дает возможность учитывать многослойность грунтов в теле плотины и в ее основании. На рис. 2 представлена схема произвольно взятого i -го отсека со всеми действующими силами. В условиях предельного равновесия реактивное касательное напряжение определяется по формуле Кулона, которая для i -го отсека

$$\tau_{pi} = \sigma_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i.$$

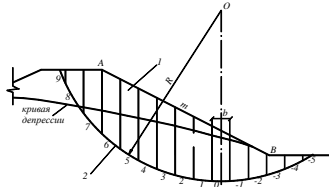


Рис. 1. К расчету устойчивости откоса:
1 – призма обрушения; 2 – кривая скольжения

Очевидно, что активное касательное напряжение в пределах i -го отсека

$$\tau_{ai} = \frac{G_i \sin \alpha_i}{l_i}.$$

Таким образом основное выражение для расчета устойчивости откосов по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения при отсутствии дополнительных внешних сил запишется следующим образом

$$k_y = \frac{\sum \sigma_i \operatorname{tg} \varphi_i l_i + \sum c_i l_i}{\sum G_i \sin \alpha_i}, \quad (1)$$

где σ_i – нормальные напряжения на поверхности скольжения в пределах i -го отсека; l_i – длина кривой скольжения в пределах отсека « n »; G_i – вес i -го отсека; φ_i и c_i – соответственно угол внутреннего трения и удельное сцепление грунта, в котором проходит кривая скольжения в пределах i -го отсека.

Существующие методы расчета отличаются друг от друга способом определения нормальных напряжений, действующих на поверхности оползания. Рассмотрим следующие наиболее известные методы.

Метод Крея. Согласно этому методу силы бокового давления грунта E_{i-1} и E_{i+1} принимаются горизонтальными, точки их приложения заглублены на величину $2/3h$. В результате получена следующая формула

$$k_y = \frac{1}{\sum G_i \sin \alpha_i} \sum \frac{G_i - P_{Bi} + c_i b_i \operatorname{ctg} \varphi_i}{\cos \alpha_i \operatorname{ctg} \varphi_i + \sin \alpha_i}.$$

Метод Терцаги-Флорина. Терцаги силы E_{i-1} и E_{i+1} при построении многоугольника сил рассматривал параллельными плоскости скольжения. При этом у него силы взвешивающего и фильтрационного давления отсутствуют. У Флорина аналогично, но при наличии этих сил. В результате обобщенная формула имеет вид

$$k_y = \frac{\sum(G_i - P_{Bi}) \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + \sum c_i l_i}{\sum G_i \sin \alpha_i}.$$

Метод Мейера-Бишона-Ничипоровича. Мейер и Ничипорович при тех же допущениях, что и в предыдущем случае, но считая силу P_B направленной вертикально вверх, получили следующую формулу

$$k_y = \sum \frac{(G_i \cos \alpha_i - P_{Bi}) \operatorname{tg} \varphi_i + \sum c_i l_i}{\sum G_i \sin \alpha_i}. \quad (2)$$

Бишон получил аналогичную формулу, но с учетом всех сил, действующих на отсек (рис. 2).

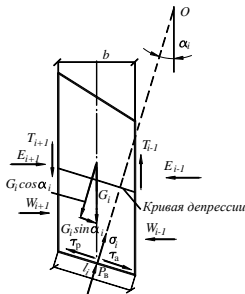


Рис. 2. Схема сил, действующих на отсек

Метод Чугаева, получивший название «метод весового давления», заключается в том, что при откосах с заложением $m = 2-2,5$ сумма нормальных сил на поверхности скольжения принимается равной весу грунта оползающего массива, а при более крутых откосах – его проекции на нормаль к поверхности сдвига с поправочным коэффициентом 1,05. Расчетная зависимость при этом имеет вид

$$k_y = \frac{\sum(G_i - P_{Bi}) \operatorname{tg} \varphi_i + \sum c_i l_i}{\sum G_i \sin \alpha_i}.$$

где G_i – вес i -го отсека; P_{Bi} – сумма взвешивающих и фильтрационных сил, действующих на i -тый отсек; α_i – угол наклона подошвы отсека к горизонту; φ_i – угол внутреннего трения грунта в подошве отсека; c_i – удельное сцепление грунта в подошве отсека; l_i – длина подошвы отсека.

Величина P_{Bi} в данной работе по предложению А. А. Ничипоровича при отсутствии порового давления определяется как сумма давления взвешивающего $P_{вз}$ и фильтрационного P_{ϕ} .

В литературных источниках [2–4] приводится следующий анализ выше перечисленных методов.

Метод Крея достаточно точен, был в свое время рекомендован межведомственной комиссией Госстроя СССР для расчетов устойчивости откосов из неоднородных грунтов.

Метод Терцаги-Флорина нашел широкое применение благодаря своей простоте, однако при расчетах пологих откосов (с заложением $m > 2,5$) может давать ошибку в сторону преуменьшения величины коэффициента запаса устойчивости.

Метод Мейера-Ничипоровича, который является частным случаем метода Бишопа, по оценке автора дает резко заниженные значения коэффициента запаса устойчивости.

Метод «весового давления» Р. Р. Чугаева, в связи с принятым способом его обоснования, не позволяет оценить его достоверность при различных сочетаниях нагрузок, а также при неоднородном сложении откоса и его основания.

Для сравнительного анализа указанных методов были выполнены расчеты с помощью Delfi-программы. В качестве примера для расчетов была взята грунтовая плотина с экраном высотой 20 м, выполненная из мелкозернистого песка со следующими физико-механическими характеристиками: пористость $n = 0,39$; удельное сцепление сухого грунта $c = 3,0$ кПа, водонасыщенного $c_m = 3,0$ кПа; угол внутреннего трения сухого грунта $\varphi = 32$ град., водонасыщенного $\varphi_m = 27$ град. Основание сложено супесью со следующими физико-механическими характеристиками: пористость $n = 0,35$; удельное сцепление сухого грунта $c = 15,0$ кПа, водонасыщенного $c_m = 5,0$ кПа; угол внутреннего трения сухого грунта $\varphi = 27$ град, водонасыщенного $\varphi_m = 20$ град. В табл. представлены результаты расчетов устойчивости низового откоса для различных коэффициентов его заложения.

Таблица

Результаты расчетов коэффициента запаса устойчивости разными методами

Коэффициент заложения откоса	Коэффициент запаса устойчивости откоса			
	По методу Крея	По методу Терцаги-Флорина	По методу Мейера-Ничипоровича	По методу Чугаева
2,0	1,14	0,99	0,93	1,18
2,5	1,23	1,09	1,03	1,28
3,0	1,34	1,22	1,11	1,39
3,5	1,45	1,31	1,21	1,50
4,0	1,53	1,43	1,30	1,58

Анализ выполненных сравнительных расчетов устойчивости откосов плотин по вышеприведенным методам показал, что метод Мейера-Ничипоровича дает заниженные на 20–30 % результаты, а методы Р. Р. Чугаева, Терцаги–Флорина и Крея дают результаты отличающиеся друг от друга на 2–5 %. Метод Р. Р. Чугаева, как было указано выше, не рекомендуется при неоднородном сложении откоса и его основания. Метод Крея согласно литературному анализу достаточно точен, однако, как указывал Р. Р. Чугаев, автор «изложил свой способ в крайне неясной и даже ошибочной форме» [5]. Метод Терцаги–Флорина дает нормальные результаты, очень понятный и наглядный.

Рассмотрим несколько иной подход. Действующие на отсек силы можно разделить на две группы – внешние и внутренние. К внешним относятся собственный вес отсека G_i , сила фильтрационного давления $P_{\phi i}$, сила взвешивающего давления $P_{взi}$. Внутренние силы – это давление грунта на границах отсека E_i и E_{i+1} , сила трения по граням отсека T_i и T_{i+1} , давление воды на границах отсека W_i и W_{i+1} . Предлагается обратить внимание на следующее. Во-первых, в окончательных формулах всех рассматриваемых методов внутренних сил нет. Они исчезают в процессе сложения действующих сил. Во-вторых, внутренние силы действуют на плоскости, ограничивающие отсеки с двух сторон. Но эти плоскости виртуальные. На самом деле их нет. Они присутствуют только для удобства расчетов. Поэтому непонятно, как могут действовать силы на несуществующие поверхности. Если учитывать только внешние силы, то получим следующее. Нормальные напряжения на поверхности скольжения в пределах i -го отсека

$$\sigma_i = \frac{(G_i - P_{вz i}) \cos \alpha_i}{l_i}.$$

Тогда формула (1) примет следующий вид

$$k_y = \frac{\sum (G_i - P_{вz i}) \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + \sum c_i l_i}{\sum G_i \sin \alpha_i}. \quad (3)$$

Эта формула совпадает с формулой Терцаги–Флорина (2).

На основании изложенного материала к практическому применению рекомендуется метод Терцаги–Флорина, формула которого совпадает с полученной нами формулой (3).

Литература

1. СН 3.04.01-2020 Строительные нормы. Гидротехнические сооружения общего назначения. – Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, Минск, 2021. – 133 с.
2. Розанов, Н. Н. Плотины из грунтовых материалов / Н. Н. Розанов. – М: Стройиздат, 1983. – 296 с.
3. Гидротехнические сооружения. Справочник проектировщика // Под редакцией В. П. Недрига. – М: Стройиздат, 1983. – 543 с.
4. Ничипорович, А. А. Плотины из местных материалов / А. А. Ничипорович. – М: Стройиздат, 1973. – 320 с.
5. Чугаев, Р. Р. Расчет устойчивости земляных откосов и бетонных плотин на нескальном основании по методу круглоцилиндрических поверхностей обрушения / Р. Р. Чугаев. – М.-Л., Госэнергоиздат, 1963. – 141 с.

УДК 628.32

Туркменское озеро – грандиозный гидротехнический проект

Келова М. Г.

Туркменский государственный архитектурно-строительный институт
Ашхабад, Туркменистан

Рассматривается значение Туркменского озера «Алтын Асыр» и его роль в экологическом оздоровлении окружающей среды.

В Туркменистане ведется грандиозная работа по рациональному использованию водных ресурсов, улучшению водоснабжения орошаемых земель, освоению новых посевных площадей [1].

В стране, где более 80 % территории занимает пустыня Каракумы, осуществляется грандиозный гидротехнический проект по созданию Туркменского озера за счет организованного отвода дренажных вод, образующихся в результате ведения орошаемого земледелия, в естественную впадину Карашор. Для этого ведется строительство коллекторно-дренажной сети на территории одной из крупнейших пустынь мира – Каракумы. Этот проект, стоимостью 6 млрд. долл. является одним из крупнейших в мире в области мелиоративного освоения земель [2].

Строительство озера «Алтын Асыр» началось в 2000 году. Цель проекта состояла в том, чтобы собрать подобные минерализованные коллекторно-дренажные воды с орошаемых территорий, что позволило бы улучшить структуру почвы, предотвращая загрязнение водных ресурсов и подъем грунтовых вод. Это открывало и возможность избавления от подтопления