

4. Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П. Г. Киселева. – М. : Энергия, 1974. – 313 с.

5. Теоретические основы расчета размыва грунтовых плотин при переливе воды через гребень / В. В. Ивашечкин, П. М. Богославчик, В. В. Веремениук, О. В. Немеровец // Энергетика. – 2022. – Т. 65, № 3. – С. 197–208.

6. Гончаров, В. Л. Динамика русловых потоков / В. Л. Гончаров. – Л. : Гидрометеиздат, 1962. – 373 с.

УДК 627.8.04

Методы расчета устойчивости грунтовых откосов

Богославчик П. М., Устюжанина В. С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Рассмотрены методы расчетов грунтовых откосов по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения. Дан анализ и их численное сравнение.

Расчет устойчивости откосов выполняется по первой группе предельных состояний – по несущей способности [1]. Откос устойчив, если соблюдается следующее условие:

$$n_c F \leq R \frac{m}{k_H}, \quad (1)$$

где n_c – коэффициент сочетания нагрузок; R – расчетное значение обобщенной несущей способности; F – расчетное значение обобщенного силового воздействия; m – коэффициент условий работы, учитывающий тип сооружения конструкции или основания, вид материала, приближенность расчетных схем и др.; k_H – коэффициент надежности по ответственности (назначению) сооружения.

Формула (1) является общей для расчета любых сооружений на прочность и устойчивость. Запишем ее в следующем виде:

$$k_H \leq \frac{R}{F} \frac{m}{n_c}. \quad (2)$$

Правая часть формулы (2) – коэффициент запаса устойчивости. Получаем:

$$k_y = \frac{R}{F} \frac{m}{n_c} \geq k_n. \quad (3)$$

Расчетные методы можно объединить в две группы.

К первой группе относятся методы, основанные на теории предельного равновесия, в которых предполагается, что во всей рассматриваемой области грунтового массива одновременно возникает предельное состояние. Следовательно, в массиве одновременно возникает множество поверхностей предельного равновесия, по которым возможен сдвиг, и задача заключается в отыскании наиболее опасной. Решение этой задачи было получено Ренкиным (для случая прямолинейных поверхностей скольжения) и Кеттером (для криволинейных поверхностей обрушения). Дальнейшее развитие эти методы получили в работах Соколовского В. В., которым получены решения для откосов из неоднородных грунтов с учетом фильтрационных сил. Однако они не имеют простых инженерных решений в широком понимании, а допущение о возникновении предельного состояния одновременно во всех точках рассматриваемой области с физической точки зрения весьма условно. В связи с этим методы этой группы в практических расчетах применяются крайне редко.

Ко второй группе относятся методы, базирующиеся на представлении, что обрушение откоса дамбы может произойти по некоторой заранее заданной поверхности, которую чаще всего принимают в форме дуги окружности (круглоцилиндрическая поверхность скольжения) или ломаной, состоящей из нескольких прямолинейных отрезков (плоские и комбинированные поверхности скольжения). Методы предложены Паттерсоном, в дальнейшем развиты Чугаевым Р. Р., Ничипоровичем А. А., Моргуновым Н. С., Федоровым И. В., Терцаги, Флориным, Креем, Бишопом и др. [2–4], нашли наибольшее применение.

Коэффициент запаса устойчивости откоса определяется способами:

- по отношению сил разрушающих (предельных) к расчетным;
- по отношению сил, сопротивляющихся сдвигу (реактивных), к силам, сдвигающим (активным);
- по отношению характеристик сопротивления грунта сдвигу, при котором происходит обрушение, к фактически имеющимся.

Оползающий массив рассматривается как одно монолитное тело либо условно делят на несколько твердых отсеков. Способы расчета, в которых деление на отсеки не производится, могут использоваться для расчета откосов из однородных грунтов. Для этого случая Тейлором получено точное решение.

Наибольшее практическое значение имеют методы расчета, предусматривающие деление сдвигающегося массива грунта на отсеки, т. к. позволяют учитывать неоднородность массива и различные силы, действующие

Коэффициент запаса устойчивости призмы обрушения определяется по формуле (3).

Определив моменты активных и реактивных сил относительно центра кривой скольжения, и имея в виду, что предельная величина реактивных касательных напряжений $\tau_{пр}$ рассчитывается по уравнению Кулона

263

получаем выражение для расчета устойчивости откоса дамбы по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения при отсутствии дополнительных внешних сил:

$$K = \frac{\sum M_p}{\sum M_a} = \frac{R \sum \tau_p \Delta l}{R \sum \tau_a \Delta l} = \frac{\sum \sigma_i \operatorname{tg} \varphi_i l_i + \sum c_i l_i}{\sum G_i \sin \alpha_i}, \quad (4)$$

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

Разработано несколько методов расчета по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения с делением массива на отсеки, которые отличаются друг от друга способом определения нормальных напряжений, действующих на поверхности оползания.

Метод Крея. В соответствии с предложением Крея величину $\sigma_i l_i$ находят из условия равенства нулю проекции всех сил на вертикальную ось, считая, что в предельном состоянии силы трения по боковым поверхностям отсека взаимно уравниваются:

$$G_i - \sigma_i l_i \cos \alpha_i - \tau_i l_i \sin \alpha_i - p_i l_i \cos \alpha_i = 0. \quad (5)$$

Заменяя в этом выражении τ_i через $\sigma_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i$ и

$$l_i = \frac{b_i}{\cos \alpha_i},$$

произведя преобразования и подставляя полученное выражение для $\sigma_i l_i$ в формулу (5) получаем расчетную зависимость:

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

Метод Крея рекомендован для расчетов устойчивости откосов дамб из неоднородных грунтов и по исследованиям показывает результаты, согласующиеся с практическими.

Метод Терцаги-Флорина. Значение $\sigma_i l_i$ находится из условия равенства нулю проекции всех сил на ось, нормальную к поверхности скольжения, считая, что в предельном состоянии силы трения по боковым поверхностям отсека и силы взаимодействия между соседними отсеками взаимно уравниваются:

$$G_i \cos \alpha_i - \sigma_i l_i - p_i l_i + (W_i - W_{i+1}) \sin \alpha_i = 0. \quad (6)$$

С учетом того, что разность давлений воды на гранях отсека $(W_i - W_{i+1})$ с достаточной точностью может быть представлена в виде $p_i b_i \operatorname{tg} \alpha_i$ из уравнения (6) находим $\sigma_i l_i$, и подставляя в (5), получаем расчетную зависимость:

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

Метод Терцаги-Флорина нашел широкое применение благодаря своей простоте.

Метод Мейера-Ничипоровича. Значение $\sigma_i l_i$ находится из условия равенства нулю проекции всех сил на ось, нормальную к поверхности скольжения, считая, что в предельном состоянии силы трения по боковым поверхностям отсека, силы взаимодействия между соседними отсеками и силы давления воды на боковые поверхности отсека взаимно уравновешиваются:

$$G_i \cos \alpha_i - \tau_i l_i - p_i \cos \alpha_i = 0. \quad (7)$$

Подставляя значения $\sigma_n l_n$, найденные из уравнения (7) в (5) получаем расчетную зависимость:

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

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

Метод Чугаева Р. Р. Метод Чугаева Р. Р. (метод весового давления), основан на формальном совпадении его результатов расчетов с точным методом Тейлора. При откосах с заложением $m = 2,0-2,5$ сумма нормальных сил на поверхности скольжения принимается равной весу грунта оползающего массива, а при более крутых откосах дамб – его проекции на нормаль к поверхности сдвига с поправочным коэффициентом 1,05. Расчетная зависимость при этом принимает вид:

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

Величина p_i по предложению Ничипоровича А. А. в общем случае определяется как сумма давления взвешивающего $p_{вз}$, фильтрационного p_{ϕ} и порового p_k или давления консолидации:

$$P_i = p_{вз} + p_{\phi} + p_k.$$

Сила P_v направлена вверх перпендикулярно плоскости скольжения.

Для сравнительного анализа указанных методов ранее [5] 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 $\phi = 32$ град., водонасыщенного $\phi_m = 27$ 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 $\phi = 27$ град., водонасыщенного $\phi_m = 20$ 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 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» [2]. Метод Терцаги – Флорина дает нормальные результаты, очень понятный и наглядный.

К сожалению, сравнить полученные результаты с экспериментальными данными сложно, так как в силу ряда причин весьма сложно провести эксперимент, данные которого можно было бы признать достаточно достоверными. Но сравнивая результаты расчетов можно отметить, что методы Крея и Флорина-Терцаги дают близкие значения. Но метод Крея несколько запутанный и при компьютерном счете часто дает сбои, причину которых бывает сложно найти.

Литература

1. Плотины из грунтовых материалов. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-3.04–150–2009. – Введ. 16.11.2009 ; отмен. 13.07.2021. – Минск : Минстройархитектуры, 2010. – 116 с.
2. Чугаев, Р. Р. Расчет устойчивости земляных откосов и бетонных плотин на нескальном основании по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения / Р. Р. Чугаев. – М.–Л. : Государственное энергетическое издание, 1963. – 144 с.
3. Ничипорович, А. А. Плотины из местных материалов / А. А. Ничипорович. – М. : Стройиздат, 1973. – 320 с.
4. Гидротехнические сооружения. Справочник проектировщика / под ред. В. П. Недриги. – М. : Стройиздат, 1983. – 544 с.
5. Богославчик, П. М. Оценка методов расчета устойчивости откосов грунтовых плотин / П. М. Богославчик // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте : материалы III Республиканской научно-технической конференции, Минск, 27–28 апр. 2023 г. – Минск, 2023. – С. 276 – 281.

УДК 631.862

Технические средства утилизации животноводческих стоков

Курчевский С. М.¹, Голубенко М. И.²

¹Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²Заслуженный изобретатель России

Владимир, Российская Федерация

Приведено описание пруда-накопителя животноводческих стоков для утилизации на полях орошения за счет предварительного аккумуляирования, основанного на технологии почвенной очистки в процессе внесения стоков и в качестве удобрительного орошения. Это позволит включить в биологический круговорот биогенные элементы стоков и снизить экологическое состояние окружающей среды вокруг крупных животноводческих комплексов.