

А. П. СИНИЦЫН

МЕТОД СБАЛАНСИРОВАННОГО РИСКА И ДОСТОВЕРНОСТЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛАБЫХ ГРУНТОВ

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Математическая теория риска за последнее время все шире внедряется в практику инженерных расчетов и позволяет найти наиболее эффективные решения при создании сложных инженерных конструкций. Такие расчеты выполняются с учетом того, что данное сооружение подвергается неизбежному риску, который возникает в связи с ограниченной достоверностью исходных данных, положенных в основу расчета. В особенности это относится к расчетам на сейсмостойкость сооружений, расположенных на слабых грунтах, динамические характеристики которых, как правило, определяются приближенно. На V Дунайской конференции в Братиславе в 1977 г. автором был представлен специальный доклад, в котором отмечались особенности использования теории риска. Риск определяется на основе обработки статистическими методами большого числа наблюдений. Повышение величины риска приводит к снижению расходов на создание той или иной конструкции и к увеличению ожидаемой выгоды. Но вместе с тем, повышение величины риска может повлечь за собой разрушение конструкции в более короткий срок. Поэтому определение принимаемой в расчете величины риска является весьма ответственной задачей, которая может быть правильно решена только путем проведения глубокого статистического анализа. Функциональная зависимость между величиной риска и ожидаемой выгодой выражается нелинейным законом, как это показано на рис. 1 в условных единицах [1, 2].

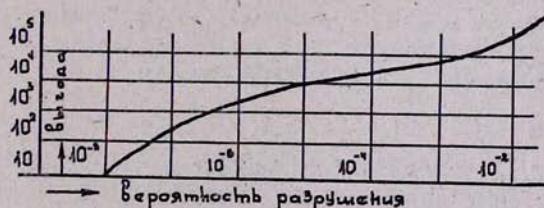


Рис. 1. Шкала риска

Сейсмический риск будем определять для земляной дамбы на основе метода, опубликованного автором в трудах VI Дунайской конференции. Учитывается совместная работа дамбы и слабого основания, определяются параметры напряженно-деформационного состояния водонасыщенного двухслойного основания от бегущей сейсмической волны. Величина риска определяется в предположении, что в

процессе передачи сейсмической энергии происходит потеря устойчивости основания, которая зависит от критического значения параметров, характеризующих основание. Затем расчет выполняется с учетом вращательного движения и возможной потери устойчивости откосов дамбы, вызванных сейсмическими волнами. Сравнение этих двух случаев показывает, что если не учитывается возможность потери устойчивости откосов, то риск получается сравнительно небольшой даже при сильном землетрясении. По шкале риска это значение находится между естественным и умеренным риском, то есть дамбу можно считать устойчивой. Если же уточнить расчет и учесть совместное напряженно-деформированное состояние дамбы и основания, возникающее под воздействием сейсмических волн, то величина риска резко возрастает и устойчивость системы «дамба—основание» оказывается необеспеченной. Для облегчения практического использования результатов составлены графики. По ним определяется сейсмическая нагрузка при которой дамба сохраняет устойчивость. Эта нагрузка зависит от интенсивности внешних сил, от высоты дамбы и наклона откосов, а также от динамических параметров водонасыщенного основания. Существенное влияние на величину риска оказывает достоверность положенных в основу расчета динамических характеристик слабых грунтов. Для оценки достоверности используется метод сбалансированного риска. Интенсивность внешних нагрузок определяется при заданной величине риска для отдельных элементов системы.

2. ВЫЧИСЛЕНИЕ РИСКА ПРИ ПОТЕРЕ УСТОЙЧИВОСТИ ВОДОНАСЫЩЕННОГО ОСНОВАНИЯ

Для вычисления риска определим вероятность $P_E[F_L]$ потери устойчивости основания, которая зависит от вероятности $P[F_L/E]$ того, что потеря устойчивости произойдет при интенсивности землетрясения E и от вероятности $P[E]$ того, что внешние силы достигнут интенсивности E .

$$P_E[F_L] = P[F_L/E] \cdot P[E]. \quad (1)$$

Как известно, интенсивность землетрясения в данной точке характеризуется двумя параметрами: ускорением A и продолжительностью D , поэтому формулу (1) перепишем так:

$$P_E[\mathcal{F}_L] = P[\mathcal{F}_L/A, D] \cdot P[A, D]. \quad (2)$$

Однако ускорение A и продолжительность D зависят от магнитуды M источника и от расстояния от источника до дамбы, поэтому формула (2) может быть преобразована к такому виду:

$$P_E[\mathcal{F}_L] = P[\mathcal{F}_L/A, D] \cdot P[A, D/M, R] \cdot P[M, R]. \quad (3)$$

Здесь: $P[\mathcal{F}_L/A, D]$ условная вероятность того, что потеря устойчивости произойдет при значениях параметров A и D : $P[A, D]$ вероятность того, что на дамбу действует ускорение продолжительностью D при магнитуде в источнике M и расстоянии до источника R ; $P(M, R)$ — вероятность того, что источник, имеющий параметры M и R , возникнет. При наличии нескольких источников формула (3) принимает такой вид:

$$P[\mathcal{F}_L] = \sum_{M, R} P[\mathcal{F}_L/M, R] \cdot P[MR] \dots \quad (4)$$

Суммирование производится по возможным положениям источника.

Величина риска вычисляется как вероятность потери устойчивости основания в течение года.

$$\text{risk}[\mathcal{F}_L] = P[\mathcal{F}_L] \text{ в год} \quad (5)$$

Риск подсчитаем, вычисляя двойной интеграл в точке «*i*»:

$$\text{risk}(\mathcal{F}_L) = \int_{R_m} \int P[\mathcal{F}_L | M_i R_i, E] \cdot f(M) P[E] dM dR. \quad (6)$$

Точка «*i*» относится к положению источника: $P[\mathcal{F}_L | M; R_i; E_b]$ — условная вероятность того, что потеря устойчивости основания произойдет, если в точке «*i*» возникнет источник с магнитудой M_i и расстояние от точки *i* до дамбы равно R_i ; $f(M)$ — функция плотности вероятности для источника с магнитудой M ; и $P[E_b]$ — годичная вероятность того, что источник возникнет «*i*».

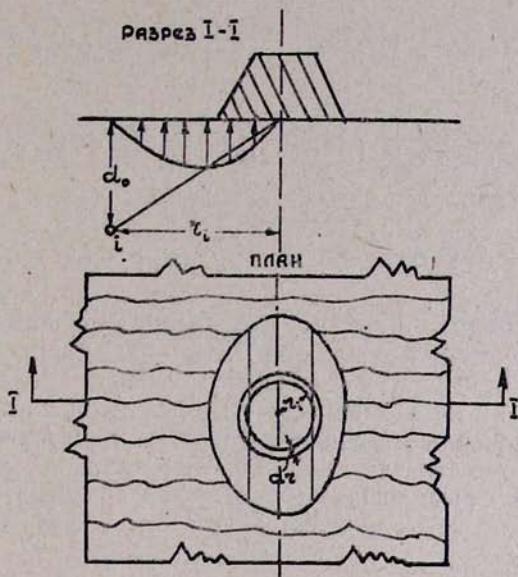


Рис. 2. Схема дамбы

Наиболее простой случай получим, если возможные источники разной магнитуды от максимума M_1 до минимума M_0 расположены на глубине d_0 внутри площади круга радиуса r_{\max} , а дамба находится над центром этого круга (рис. 2). Тогда для кольца толщиной dr , выделенного из круга на расстоянии r_i от центра, можно записать,

$$P[\mathcal{F}_L] / b_{\text{год}} = \int_{m_0}^{m_1} P[\mathcal{F}_L | M, R_i E] f(M) P[E_b] dM, \quad (7)$$

величина

$$R_i = (r_i^2 + d_0^2)^{1/2}. \quad (8)$$

Годовая вероятность возникновения источника внутри выделенного кольца радиуса r_i вычисляется по формуле:

$$P[E_b] / b_{\text{год}} = \lambda \cdot 2\pi r_i dr, \quad (9)$$

λ —среднее годовое число (т. е. частота) возникновения источников на единицу площади круга.

Функция плотности вероятности для магнитуды M вычисляется обычно по формуле:

$$f(M) = k_m \cdot \beta \cdot \exp[-\beta(M - M_0)], \quad (10)$$

β —коэффициент, зависящий от магнитуды и частоты источника.

k_m —множитель, позволяющий нормализовать правую часть формулы

$$k_m = [\beta \exp(M_1 - M_0)]^{-1}. \quad (11)$$

Подставляя значения из формул (9), (10) и (11) в формулу (7), учитывая зависимость между R_i , r_i и d_0 , по формуле (8) получим:

$$P[\mathcal{F}_L]/b_{\text{год}} = \text{risk}(\mathcal{F}_L) = \int_Q^{\infty} \int_{M_0}^{\max M} \left\{ P[\mathcal{F}_L/M, R_i, E_{bi}] \cdot k_m \beta \exp[-\beta(M - M_0)] dM \right\} 2\pi \cdot R_i \cdot dR \dots \quad (12)$$

Внутренний интеграл

$$f(R_i) = k_m \beta \sum_{m=0}^{m_1} P[\mathcal{F}_L/M, R_i, E_{bi}] \exp[-\beta(M - M_0)] \Delta M \quad (13)$$

вычисляется численным методом. Например, определим величину риска потери устойчивости основания для следующих данных: радиус площадки, на которой могут возникать источники $R_{\max} = 250$ км. Глубина расположения источников $a_0 = 20$ км. Средняя величина $\beta_0 = 1,50$. Частота возникновения источников $\lambda = 2 \cdot 10^{-5}$ источников в год на 1 км². Минимальная магнитуда $M_0 = 4,0$; максимальная $M = 8,0$. Подставляя эти данные в формулу (12) и учитывая формулы (10), (11) и (13), получим величину риска, указанную в табл. 1, для разных значений β и M .

Таблица 1
Величина риска

M	β						
	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	
6	$3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	
7	$9 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$0,8 \cdot 10^{-5}$	
8	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	

3. РИСК ПРИ ПОТЕРЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСА ДАМБЫ

Для определения риска, возникающего в результате потери устойчивости откоса дамбы, рассмотрим статистический ансамбль из нескольких одинаковых дамб, для которых вычислена критическая сила P_{kp} [3].

Ставим эту силу с обобщенной сейсмической нагрузкой „S“, возникающей при землетрясении. Тогда при некоторых упрощениях коэф-

Фактор надежности откоса дамбы «θ» можно представить в виде отношения:

$$\nu = \frac{P_{kp}}{S}. \quad (14)$$

Для каждого ансамбля величина ν будет статистической переменной, имеющей плотность вероятности $p(\nu)$ и функцию вероятности. Потеря устойчивости откоса дамбы произойдет, если:

$$S > P_{kp} \text{ или } \nu < 1.$$

Риск подсчитаем по формуле:

$$r = \int_0^1 p(\nu) d\nu = \int_0^1 p(P_{kp}/S) dP_{kp}/S = P(1) = \int_0^1 p_1(S) dp_2(P_{kp}). \quad (15)$$

Принимая для $p_1(S)$ и $p_2(P_{kp})$ — нормальный закон распределения с медианами S и P_{kp} и стандарты отклонения $\delta_{P_{kp}}$ и δ_s со средним значением $P_{kp}/S = \nu$ и стандартом $\delta = \sqrt{\delta_{P_{kp}}^2 + \delta_s^2}$, после преобразований получим:

$$\text{risk}[\mathcal{F}_L] = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} - \frac{\log \nu_0}{\delta}\right) \cdot d\left(\frac{\log \nu_0}{\delta}\right). \quad (16)$$

В табл. 2 указана величина риска для разных значений ν_0 и δ .

Таблица 2
Величина риска

ν_0	δ			
	5	7	9	12
1,5	10^{-3}	10^{-2}	—	10^{-1}
2,0	10^{-5}	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}
2,5	10^{-8}	$4 \cdot 10^{-6}$	10^{-4}	10^{-3}
3,0	—	10^{-8}	$5 \cdot 10^{-6}$	10^{-4}
4,5	—	—	10^{-7}	$4 \cdot 10^{-7}$

4. ПОДСЧЕТ P_{kp}

Как было доложено автором на VI симпозиуме по сейсмостойкому строительству в Рурки в 1978 г., потеря общей устойчивости сооружения может произойти по двум формам. Если Θ — начальный угол наклона вертикальной оси дамбы равен нулю, то наибольшая вертикальная нагрузка, вызывающая потерю устойчивости (рис. 3), будет определяться обычным путем. Однако из-за упругого основания происходит раскачивание профиля дамбы и возникает другая форма потери устойчивости, то есть возникает эффект бифуркации. Для определения P_{kp} системы «дамба — основание» необходимо рассмотреть два возможных условия равновесия.

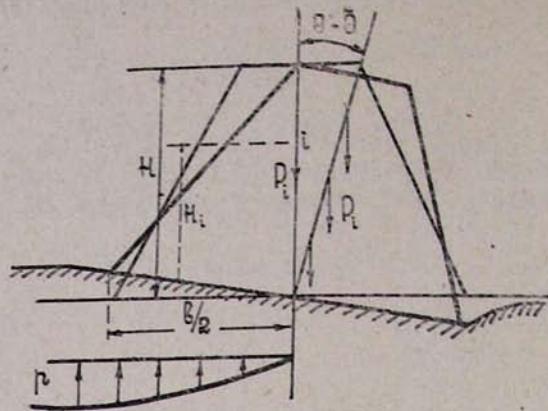


Рис. 3. Схема сил при движении дамбы

Первое уравнение равновесия соответствует прямолинейной форме и записывается как сумма проекций всех сил на вертикаль

$$\sum P_i = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} p dx, \quad (17)$$

p —реакция основания на п. м. ширины дамбы.

В табл. 3 указаны значения коэффициента « η » снижения величины P_{kp} с учетом раскачивания дамбы в зависимости от отношения Hb — высоты дамбы к ее ширине.

Таблица 3

Значения коэффициента η

$H/b =$	2	3	4	5	6	7
$\eta =$	0,42	0,30	0,20	0,15	0,10	0,07

Второе уравнение соответствует второй форме потери устойчивости, когда вертикальная ось дамбы имеет отклонения на угол $(\Theta + \bar{\Theta})$ и выражает равенство нулю моментов всех сил, приложенных к системе:

$$\sum P_i (\Theta + \bar{\Theta}) H_i + \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} p x dx = \beta H \Theta^2, \quad (18)$$

$\beta H \Theta^2$ — удерживающий реактивный момент, возникающий в основании при отклонении оси дамбы на угол Θ в результате потери устойчивости. При некоторых упрощениях решение уравнения (18) можно получить в виде ряда:

$$\frac{P_{kp}}{P_{kp}^0} = 1 \left(\frac{4b}{Eb/2} \cdot \frac{H}{b} \cdot \bar{\Theta} \right)^{1/2} + \dots \quad (19)$$

В формулу (19) введены следующие обозначения:

P_{kp} — критическая нагрузка с учетом бифуркации;

P_{kp}^0 — критическая нагрузка без учета бифуркации дамбы, вызванной сейсмическими волнами;

E — модуль деформации основания;

β — характеристика восстанавливающего момента.

Формула (19) позволяет оценить влияние угла Θ наклона дамбы, возникающего в результате бегущей сейсмической волны, на снижение той нагрузки, при которой произойдет потеря устойчивости дамбы.

В данном случае такой нагрузкой является собственный вес дамбы. Из сделанных расчетов видно, что в результате раскачивания дамбы под воздействием сейсмических волн величина критической силы, при которой наступает потеря устойчивости дамбы, снижается в несколько раз. Этот эффект зависит от многих параметров, основным из которых является угол наклона вертикальной оси дамбы в процессе ее раскачивания. В некоторых случаях увеличение угла наклона оси вызывает снижение критической силы до десяти раз. Увеличение отношения высоты дамбы к ее приведенной ширине также снижает критическую силу. Однако увеличение эффективного модуля деформации основания вызывает существенное увеличение критической силы.

5. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ РИСКА

Для определения вероятности оползня необходимо установить те начальные и граничные условия, которые отвечают началу этого явления. Сделать это очень трудно, но в этом направлении следует работать. Главным является правильное определение поверхностей скольжения. Для частично водонасыщенных грунтов еще недостаточно выяснены все процессы, связанные с потерей устойчивости. Главным фактором, определяющим задачу устойчивости грунтов в естественном состоянии, является выяснение того, какое влияние оказывает дилатансия. Большинство дилатирующих глин растрескивается и при этом происходит снижение сопротивления сдвигу.

Решение задачи устойчивости склонов существенным образом зависит от правильной оценки геологических условий. Для того, чтобы выяснить вопрос о надежности склона, надо ответить раньше на следующие вопросы: 1) где возможно обрушение, 2) когда оно может произойти, 3) какой объем имеет неустойчивая область, 4) какие условия соответствуют ожидаемому движению. Особое внимание надо обратить на сложность геологического профиля, затем организовать предварительные систематические наблюдения за напряженным состоянием и деформациями откоса как на поверхности, так и в глубине. Предвестником оползня является образование трещин и большие смещения поверхности. Для успешного предсказания времени обрушения необходимо иметь натурные наблюдения за изменением напряжений, порового давления и смещения поверхности и перемещений по глубине. Обработка данных наблюдений должна проводиться с учетом теории риска. В зависимости от натурных условий геологического профиля необходимо учитывать два возможных типа оползней. Ес-

ли толщина мягкого слоя мала по сравнению с длиной склона, то происходит оползень по плоскости скольжения по плотной породе. Если же плотная порода расположена глубоко, то происходит вращение массы грунта в оползне, образуются отдельные крупные блоки. Характерной особенностью оползней выемок является пространственный тип обрушения. Основным средством защиты откосов от оползней является снижение порового давления путем устройства дренажа, а также устройство подпорных стен и анкеровка.

Обычно для определения устойчивости откосов сравнивают эффективные напряжения. Однако следует учитывать, что после устройства выемки величина порового давления изменяется в связи с понижением уровня грунтовых вод. Как правило, на графике σ' — t кривая понижается. Что касается естественных откосов, то оценка их устойчивости является очень трудной проблемой и для ее разрешения необходимо проведение глубоких теоретических исследований и большого числа тщательно поставленных экспериментов.

В основу излагаемого метода положен статистически обоснованный неизбежный риск, которому подвергается откос или склон в данных условиях. Для оценки степени риска устанавливается отрезок времени, в течение которого должна быть обеспечена устойчивость откоса. Вторым фактором является категория склона, которая устанавливается в зависимости от величины ожидаемых расходов на восстановление тех разрушений, которые могут произойти в результате оползня. Как правило, повышение риска приводит к снижению расходов на мероприятие по укреплению склона, но может повлечь возникновение оползня спустя более короткий интервал времени. Для отдельных участков склона ожидаемый риск будет различным, для получения одинакового риска следует распределить искусственное укрепление склона по оптимальной схеме. Для этого составляется целевая функция, и обычными приемами оптимизации определяются необходимые расходы на работы по укреплению склона.

Изучение задачи об устойчивости склонов показывает, что вопросы теории еще недостаточно разработаны, хотя имеются указания на то, что явление дилатансии в данном случае имеет существенное значение. Отмечаются два типа естественных оползней: 1) скольжение по плоскости, параллельной поверхности склона, или 2) скольжение по криволинейной поверхности, сопровождающееся вращением частиц грунта. Этот случай был нами рассмотрен ранее. На критерий устойчивости оказывает существенное влияние величина порового давления. В процессе движения оползня отмечается изменение ускорений и величины коэффициента трения между грунтовой массой оползня и поверхностью скольжения. При переходе на горизонтальный участок движения оползня наблюдается увеличение коэффициента трения. Это явление требует проверки и дополнительного изучения.

Все изложенное указывает на то, что наиболее рациональным методом для определения коэффициента надежности откоса следует признать статистический способ расчета с использованием теории риска.

6. РИСК И НАДЕЖНОСТЬ ОТКОСА

За последнее время в практику расчета надежности все чаще вводится статистическое понятие о неизбежном риске, которому подвергается объект в условиях его эксплуатации. Понятие «риск» будем характеризовать величиной статистической вероятности того, что откос при ($N=1$) изменении данного критерия потеряет устойчивость, хотя при N изменениях этого параметра статистический ансамбль,

составленный из этих объектов, остается устойчивым. В соответствии с этим определяется функция риска $r(N)$, представляющая собой вероятность потери устойчивости откоса в статистическом ансамбле при N -ом изменении параметра, то есть $r(N)$, поделенную на число объектов $L(N)$, сохранивших устойчивость в этом ансамбле при N -ом цикле изменения параметра

$$r(N) = \frac{L(N)}{L(N)}, \quad (20)$$

учитывая, что $L(N) = -dL(N)$, получим:

$$r(N) = -\frac{1}{L(N)} \frac{dL(N)}{dN} = \frac{d}{dN} \log L(N), \quad (22)$$

Зависимость между функцией надежности $L(N)$ и функцией риска $r(N)$ получается путем интегрирования уравнения (22)

$$L(N) = \exp\left(-\int_0^N r(z) dz\right). \quad (23)$$

После подстановки пределов переменное интегрирования „ z “ исключается, это позволяет определить надежность как функцию числа (N) , характеризующую число изменений критерия.

При однократном изменении критерия устойчивости до предельного значения функции риск превращается в постоянное число, которое не зависит от времени эксплуатации. Однако при циклическом изменении критерия, которое возникает в натурных условиях, функция риска увеличивается с «возрастом». Очень часто возникает комбинированный случай, и поэтому величина риска может быть определена как сумма:

$$r(N) = r_0 + r_1(N). \quad (24)$$

Подставляя $r(N)$ из формулы (24) в формулу (23) и выполняя интегрирование, получим:

$$\begin{aligned} L(N) &= \exp\left\{-\int_0^N [r_0 + r_1(z)] dz\right\} = \exp\left[-\left[(Nr_0) + \right.\right. \\ &\quad \left.\left. + \int_0^N r_1(z) dz\right]\right], \end{aligned}$$

но $\exp\left(-\int_0^N r_1(z) dz\right) = L_1(N)$, поэтому:

$$L(N) = \exp(-Nr_0) - L_1(N). \quad (25)$$

По формуле (25) представляется возможным вычислить надежность сложного откоса, опираясь на величину риска $r(N)$, который должен быть установлен экспериментально, опираясь на статистические данные, накопленные путем наблюдений над состоянием откосов. Хотя в

в этом направлении ведутся работы, тем не менее наблюдений имеется недостаточно, и поэтому величины r_0 и $r_1(N)$ пока придется определять путем использования данных, полученных в других областях.

При решении задачи об устойчивости откоса будем определять тот риск, который возникает в результате сокращения мероприятий по его укреплению. Риск определяется на основе обработки статистическими методами большого числа наблюдений. Величина риска зависит от многих факторов. Как правило, повышение величины риска приводит к снижению расходов на создание укреплений откоса. Но вместе с тем это повышение может повлечь за собой потерю устойчивости откоса в более короткий срок. Поэтому определение принимаемой величины риска является весьма ответственной задачей, которая может быть правильно решена только путем проведения глубокого статистического анализа. Функциональная зависимость между величиной риска и ожидаемой выгодой выражается нелинейным законом.

Рассмотрим подробнее физический смысл числового выражения риска. Наиболее полные статистические данные имеются для риска, которым характеризуются несчастные случаи в разных областях производства. Так, например, риск, характеризуемый числом 10^{-3} случаев на одного человека в год, является совершенно неприемлемым, хотя в отдельных видах профессионального спорта он возникает, но тогда принимают срочные меры по снижению риска. Уровень риска 10^{-4} требует принятия мер и может быть принят только в том случае, если другого выхода нет. Для американских условий риск в автомобильных авариях достигает уровня $2,8 \cdot 10^{-4}$. Но уже уровень риска 10^{-5} соответствует естественным случайным событиям, как, например, несчастные случаи при купании в море, для которых риск исчисляется в $3,7 \cdot 10^{-5}$. Несчастные случаи, обусловленные риском 10^{-6} , относятся к такому уровню, на который имеется более спокойная реакция, так как считается, что избежать этот риск может каждый, соблюдая элементарные правила предосторожности; применительно к откосам величина риска может быть вполне определено установлена для каждого случая с учетом срока эксплуатации и значения общей устойчивости всего откоса, а также стоимости и срока восстановления и т. д.

Последствия, возникающие в результате потери устойчивости откоса, целесообразно сравнить с теми, которые возникают в других областях. Например, очень часто для оценки риска принимается частота возникновения разрушения, то есть число случаев разрушения откоса плотин в год и число несчастных случаев, которые вызваны этой аварией.

Подробный анализ разрушения плотин показывает, что нет оснований принимать для плотин в целом меньший риск, чем для других событий. Однако в плотинах и других гидротехнических сооружениях отдельные конструкции имеют сокращенный срок эксплуатации и стоимость их восстановления дешевле, поэтому для этих конструкций риск может быть повышен.

7. ПРИНЦИП СБАЛАНСИРОВАННОГО РИСКА

Как известно, в состав крупных гидротехнических узлов входят весьма ответственные объекты, как, например, плотины и менее существенные—здания, трубопроводы и т. д. Для каждого типа объектов получается различная степень ответственности в случае аварии. Однако для расчетов желательно установить для всех объектов одинаковую величину риска, поэтому для каждого объекта устанавливается категория, отражающая его значение с точки зрения возможных

последствий при его разрушении. Для зданий указанные категории устанавливаются в зависимости от среднего числа людей, ежедневно находящихся в здании и подвергающихся риску. Для гидротехнических сооружений такой подход будет недостаточно правомерным. При разрушении плотины риску будут подвергаться люди, находящиеся на значительном расстоянии от плотины, ввиду возникновения зоны затопления. Также необходимо учитывать срок службы каждого объекта, так как при малом сроке службы за этот период разрушение не произойдет, и вероятный риск значительно снижается. Для объекта с длительным сроком службы возникает большая вероятность того, что за этот период произойдет авария, и поэтому для таких объектов расчетная интенсивность внешних воздействий должна быть повышена при сохранении принятой степени риска. Принцип сбалансированного риска требует того, чтобы все объекты, входящие в состав гидротехнического узла, проектировались на одинаковую степень риска. Поэтому надежность каждого объекта при постоянном риске для всего гидротехнического узла будет различной, она зависит от срока службы, расходов на восстановление и показателя значимости объекта. Применение сбалансированного риска требует, чтобы при проектировании каждого объекта была бы определена расчетная интенсивность внешнего воздействия с учетом тех требований, которые были сформулированы выше и которые обеспечивают получение одинаковой степени риска всех объектов гидротехнического узла. Применим этот принцип к оценке устойчивости откоса, для которого ожидаемая поверхность скольжения представляет собой плоскость, параллельную поверхности откоса, и за основной параметр, характеризующий устойчивость откоса, будет принята интенсивность переувлажнения и повышение порового давления. Как известно, по высоте откоса величина порового давления изменяется, и поэтому потеря устойчивости откоса произойдет, если переувлажнение будет на вполне определенном участке откоса. Поэтому на этом участке должны быть в первую очередь и в большем объеме проведены мероприятия, способствующие снижению переувлажнения. Для других участков откоса эти мероприятия могут быть выполнены в меньшем объеме. При этом можно сделать так, что риск будет одинаковым для обоих участков откоса. При таком подходе к решению задачи о расходах на укрепление откоса против потери устойчивости приходится каждый участок откоса рассчитывать на соответствующую этому участку возможную интенсивность внешнего воздействия (в данном случае переувлажнение) и находить экономически наиболее рациональное решение.

8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ОПОЛЗНЯ

Для определения расчетной интенсивности оползня существенное значение имеет величина так называемого периода повторяемости. Для сильных оползней период повторяемости больше, чем для слабых, поэтому вероятность возникновения сильного оползня и разрушения объекта с малым сроком эксплуатации будет невелика, соответственно уменьшается и степень риска. Расчет целесообразно выполнять на два уровня интенсивности; во-первых, следует оценить наибольшую возможную интенсивность и затем наиболее вероятную интенсивность. При одинаковой степени риска для каждого объекта, расположенного в пределах ожидаемого оползня, вычислим расчетную интенсивность по величине ожидаемой выгоды. Поэтому целевую функцию запишем так:

$$[U] = E[B] - E[C] - E[D], \quad (26)$$

$[ED]$ —обобщенная ожидаемая стоимость повреждений;

$E[C]$ —обобщенная ожидаемая первоначальная стоимость сооружения;

$E[B]$ —обобщенный ожидаемый доход от эксплуатации сооружения.

Первоначальную стоимость определим как ожидаемую детерминистическую величину по формуле:

$$C = A_0 + A_1 Y_s^n \quad (27)$$

A_0 —стоимость сооружения без расходов на укрепление откоса;

A_1 —коэффициент стоимости расходов на мероприятие по усилению откоса;

Y_s^n —расчетная интенсивность оползня.

Для вычисления ожидаемых обобщенных доходов от эксплуатации сооружения используем формулу:

$$E[B] = \int_0^{\infty} b(t) L(t) e^{-\gamma t} dt, \quad (28)$$

$b(t)$ —доход за единицу времени;

$L(t)$ —вероятность того, что конструкция будет работать в момент времени t ;

γ —относительный процент погашения расходов.

Из формулы (28) видно, что $E(B)$ будет величиной постоянной, равной B . Величину ожидаемой обобщенной стоимости повреждений определим по формуле:

$$E(D) = \int_0^{\infty} D_0 v(Y_s) e^{-\gamma t} dt = \frac{D_0}{\gamma} v(y_s), \quad (29)$$

D_0 —стоимость повреждений;

$v(y_s)$ —среднеквадратичное число разрушений за единицу времени.

Для определения расчетной интенсивности оползней при землетрясении вычислим производную $d(U)dy_s$ из формулы (26) и приравняем ее к нулю. Предварительно подставим в формулу (26) входящие в нее величины из формул (28) и (29), тогда получим:

$$E(U) = B - C \frac{D_0}{\gamma} v(y_s). \quad (30)$$

Продифференцируем эту формулу и приравняем к нулю производную, тогда получим:

$$\frac{dC}{dy_s} = - \frac{D_0}{\gamma} - \frac{dv(y_s)}{dy_s}. \quad (31)$$

Учитывая, что:

$$v(y_s) = \frac{1}{T_s} = k y_s^{-r},$$

где T_s — период повторяемости оползней;
 k и r — численные коэффициенты, найдем

$$\frac{d\psi(y_s)}{dy_s} = -rky_s^{r-1} \text{ и } \frac{dC}{dy_s} = nA_1y_s^{n-1}.$$

Подставляя в формулу (31), получим:

$$nA_1y_s^{n-1} = rky_s^{r-1} \cdot \frac{D_0}{\gamma}. \quad (32)$$

Из этого уравнения найдем

$$y_s = \left[\frac{rKD_0}{nA_1} \right] \frac{1}{r+n}. \quad (33)$$

Упрощенную графическую схему определения y_s легко получим. Из формулы (33) видно, что с увеличением интенсивности оползня или стоимости повреждений, им вызванных, то есть с увеличением K или D_0 , увеличивается расчетная интенсивность, увеличение же расходов на мероприятия по укреплению откоса, то есть увеличение n и A_1 , вызывает снижение расчетной интенсивности.

При решении задач оптимизации для реального сооружения приходится считаться с тем, что кроме основных ответственных зданий оползень может повредить также элементы оборудования, вмонтированного в это сооружение. Кроме того, в каждом сооружении имеются второстепенные элементы, повреждение которых при оползнях не является опасным и они могут быть быстро восстановлены. Для таких элементов расчетная интенсивность может быть ниже той, которая установлена для основных несущих конструкций. Таким образом, первоначальная стоимость каждой такой конструкции или субсистемы будет выражаться формулой (27), в которую входят соответствующие каждой субсистеме параметры, и формула (27) будет состоять из нескольких похожих выражений, включающих разные параметры.

$$\left. \begin{array}{l} C_1 = A_0 + A_{11}y_1^{n_1} \\ C_2 = A_{02} + A_{12}y_2^{n_2} \\ C_i = A_{0i} + A_{1i}y_i^{n_i} \end{array} \right\} \quad (34)$$

Теперь формула (30) принимает такой вид:

$$E[U] = B - \sum C_i - \sum \frac{D_i[\psi(y_i) - \psi(y_k)]}{\gamma}. \quad (35)$$

Дифференцируя уравнение (35) по каждому y_i и приравнивая производные нулю, получим систему уравнений для определения расчетных интенсивностей для каждой субсистемы. Так, например, для сооружения, состоящего из двух систем, то есть из основной несущей конструкции, которая должна сохраняться, и из второстепенной субсистемы в виде оборудования, уравнение (35) будет записано так:

$$E[U] = B - (A_{01} + A_{02}) - (A_{11}y_1^{n_1} + A_{12}y_2^{n_2}) - \\ - \frac{1}{\gamma} \{ D_1[\psi(y_1) + D_2[\psi(y_2) - \psi(y_1)] \}.$$

Вычисляем частные производные $E[U]$ по y_1 и y_2 и, приравнивая их к нулю, получим два уравнения:

$$\frac{\partial E[U]}{\partial y_1} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial E[U]}{\partial y_2} = 0,$$

решая которые, относительно y_1 и y_2 получим

$$y_1 = \left[\frac{r}{n} \cdot \frac{(D_1 - D_2)K}{\gamma A_{11}} \right]^{\frac{1}{n_1+r}} \quad \text{и} \quad y_2 = \left[\frac{r}{n_2} \cdot \frac{D_2 K}{\gamma A_{12}} \right]^{\frac{1}{n_2+r}}. \quad (36)$$

Степень риска, которая характеризуется коэффициентом y , принимается одинаковой для обоих объектов.

9. ПРИМЕР

Рассмотрим два здания, расположенные в районе, который имеет откос, подверженный воздействию оползней. Основным зданием является 2-этажный дом, вторым зданием является одноэтажный гараж. Для каждого из этих зданий определим расчетную интенсивность оползня по формуле (36). Период повторяемости оползня и степень риска для обоих зданий будем считать одинаковыми. Двухэтажное здание является более ответственным объектом, поэтому расходы на восстановление здания после разрушения в результате оползня могут быть больше первоначальных затрат на строительство, поэтому принимаем $D_1/A_{11}=25$. Второе здание, то есть одноэтажный гараж, потребует значительно меньших расходов на восстановление, поэтому $D_2/A_{12}=2,5$. Для других величин, входящих в формулу (36), получены следующие значения:

$$1/k=10^4 \quad \text{и} \quad r=2.$$

По формулам (36) получим:

$$\begin{aligned} \text{для двухэтажного здания---} &y_1 = 0,320; \\ \text{для гаража---} &y_2 = 0,180. \end{aligned}$$

$$\text{То есть } y_2/y_1 = \frac{0,180}{0,320} \approx 0,60.$$

Это значит, что при одинаковом риске гараж можно рассчитывать на интенсивность оползня, которая составляет всего 60% от той интенсивности, на которую рассчитано 2-этажное здание.

10. ДОСТОВЕРНОСТЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Разработанная теория сбалансированного риска позволяет оценить достоверность динамических характеристик слабых грунтов, положенных в основу расчета устойчивости основания. При этом представляется возможным наметить общую схему решения. Если динамические характеристики были определены экспериментально для данной строительной площадки путем проведения лабораторных и натурных испытаний, то по этим данным необходимо построить функции распределения и вычислить величину медианы R и сопротивления основания динамическим нагрузкам и найти дисперсию σ_2 ---соответствующую фактическому разбросу, имеющемуся в экспериментах [4].

По этим данным вычисляется стандарт отклонения δ_R . Риск вычисляем путем использования формулы (16). Из этой формулы видно,

Что риск зависит не только от стандарта отклонения, полученного от определения динамических характеристик основания, но также и от ожидаемого стандарта δ_s , соответствующего внешним сейсмическим силам.

В табл. 2 указаны значения риска в зависимости от обобщенного стандарта $\delta = \sqrt{\delta_R^2 + \delta_s^2}$. Стандарт δ_s внешних сил не зависит от динамических характеристик основания, поэтому представим δ в таком виде:

$$\delta = \delta_R \sqrt{1 + \left(\frac{\delta_s}{\delta_R}\right)^2} = \alpha \cdot \delta_R; \quad \alpha = \sqrt{1 + \left(\frac{\delta_s}{\delta_R}\right)^2}.$$

Коэффициент „ α “ зависит от динамических характеристик основания. Из табл. 2 видно, что δ изменяется в пределах от 5 до 12, это соответствует изменению α от $\alpha = \frac{5}{\delta_R}$ до $\alpha = \frac{12}{\delta_R}$. Вычислим величину „ δ “ при $\alpha=1$; $\delta=\delta_R$ — это соответствует данному внешнему воздействию. С уменьшением „ α “ обобщенный стандарт δ увеличивается, поэтому, согласно формуле (16) и данным табл. 2, риск уменьшается. Для определения максимального риска можно принять условие:

$$\delta = \delta_R.$$

Риск находим по табл. 2, в зависимости от $v_0 = \frac{R}{S}$ как отношение медиан сопротивления основания и внешних сил. Так, например, при $\vartheta_0=2$ и $\delta=12$ из табл. 2 имеем risk=10⁻², т. е. слишком велик и поэтому достоверность динамических характеристик является неудовлетворительной. Достоверность положенных в основу расчета динамических характеристик будет приемлемой, если risk=10⁻⁵. По таблице это соответствует значению $\delta=5$.

Таким образом, для оценки достоверности положенных в основу расчета динамических характеристик слабых грунтов необходимо построить их функции распределения и найти стандарт δ_R . Если при $\vartheta_0=2$ этот стандарт δ_R будет меньше 5, то статистическая достоверность динамических характеристик основания будет достаточной.

При проверке статистической достоверности динамических характеристик основания сложного объекта, состоящего из нескольких сооружений разной степени ответственности, рассчитанных с использованием сбалансированного риска, необходимо сделать анализ для каждого сооружения в отдельности. Для этого используется положенный в основу метода сбалансированного риска критерий одинакового риска для всех сооружений данного объекта. Это условие, как было указано в § 5, приводит к тому, что для каждого сооружения определяется своя расчетная величина внешних сил S_i .

Таким образом, коэффициент v_0 будет иметь разные значения для каждого сооружения: $v_{oi} = \frac{R}{S_i}$ за счет изменения S_i . Из табл. 2 видно, что риск повышается с уменьшением v_{oi} , поэтому наиболее невыгодный случай будет соответствовать:

$$(v_{oi})_{\min} = \frac{R}{(S)_{\max}},$$

Это получим при $(S)_{i,\max}$.

Из этих соображений приходим к выводу, что оценку статистической достоверности для динамических характеристик основания для сложного объекта следует определять по тому сооружению, для которого принята наибольшая расчетная интенсивность внешних сил.

11. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Подсчитываем величину риска, исходя из двух предположений: во-первых, допустим, что разрушение дамбы произошло за счет потери устойчивости основания. Величину риска получим из табл. 1 для $M=8$ и $\beta=1,4-r_1=10^{-4}$.

По шкале риска это значение находится на границе между естественным и умеренным риском, то есть если оценивать риск только путем определения потери устойчивости основания, то опрокидывания не должно произойти. Другой выход получим, если учтем совместное движение дамбы и основания (рис. 2), то есть риск определим по P_{kp}^0 . Из расчета получим величину параметра внешней нагрузки $S_0 \approx P_{kp}^0$ и величину параметра сопротивляемости системы, который снизился за счет влияния раскачивания дамбы: P_{kp} определим при $H/b=5$ по табл. 3 получим

$$P_{kp} = \eta P_{kp}^0 = 0,15 P_{kp}^0, \quad \eta = \frac{\eta \cdot P_{kp}^0}{P_{kp}^0} = \eta$$

для численного примера, приведенного в (3), величина $\eta=0,15$, тогда $r_{II}=10^{-1}$, то есть получаем очень большой риск, при котором устойчивость дамбы не обеспечивается.

Военно-инженерная Академия
им. Куйбышева.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болотин В. В. Статистическая теория сейсмостойких сооружений. Труды 2-го Международного конгресса по сейсмостойкости. Токио, 1960.
2. Медведев С. В., Синицын А. П. и др. Основные принципы расчета сейсмического риска. Труды IV симпозиума по инженерной сейсмологии. Изд. Акад. наук Болгарии, София, 1972.
3. Синицын А. П. Исследование опрокидывания сейсмостойких зданий. Труды VI симпозиума по сейсмостойкому строительству. Индия, т. I. Изд. Университета Рурка, 1978.
4. Цытович Н. А. Механика грунтов, Стройиздат, М., 1968.