

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОПОЛЗНЕВОГО СКЛОНА «ТЕКТОНИК»

Целью данных исследований является вероятностная оценка устойчивости геотехнического объекта на примере оползневого склона «Тектоник».

Решить вероятностную задачу устойчивости откоса в наиболее общем виде позволяет метод *прямых статистических испытаний (метод Монте-Карло)*. Метод Монте-Карло может быть использован для получения параметров распределения коэффициента устойчивости (математических ожиданий, средних квадратических отклонений и пр., установления плотности распределения вероятностей k_s) для выбранной поверхности скольжения. Согласно ранее выполненным исследованиям, в данном случае количество независимых статистических испытаний может быть ограничено 60-100 реализациями /1, 2/.

Что касается вида распределения вероятностей, то проведенные различными авторами вероятностные расчеты устойчивости методом Монте-Карло показывают, что расчетные распределения коэффициентов устойчивости грунтовых откосов достаточно хорошо аппроксимируются нормальным законом /3/.

Гипотеза о нормальном законе распределения как входных случайных величин (показателей свойств грунтов, параметров нагрузок), так и коэффициента устойчивости k_s позволяет применить для оценки параметров распределения k_s *метод статистической линеаризации* /4/. При этом, для выбранной поверхности скольжения достаточно одной численной реализации уравнения связи, по которому определяется коэффициент устойчивости. Однако особым достоинством метода линеаризации при решении поставленной задачи является возможность учета «вклада» изменчивости различных входных характеристик на изменчивость коэффициента устойчивости k_s и окончательные оценки вероятностей нарушения устойчивости.

Линеаризация осуществляется в окрестности математического ожидания. Параметры распределения k_s определяются следующими зависимостями:

математическое ожидание

$$M(k_s) \approx k_s \{M(x_1), M(x_2), \dots, M(x_n)\} ; \quad (1)$$

среднее квадратическое отклонение

$$\sigma(k_s) \approx \left(\sum_i^n [\partial k_s / \partial x_i]^2 \sigma^2(x_i) - 2 \sum_{i,j}^n ((\partial k_s / \partial x_i)(\partial k_s / \partial x_j) \sigma(x_i) \sigma(x_j) r(x_i, x_j)) \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где $k_s(M(x_1), M(x_2), \dots, M(x_n))$ – значение коэффициента устойчивости, полученное при математических ожиданиях (средних значениях) величин $x_1, x_2, \dots, x_n$; $\partial k_s / \partial x_i, \partial k_s / \partial x_j$ – частные производные функции k_s по характеристикам x_i и x_j в окрестности точки $(M(x_1), M(x_2), \dots, M(x_n))$; $\sigma(x_i)$ – среднее квадратическое отклонение (стандарт) величины x_i ; $r(x_i, x_j)$ – коэффициент корреляции величин x_i и x_j .

Объектом исследования был выбран оползень «Тектоник». Оползень ограничен с запада руслом реки Майлуу-Суу, с востока – водораздельным хребтом, с севера – зоной обвальных обрушений, с юга – оползневыми уступами и осыпями. Оползень сформировался на крутопадающем крыле антиклинальной складки и разгрузился 4 июля 1992 г. /5/.

Причиной оползания склона явилось сочетание неблагоприятных природных факторов: крутосклонность рельефа, наличие зоны тектонического нарушения, неглубокое залегание водоупора, высокая сейсмичность района, обильное выпадение осадков.

Мы имеем инженерно-геологическую модель с описанием геологии, структуры. Основные свойства грунтов оползневого склона «Тектоник»: плотность, влажность, консистенция, сцепление, угол внутреннего трения. Для выбора расчетных физико-механических свойств грунтов необходимо использование нормативных подходов с учетом имеющихся данных лабораторных исследований грунтов.

Учитывая коэффициент пористости и показатель консистенции, по СНиП 2.02.02-8 «Основания гидротехнических сооружений» /6/ определили нормативные значения прочностных характеристик грунтов.

За математическое ожидание свойств грунтов приняты их нормативные значения. Задаемся коэффициентом вариации для данных грунтов по механическим характеристикам – $v=0.3$. Расчет коэффициента устойчивости по математическому ожиданию C и ϕ был выполнен по методу Morgenштерна. Определяем стандартное отклонение σ :

$$\sigma = v \times \bar{A}, \quad (3)$$

где $\bar{A}$ – среднее значение характеристики.

Таблица 1

Стандартные отклонения по С и φ

Слои	σ (С), кПа	$\sigma(\varphi)$, град.
Суглинок лессовидный	9,3	7,2
Глина 1	20,4	6
Глина 2	17,1	5,4

Вероятностная оценка устойчивости оползневого склона «Тектоник» методом Монте-Карло производилась путем случайного разыгрывания случайных величин С и φ . При этом, случайным образом менялись значения С и φ всех трех слоев одновременно.

На рис. 1 приводится разрез оползневого склона с результатом расчета математического ожидания K_y склона на программе Slide.

Был произведен вычислительный эксперимент на основе генератора случайных чисел, выполненного в среде Excel. Было произведено 80 расчетов, в результате чего выяснилось, что вероятность обрушения склона $P(K_y < 1)$ оказалась равной 0,1625.

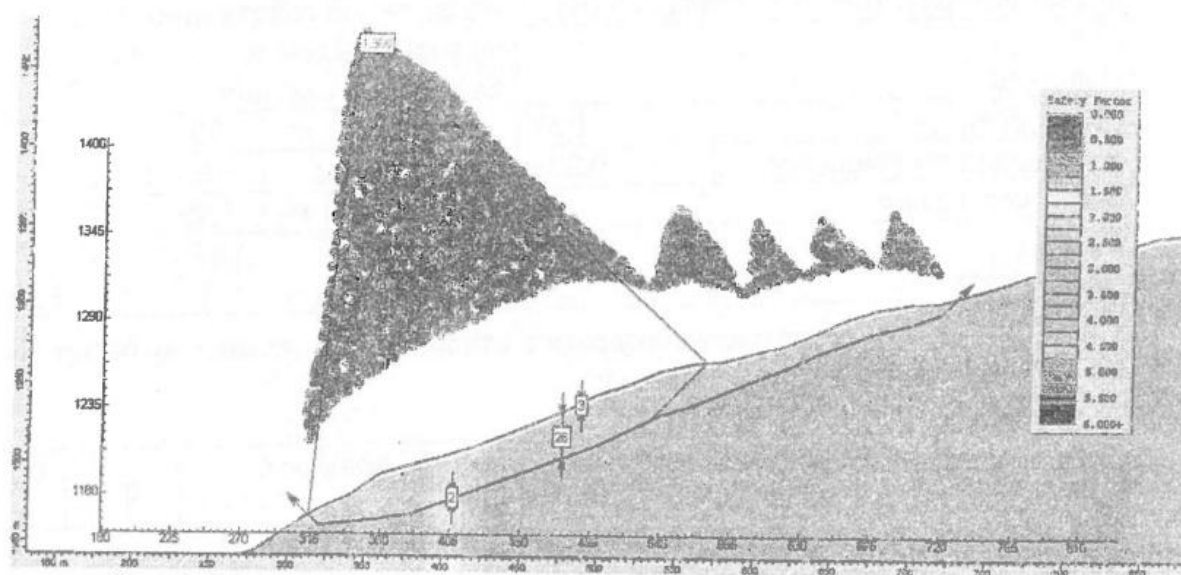
Рис. 1 Результат расчета математического ожидания K_y склона

Таблица 2

Описательная статистика для K_y

Описательная статистика для K_y						
	Среднее	1.272	Медиана	1.312	Асиммет.	-0.148
	Стандарт.	0.273	Мода	1.315	Мин.	0.598
	Диспер.	0.074	Эксцесс	-0.088	Мак.	1.834
	Число	Вероятн.	Вероятн.			
	$K_y < 1$	$K_y < 1$	$K_y > 1$			
	13	0.1625	0.8375			

Используя критерии χ^2 и Колмогорова-Смирнова, определили, что значения коэффициентов устойчивости подчиняются нормальному закону распределения.

Далее была произведена *интервальная оценка* математического ожидания коэффициента устойчивости, стандартного отклонения и вероятности устойчивости склона. Интервальная оценка необходима для определения надежности определяемых параметров.

Таблица 3

Результаты интервальной оценки параметров распределения K_y

Расчет доверительного интервала $M(K_y)$		при неизвестной дисперсии генеральной совокупности по распределению Стьюдента находим t			
Известны					
средн. $K_y =$	1,27	для	$n =$	79	
исправл.среднеквад.откл.	0,273	уровень знач.		0,05	
число испытаний	80		$t =$	1,99	
		$M(K_y)$			
Надежность	0,95	1.21	<	)	< 1,33
Расчет довер. интервала среднеквадратич. отклонения σ нормально распр. K_y по исправл. среднеквад.отклонению S					
Известны		по табл.прилож.4 находим q		$q =$	0,16 1
число испытаний	80	для	$n =$	80	
Надежность	0,95	надежности		0,95	
		0,31			
исправл. среднеквад. откл.	0,273	0,229	<	σ	< 6
Интервальная оценка вероятности $K_y < 1$ по результатам расчета K_y методом Монте-Карло					
Известно		опред. аргумент t функции Лапласа			0,475

			$\Phi(t) =$				
число испытаний		80				$t =$	1,96
число $K_y < 1$		13	$n/(t^2+n) =$	0,954	$w(1-w)/n =$	0,0017	$W =$
Надежность		0,95	$T^2/2n =$	0,024	$(t/2n)^2 =$	0,00015	0,163
			0,0975	<	$P(K_y) < 1$	<	0,258

Согласно методу статистической линеаризации математическое ожидание коэффициента устойчивости определяется из условия, что входные величины C и φ установлены на значениях математических ожиданий (средних значениях).

В табл. 4 приводятся результаты расчетов по методу статистической линеаризации.

В табл. 5 приводится анализ результатов расчетов, выполненных методом линеаризации. Анализ показал следующее. Значение математического ожидания коэффициента устойчивости по методу линеаризации 1,353 выходит за границы интервальной оценки. Значение стандарта $\sigma(K_y)$, полученного путем увеличения входных факторов (C и φ) на величину их стандартного отклонения от математического ожидания, оказалось равным 0,26. Обозначим его $+\sigma(K_y)$, которое отвечает условию интервальной оценки стандартного отклонения.

Значение стандарта $\sigma(K_y)$, полученного путем уменьшения факторов (C и φ) на величину их стандартного отклонения от математического ожидания, оказалось равным 0,28. Обозначим его $-\sigma(K_y)$, которое также отвечает условию интервальной оценки стандартного отклонения.

Что касается вероятности обрушения склона $P(K_y < 1)$, то здесь отмечается следующее. Вероятность обрушения, полученная при $+\sigma(K_y)$, составила $P(K_y < 1) = 0,087$, что не отвечает условию интервальной оценки вероятности обрушения склона. Тот же параметр при $-\sigma(K_y)$ составил $P(K_y < 1) = 0,103$. Данное значение находится в допустимых пределах.

Таблица 4

Результаты расчетов по методу статистической линеаризации

Результаты расчетов методом линеаризации									
Суглинок лессовидный				Глина-1		Глина-2			
	C	Fi		C	Fi	C	Fi		
	кПа	град.		кПа	град.	кПа	град.		
M(x)	31	24		68	20				
$\sigma(x)$	9.3	7.2		20.4	6	57	18		Slide
1	31	24		68	20	17.1	5.4		Ky
2	31	24		68	20	57	18		1.353
3	21.7	24		68	20	57	18		1.353
4	31	31.2		68	20	57	18		1.352
5	31	16.8		68	20	57	18		1.352
6	31	24		38.4	20	57	18		1.353
7	31	24		47.6	20	57	18		1.384
8	31	24		68	20	57	18		1.321
9	31	24		68	14	57	18		1.39
10	31	24		68	20	57	18		1.283
11	31	24		68	20	74.1	18		1.455
12	31	24		68	20	39.9	18		1.25
13	31	24		68	20	57	23.4		1.587
				68	20	57	12.6		1.105
"+" σ "	0	0.000138889		0.0015608	0.0055567				
"-" σ "	0.000107527	0		0.001568627	0.01166667				
	$(\sigma F/\sigma C)^2 \sigma^2(C)$	$(\sigma F/\sigma \varphi)^2 \sigma^2(\varphi)$		$(\sigma F/\sigma C)^2 \sigma^2(C)$	$(\sigma F/\sigma \varphi)^2 \sigma^2(\varphi)$				$\sigma(Ky)$
	0	1E-06		5.00096	0.0045				0.23
	1E-06	0		0.00102	1.353				
Окончательно получаем				M(Ky)=					
				$\sigma(Ky)=$	0.25				
				$\sigma(Ky)=$	0.28				
				P(Ky<1)=	0.087				
				P(Ky<1)=	0.103				

Таблица 5

**Анализ результатов расчетов, выполненных методом статистической
линеаризации**

Результаты по методу линеаризации	Интервальная оценка по методу Монте-Карло	
$M(K_y)=1,353$	1,21	1,33
$+ \sigma(K_y)=0,26$	0,23	0,32
$- \sigma(K_y)=0,28$		
$+ P(K_y < 1)=0,087$	0,097	0,26
$- P(K_y < 1)=0,103$		

Выводы

1. При вероятностной оценке устойчивости необходимо проводить интервальную оценку, что дает право исследователю самому выбирать то значение вероятности, которое он считает нужным.
2. Сравнительный анализ результатов вероятностной оценки устойчивости оползневого склона «Тектоник» с помощью двух методов показал, что существует сходимость результатов, но не по всем параметрам. Для важных народнохозяйственных объектов рекомендуется использование метода Монте-Карло как основополагающего в вероятностном анализе.

Список литературы

1. Пепоян В. С. Исследование устойчивости откосов грунтовых плотин методом Монте-Карло // Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. – М., 1987. – Т.202. – С. 35-38.
2. Расчет устойчивости откосов методов Монте-Карло / Н.С.Розанов, Л.В.Горелик и др. // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике: Оценка и обеспечение надежности гидротехнических сооружений / ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – М., 1981. – С. 55-58.
3. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1983.
4. Torgoev I.A., Aleshin Y.G., Meleshko A.B., Havenith H.B. Hazard mitigation for landslide dams in Mailuu-Suu valley / Security of Natural and Artificial Rockslide Dams. – Bishkek, 2004 – p.p. 183-188.
5. Алешин Ю.Г. – Отчет. исп. Отчет об инженерно-геологических изысканиях на участие оползня «Тектоник», угрожающем хвостохранилищу №3 - Майлуу-Суу – Бишкек, 2004 – 65с., Приложение 16. – Фонды ОРП МЧС КР.
6. СНиП 2.02.02-85. Основания гидротехнических сооружений.