

DOI: 10.11779/CJGE201903002

考虑堆石料软化的坝坡随机地震动力稳定分析

孔宪京^{1, 2}, 庞锐^{1, 2}, 徐斌^{1, 2}, 周扬^{1, 2}, 邹德高^{1, 2}

(1. 大连理工大学建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 海岸和近海工程国家重点实验室(大连理工大学), 辽宁 大连 116024)

摘要: 地震尤其强震作用下, 土石坝筑坝堆石料会逐渐呈现出软化特性, 影响坝坡安全。为有效评估堆石料软化对坝坡稳定性的影响, 结合地震动随机性, 考虑不同地震强度水平, 提出了基于等价极值分布和广义概率密度演化方法的坝坡安全概率分析方法, 并基于坝坡稳定最小安全系数、安全系数超限累积时间、累积滑移量 3 个物理量, 对 242 m 高的面板堆石坝进行随机动力响应分析和概率可靠度分析。结果表明: 地震作用过程中, 随着地震强度的增加, 考虑软化与不考虑软化的计算结果差别逐渐增大, 因为地震作用下, 堆石料软化特性逐渐显现; 同时, 在地震激励下, 堆石料软化是一个渐进过程。因此, 考虑坝坡堆石料软化, 对高土石坝抗震性能分析具有重要的意义。此外, 单纯从最小安全系数角度考察土石坝稳定性, 是不合理的, 需要结合安全系数超限累积时间和累积滑移量, 全面评估坝坡的安全性。提出的随机概率分析方法, 可以对土石坝坡的可靠度给出较为准确的评价。

关键词: 高土石坝; 堆石料软化; 随机地震; 坝坡稳定; 概率分析

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)03-0414-08

作者简介: 孔宪京(1952-), 男, 江苏南京人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土地震工程和高土石坝抗震研究。E-mail: kongxj@dlut.edu.cn。

Stochastic seismic stability analysis of dam slopes considering softening of rockfills

KONG Xian-jing^{1, 2}, PANG Rui^{1, 2}, XU Bin^{1, 2}, ZHOU Yang^{1, 2}, ZOU De-gao^{1, 2}

(1. School of Hydraulic Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The rockfills of earth-rockfill dams gradually show softening characteristics subjected to earthquakes, especially strong ones, which will affect the safety of dam slopes. In order to evaluate the effect of rockfill softening on the stability of dam slopes, a probability analysis method of dam slope safety based on the equivalent extreme-value distribution and probability density evolution method is proposed considering the stochastic earthquake excitation and different earthquake levels. A 242-m CFRD is used to perform stochastic dynamic response analysis and probabilistic reliability analysis based on three physical parameters of dam slope stability, the minimum safety factor, cumulative time of safety factor ($F_s < 1.0$) and cumulative slippage. The results show that the difference between considering softening and without considering softening gradually increases with the increase of earthquake intensity, and the attributes to the softening characteristics of rockfills are gradually revealed during the earthquake. Meanwhile, the softening is a gradual process. Hence, it is of great significance to analyze the seismic performance of the high earth-rockfill dams considering softening of rockfills. Moreover, it is unreasonable to study the stability of earth-rockfill dams only from the point of the minimum safety factor, and it is necessary to combine the cumulative time of $F_s < 1.0$ and cumulative slippage to fully evaluate the safety of dam slope. The proposed stochastic probabilistic analysis method can give a more accurate evaluation of the reliability of high earth-rockfill dam slopes.

Key words: high earth-rockfill dam; softening of rockfill; stochastic earthquake; stability of slopes; probability analysis

0 引言

从众多的工程案例^[1-2]、动力数值模拟^[3-4]、动力模型试验^[5-6], 可以明显看到, 滑坡是土石坝地震破坏的主要形式之一。因此, 中国水工抗震规范明确要求, 土石坝抗震计算应包括抗震稳定计算, 并指出应从滑动面的位置、深度、范围及稳定指标超限持续时间和

程度等综合评判坝坡的抗滑稳定性^[7], 因此, 目前众多学者除采用传统安全系数法评价坝坡稳定之外, 还

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404904); 国家自然科学基金项目(51779034, 51679029, 51508071)

收稿日期: 2018-02-02

*通讯作者(E-mail: xubin@dlut.edu.cn)

采用安全系数小于 1.0 的累积时间和累积滑移量对坝坡稳定进行评价^[8-11]。此外, 研究表明, 在地震尤其强震作用下, 坝体堆石料会逐渐呈现应变软化特性^[12], 这一特性往往加剧坝坡的渐进破坏。

中国西部地区海拔高, 水能资源丰富, 因此大批高土石坝工程在此建设, 如水布垭 (233 m)、江坪河 (219 m)、猴子岩 (219.5 m)、糯扎渡 (261.5 m)、长河坝 (240 m) 和两河口 (293.5 m) 等。但这些地区地震烈度高, 这些高土石坝在强震作用下的坝坡安全性, 值得关注; 强震作用下堆石料软化特性对坝坡稳定性的影响, 值得研究。周扬等^[12]确定性地对比了考虑软化与不考虑软化情况对坝坡稳定性的影响, 初步认为堆石料的软化增加坝坡失稳可能性。但是确定性的分析不能够全面反映地震动的随机性以及不同地震作用对坝坡稳定性的影响, 因此, 有必要从随机观点和概率角度深入研究堆石料软化对坝坡抗震安全性的影响。

本文考虑堆石料的软化特性, 引入随机地震激励作用, 构造虚拟随机过程和相应的广义概率密度演化方程, 采用等价极值分布的概率分析方法, 基于安全系数、安全系数小于 1.0 累积时间、累积滑移量 3 个物理量对坝坡稳定进行安全评价。

1 等价极值分布及广义概率密度演化

等价极值分布方法并结合广义概率密度演化求解, 自李杰等^[13]提出后, 为工程结构的可靠度计算和概率分析建立了一套完整的体系。

地震动作用下土石坝的非线性动力响应分析方程可表示为

$$\bar{M}\ddot{X}(t)+C\dot{X}(t)+KX(t)=-\bar{M}\ddot{X}_g(\boldsymbol{\theta}, t)。(1)$$

式中 \bar{M} , C 和 K 分别是质量、阻尼和刚度矩阵; $\ddot{X}(t)$, $\dot{X}(t)$ 和 $X(t)$ 分别是加速度、速度和位移向量; $\ddot{X}_g(\boldsymbol{\theta}, t)$ 是随机地震加速度, 可由谱表达-随机函数方法生成; $\boldsymbol{\theta}$ 是随机向量。

考虑地震动随机性, 假设 $\boldsymbol{\theta}=(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s)$ 是地震动函数中的随机变量, s 是地震动随机变量的个数。为方便计, 式 (1) 的解答写为

$$X(t)=H(\boldsymbol{\theta}, t)。(2)$$

$\mathbf{Z}=(Z_1, Z_2, \dots, Z_m)^T$ 是土石坝坝坡稳定分析感兴趣的物理量 (例如安全系数等), m 为感兴趣的物理量个数。则式 (1) 可表达为

$$\mathbf{Z}(t)=\mathbf{H}_Z(\boldsymbol{\theta}, t)。(3)$$

对于方程 (1) 描述的随机动力系统, 在给定时间区间 $[0, T]$ 内的极值依赖于随机参数 $\boldsymbol{\theta}$ 。则地震作用下 $\mathbf{Z}(t)$ 的极值可表示为

$$Y_Z=\max\{H_Z(\boldsymbol{\theta}, T)|, t \in [0, T]\}。(4)$$

对于给定的 $\boldsymbol{\theta}$, Y_Z 是存在且唯一的, 即表达式为

$$Y_Z=W_Z(\boldsymbol{\theta}, T)。(5)$$

因此, 可以构造一个虚拟的随机过程

$$Q_Z(\tau)=Y_{\boldsymbol{\theta}}\tau=W_Z(\boldsymbol{\theta}, T)\tau。(6)$$

式中, τ 是一虚拟“时间参数”, 显然,

$$Q_Z(\tau)|_{\tau=0}=0, Y_Z=Q_Z(\tau)|_{\tau=1}。(7)$$

对式 (7) 关于 τ 求导, 有

$$\dot{Q}_Z=\frac{\partial Q_Z}{\partial \tau}=W_Z(\boldsymbol{\theta}, T)。(8)$$

$(Q(\tau), \boldsymbol{\theta})$ 构成一个概率保守系统, 其联合概率密度函数 $p_{Q\boldsymbol{\theta}}(q, \boldsymbol{\theta}, \tau)$ 的概率密度演化方程为

$$\frac{\partial p_{Q\boldsymbol{\theta}}(q, \boldsymbol{\theta}, \tau)}{\partial \tau}+W(\boldsymbol{\theta}, T)\frac{\partial p_{Q\boldsymbol{\theta}}(q, \boldsymbol{\theta}, \tau)}{\partial q}=0。(9)$$

其初始条件为

$$p_{Q\boldsymbol{\theta}}(q, \boldsymbol{\theta}, t)|_{t=t_0}=\delta(q)p_{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\theta})。(10)$$

$\delta(q)$ 为 Dirac 函数, 求解方程 (9) 及 (10), 可以得到

$$p_Q(q, \tau)=\int_{\Omega_{\boldsymbol{\theta}}} p_{Q\boldsymbol{\theta}}(q, \boldsymbol{\theta}, \tau)d\boldsymbol{\theta}。(11)$$

由式 (7) 进一步可知

$$p_{Y_Z}(y)=p_Q(q, \tau)|_{q=y, \tau=1}。(12)$$

结合确定性动力分析方法与单边差分格式的有限差分方法^[14], 可得到求取随机结构动力反应极值分布的数值解。

2 随机地震动的生成

随机动力分析和概率分析的首要步骤是生成随机地震动, 本文采取谱表达-随机函数方法生成非平稳的地震加速度时程^[15], 谱表示由如下公式模拟:

$$\ddot{X}_g(t)=\sum_{k=1}^N\sqrt{2S_{\ddot{X}_g}(t, \omega_k)\Delta\omega}[\cos(\omega_k t)X_k+\sin(\omega_k t)Y_k],(13)$$

$\{X_k, Y_k\} (k=1, 2, \dots, N)$ 是标准正交随机变量, N 一般取 1500, $\Delta\omega$ 通常为 0.15 rad/s。假设任意的两组标准正交随机变量 \bar{X}_n 和 $\bar{Y}_n (n=1, 2, \dots, N)$ 分别是两个相互独立的基本随机变量 θ_1 和 θ_2 的函数, 即随机函数

$$\left. \begin{aligned} \bar{X}_n &= \text{cas}(n\theta_1), \\ \bar{Y}_n &= \text{cas}(n\theta_2), \end{aligned} \right\} (14)$$

随机变量 θ_1 和 θ_2 可由数论法^[16]生成, 本文基于最新的水工抗震规范谱^[7]生成 233 条加速度时程样本, 每组加速度时程峰值加速度 PGA 分别为 0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g, 0.5g, 用于有限元动力计算, 共 1165 个计算工况, 以 0.2g 峰值加速度为例, 其加速度时程样本均值、标准差和反应谱如图 1 所示, 样本值和目标值的较小差别表明选取样本的统计意义明显。

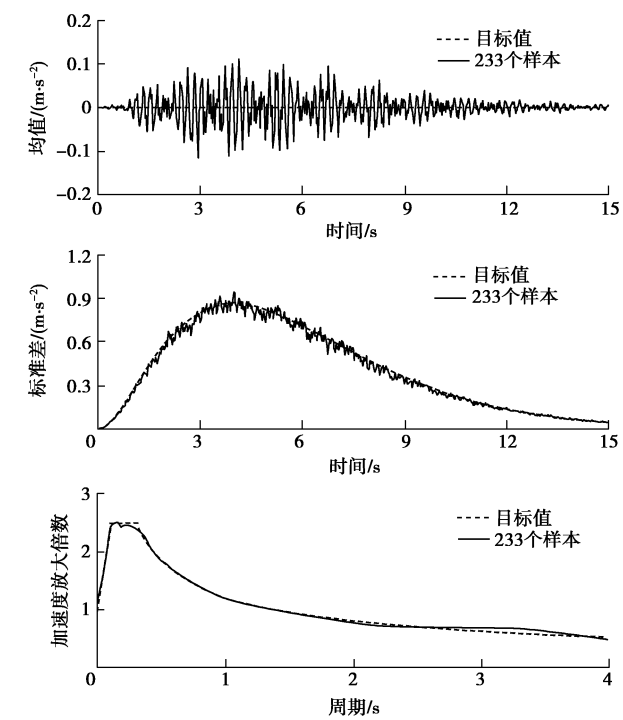


图 1 生成样本地震动和目标值的均值、标准差和反应谱对比
Fig. 1 Comparison among mean values, standard deviations and response spectra between samples and targets

3 计算模型与参数

本文静、动力计算和稳定计算分别采用笔者团队自主开发的岩土工程系列软件 GEODYNA 和 FEMSTABLE2.0 程序。以坝高 242 m 的古水面板堆石坝为例，进行二维非线性有限元数值随机计算，分析堆石料软化对坝坡稳定的影响。所采用的有限元模型、数值方法和计算参数如下。

3.1 有限元模型

采用的古水面板堆石坝坝顶宽度 25 m，上游坝坡为 1:1.5，下游马道上方坝坡为 1:1.7、马道下方坝坡为 1:1.4。坝体由面板和五个堆石区构成：堆石区 A、堆石区 B、堆石区 C、过渡区和垫层区。蓄水高度 225 m。

混凝土面板堆石坝有限元网格如图 2 所示。计算中，单元采用四边形 4 结点等参单元模拟，划分单元数为 3777、节点数为 3795，采用笔者团队自主开发的

基于 CPU+GPU 并行的高性能岩土动力有限元非线性分析软件 GEODYNA，采用 Intel、i7、8 核的 CPU，32G 内存的 PC 机，单个样本的动力计算耗时 5 min 左右。动水压力采用 Westergaard 附加质量法^[17]施加。

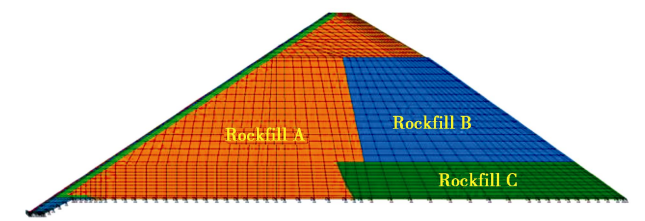


图 2 混凝土面板坝有限元网格模型
Fig. 2 Finite element meshes of CFRD

3.2 计算数值方法和参数

堆石体静力计算采用邓肯 *E-B* 非线性弹性模型^[18]，表 1 列出了静力模型计算参数；动力计算采用等效线性黏-弹性模型^[19]，参数如表 2 所示；坝坡稳定计算采用改进的 Newmark 法^[20]，分别不考虑堆石料软化和考虑堆石料软化两种情况，堆石料峰后剪应变和峰后强度见表 3，本文中只考虑堆石区 A 和 B 的剪应变。

4 计算结果分析

经过大量确定性的非线性有限元计算，可得到不同峰值加速度下不考虑堆石料软化和考虑堆石料软化的坝坡稳定随机动力计算结果，包括安全系数、安全系数小于 1.0 累积时间、累积滑移量 3 个物理量，并基于等价极值分布和广义概率密度演化方法，得到不同物理量的概率分析结果。

4.1 安全系数

图 3、4 给出了地震动输入峰值加速度为 0.2g 和 0.5g 时安全系数时程的均值和标准差。从均值可以看出，考虑堆石料软化时，安全系数会降低；在弱震作用下（如 0.2g 峰值加速度），不考虑软化和考虑软化，两者的安全系数时程基本没有差别，这是因为弱震作用时堆石料还未达到峰值强度发生软化；随着地震作用时间的推进，两者的安全系数差别逐渐增加，呈现出渐进过程；然而伴随着地震强度增加，不考虑软化和考虑软化，安全系数时程的差别日趋明显。另外，

表 1 静力邓肯 *E-B* 模型参数

Table 1 Parameters for Duncan *E-B* model

材料	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	K	n	R_f	K_b	m	$\varphi_0/(^{\circ})$	$\Delta\varphi/(^{\circ})$
堆石区 A	2150	1109	0.24	0.64	420	0.26	49.8	7.2
堆石区 B	2100	800	0.32	0.64	490	0.30	49.8	7.2
堆石区 C	2170	980	0.26	0.79	400	0.31	50	8.2
过渡料	2222	1250	0.31	0.78	500	0.16	53.5	10.7
垫层料	2258	1200	0.30	0.75	680	0.15	54.4	10.6

表 2 动力 Hardin-Drnevich 模型参数

Table 2 Parameters for Hardin-Drnevich model			
材料	K	n	ν
堆石区 A	2660	0.444	0.33
堆石区 B	3115	0.396	0.33
堆石区 C	4997	0.298	0.33
过渡区	3223	0.455	0.40
垫层区	3828	0.345	0.40

表 3 峰后强度

Table 3 Strengths after peak values		
峰后剪应变	堆石区 A 和 B	
	$\varphi_0/(^{\circ})$	$\Delta\varphi/(^{\circ})$
0	49.80	7.20
0.03	48.85	6.65
0.06	47.96	6.16
0.09	47.01	5.67
0.12	46.07	5.18
0.15	45.12	4.69
0.18	44.17	4.20
0.21	43.20	3.72

标准差曲线先升高, 表明随着堆石料非线性特性的发展, 安全系数的随机特性增加; 标准差曲线然后降低, 部分由于随着地震时程衰减, 安全系数的随机性减小。由此可看出, 不考虑堆石料软化和考虑软化时, 引入地震动的随机性进行坝坡稳定安全系数分析, 是有必要的也是有意义的。

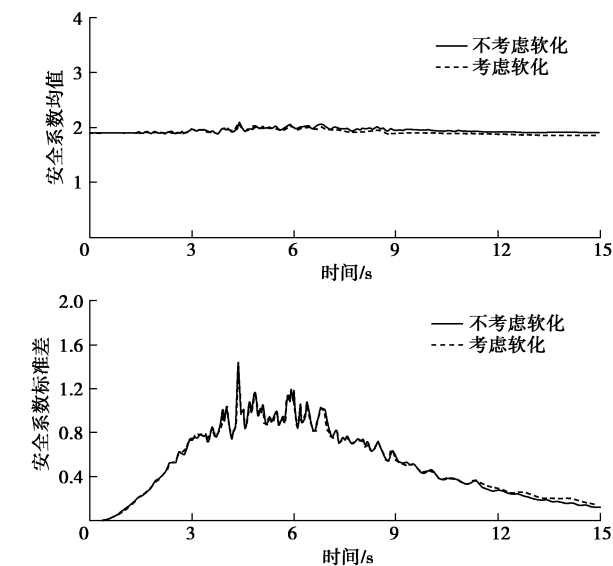


图 3 0.2g 地震动作用下安全系数时程均值和标准差

Fig. 3 Mean values and standard deviations of time-histories under 0.2g

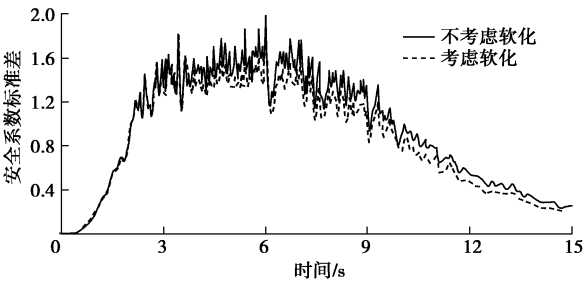
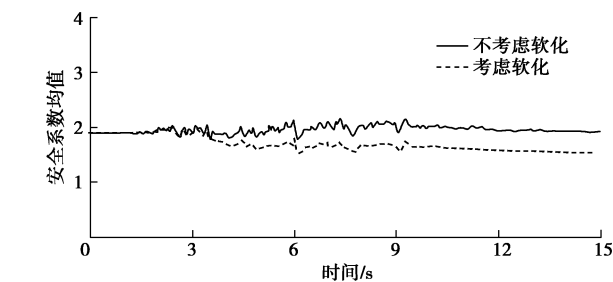


图 4 0.5g 地震动作用下安全系数时程均值和标准差

Fig. 4 Mean values and standard deviations of time-histories under 0.5g

基于等价极值分布和广义概率密度方法, 可以得到最小安全系数的概率密度分布函数和累积分布函数, 如图 5, 6 (以 0.2g 和 0.5g 为例)。明显看出, 0.2g 峰值加速度时, 不考虑软化和考虑软化情况, 最小安全系数的概率密度分布函数和累积分布函数基本没有差别; 而 0.5g 峰值加速度时, 差别明显增大, 这与上述均值和标准差的分析结果是一致的。以上分析结果表明, 地震过程中, 坝坡的安全系数时程和最小安全系数, 随着加速度峰值的增加, 不考虑软化与考虑软化的计算结果差别逐渐增大, 这是由于随着地震强度增加坝坡堆石体逐渐发生软化所致。表 4 列出了最小安全系数等于 1.0 时的可靠度, 可以看出, 不考虑软化和考虑软化, 在不同地震峰值加速度下概率几乎没有差别, 这一结果表明单纯从最小安全系数方面考察坝坡失稳概率, 是不合理的。

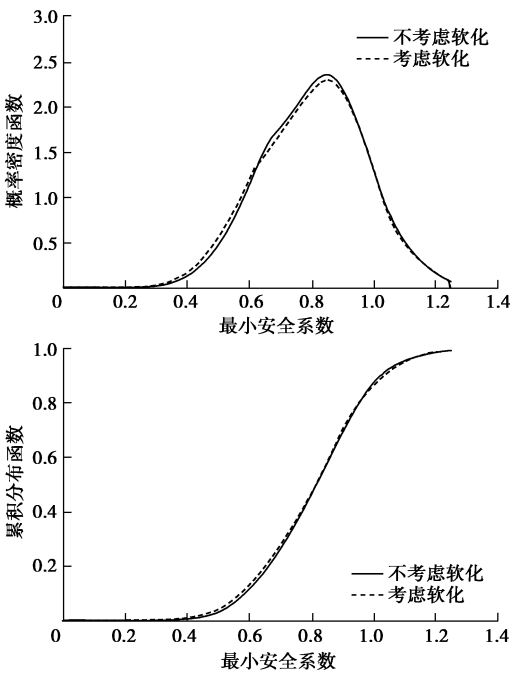


图 5 0.2g 地震动作用下最小安全系数等价极值概率信息

Fig. 5 PDFs and CDFs of equivalent extreme-value events of safety factor under 0.2g

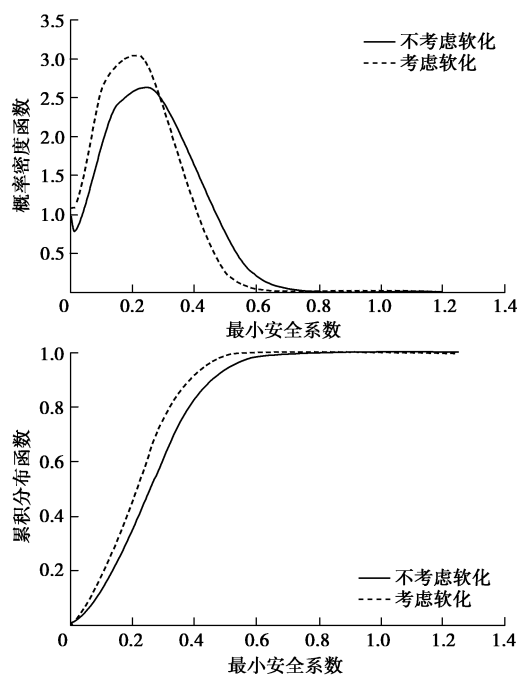


图 6 0.5g 地震作用下最小安全系数等价极值概率信息

Fig. 6 PDFs and CDFs of equivalent extreme-value events of safety factor under 0.5g

4.2 安全系数超限累积时间

安全系数小于 1.0 的累积时间是评价高土石坝坝坡稳定的新指标,并逐渐引起更多研究人员的注意,一些学者和工程人员建议,安全系数超限累积时间超过 1~2 s,坝坡可能失稳^[8-10]。图 7 和图 8 给出了峰

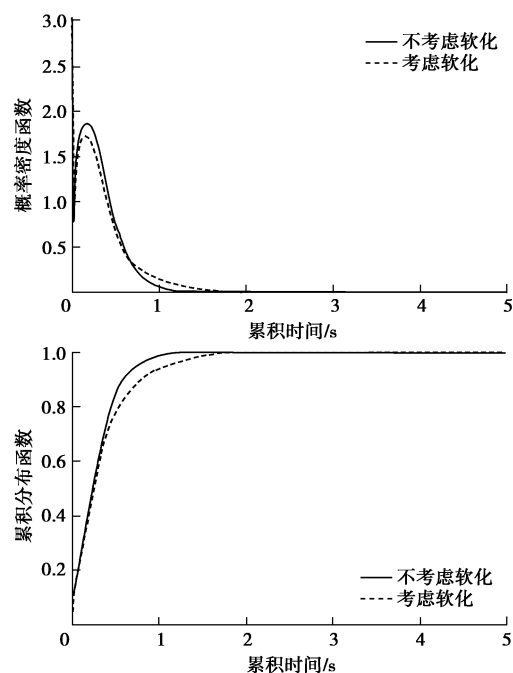


图 7 0.2g 地震作用下安全系数超限累积时间等价极值概率信息

Fig. 7 PDFs and CDFs of equivalent extreme-value events of cumulative time of $F_s < 1.0$ under 0.2g

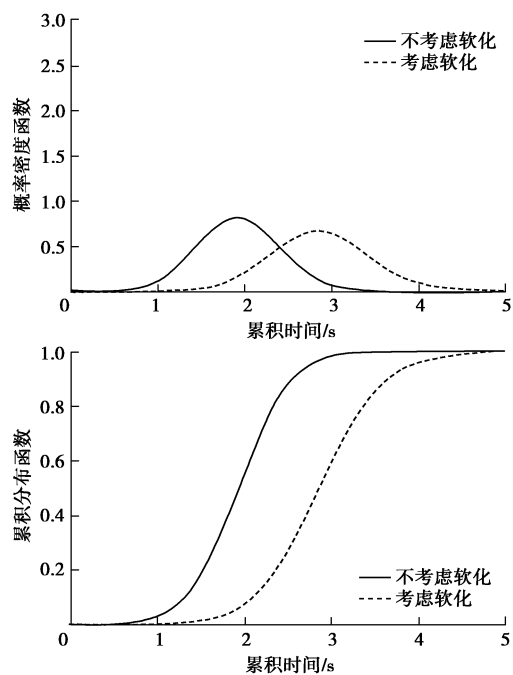


图 8 0.5g 地震作用下安全系数超限累积时间等价极值概率信息

Fig. 8 PDFs and CDFs of equivalent extreme-value events of cumulative time of $F_s < 1.0$ under 0.5g

值加速度 0.2g 和 0.5g 时,安全系数小于 1.0 累积时间的概率密度分布函数和累积分布函数,可以看出,在弱地震作用下,不考虑软化和考虑软化差别较小,但是随着地震强度增加,差别逐渐明显,表明强震的作用下,堆料料软化特性逐渐凸显。表 4 列出了不同峰值加速度下基于安全系数超限累积时间的可靠度,可靠度结果表明,随着地震强度增加,不考虑软化和考虑软化概率的差别逐渐增大,这一结果同时表明从安全系数超限累积时间角度考察坝坡的失稳,具有一定合理性。

4.3 滑裂面和累积滑移量

针对累积滑移量, Ozkan^[21]建议的地震滑移变形控制标准为 1 m; 美国规定采用 Newmark 法计算时,沿滑裂面变形不超过 0.60 m^[7]; 田景元等^[10]认为累积滑移量超过 1 m 或超过滑动体长度的 1%, 坝坡可能失稳。笔者在总结前人研究成果的基础上,选取了累积滑移量 5, 50, 100 cm 的 3 个界限破坏控制标准^[11]。图 9 是不考虑软化和考虑软化两种情况下坝坡最危险滑动面的位置 (0.5g), 结果表明,对大部分地震动序列,不考虑软化和考虑软化,不影响最危险滑动面位置,但有部分滑动面位置不一样,证明不同地震动对最危险滑动面位置有一定影响,展现出从随机和统计观点探究是否考虑软化对坝坡滑动影响的必要性。图 10 是 0.5g 峰值加速度作用下不考虑软化和考虑软化

表 4 不同地震强度下对应的坝坡可靠度 (基于最小安全系数和安全系数超限累积时间)

Table 4 Seismic reliabilities under different earthquake levels

堆石料特性	累积时间/s	PGA				
		0.1g	0.2g	0.3g	0.4g	0.5g
不考虑软化	0	0.9738	0.0931	0.0043	0	0
	1	1	0.9828	0.6314	0.1226	0.0199
	2	1	1	0.9977	0.9132	0.5685
考虑软化	0	0.9738	0.0931	0.0043	0	0
	1	1	0.9355	0.3314	0.0274	0
	2	1	1	0.8661	0.3132	0.0593

注: 0 s 累积时间表示安全系数等于 1.0。

表 5 不同地震强度下对应的坝坡可靠度 (基于累积滑移量)

Table 5 Seismic reliabilities under different earthquake levels

堆石料特性	累积滑移量/m	PGA				
		0.1g	0.2g	0.3g	0.4g	0.5g
不考虑软化	0.05	1	0.7121	0.1340	0.0218	0
	0.5	1	0.9976	0.8299	0.3773	0.1266
	1	1	1	0.9734	0.7297	0.3522
考虑软化	0.05	1	0.6869	0.1067	0.0102	0
	0.5	1	0.9732	0.5378	0.1252	0.0240
	1	1	0.9969	0.8170	0.3305	0.0979

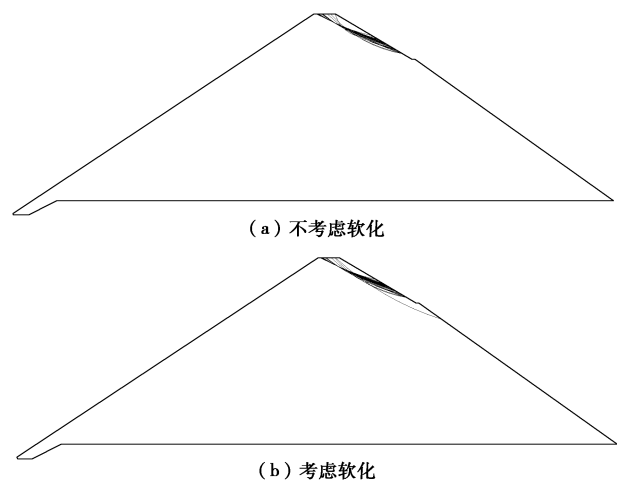


图 9 坝坡最危险滑动面 (0.5g)

Fig. 9 Slide surfaces corresponding to minimum safe factor (0.5g)

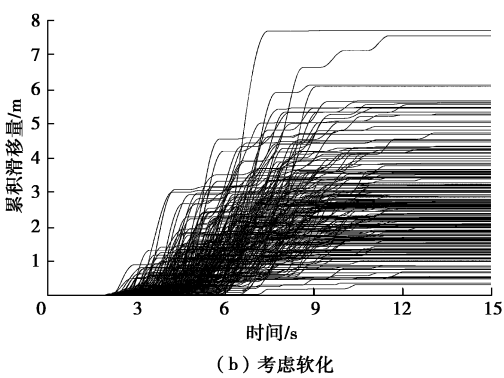
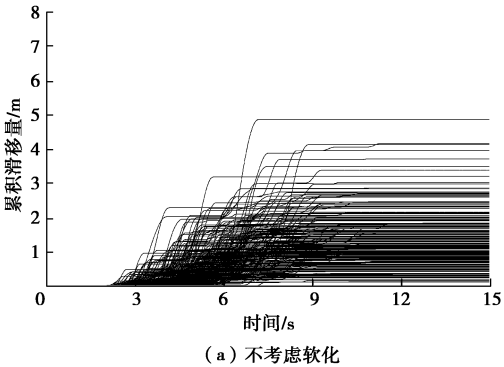


图 10 最小安全系数对应的累积滑移量 (0.5g)

Fig. 10 Cumulative slippages of dam slope corresponding to minimum safe factor (0.5g)

坝坡累积滑移量, 明显看出, 强震作用下, 考虑堆石料软化的累积滑移量远远大于不考虑软化的滑移量。图 11, 12 给出了 0.2g 和 0.5g 峰值加速度时不考虑软化和考虑软化的概率信息, 表 5 是不同峰值加速度情况下不考虑软化和考虑软化的可靠度, 各组滑移量概率计算结果证明, 在弱震作用下, 坝坡几乎不发生滑移; 但是在强震作用下, 发生较大的滑移变形, 并且是否考虑软化对滑移变形有很大影响。这是由于随着加速度峰值的增加, 滑移量增大, 滑移剪应变增大, 此时坝坡堆石体发生明显的软化所致。

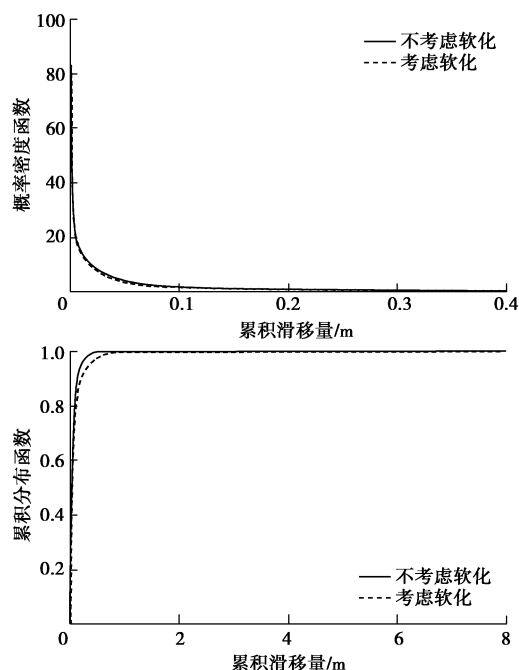


图 11 0.2g 地震动作用下累积滑移量等价极值概率信息

Fig. 11 PDFs and CDFs of equivalent extreme-value events of cumulative slippage under 0.2g

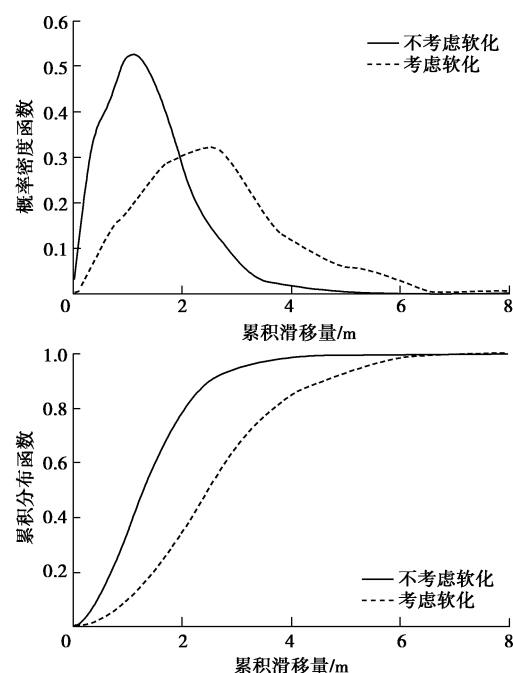


图 12 0.5g 地震动作用下累积滑移量等价极值概率信息

Fig. 12 PDFs and CDFs of equivalent extreme-value events of cumulative slippage under 0.5g

5 结 论

地震尤其强震作用下,土石坝筑坝堆石料会逐渐呈现出软化特性,对坝坡安全产生重大影响,为有效评估堆石料软化特性对坝坡稳定性的影响,本文从地

震动的随机观点出发,考虑不同地震强度的影响,提出了基于等价极值分布和广义概率密度演化方法的坝坡安全概率分析方法,并基于最小安全系数、安全系数超限累积时间、累积滑移量 3 个物理量,结合实例分析,得出如下 3 点结论。

(1) 本文采用概率密度演化的基本思想,构造关于土石坝坝坡动力反应极值的具有“虚拟时间参数”的随机过程,导出概率密度演化方程并求出随机结构动力反应的极值分布概率和可靠度,这一方法对复杂工程结构随机概率分析具有广泛的适用性,可以对土石坝坡的可靠度给出较为准确的评价。

(2) 随机分析和概率结果表明,地震过程中,无论是坝坡的最小安全系数,还是安全系数超限累积时间,还是滑裂面的累积滑移量,随着地震强度的增加,考虑软化与不考虑软化的计算结果差别逐渐增大,这是因为地震作用下,堆石料软化特性逐渐显现。同时,在地震激励下,堆石料软化性质也展现出渐进过程。考虑坝坡堆石料的软化,对高土石坝抗震性能分析具有重要的意义。

(3) 可靠度分析结果表明,单纯从最小安全系数角度考察土石坝坡稳定性,是不合理的,需要结合安全系数超限持时和累积滑移量,全面评估坝坡安全性。同时,对于目前大型工程设计由确定性分析向可靠度分析过渡阶段的破坏指标和概率风险水准确定具有重大意义,可以为土石坝坝坡的抗震设计、加固措施提供理论支撑。

参考文献:

- [1] LIU H L, CHEN Y M, YU T, et al. Seismic analysis of the Zipingpu concrete-faced rockfill dam response to the 2008 Wenchuan, China, Earthquake[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015, **29**(5): 04014129.
- [2] ZHANG J M, YANG Z Y, GAO X Z, et al. Geotechnical aspects and seismic damage of the 156-m-high Zipingpu concrete-faced rockfill dam following the Ms 8.0 Wenchuan earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, **76**: 145 - 156.
- [3] UDDIN N. A dynamic analysis procedure for concrete-faced rockfill dams subjected to strong seismic excitation[J]. Computers and Structures, 1999, **72**(1-3): 409 - 421.
- [4] ZOU D G, XU B, KONG X J, et al. Numerical simulation of the seismic response of the Zipingpu concrete face rockfill dam during the Wenchuan earthquake based on a generalized plasticity model[J]. Computers and Geotechnics, 2013, **49**: 111 - 122.

- [5] ZHU Y L, KONG X J, ZOU D G, et al. Shaking table test and numerical simulation on the effect of reinforcement on the seismic safety of dam slopes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, **18**(4): 132 - 138.
- [6] LIU J, LIU F H, KONG X J. Large-scale shaking table model tests on seismically induced failure of concrete-faced rockfill dams[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, **82**: 11 - 23.
- [7] NB 35047—2015 水电工程水工建筑物抗震设计规范[S]. 2015. (NB 35047—2015 Code for seismic design of hydraulic structures of hydropower project[S]. 2015. (in Chinese))
- [8] 陈生水, 李国英, 傅中志. 高土石坝地震安全控制标准与极限抗震能力研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(1): 59 - 65. (CHEN Sheng-shui, LI Guo-ying, FU Zhong-zhi. Safety criteria and limit resistance capacity of high earth-rock dams subjected to earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(1): 59 - 65. (in Chinese))
- [9] 赵剑明, 刘小生, 杨玉生, 等. 高面板堆石坝抗震安全评价标准与极限抗震能力研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(12): 2254 - 2261. (ZHAO Jian-ming, LIU Xiao-sheng, YANG Yu-sheng, et al. Criteria for seismic safety evaluation and maximum aseismic capability of high concrete face rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(12): 2254 - 2261. (in Chinese))
- [10] 田景元, 刘汉龙, 伍小玉. 高土石坝极限抗震能力的评判角度及标准述评[J]. 防灾减灾工程学报, 2013(增刊 1): 128 - 131. (TIAN Jing-yuan, LIU Han-long, WU Xiao-yu. Evaluation perspectives and criteria of maximum aseismic capability for high earth-rock dam[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013(S1): 128 - 131. (in Chinese))
- [11] 孔宪京, 庞锐, 邹德高, 等. 基于 IDA 的高面板堆石坝抗震性能评价[J]. 岩土工程学报, 待刊. (KONG Xian-jing, PANG Rui, ZOU De-gao, et al. Seismic performance evaluation of high CFRD based on incremental dynamic analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, in press. (in Chinese))
- [12] 周扬, 邹德高, 徐斌, 等. 考虑堆石料软化特性的坝坡动力稳定和滑移变形分析[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(9): 1713 - 1719. (ZHOU Yang, ZOU De-gao, XU Bin, et al. Study on dynamic stability and slip deformation of dam slope considering softening of rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(9): 1713 - 1719. (in Chinese))
- [13] LI J, CHEN J B, FAN W L. The equivalent extreme-value event and evaluation of the structural system reliability[J]. Structural Safety, 2007, **29**(2): 112 - 131.
- [14] LI J, CHEN J B. Stochastic dynamics of structures[M]. Singapore: John Wiley & Sons, 2009.
- [15] LIU Z J, LIU W, PENG Y B. Random function based spectral representation of stationary and non-stationary stochastic processes[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2016, **45**: 115 - 126.
- [16] PANG R, XU B, KONG X J, et al. Seismic reliability assessment of earth-rockfill dam slopes considering strain-softening of rockfill based on generalized probability density evolution method[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, **107**: 96 - 107.
- [17] WESTERGAARD H M. Water pressures on dams during earthquakes[J]. Trans Asce, 1933, **98**(2): 418 - 432.
- [18] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1970, **96**(5): 1629 - 1654.
- [19] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972, **98**: 667 - 692.
- [20] 孔宪京. 混凝土面板堆石坝抗震性能[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (KONG Xian-jing. Seismic performance of concrete-faced rockfill dam[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))
- [21] OZKAN M Y. A review of considerations on seismic safety of embankments and earth and rock-fill dams[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1998, **17**: 439 - 458.