

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.064



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



考虑堆石料软化的三维坝坡优化动力稳定分析

庞锐^{a,b}, 姚浩宇^a, 徐明洋^a, 周扬^{a,b}, 徐斌^{a,b}

(大连理工大学 a. 建设工程学院; b. 海岸与海洋工程全国重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 对于高土石坝的稳定分析大多局限于二维情况, 缺少合适的三维稳定分析方法; 地震作用下坝体堆石料容易出现应变软化现象, 影响大坝的抗震性能, 有必要发展能考虑软化效应的高土石坝三维动力稳定分析方法。首先, 基于有限元滑面应力法, 结合优化的号角形三维破坏机制提出一种高土石坝三维稳定分析方法; 然后, 对堆石料三轴试验结果进行整理得到峰后强度与峰后剪应变的关系, 以考虑堆石料软化效应的影响; 最后, 将所建立的稳定分析框架应用于三维高土石坝的静动力稳定分析, 并与二维分析结果进行对比。结果表明: 考虑与不考虑软化效应的滑移量结果差异较大, 且这种差异随累积滑移量的增大而增大; 相较于三维稳定分析, 基于累积滑移量的二维稳定分析容易高估坝坡的抗震稳定性。

关键词: 高土石坝; 应变软化; 三维动力稳定; 滑移面应力法; Newmark 位移

中图分类号: TV641.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Optimized dynamic stability analysis of three-dimensional dam slope considering strain-softening of rockfill

PANG Rui^{a,b}, YAO Haoyu^a, XU Mingyang^a, ZHOU Yang^{a,b}, XU Bin^{a,b}

(a. School of Infrastructure Engineering; b. National Key Laboratory of Coastal and Ocean Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China)

Abstract: The stability analysis of high earth-rockfill dam is mostly limited to two-dimensional situation, and there is no suitable three-dimensional stability analysis method. In addition, the rockfill material of earth-rockfill dam is prone to strain softening under strong earthquakes, which affects the seismic performance of the dam. It is necessary to develop a three-dimensional stability analysis method for high dams that can take the softening effect into account. Firstly, a three-dimensional static and dynamic stability analysis method for high earth-rock dams is proposed based on the finite element sliding surface stress method combined with the optimized horn-shaped three-dimensional damage mechanism. Then, the relationship between post-peak strength and post-peak

收稿日期: 2025-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(52479094, 52379117, 52279096, 52279125); 国家重点研发项目(2023YFC3011400); 辽宁省科技计划联合计划(2023JH2/101700339)

作者简介: 庞锐(1991-), 男, 博士, 副教授, 主要从事土动力学与高土石坝抗震研究, E-mail: pangrui@mail.dlut.edu.cn
徐斌(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: xubin@dlut.edu.cn

Received: 2025-02-28

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52479094, 52379117, 52279096, 52279125); National Key R & D Program of China (No. 2023YFC3011400); Liaoning Province Science and Technology Plan Joint Plan (No. 2023JH2/101700339)

Author brief: PANG Rui (1991-), PhD, associate professor, main research interests: soil dynamics and seismic performance of high earth rock dams, E-mail: pangrui@mail.dlut.edu.cn.

XU Bin (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xubin@dlut.edu.cn.

shear strain is obtained by processing the triaxial test results of rockfill in order to consider the impact of the softening effect of the rockfill material. Finally, the developed stability analysis framework is applied to analysis the static and dynamic stability of three-dimensional high earth-rockfill dam, and is compared with the two-dimensional case. The results show that the slippage with and without considering the softening effect differ significantly, and this difference increases as the cumulative slippage increases. Compared with the three-dimensional stability analysis, the two-dimensional stability analysis based on cumulative slippage tends to underestimate the seismic stability of the dam slope.

Keywords: high earth-rockfill dam; strain softening; three-dimensional dynamic stability; slip surface stress method; Newmark displacement

高土石坝在地震作用下的安全评价一直是岩土工程领域一项重要而棘手的课题,受到广泛关注。对大坝展开渗流分析^[1-2]、变形分析^[3]以及稳定分析^[4],以反映大坝的安全状态是高坝安全评价的主要内容。其中,坝坡稳定分析作为一项重要而基础的研究,其理论方法仍有待进一步发展。

传统的边坡动力稳定分析主要基于安全系数,通过判断安全系数是否小于阈值或者计算安全系数小于阈值的持续时间^[5]来进行稳定评估。自Newmark滑块位移法^[6]提出以来,学者逐渐认识到仅依据安全系数来评价边坡的动力稳定较为片面,基于滑移范围、滑移量等因素综合分析边坡的稳定性成为主流的分析方法。栾茂田等^[7]采用拟静力法发展了坝坡潜在滑移面安全系数和滑移量的计算方法;徐斌等^[8]对不同高度的高土石坝进行了动力时程分析,指出地震时程中安全系数最小的滑移面与滑移量最大的滑移面并不相对应且时刻发生改变。此外,由于剪切过程可能出现剪胀变形和颗粒破碎现象^[9],地震作用下筑坝堆石料容易发生强度软化,周扬等^[10]结合二维滑面应力法和三轴试验数据讨论了堆石材料软化对面板坝动力稳定的影响;孔宪京等^[11]将广义概率密度演化方法应用于考虑软化效应和地震动随机的高面板堆石坝动力稳定分析,结合安全系数超限时间和滑移量评估了大坝的安全状态。

上述研究大多局限于二维分析,而三维到二维的简化对于静力稳定分析会得到偏于保守的结果^[12]。对高坝进行三维动力稳定分析耗时较长但能获得更准确的评价。赵剑明等^[13]采用三维动力有限元方法,研究了三维心墙坝的残余变形和动力稳定性;张泽宇^[14]基于有限元滑面应力法,建立了三维高土石坝的抗震稳定分析流程,其中滑移面采用球形假设;Song等^[15]将椭球破坏机制应用于三维边坡的动力可靠度求解,然而实际工程中的滑动模式较为复杂,使用这种滑动面存在一些不可控制的误差。随着求解技术的发展,大坝的三维稳定分析有更为

广泛的应用。

有限元滑面应力法结合了有限元法和传统极限平衡法的优点,概念清晰,物理意义明确,具有较强的适用性^[16-18]。笔者在有限元滑面应力法的基础上,结合优化的号角形三维破坏机制,提出了一种高土石坝三维稳定分析方法。通过对堆石料三轴试验结果进行整理,得到了峰后强度与峰后剪应变的关系,以考虑堆石料软化效应的影响。将建立的稳定分析框架应用于三维高土石坝的静动力稳定分析,验证了提出的三维边坡优化稳定分析流程的实用性,并与二维分析结果进行了对比和讨论。

1 稳定分析方法

1.1 有限元滑面应力法

由于地震动的往复多变性,地震激励下边坡的临界滑动面也在时刻改变^[8],并且筑坝材料参数具有较强非线性,这些因素使得坝坡动力稳定分析较为复杂。而结合了有限元分析和极限平衡法基本原理的滑面应力法能较好地适用于坝坡的稳定分析。根据极限平衡理论,边坡的安全系数 F_s 可定义为强度储备值,即滑面上抗滑力与下滑力的比值^[18]。

$$F_s = \frac{\oint (c + \sigma_0 \tan \varphi) ds}{\oint \tau_0 ds} \quad (1)$$

式中: σ_0 和 τ_0 分别为滑动面微分 ds 上的正应力和切应力, c 和 φ 为土体的抗剪强度参数。式(1)中的滑动面微分 ds 对应于二维情况为弧微分,对应于三维情况为面积微分;此外,文献[19]指出,式(1)定义的安全系数具有与条分法一致的物理意义。基于有限元滑面应力法,边坡的滑动面被离散为多个相互连接的三角形局部微小滑动面,需要根据每个细分的三角形滑动面受力状态计算局部安全系数。以图1所示的 ABC 局部滑动面为例,其局部安全系数可以定义为

$$F_{s, local} = \frac{(c + \sigma \tan \varphi)s}{\tau s} \quad (2)$$

式中: σ 和 τ 分别为三角形 ABC 局部滑动面上的正应力和切应力, s 为三角形 ABC 局部滑动面的面积。根据平面法线方向 $\mathbf{n}$,可以容易地计算出3个方向上的余弦值 $L=\cos\langle\mathbf{n}, X\rangle$ 、 $K=\cos\langle\mathbf{n}, Y\rangle$ 、 $M=\cos\langle\mathbf{n}, Z\rangle$ 。然后根据力的平衡,得到滑动面上不同方向上的力,进而求出 ABC 滑动面上的正应力 σ 和剪应力 τ ,表示为

$$\begin{bmatrix} P_X \\ P_Y \\ P_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L \\ K \\ M \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\sigma = L^2 \sigma_x + K^2 \sigma_y + M^2 \sigma_z + 2KM\tau_{yz} + 2LM\tau_{xz} + 2LK\tau_{xy} \quad (4)$$

$$\tau^2 = P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - \sigma^2 \quad (5)$$

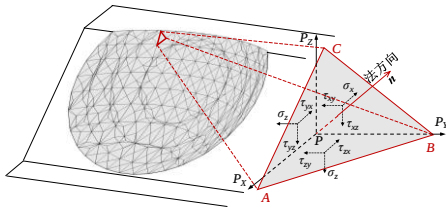


图1 坝坡滑动面的局部应力状态^[20]

Fig.1 Local stress state on the slip surface of dam slope

将式(4)、式(5)代入式(2)便可以求得三角形 ABC 局部滑动面的局部安全系数。将整个滑动面上的所有局部三角形滑动面上的正应力和切应力求出后,可以采用式(6)求解滑动面主滑移方向上的安全系数^[14]。

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i + \sigma_i \tan \varphi_i) s_i}{\sum_{i=1}^n \tau_i s_i} \quad (6)$$

式中: σ_i 和 τ_i 分别为第 i 个三角形局部滑动面上的正应力和切应力; s_i 为第 i 个三角形局部滑动面的面积; n 为整个滑动面上的局部三角形滑动面的个数。

1.2 坝坡三维破坏机制

滑动面形状的设定对滑面应力法计算结果的准确性有一定影响。二维边坡稳定性分析中,圆弧滑动面是不排水破坏条件的合理近似,因此,被广泛应用。当扩展到三维情况时,滑动面形状变得更加复杂,传统的球形和椭球破坏机制不能很好地适应土石坝的空间形态变化。Michalowski等^[21]基于三维极限分析理论提出了号角形旋转破坏机理,并证明了其理论基础和空间形态适应性方面具有优异的性能。号角形旋转破坏机制的空间形态结构如图2所示,径向剖面为圆,而纵向剖面由上对数螺旋曲线 PBC 和下对数螺旋曲线 PAD 组成,上下曲线的表达式为

$$r_1(\theta) = r_0 e^{-(\theta - \theta_0) \tan \phi} \quad (7)$$

$$r_2(\theta) = r'_0 e^{(\theta - \theta_0) \tan \phi} \quad (8)$$

式中: r_0 和 r'_0 别为中心 O 到 B 点、 A 点的距离; ϕ 为对数螺旋的旋转增长角,当旋转任意角度 θ 时,径向圆形剖面的半径为 $R(\theta)$ 。

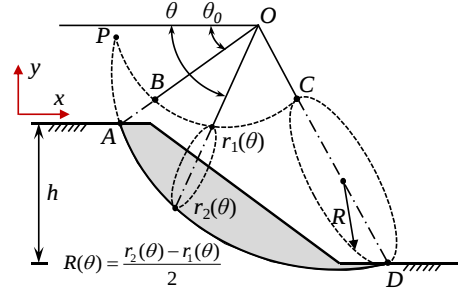


图2 号角形三维旋转破坏机制

Fig.2 Horn-shaped three-dimensional rotational failure mechanism

实际的高土石坝工程由于受到两侧山体、河谷以及地形的影响,空间形态可能较窄,坝坡面呈现出V型的收缩型结构特征。上述传统号角形滑动面的旋转增长角 ϕ 是一个固定的正值,对应的滑动面形态呈现出扩散型的特点,与实际坝坡面的收缩型结构特征不能良好地适配。为了适配实际高土石坝工程的V型坝坡滑动形态,对传统的号角形滑动面进行适当改进,将旋转增长角 ϕ 当作一个需要进行最优搜索的滑动面参数,且可正可负。在进行坝坡稳定分析时,采用枚举法进行最危险滑动面搜索,以 ϕ 作为搜索参数,整体安全系数作为目标函数,当整体安全系数取最小值时对应的 ϕ 即为最优的旋转增长角,对应的滑动面即为临界滑动面。图3和图4给出了 ϕ 大于0和小于0情况对应的扩散型、收缩型滑动面形态示意图。可以看出,优化的号角形滑动面形态直接受到旋转增长角 ϕ 的影响。对 ϕ 进行最优搜索,可以更好地使号角形滑动面与坝坡V形空间构型相协调。

1.3 累积滑移量

通过滑面应力法求得坝坡的安全系数时程曲

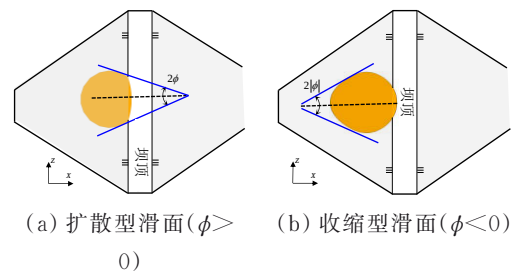


图3 扩散型、收缩型滑面示意图

Fig.3 Schematic diagram of diffusion and contraction type slip surface

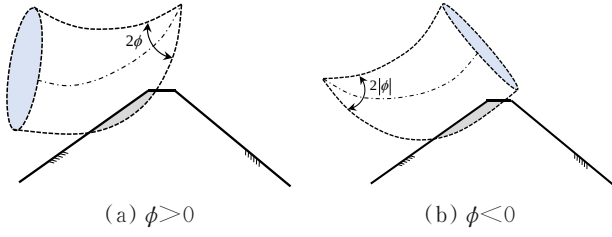


图4 旋转增长角对号角形滑动面形态的影响

Fig.4 Effect of rotation growth angle on the horn-shaped slip surface

线,可以反映某一时刻的稳定状态而难以表征整个地震动作用时程中的坝坡稳定,具有一定的片面性^[11]。Newmark^[6]提出的滑块位移法建议采用滑移量代替安全系数来评估边坡的抗震稳定性。地震动具有瞬时性往复性的特点,地震作用下边坡的稳定性分析是一个持续性的过程,基于累积滑移量的评估方法考虑了整个地震过程中边坡滑移的持续发展,且能够体现整个地震持时过程对边坡的累积破坏效应,避免了基于单一安全系数评价边坡稳定的片面性。

Newmark法把滑坡体视为一个刚塑性滑块,在地震发生时,可能会有短暂的惯性力导致滑块沿斜坡下滑。发生滑动的临界加速度定义为临界屈服加速度 a_y ,采用安全系数为1.0的滑面加速度作为屈服加速度。当滑动面加速度超过屈服加速度时认为滑块下滑,其失稳滑移量为超出屈服加速度的部分对时间进行两次积分,然后将每段滑移位移求和得到第 k 个潜在滑移面对应的累积滑移量 d_k ,即

$$d_k = \sum_{j=1}^m \iint_{\Delta t_j} (a - a_y) dt \quad (9)$$

取所有潜在滑移面累积滑移量的最大值作为坝坡的最大累积滑移量 $d_{\max}$ 。

$$d_{\max} = \max\{d_1, d_2, \dots, d_k, \dots\} \quad (10)$$

累积滑移量不仅考虑了坝坡的应力状态,还涉及了加速度响应,是更为全面的坝坡稳定评价标准,已经在边坡抗震稳定分析中得到了广泛应用^[22-23]。

2 堆石料应变软化效应

2.1 应变软化模型

以上求得的累积滑移量未考虑到堆石料应变软化效应的影响。实际上,当安全系数小于1.0,即滑动面开始滑动时,堆石料的峰值强度向残余强度转化,滑动面抗剪强度有所降低,周扬等^[10]指出这种软化现象在围压较低的坝顶区域更加明显。

图5为一组典型的具有应变软化现象的堆石料固结排水剪三轴试验结果曲线^[24],峰值强度走向残

余强度的过程就是堆石料应变软化的过程。三轴试验结果表明,堆石料轴向应力与应变的关系符合双曲型,其切线模量 E_t 和体积模量 B_t 可拟合为Duncan提出的关系式^[25]。

$$E_t = K p_a \left[1 - R_f \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (11)$$

$$B_t = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \quad (12)$$

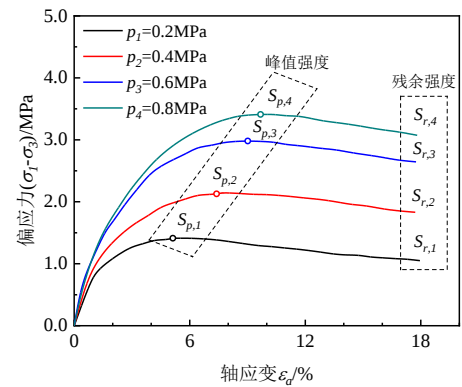
式中: K 、 n 、 K_b 和 m 均为实验结果拟合参数; R_f 为破坏比; c 和 φ 为材料的黏聚力和内摩擦角; p_a 为标准大气压强。随着围压 σ_3 的增加,堆石料的内摩擦角 φ 会减小,两者满足式(13)。

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \cdot \lg \frac{\sigma_3}{p_a} \quad (13)$$

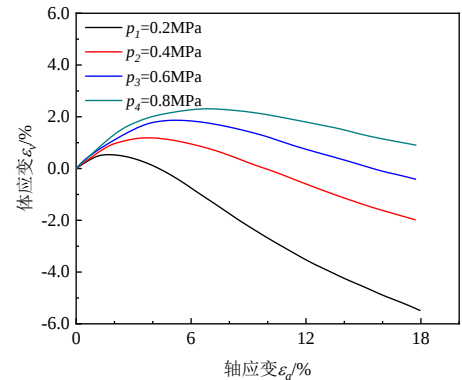
式中: φ_0 和 $\Delta\varphi$ 为材料的强度参数。此外,根据三轴试验结果中体应变 ϵ_v 和轴应变 ϵ_a 的关系曲线,按照式(14)可以得到偏应力和轴应变关系曲线上某点(如峰值强度处)对应的剪应变 γ 。

$$\gamma = 1.5\epsilon_a - 0.5\epsilon_v \quad (14)$$

当滑动面安全系数小于1.0时,视堆石料强度为峰后强度。此后随着滑动位移的累积,剪应变逐渐增大,相应的堆石料抗剪强度逐渐下降。峰后剪



(a) 偏应力与轴应变曲线



(b) 体应变与轴应变曲线

图5 堆石料三轴试验应力应变关系曲线

Fig.5 A set of triaxial test stress-strain curves of rockfill

应变 γ_p 与累积滑移量 d_k 的关系应满足式(15)。

$$\gamma_p = \frac{d_k}{b} \quad (15)$$

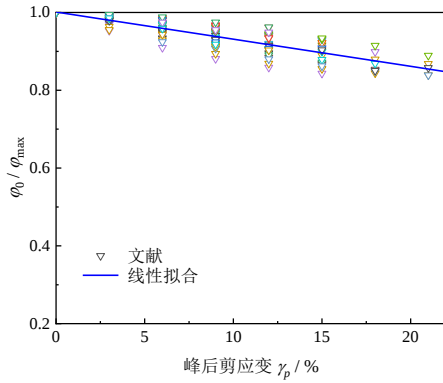
式中: b 为剪切带宽度。根据文献[10]的建议,堆石料的剪切带宽度可取平均粒径的 5~10 倍。

2.2 峰后强度整理

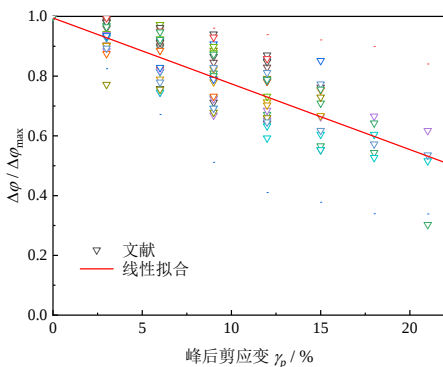
通过式(13)~式(15)对一组三轴试验结果进行处理,可以得到抗剪强度参数 φ_0 和 $\Delta\varphi$ 与峰后剪应变 γ_p 之间的对应关系。对多个文献^[10,24,26-33]提供的具有明显软化现象的三轴试验数据进行整理,得到了 φ_0 和 $\Delta\varphi$ 的各 30 组结果。为了反映一般规律,将整理结果进行归一化处理然后绘图分析(其中 $\varphi_{\max}$ 和 $\Delta\varphi_{\max}$ 代表峰值强度)。如图 6 所示,其规律表明,抗剪强度与峰后剪应变存在一定的线性关系,因此,采用线性拟合来考虑本研究中堆石料软化对强度参数的影响。式(16)、(17)为抗剪强度与峰后剪应变的线性拟合方程。

$$\varphi_0/\varphi_{\max} = -0.6978\gamma_s + 1 \quad (16)$$

$$\Delta\varphi/\Delta\varphi_{\max} = -2.2028\gamma_s + 0.9946 \quad (17)$$



(a) φ_0 与 γ_p 的关系



(b) $\Delta\varphi$ 与 γ_p 的关系

图 6 峰后强度与峰后剪应变的关系

Fig.6 Relationship between post-peak shear strain and post-peak strength

笔者采用 C++ 语言自主开发了基于有限元滑面应力法的能考虑堆石料应变软化效应的三维边坡(坝坡)静动力稳定分析程序,其分析流程如图 7

所示,详细的计算原理、功能等可以参见文献[20]。

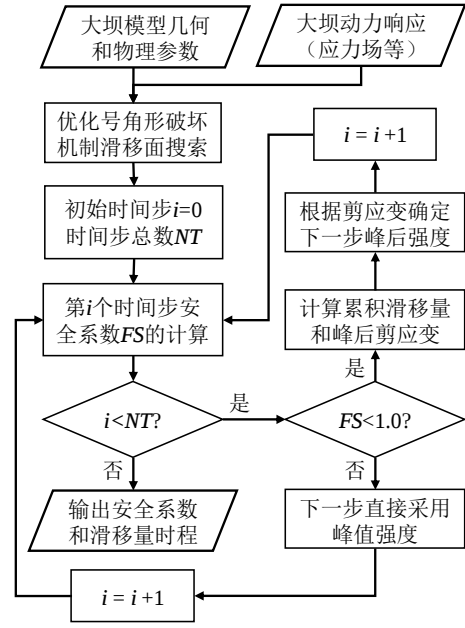
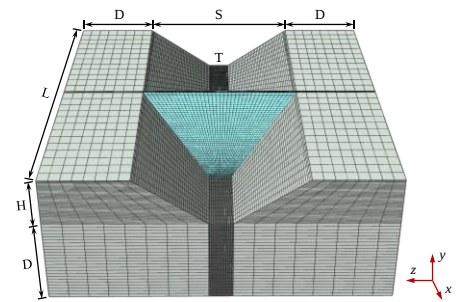


图 7 考虑软化效应的三维坝坡动力稳定分析流程

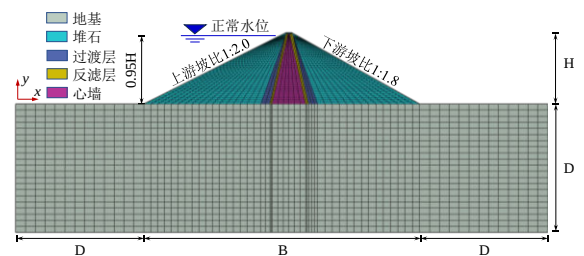
Fig.7 Flowchart of three-dimensional dynamic stability analysis of dam slope considering the strain-softening effect of rockfill

3 模型与参数

图 8 为采用的高土石坝模型,模型包括堆石料、心墙、反滤层、过渡层和地基。其中大坝高度 H 为 200 m,上游坡比取为 1:2.0,下游坡比取为 1:1.8,岸坡比为 1:1.5。沿坝轴向的坝顶长度 S 为 700 m,坝顶宽度取为 15 m,河谷宽度 T 取为 100 m,坝-基



(a) 三维模型



(b) 顺河向中轴典型切面

图 8 带地基的心墙坝三维模型

Fig.8 3D model of core wall dam with foundation

交界面顺河向长度 B 为 775 m, 心墙、反滤层、过渡层的坡度比等均取自如美心墙坝。参考两河口、糯扎渡等实际高土石坝工程, 设定的土石坝正常蓄水位距坝顶高度为 10 m, 即 0.95 倍的坝高^[34-35]。考虑地基截取范围对计算结果的影响, 地基的竖向、水平向截取长度 D 按照文献[36]推荐取为 1.8 倍的坝高, 即 360 m。为保证有限元分析的精度, 模型共划分 195 944 个有限元网格。

静力分析过程中, 地基采用线弹性本构模型, 其他材料均采用邓肯张 $E-B$ 本构模型, 具体参数取值如表 1 所示。动力分析时材料采用等效线性本构, 其中堆石料、过渡层和反滤层-1 的动剪切模量和动阻尼比与动剪应变关系曲线如图 9 所示, 心墙和反滤层-2 材料采用沈珠江等效线性模型^[37]进行拟合, 材料参数如表 2 所示。

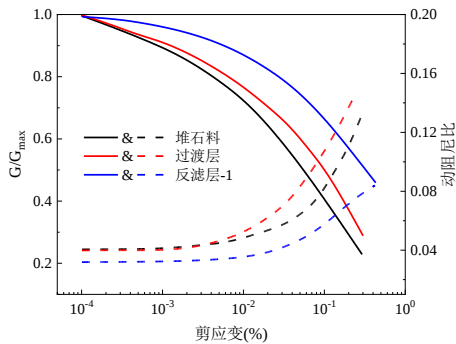


图 9 大坝材料动剪切模量和动阻尼比曲线

Fig.9 Dynamic shear modulus and dynamic damping ratio curves of dam materials

表 1 大坝静力分析材料参数

Table 1 Dam material parameters for static analysis

材料	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	c/kPa	$\varphi_0/^\circ$	$\Delta\varphi/^\circ$	K	n	R_t	K_b	m
堆石料	2040	0	56.4	9.1	1 400	0.28	0.77	770	0.1
过渡层	2 120	0	53.2	7.5	1 260	0.3	0.71	680	0.11
反滤层-1	2 140	0	53.9	8.6	1 250	0.33	0.74	680	0.1
反滤层-2	2000	0	50.1	8	850	0.31	0.74	460	0.09
心墙	2 250	130.5	40.1	4	430	0.45	0.77	350	0.38

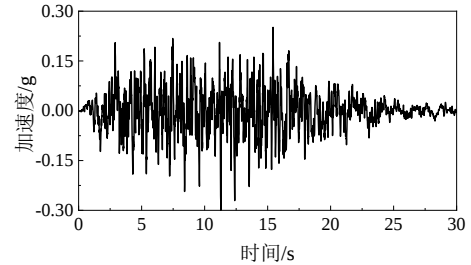
表 2 沈珠江等效线性模型参数

Table 2 Shen Zhu-jiang equivalent linear model parameters

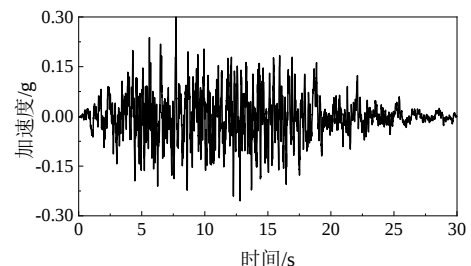
材料	K_1	K_2	n	$\gamma_{\max}$
反滤层-2	28.9	1 876	0.44	0.22
心墙	19.9	811	0.69	0.25

图 10 为由如美大坝的标准反应谱导出的地震动时程曲线, 时间步长为 0.01 s。在输入地震激励时, 竖向地震动的峰值加速度 (Peak Ground Acceleration, PGA) 取为顺河向地震动峰值加速度的 2/3, 坝轴向地震动的峰值加速度取顺河向地震

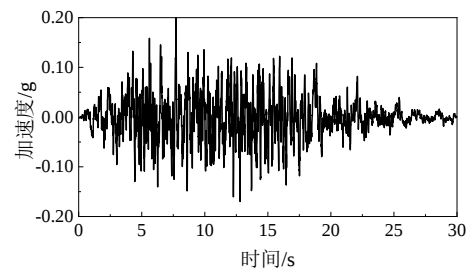
动峰值加速度。参考相关研究^[38], 顺河向地振动的峰值加速度分别取 0.3g、0.4g、0.5g、0.6g。稳定计算中假定堆石料的平均粒径为 0.18 m, 剪切带宽度 b 可以取为 0.90 m。



(a) 顺河向地震动



(b) 坝轴向地震动



(c) 竖向地震动

图 10 地震加速度时程曲线

Fig.10 Seismic acceleration time history curve

4 结果与分析

4.1 三维静动力稳定分析

考虑到大坝的蓄水, 主要考察上游坝坡的稳定情况。采用枚举法进行最危险滑动面搜索, 以改进的号角形滑动面对数螺旋的旋转增长角 ϕ 作为搜索参数, 整体安全系数作为目标函数, 当整体安全系数取最小值时对应的滑动面即为临界滑动面。在进行大坝三维静力稳定分析时, 通过枚举法共搜索到 1 723 个潜在滑动面, 图 11 展示了静力稳定分析搜索到的临界滑动面, 对应的安全系数为 3.15, 与《碾压式土石坝设计规范》(SL 274—2020) 规定的安全系数相比, 该心墙坝有充足的安全余量。图 12 给出了坝坡静力稳定分析临界滑动面中性面的位置。中性面对应滑弧 (红色线) 即为图 2 中对应号角形三维旋转破坏机制的 AD 段。可以看出, 通过对

旋转增加角 ϕ 进行最优搜索,可以更好地使号角形滑动面与坝坡的空间构型相协调。

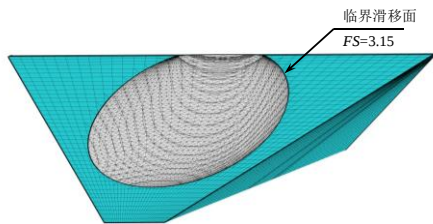


图 11 坝坡静力稳定分析结果

Fig.11 Results of static stability analysis of the dam

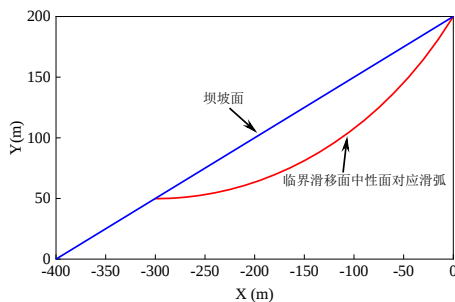


图 12 坝坡静力稳定分析临界滑移面中性面

Fig.12 Neutral surface of critical slip surface for static stability analysis of the dam

动力稳定计算中对每个时间步均采用枚举法搜索最危险滑移面,图 13 为水平向 PGA 为 0.3g 且未考虑堆石料应变软化工况的上游坝坡安全系数时程曲线。该工况在地震动输入后的第 20.79 s 稳定性最差,此时安全系数计算结果为 0.50,整个时程中安全系数小于 1.0 的持时为 1.21 s。上述最低安全系数与安全系数小于 1.0 持时这两个指标分别从最危险状态和危险状态持续时间的角度对坝坡进行动力稳定评价,而累积滑移量可以视为这两种评价指标的综合,且具有明确的物理意义。因而以累积滑移量作为坝坡抗震能力的主要评价指标是必要的,考虑软化效应对滑移量的影响也是有意义的。

为更全面地研究考虑软化效应对震后累积滑移量的影响,对水平向 PGA 分别为 0.3g、0.4g、

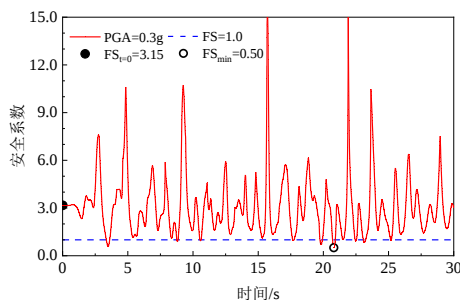


图 13 坝坡动力安全系数时程 (PGA=0.3g)

Fig.13 Time history of dam dynamic safety factor (PGA=0.3g)

0.5g 和 0.6g 的 4 个工况进行稳定计算,每个工况的累积滑移量时程如图 14 所示。顺河向 PGA 取为 0.3g 时,考虑软化效应比不考虑软化效应震后的累积滑移量增加了 6.94 cm,随着 PGA 的增大,软化效应对震后累积滑移量增大的效果更为显著,当顺河向 PGA 分别为 0.4g、0.5g 和 0.6g 时,软化效应致使震后累积滑移量分别增大 58.53 cm、83.73 cm 和 184.19 cm。忽视滑动变形发展而导致的堆石料的抗剪强度下降将会大大高估坝坡的抗震稳定性。此外,滑移量的累积使得峰后剪应变增大,堆石材料强度下降更明显,进而导致 PGA 增大时不考虑软化与考虑软化所得到的滑移量差距变大。而软化效应在粗粒料的应力应变关系中较为常见,因此在进行大坝的三维动力稳定分析时考虑应变软化效应具有重要意义,可以更合理地评估大坝的抗震稳定性。

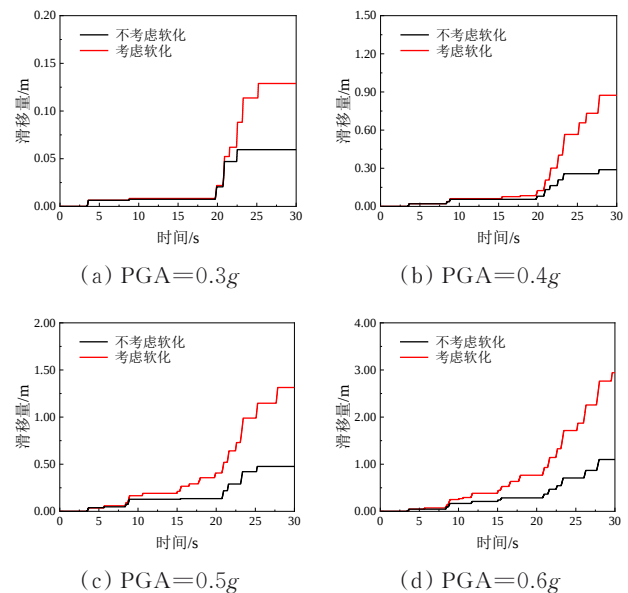


图 14 不同工况的累积滑移量计算结果

Fig.14 Results of cumulative slip under different working conditions

4.2 二维与三维的对比

将三维简化为二维平面应变情况,二维模型采用图 8(b) 所示的顺河向典型切面,材料参数不变,且省略坝轴向地震动输入。不同顺河向 PGA 工况对应的二维与三维大坝安全系数时程对比如图 15 所示。由图 15 可见,两种情况的安全系数峰值时间和波动分布并不同步。图中安全系数会出现显著高于其他时间点的异常值,这是因为地震荷载的往复变化,使得在动力分析阶段每个单元的正应力和切应力也在时刻发生变化,由式(6)可以看出,当某时刻滑移面上的正应力较大而切应力较小时会导致对应的安全系数出现较大值。与二维情况相

比,三维大坝安全系数波动范围较大,波动频率也较大,表明三维情况的动安全系数更容易受到地震的影响。单从安全系数的角度很难去比较两种情况稳定评估结果的大小。

不同PGA工况对应的二维和三维稳定分析结果的最低安全系数 $F_{S,min}$ 、安全系数小于1.0的持时 T_i 、未考虑软化的累积滑移量 d_{max} 和考虑软化的累积滑移量 $d_{s,max}$ 如表3所示。从安全系数小于1.0的持时 T_i 来看,在不同的PGA工况下,三维稳定分析得到的 T_i 总是大于二维稳定分析的结果,且随着

PGA的增大,两者的差距逐步增加。当PGA取0.3g时,三维稳定分析安全系数小于1.0的持时 T_i 相较于二维稳定分析增加了0.08 s,而当PGA取0.6g时,持时的差异达到了1.3 s,说明基于二维稳定分析容易高估高土石坝的抗震稳定性;从累计滑移量的角度来看,考虑与不考虑软化效应对应的三维分析的累计滑移量结果也总是大于二维稳定分析的结果,且随着PGA的增加,滑移量结果的差距逐渐增大,进一步表明对高土石坝进行三维抗震稳定分析更为合理。

表3 二维与三维动力稳定分析结果对比

Table 3 Comparison of 2D and 3D dynamic stability analysis results

水平向PGA/g	二维稳定分析				三维稳定分析			
	$F_{S,min}$	T_i/s	d_{max}/cm	$d_{s,max}/cm$	$F_{S,min}$	T_i/s	d_{max}/cm	$d_{s,max}/cm$
0.3	0.57	1.13	0.61	2.21	0.50	1.21	5.95	12.89
0.4	0.23	1.93	1.50	3.61	0.30	2.43	28.87	87.40
0.5	0.10	2.47	2.58	4.59	0.17	3.18	47.66	131.39
0.6	0.02	2.86	3.72	5.95	0.11	4.16	109.97	294.16

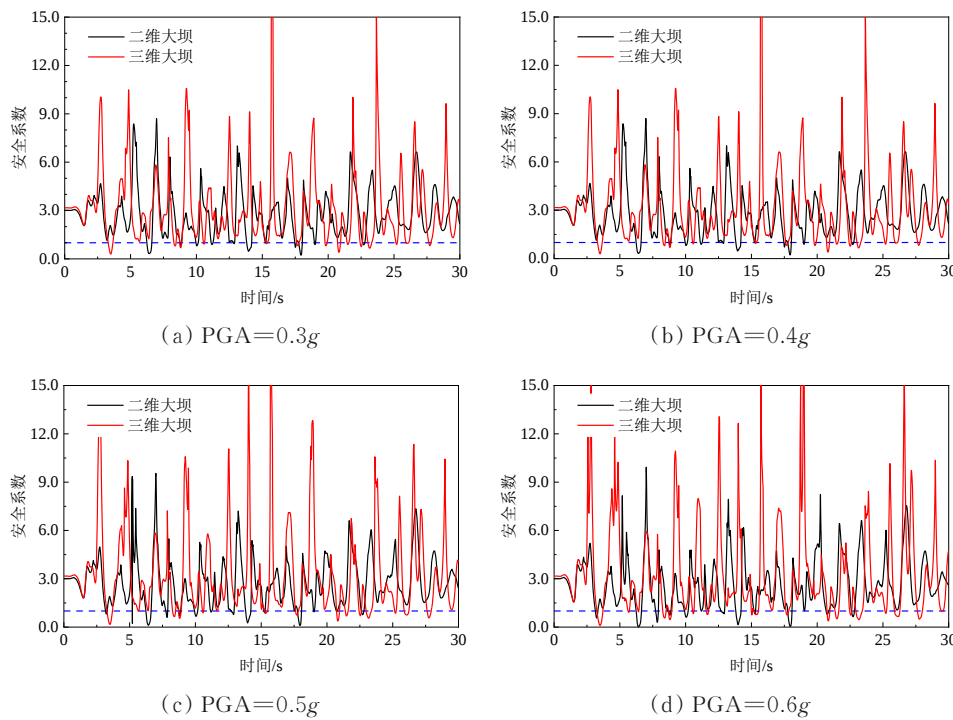


图15 二维与三维动力安全系数时程对比

Fig.15 Comparison of 2D and 3D dynamic safety factor time histories

5 结论

基于优化号角形三维破坏机制的有限元滑面应力法和Newmark滑块位移法,通过对各文献提供的堆石料三轴试验数据进行整理和拟合得到了峰后强度与峰后剪应变的关系,对三维高心墙坝进行了考虑堆石料应变软化效应的静动力稳定分析,得出以下结论:

- 1)提出的三维坝坡优化稳定分析流程考虑了三维坝坡的复杂空间形态、坝体材料的非线性以及堆石料应变软化的影响,能合理地进行坝坡静动力稳定评估,为实际工程提供参考。
- 2)与考虑堆石料软化效应的情况相比,不考虑软化效应将会高估大坝的抗震稳定性,且这种高估会随着累积滑移量的增大而加剧。考虑堆石料软化效应(尤其是在强震易发区)对于高土石坝动力

稳定评估具有重要意义。

3)对比二维与三维稳定计算结果可以看出,二维稳定分析会高估高土石坝的抗震稳定性。从安全系数角度来看,二维稳定分析安全系数小于1.0的持时更短;从累积滑移量角度来看,二维稳定分析得到的累积滑移量结果偏小。因此,对高土石坝进行三维动力稳定分析更为准确合理。

参考文献

- [1] 李镨佳,张建清,王成龙,等.不同振碾条件下高坝堆石料的颗粒破碎与渗透特性[J/OL].土木与环境工程学报(中英文),2024:1-10.(2024-06-19).<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JIAN20240617002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. LI R J, ZHANG J Q, WANG C L, et al. Particle breakage and permeability characteristics of high dam rockfill under different vibratory compacting conditions [J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024: 1-10. (2024-06-19). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JIAN20240617002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese)
- [2] 李卓,方艺翔,鲁洋,等.前期降雨与库水位变化对土石坝渗流及稳定特性影响研究[J].岩土工程学报,2022,44(12):2177-2186. LI Z, FANG Y X, LU Y, et al. Influences of antecedent rainfall and change of reservoir water level on seepage and stability characteristics of earth rock dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44 (12): 2177-2186. (in Chinese)
- [3] 杨星,余挺,金伟,等.两河口超高心墙堆石坝三维非线性地震反应分析[J].土木与环境工程学报(中英文),2023,45(3):9-15. YANG X, YU T, JIN W, et al. Three dimensional non-linear seismic response analysis of Lianghekou super high core rockfill dam [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(3): 9-15. (in Chinese)
- [4] 李典庆,周强,曹子君.基于广义可靠指标相对安全率的高土石坝坝坡稳定设计安全判据[J].中国科学:技术科学,2024,54(3):501-514. LI D Q, ZHOU Q, CAO Z J. Safety criteria for slope stability of high rockfill dams based on the generalized reliability ratio of safety margin [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2024, 54(3): 501-514. (in Chinese)
- [5] 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 J M, LIU X S, YANG Y S, 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)
- [6] NEWMARK N M. Effects of earthquakes on dams and embankments [J]. Géotechnique, 1965, 15(2): 139-160.
- [7] 栾茂田,李湛,范庆来.土石坝拟静力抗震稳定性分析与坝坡地震滑移量估算[J].岩土力学,2007,28(2):224-230,236. LUAN M T, LI Z, FAN Q L. Analysis and evaluation of pseudo-static aseismic stability and seism-induced sliding movement of earth-rock dams [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 224-230, 236. (in Chinese)
- [8] 徐斌,邹德高,孔宪京,等.高土石坝坝坡地震稳定性分析研究[J].岩土工程学报,2012,34(1):139-144. XU B, ZOU D G, KONG X J, et al. Seismic stability of slopes of high rockfill dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 139-144. (in Chinese)
- [9] 梁军.高面板堆石坝流变特性研究[D].南京:河海大学,2003. LIANG J. Research on rheology properties of high concrete-faced rock-fill dams [D]. Nanjing: Hohai University, 2003. (in Chinese)
- [10] 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 Y, ZOU D G, XU B, et al. 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)
- [11] 孔宪京,庞锐,徐斌,等.考虑堆石料软化的坝坡随机地震动力稳定分析[J].岩土工程学报,2019,41(3):414-421. KONG X J, PANG R, XU B, et al. Stochastic seismic stability analysis of dam slopes considering softening of rockfills [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(3): 414-421. (in Chinese)
- [12] 邓东平,李亮.基于滑动面应力假设下的三维边坡稳定性极限平衡法研究[J].岩土力学,2017,38(1):189-196. DENG D P, LI L. Three-dimensional limit equilibrium method for slope stability based on assumption of stress on slip surface [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38 (1): 189-196. (in Chinese)
- [13] 赵剑明,常亚屏,陈宁.高心墙堆石坝地震变形与稳定分析[J].岩土力学,2004,25(增刊2):423-428. ZHAO J M, CHANG Y P, CHEN N. Study on earthquake-induced permanent deformation and dynamic stability of high core rockfill dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Sup 2): 423-428. (in Chinese)
- [14] 张泽宇.基于有限元滑面应力法的高面板堆石坝三维抗震稳定分析[D].辽宁大连:大连理工大学,2018. ZHANG Z Y. Three-dimensional aseismic stability anal-

- ysis of high concrete face rockfill dam based on finite element sliding-surface stress method [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [15] SONG L F, XU B, KONG X J, et al. Three-dimensional slope dynamic stability reliability assessment based on the probability density evolution method [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 120: 360-368.
- [16] ZOU J Z, WILLIAMS D J, XIONG W L. Search for critical slip surfaces based on finite element method [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32(2): 233-246.
- [17] FARIAS M M, NAYLOR D J. Safety analysis using finite elements [J]. *Computers and Geotechnics*, 1998, 22(2): 165-181.
- [18] 邵龙潭, 刘士乙, 李红军. 基于有限元滑面应力法的重力式挡土墙结构抗滑稳定分析[J]. *水利学报*, 2011, 42(5): 602-608.
- SHAO L T, LIU S Y, LI H J. Analysis of stability against sliding for gravity retaining wall structure based on finite element slip surface stress method [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(5): 602-608. (in Chinese)
- [19] 邵龙潭, 唐洪祥, 韩国城. 有限元边坡稳定分析方法及其应用[J]. *计算力学学报*, 2001, 18(1): 81-87.
- SHAO L T, TANG H X, HAN G C. Finite element method for slope stability analysis with its applications [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2001, 18(1): 81-87. (in Chinese)
- [20] XU M Y, ZHOU Y, PANG R, et al. A novel finite element limit equilibrium method and its application in instability analysis for 3-D high core rockfill dams [J]. *Structures*, 2024, 68: 107066.
- [21] MICHALOWSKI R L, DRESCHER A. Three-dimensional stability of slopes and excavations [J]. *Géotechnique*, 2009, 59(10): 839-850.
- [22] 赵留园, 黄雨. 地震作用下边坡随机动力分析方法的若干进展[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(3): 584-596.
- ZHAO L Y, HUANG Y. Advances in stochastic dynamic analysis of slopes under earthquakes [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(3): 584-596. (in Chinese)
- [23] DU W Q, WANG G. A one-step Newmark displacement model for probabilistic seismic slope displacement hazard analysis [J]. *Engineering Geology*, 2016, 205: 12-23.
- [24] 蔡云惠. 堆石料三维多重机构界面模型研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- CAI Y H. A study on 3D multi-mechanism bounding surface model for rockfills [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [25] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1970, 96(5): 1629-1653.
- [26] 徐志华, 孙大伟, 张国栋. 堆石料应力-应变特性大型三轴试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(6): 1565-1572.
- XU Z H, SUN D W, ZHANG G D. Study on stress-strain behavior of rockfill using large-scale triaxial tests [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(6): 1565-1572. (in Chinese)
- [27] 张鹏涛. 堆石料碾压模拟及宏观力学特性研究 [D]. 西宁: 青海大学, 2022.
- ZHANG P T. Rockfill rolling simulation and macro-micro mechanical properties research [D]. Xining: Qinghai University, 2022. (in Chinese)
- [28] 宁凡伟. 基于超大型三轴仪的筑坝粗粒料缩尺效应研究 [D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2020.
- NING F W. Research on the scale effect of coarse grained materials based on super large triaxial apparatus [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [29] 邓成进. 高混凝土面板砂砾石坝筑坝料力学特性及坝体分区研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- DENG C J. Study on mechanical properties of dam materials and dam body zoning for high concrete face gravel dam [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [30] 孟敏强. 考虑颗粒级配和破碎演化的堆石料强度特性及本构模型研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- MENG M Q. Study on strength behaviors and constitutive model of rockfill materials considering gradation and particle breakage [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese)
- [31] GUO W L, CAI Z Y, WU Y L, et al. Estimations of three characteristic stress ratios for rockfill material considering particle breakage [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2019, 32(2): 215-229.
- [32] GUO W L, SONG D Q, LI X M. Unified model of critical state line for rockfill material with and without considering particle breakage [J]. *Acta Geotechnica*, 2024, 19(4): 2273-2291.
- [33] KHONJI A, BAGHERZADEH-KHALKHALI A, AGHAEI-ARAEI A. Experimental investigation of rockfill particle breakage under large-scale triaxial tests using five different breakage factors [J]. *Powder Technology*, 2020, 363: 473-487.
- [34] 陈立宏, 陈祖煜. 堆石非线性强度特性对高土石坝稳定性的影响[J]. *岩土力学*, 2007, 28(9): 1807-1810.
- CHEN L H, CHEN Z Y. Effect of nonlinear strength of rockfill on slope stability of high earth-rock dam [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(9): 1807-1810. (in Chinese)

[35] PANG R, YANG Y M, ZHOU Y, et al. Seismic reliability analysis of high earth-rockfill dams subjected to mainshock-aftershock sequences using a novel noninvasive stochastic finite element method [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 183: 108817.

[36] 孔宪京, 周晨光, 邹德高, 等. 高土石坝-地基动力相互作用的影响研究[J]. 水利学报, 2019, 50(12): 1417-1432.

KONG X J, ZHOU C G, ZOU D G, et al. Influence of the dynamic interaction between high rockfill dam and foundation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(12): 1417-1432. (in Chinese)

[37] 沈珠江, 徐刚. 堆石料的动力变形特性[J]. 水利水运科学研究, 1996(2): 143-150.

SHEN Z J, XU G. Deformation behavior of rock materials under cyclic loading [J]. Hydro-Science and Engineering, 1996(2): 143-150. (in Chinese)

[38] 李国英, 沈婷, 赵魁芝. 高心墙堆石坝地震动力特性及抗震极限分析[J]. 水利水运工程学报, 2010(1): 1-8.

LI G Y, SHEN T, ZHAO K Z. Seismic dynamic behavior and limit aseismic analysis on high earth core rockfill dams [J]. Hydro-Science and Engineering, 2010 (1): 1-8. (in Chinese)

(编辑 XXX)