

DOI:10.11784/tdxbz202506013

混凝土堆石组合坝主动土压力上限分析

杨 贵^{1,2}, 兰宜兵^{1,2}, 姚栓喜³, 李 锋³

(1. 河海大学精细爆破全国重点实验室, 南京 210024; 2. 河海大学土木与交通学院, 南京 210024;
3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065)

摘 要: 混凝土堆石组合坝是一种融合面板堆石坝与混凝土重力坝各自优点的新型坝体结构。为解决有限土体高度下混凝土堆石组合坝中重力坝主动土压力计算问题, 本文基于极限分析上限法, 通过构建重力坝下游的堆石体平面滑动破坏机制, 建立外力功率与内能耗散功率平衡方程, 推导出主动土压力表达式。研究表明: 主动土压力随坝高比增加呈现典型的非线性增长特征, 其变化规律符合指数函数关系, 且在坝高比达到临界值后趋于稳定; 滑裂面的发展模式表现出明显的阶段性特征, 其倾角随坝高比增大而逐渐增大, 破坏路径从下游坝坡逐步向上游坝坡扩展。主动土压力与坝土摩擦角、面板堆石坝倾角呈显著正相关, 而与重力坝倾角、堆石料内摩擦角和黏聚力呈负相关关系。坝高比对主动土压力的影响幅度达 20%~48%, 是最重要的影响因素之一。此外, 黏聚力对主动土压力的影响呈现独特的非线性特征, 表现为先增强后减弱的变化规律。基于因子变换法的局部灵敏度分析进一步识别出重力坝倾角、重力坝坝高和堆石料内摩擦角为高灵敏度参数, 而坝土摩擦角与面板堆石坝倾角的灵敏度则显著受坝高比控制。该模型清晰地揭示了混凝土堆石组合坝重力坝段在有限土体高度条件下的主动土压力发展规律及参数影响机制, 为该坝型的抗滑稳定性设计和优化提供了重要的理论依据。

关键词: 混凝土堆石组合坝; 主动土压力; 上限分析; 有限土体高度

中图分类号: TV641

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)07-0768-08

Analysis of Upper Bound Limit of Active Earth Pressure of Concrete Rockfill Composite Dam

Yang Gui^{1,2}, Lan Yibing^{1,2}, Yao Shuanxi³, Li Feng³

(1. State Key Laboratory of Precision Blasting, Hohai University, Nanjing 210024, China;
2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;
3. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: The concrete rockfill composite dam (CRCD) is a novel dam structure that integrates the respective advantages of concrete face rockfill dams and concrete gravity dams. To address the challenge of accurately calculating the active earth pressure on the concrete gravity dam section of a CRCD under finite soil height conditions, the upper bound limit analysis method is adopted in this paper. A planar sliding failure mechanism for the downstream rockfill is established, and the active earth pressure expression is derived by balancing the external work rate and the internal energy dissipation rate. Results indicate that the active earth pressure exhibits a typical nonlinear increase with the dam height ratio, following an exponential relationship and tending to stabilize once the ratio reaches a critical value. The development of the sliding surface shows unique stage-specific characteristics, i.e., its inclination angle gradually increases with the dam height ratio, and the failure path progressively extends from the downstream slope toward the upstream slope. The active earth pressure is positively correlated with the dam-soil friction angle and the concrete face rockfill dam inclination angle, while it is negatively correlated with the concrete gravity dam inclination angle, the

收稿日期: 2025-06-08; 修回日期: 2026-01-13.

作者简介: 杨 贵 (1977—), 男, 博士, 副教授.

通信作者: 杨 贵, ygheitu@hhu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51479059).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51479059).

rockfill internal friction angle and cohesion. The dam height ratio, whose influence ranges from 20% to 48%, is identified as one of the most significant factors. Furthermore, the effect of cohesion on active earth pressure demonstrates a unique nonlinear pattern, characterized by an initial increase followed by a subsequent decrease. A local sensitivity analysis based on the factor transformation method further identifies the concrete gravity dam inclination angle, concrete gravity dam height and rockfill internal friction angle as highly sensitive parameters. In contrast, the sensitivities of the dam-soil friction angle and concrete face rockfill dam inclination angle are significantly controlled by the dam height ratio. The proposed model clearly reveals the evolution law of active earth pressure and the parameter influence mechanisms in the concrete gravity dam section under finite soil height conditions, providing a solid theoretical foundation for the anti-sliding stability design and optimization of this dam type.

Keywords: concrete rockfill composite dam; active earth pressure; upper bound limit analysis; finite soil height

水电是清洁可再生能源,其既保障了国家能源安全,也保障了社会经济生态可持续发展。混凝土面板堆石坝以其优越的安全性、经济性、适应复杂地形和地质条件等优势在水利水电工程中得到了广泛应用。在中国西部,相关部门建设和规划了一批坝高超200.0 m的特高面板堆石坝^[1],如水布垭面板堆石坝(233.0 m)^[2]、茨哈峡面板堆石坝(257.5 m)^[3]、大石峡面板堆石坝(250 m)^[4]和猴子岩面板堆石坝(223.5 m)^[5]。

一般技术条件下潜水员下潜极限深度为60 m左右,如何实现特高面板堆石坝上游铺盖以下的防渗体结构在极端工况下的可检查和维修功能,已成为亟待解决的问题^[6]。基于此,中国电建集团西北勘测设计研究院团队在综合考虑面板堆石坝和混凝土重力坝各自优点的基础上,提出了混凝土堆石组合坝,即在面板堆石坝的“坝踵”附近将一定高度的重力坝“嵌入”面板堆石坝,在混凝土重力坝内部沿高程布置多层廊道,从而实现面板坝上游铺盖以下的防渗体结构的可检查和维修功能。

混凝土堆石组合坝作为一种新坝型,其底部重力坝抗滑稳定性成为设计的关键,其中如何计算重力坝下游面的主动土压力成为设计的难点^[7]。

在经典土压力理论^[8-9]出现之后,学者们对主动土压力的研究已持续了多年,因其力学概念明确,计算过程简便,在工程设计中得到广泛的应用^[10-11]。Rankine理论^[8]要求墙背竖直光滑、填土表面水平的理想条件。Coulomb理论^[12]虽能处理墙背倾斜、粗糙及填土表面倾斜等复杂边界,但其假设平面滑裂面和线性土压力分布,且仅适用于无黏性土。后续研究不断扩展经典理论(如彭明祥^[13]提出的统一解)并发展新方法,如水平层分析法^[14-15]。在分析过程中,考虑土拱效应来克服经典土压力理论无法反映土压力的非线性分布特征^[16-18],在此基础上建立了考虑土体强度参数随法向应力变化的主动土压力计算方法^[19]。

基于塑性理论的极限分析法将土体视为理想塑性材料,通过流动法则严格考虑本构关系,通过构造运动许可的破坏机构和协调的速度场,建立外力功率与内部塑性耗散功率的平衡方程,求得上限解和下限解,与极限平衡法相比更为严格^[20]。极限分析法的优点^[21-23]为:其能更合理地模拟实际破坏机制,可有效处理复杂边界条件和荷载;若破坏机构选取得当,其解与实际工程吻合良好,并具备处理非线性破坏准则的潜力。

尽管近年来主动土压力研究取得了诸多进展,但当前研究主要集中于无限土体或深填土条件下的主动土压力计算。对于有限土体宽度和高度条件下的主动土压力,研究相对较少^[24]。

鉴于极限分析上限法在理论基础严谨性、机制模拟合理性和处理复杂问题能力方面的显著优势,本文聚焦混凝土堆石组合坝的主动土压力问题,采用该方法作为分析主动土压力的理论框架,重点在于构建合理的破坏机构并优化求解,以期为工程设计和施工提供理论依据。

1 主动土压力上限分析

1.1 基本假设

对于重力式挡墙主动土压力,墙后土体滑裂面的常见破坏类型有对数螺旋面和平面^[22,25]。本文研究对象与重力式挡墙相似,参考芮瑞等^[26]的物理模型试验和梁军等^[27]的理论分析成果,为简化分析,做以下基本假设:重力坝向远离堆石料的方向平动,直至土体破坏;堆石料服从Mohr-Coulomb屈服准则和相关流动法则;滑动堆石料沿平面失稳;上部面板堆石坝上、下游倾角相同;坝顶宽度为0;墙土摩擦角小于堆石料内摩擦角。

考虑坝体结构形式,随着上游水位的升高,混凝土重力坝抗滑稳定安全系数会增大。本研究主要聚

焦于对重力坝抗滑稳定最为不利的空库或低水位运行工况,在此条件下作用于坝体的上游水压力可忽略不计,下游堆石体产生的主动土压力成为控制性荷载.因此,文中关于重力坝向远离堆石料方向平动的假设成立,且基于此开展主动土压力上限分析具有明确的工程安全意义.当上游水压力显著增大时(例如高水位运行工况),坝体潜在失稳模式将发生改变,其下游面土压力状态可能趋近于被动土压力,此情形已超出本文讨论范围.

设重力坝高度为 H_G ,下游坝坡与水平方向夹角为 α ,重力坝与墙后填料之间的摩擦角为 δ ,上部面板堆石坝坝高为 H_R ,上、下游坡比相同,对应倾角为 β ,坝坡滑裂面与水平方向的夹角为 θ ,堆石料的容重、内摩擦角和黏聚力分别为 γ_s 、 φ 和 c_s .对于不同的模型尺寸和材料参数,滑裂面破坏模式会呈现两种模式,即过上游坝坡的模式(BD')和过下游坝坡的模式(BD),如图 1 所示.

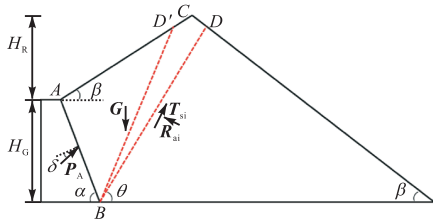


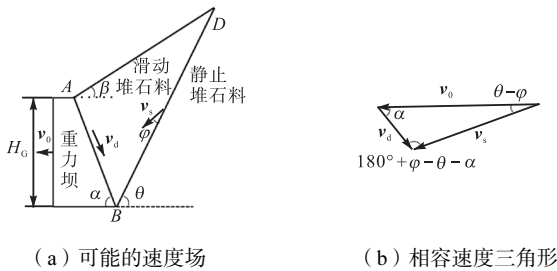
图 1 混凝土堆石组合坝平面滑动模式示意

Fig.1 Schematic of planar sliding modes for concrete rockfill composite dam

假设作用在重力坝下游破坏堆石料上的外力包括:滑动堆石料重力 G ,重力坝对堆石料的反力 P_A ,滑裂面处的法向力 R_{ai} 和摩擦力 T_{si} .

1.2 速度场构造

由相关联的正交流动法则,刚体平移时位移速度与滑裂面的夹角为土体内摩擦角.设重力坝水平滑动速度为 v_0 ,则各部位的运动速度如图 2 所示.



(a) 可能的速度场

(b) 相容速度三角形

图 2 主动破坏机制速度场

Fig.2 Velocity field of active failure mechanism

破坏堆石料在滑裂面上的速度 v_s 和重力坝下游面的相对速度 v_d 分别为

$$v_s = v_0 \sin \alpha / \sin(\alpha + \theta - \varphi) \quad (1)$$

$$v_d = v_0 \sin(\theta - \varphi) / \sin(\alpha + \theta - \varphi) \quad (2)$$

1.2.1 外力作用功率计算

作用于滑动堆石料上的外力包括重力和主动土压力,以下分别计算它们对滑动堆石料的功率.

重力的功率 $\dot{W}_G$ 为

$$\dot{W}_G = G v_s \sin(\theta - \varphi) \quad (3)$$

主动土压力的功率 $\dot{W}_p$ 为

$$\dot{W}_p = -P_A v_0 \sin(\alpha - \delta) \quad (4)$$

1.2.2 内能耗散率计算

内能耗散仅发生在速度不连续面上,即重力坝下游面的内能耗散率 $\dot{W}_{ss}$ 和堆石料滑裂面的内能耗散率 $\dot{W}_{sd}$ 分别为

$$\dot{W}_{ss} = c_s v_s \cos \varphi L_{BD} \quad (5)$$

$$\dot{W}_{sd} = v_d P_A \sin \delta + c_d v_d L_{AB} \quad (6)$$

式中: c_d 为重力坝下游面与堆石料之间的黏聚力; L_{AB} 和 L_{BD} 分别为重力坝下游面和堆石料滑裂面的长度. L_{BD} 的计算式为

$$L_{BD} = \begin{cases} \frac{H_G \sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha \sin(\theta - \beta)} & \theta > \theta_{BC} \\ \frac{2H_R \cos \beta}{\sin(\theta + \beta)} + \frac{H_G \sin(\alpha - \beta)}{\sin \alpha \sin(\theta + \beta)} & \theta \leq \theta_{BC} \end{cases}$$

$$\theta_{BC} = \arctan \left(\frac{(H_G + H_R) \sin \alpha \sin \beta}{H_R \sin \alpha \cos \beta - H_G \cos \alpha \sin \beta} \right)$$

1.3 主动土压力计算

由外荷载的功率与塑性区破坏的内能耗散率相平衡,则有

$$\dot{W}_{ss} + \dot{W}_{sd} = \dot{W}_G + \dot{W}_p \quad (7)$$

经过计算,主动土压力为

$$P_A = P_w + P_s + P_d \quad (8)$$

式中: P_w 为由土体重力引起的主动土压力, $P_w = \gamma_s S_d \sin(\theta - \varphi) / \sin(\alpha + \theta - \varphi - \delta)$; P_s 为内能耗散在滑裂面上引起的主动土压力, $P_s = -\frac{c_s \cos \varphi L_{BD}}{\sin(\alpha + \theta - \varphi - \delta)}$; P_d 为内能耗散在重力坝下游面上引起的主动土压力, $P_d = -\frac{c_d \sin(\theta - \varphi) H_G}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha + \theta - \varphi - \delta)}$.

上述计算式中新出现的变量 S_d 的计算式为

$$S_d = \begin{cases} S_{d1} & \theta > \theta_{BC} \\ S_{d1} + S_{d2} + S_{d3} & \theta \leq \theta_{BC} \end{cases}$$

$$S_{d1} = \frac{H_G^2 \sin(\alpha + \beta) \sin(\alpha + \theta)}{2 \sin^2 \alpha \sin(\theta - \beta)}$$

$$S_{d2} = \frac{(0.5 + \cos \beta) H_G H_R \sin(\alpha + \theta)}{\sin \alpha \sin(\theta + \beta)}$$

$$S_{A3} = -[H_R^2 \sin(\theta - \beta)] / [2 \sin \beta \sin(\theta + \beta)]$$

当土体处于主动极限状态时, 则有 $\partial P_A / \partial \theta = 0$. 采用数学优化进行分析, 可得当主动土压力达到最大时, 对应的滑裂面夹角即为临界滑裂面夹角 θ_{cr} .

在采用平面滑裂面假设下, 基于上限分析法的主动土压力计算模型与 Coulomb 理论在数学上等效. 这是因为当破坏机限制定为平面时, 上限分析法的能量守恒条件与 Coulomb 理论的静力平衡条件等价, 导致两者计算结果一致. 因此, 本文未进行方法对比, 但这一等效性揭示了 Coulomb 理论作为上限分析法特例的理论联系.

2 参数影响分析

设重力坝高度为 50 m, 下游倾角为 55° , 上部面板堆石坝坝高为 50 m, 堆石坝上、下游坡比相等, 均为 1:1.43 (简述为堆石坝倾角 35°), 下游堆石料黏聚力和内摩擦角分别为 0 kPa 和 40° , 容重为 21 kN/m^3 , 重力坝与堆石料摩擦角为 20° .

2.1 坝高影响分析

考虑不同坝高比 (面板堆石坝与重力坝高度比), 主动土压力及临界滑裂面夹角的变化规律如图 3 所示. 分析结果表明: 随着坝高比的增大, 临界滑裂面夹角逐渐减小, 而主动土压力则逐渐增大, 最后两者均趋于稳定. 稳定状态下的临界滑裂面夹角即为常规临界值, 此时滑裂面从非稳定阶段的下游坝坡逐渐发展至上游坝坡. 图 3 中 $H_R/H_G = 1.0$ 为非稳定状态, $H_R/H_G = 3.0$ 为稳定状态, 稳定状态下的结论与经典 Coulomb 理论解^[13]相符. 研究表明: 坝高比对主动土压力具有显著影响, 不同坝高比工况下的主动土压力最大差异可达 30%.

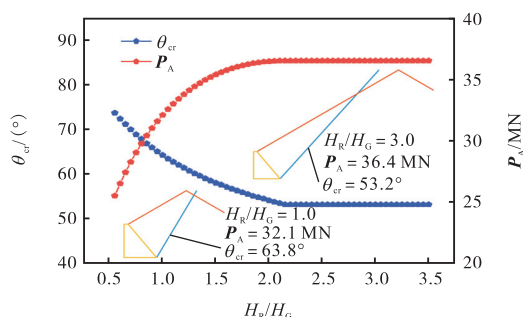


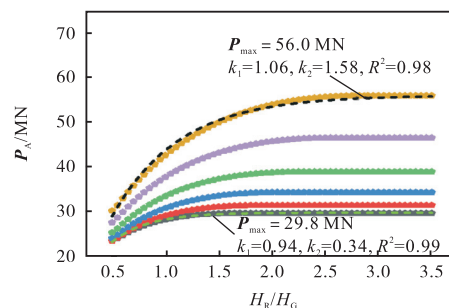
图 3 坝高比与主动土压力和临界滑裂面夹角关系曲线

Fig.3 Variation of active earth pressure and critical slip surface angle with dam height ratio

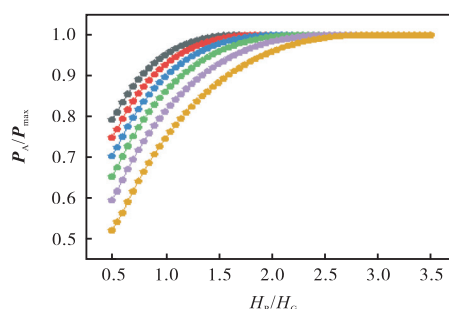
2.2 坝土摩擦角分析

为了分析坝土摩擦角对主动土压力的影响, 基于

初始模型参数, 对 δ/φ 取 0~1.00 范围内 (满足 $\delta < \varphi$) 的不同值进行分析. 图 4 给出了不同坝土摩擦角随坝高比变化的关系曲线, 其中 P_{max} 为忽略坝高比影响的主动土压力.



(a) 主动土压力与坝高比和坝土摩擦角的关系



(b) 归一化主动土压力与坝高比和坝土摩擦角的关系

— $\delta/\varphi=0$ — $\delta/\varphi=0.40$ — $\delta/\varphi=0.80$
— $\delta/\varphi=0.20$ — $\delta/\varphi=0.60$ — $\delta/\varphi=0.95$

图 4 坝土摩擦角对主动土压力的影响

Fig.4 Effects of dam-soil friction angle on active earth pressure

从图 4 中可以看出: 不同坝土摩擦角下主动土压力的分布规律相同, 即其随着坝高比的增大呈非线性增大, 最后趋于稳定; 坝土摩擦角越大, 达到最大主动土压力的坝高比越大; 相同坝高比下, 坝土摩擦角越大, 主动土压力越大, 归一化主动土压力 (P_A/P_{max}) 越小 (最小值达到 0.5). 分析表明, 相同坝高比下主动土压力最大差异达到 28%, 可以看出坝土摩擦角对重力坝挡墙上主动土压力有重要影响. 不同坝高比下的主动土压力最大差异可达到 21%~48%.

主动土压力与坝高比呈指数函数变化规律, 其表达式为

$$P_A = P_{max} [1 - k_1 \exp(-k_2 H_R / H_G)] \quad (9)$$

式中 k_1 和 k_2 为拟合参数.

当 δ/φ 分别为 0 和 0.95 时, 对应的拟合参数 k_1 和 k_2 分别为 0.94 和 0.34 以及 1.06 和 1.58, 其拟合相关系数 R^2 均不小于 0.98, 如图 4 所示.

图 5 揭示了不同坝土摩擦角与临界滑裂面夹角之间的变化关系. 从图 5 中可以看出, 在不同坝土摩擦角条件下, 临界滑裂面夹角随坝高比的变化规律基

本一致:随着坝高比的增大,临界滑裂面夹角逐渐减小,最后趋于稳定.相同坝高比下,坝土摩擦角越大,所对应的临界滑裂面夹角越小.临界滑裂面夹角趋于稳定时的取值与坝体上、下游分界线(即堆石坝坝顶与重力坝坝址连线)基本一致.这一现象说明:滑裂面夹角位于该分界线下时,滑裂面位于下游坝坡范围内;反之,滑裂面延伸至上游坝坡区域.

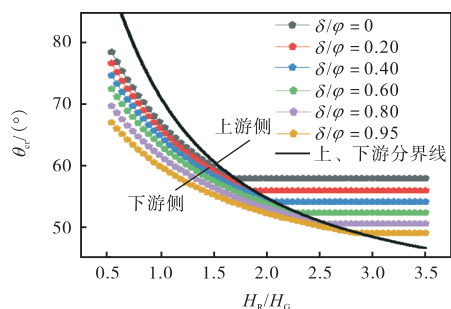
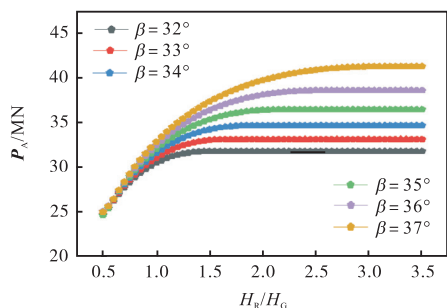


图 5 坝土摩擦角对临界滑裂面夹角的影响

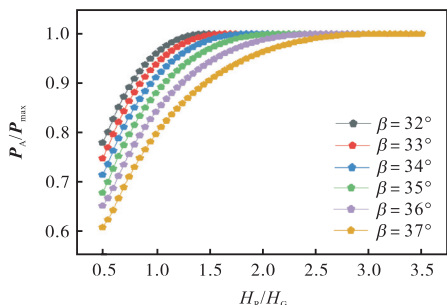
Fig.5 Effects of dam-soil friction angle on critical slip surface angle

2.3 堆石坝倾角分析

在计算堆石坝倾角对主动土压力的影响时,基于初始模型参数,对 β 取 $32^\circ \sim 37^\circ$ 范围内的不同值进行分析.图 6 给出了不同堆石坝倾角随坝高比变化的关系曲线.



(a) 主动土压力与坝高比和堆石坝倾角的关系



(b) 归一化主动土压力与坝高比和堆石坝倾角的关系

图 6 堆石坝倾角对主动土压力的影响

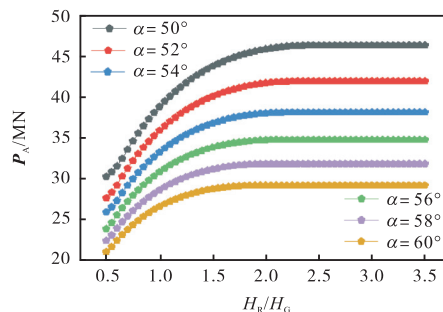
Fig.6 Effects of inclination angle of rockfill dam on active earth pressure

从图 6 中可以看出:主动土压力随着坝高比和堆

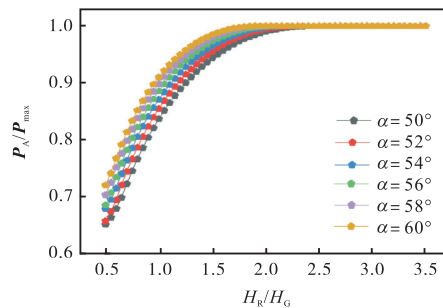
石坝倾角的增大而增大,最后趋于稳定;堆石坝倾角越大,达到最大主动土压力的坝高比越大.不同坝高比下的主动土压力最大差异可达到 $22\% \sim 39\%$,相同坝高比下因堆石坝倾角变化而引起的主动土压力差异达到 18% ,可以看出倾角对主动土压力亦有重要影响.

2.4 重力坝倾角分析

计算重力坝倾角对主动土压力影响时,基于初始模型参数,对 α 取 $50^\circ \sim 60^\circ$ 范围内的不同值进行分析.图 7 给出了不同重力坝下游倾角随坝高比变化的关系曲线.从图 7 中可以看出:重力坝下游倾角越大,主动土压力越小,达到最大主动土压力的坝高比越小.不同坝高比下的主动土压力最大差异可达到 $28\% \sim 35\%$,相同坝高比下主动土压力最大差异约为 8% ,可以看出重力坝倾角对主动土压力的影响较小.



(a) 主动土压力与坝高比和重力坝倾角的关系



(b) 归一化主动土压力与坝高比和重力坝倾角的关系

图 7 重力坝倾角对主动土压力的影响

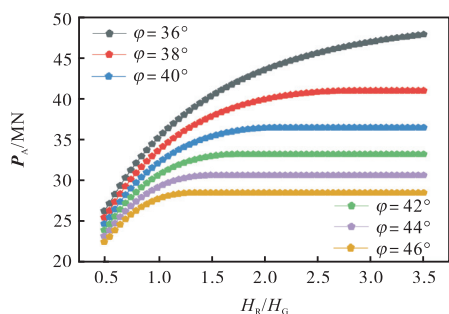
Fig.7 Effects of inclination angle of gravity dam on active earth pressure

2.5 堆石料强度参数分析

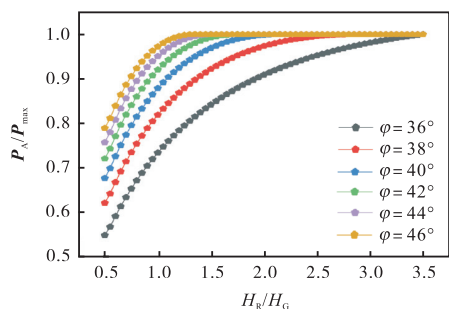
计算堆石料内摩擦角对主动土压力影响时,基于初始模型参数,对 φ 取 $36^\circ \sim 46^\circ$ 范围内的不同值进行分析.图 8 给出了不同堆石料内摩擦角随坝高比变化的关系曲线.

从图 8 中可以看出:内摩擦角越大,主动土压力越小,达到最大主动土压力的坝高比越小.不同坝高比下的主动土压力最大差异可达到 $21\% \sim 45\%$,相同坝高比下因内摩擦角变化而引起的主动土压力最

大差异为 25%, 可以看出堆石料内摩擦角对重力坝挡墙上主动土压力有重要影响。



(a) 主动土压力与坝高比和堆石料内摩擦角的关系

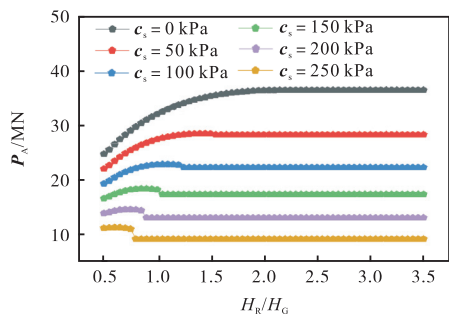


(b) 归一化主动土压力与坝高比和堆石料内摩擦角的关系

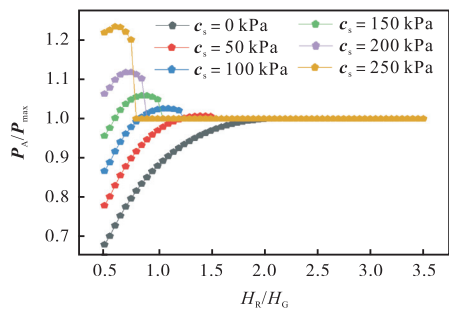
图 8 堆石料内摩擦角对主动土压力的影响

Fig.8 Effects of rockfill internal friction angle on active earth pressure

在计算堆石料黏聚力对主动土压力影响时, 基于初始模型参数 c_s 取 0 ~ 250 kPa 范围内的不同值进行分析。图 9 给出了不同堆石料黏聚力随坝高比变化的关系曲线。从图 9 中可以看出, 黏聚力对主动土压力



(a) 主动土压力与坝高比和堆石料黏聚力的关系



(b) 归一化主动土压力与坝高比和堆石料黏聚力的关系

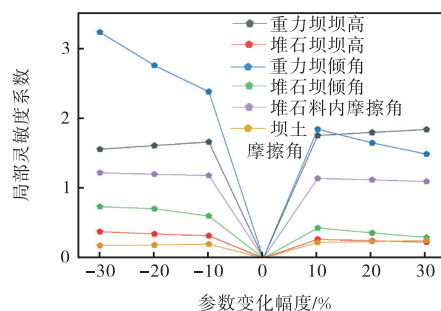
图 9 堆石料黏聚力对主动土压力的影响

Fig.9 Effects of rockfill cohesion on active earth pressure

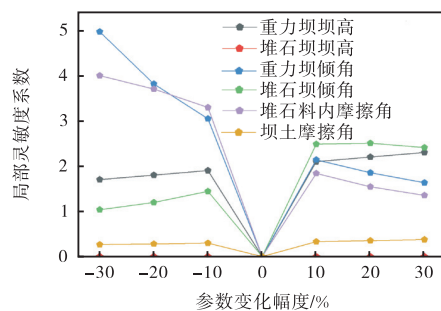
的大小有显著影响, 其变化规律呈现阶段性特征: 当黏聚力较小时, 主动土压力随坝高比的增大而逐渐增大, 最终趋于稳定; 当黏聚力较大时, 主动土压力随坝高比的增大先增大后减小, 最后亦趋于稳定。不同工况下主动土压力的最大差异可达 32%。

2.6 参数灵敏度分析

灵敏度分析可用于定量评估各输入参数变化对输出结果的影响程度, 其通过识别模型中的高灵敏度参数, 为重力坝的断面设计与回填料强度参数选择提供依据。基于局部导数信息的因子变换法^[28]对主动土压力进行局部灵敏度分析。该方法的结果在很大程度上依赖于所选初始点的位置, 不同初始点可能导致分析结论存在显著差异。图 10 为两种典型初始坝高比(1.0 与 3.0)下的局部灵敏度分析结果, 分别对应滑裂面经过下游与上游坝坡的两种典型破坏机制。从图 10 中可以看出: 重力坝倾角、重力坝坝高及堆石料内摩擦角表现为高灵敏度参数。坝土摩擦角与面板堆石坝倾角的灵敏度受坝高比影响显著; 当坝高比较大、滑裂面转向上游坝坡时, 面板堆石坝倾角亦转变为高灵敏度参数。



(a) 初始坝高比为 1.0



(b) 初始坝高比为 3.0

图 10 主动土压力局部灵敏度分析结果

Fig.10 Results of local sensitivity analysis for active earth pressure

3 结 论

本文基于上限分析法, 系统研究了混凝土堆石组合坝下游面主动土压力的变化规律及其关键影响因

素,主要结论如下.

(1) 基于二维楔体滑动模式推导了考虑滑裂面不同破坏模式的坝土界面内能损耗混凝土堆石组合坝主动土压力上限解,模型考虑了混凝土堆石组合坝坝高比、面板堆石坝倾角和重力坝倾角等因素的影响.

(2) 坝高比与主动土压力之间呈指数函数变化规律. 坝高比是决定主动土压力大小和潜在滑裂面位置的关键参数,坝高比较小时滑裂面位于下游坝坡,随着坝高比的增大,滑裂面向上游旋转,最后趋于稳定. 主动土压力变化规律与滑裂面倾角基本一致,主动土压力差异可达 20% ~ 48%,忽略坝高比的影响会导致主动土压力计算偏高.

(3) 主动土压力随着坝高比的增大逐渐增大,后趋于稳定. 其与重力坝倾角、堆石料内摩擦角和黏聚力成负相关,与坝土摩擦角和面板堆石坝倾角呈显著正相关. 随着坝高比的增大,黏聚力对主动土压力的影响先增大后减小,最后趋于稳定. 灵敏度分析表明,重力坝倾角、重力坝坝高和堆石料内摩擦角为高灵敏度参数.

(4) 本研究采用的平面滑动假设与线性强度准则是对实际工况的合理简化,与真实情况存在差异. 后续研究将考虑堆石料强度非线性及复杂滑裂面形态以提升设计精确性,同时将开展数值模拟验证与更复杂的工程案例.

参考文献:

- [1] 陈祖煜,姚栓喜,陆 希,等. 特高土石坝坝坡抗滑稳定安全判据和标准研究[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 12-24.
Chen Zuyu, Yao Shuanxi, Lu Xi, et al. Study on safety criteria for the acceptable factor of safety for high earth and rockfill dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 12-24 (in Chinese).
- [2] 程展林,潘家军. 水布垭面板堆石坝应力变形监测资料分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2299-2306.
Cheng Zhanlin, Pan Jiajun. Analysis of monitoring data of stress and deformation for Shuibuya concrete face rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2299-2306 (in Chinese).
- [3] 崔家全,马凌云,段军邦,等. 茨哈峡水电站垫层料与过渡料联合抗渗试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(1): 216-222.
Cui Jiaquan, Ma Lingyun, Duan Junbang, et al. Combined seepage failure tests on cushion and transition materials for Cihaxia Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(1): 216-222 (in Chinese).
- [4] 陈生水,阎志坤,傅中志,等. 特高面板砂砾石坝结构安全性论证[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 1949-1958.
Chen Shengshui, Yan Zhikun, Fu Zhongzhi, et al. Evaluation of safety performance of extremely high slab-faced gravel dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 1949-1958 (in Chinese).
- [5] 盛云锋,陈 远,周 伟,等. 基于改进动剪切模量模型的堆石坝动力响应分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(增 2): 405-414.
Sheng Yunfeng, Chen Yuan, Zhou Wei, et al. Dynamic response analysis of rockfill dam based on modified dynamic shear modulus model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(Suppl 2): 405-414 (in Chinese).
- [6] 徐泽平. 混凝土面板堆石坝关键技术与研究进展[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 62-74.
Xu Zeping. Research progresses and key technologies of CFRD construction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 62-74 (in Chinese).
- [7] NB/T 35026—22 混凝土重力坝设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2022.
NB/T 35026—22 Code for Design of Concrete Dams [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2022 (in Chinese).
- [8] Rankine W J M. On the stability of loose earth[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1857, 147: 9-27.
- [9] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
Yin Zongze. Geotechnical Principle[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007 (in Chinese).
- [10] 谢 涛,罗 强,张 良,等. 主动与被动状态下墙体侧向位移近似计算[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1682-1690.
Xie Tao, Luo Qiang, Zhang Liang, et al. Calculation of wall displacement to reach active or passive earth pressure state[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1682-1690 (in Chinese).
- [11] 杨 贵,王阳阳,刘彦辰. 基于曲线滑裂面的挡墙主动土压力分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2182-2188.
Yang Gui, Wang Yangyang, Liu Yanchen. Analysis of active earth pressure on retaining walls based on curved sliding surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2182-2188 (in Chinese).
- [12] 竺明星,姜开渝,龚维明,等. 考虑 $c-\phi$ 回填土坡面倾角影响的挡土墙非线性主动土压力研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(增 1): 70-75.
Zhu Mingxing, Jiang Kaiyu, Gong Weiming, et al. Contribution of inclined surface angle to nonlinear active earth pressure on a retaining wall with $c-\phi$ backfill soil

- [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52 (Suppl 1): 70-75 (in Chinese).
- [13] 彭明祥. 挡土墙主动土压力的库仑统一解[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 379-386.
- Peng Mingxiang. Coulumb's unified solution of active earth pressure on retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 379-386 (in Chinese).
- [14] 陈奕柏, 柯才桐, 高洪波, 等. 考虑变位影响的刚性挡墙非极限土压力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5): 1060-1070.
- Chen Yibai, Ke Caitong, Gao Hongbo, et al. Non-limit state earth pressure against retaining wall considering influence of deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(5): 1060-1070 (in Chinese).
- [15] 何小花, 王玉杰, 陈祖煜, 等. 分层土挡土墙库仑主动土压力计算方法及应用[J]. 水利学报, 2014, 45(增2): 202-208.
- He Xiaohua, Wang Yujie, Chen Zuyu, et al. Calculation method and application of Coulomb active earth pressure for layered soil retaining wall[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45 (Suppl 2): 202-208 (in Chinese).
- [16] Goel S, Patra N R. Effect of arching on active earth pressure for rigid retaining walls considering translation mode[J]. International Journal of Geomechanics, 2008, 8(2): 123-133.
- [17] Zhou Y T, Chen Q S, Chen F Q, et al. Active earth pressure on translating rigid retaining structures considering soil arching effect[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2018, 22(8): 910-926.
- [18] 周云东, 杨 德. 基于土拱效应的挡墙后砂土主动土压力计算分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 149-154.
- Zhou Yundong, Yang De. Calculation and analysis of active earth pressure on retaining walls considering soil arching effects[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(2): 149-154 (in Chinese).
- [19] Liu M L, Chen X S, Hu Z Z, et al. Active earth pressure of limited $c-\phi$ soil based on improved soil arching effect[J]. Applied Sciences, 2020, 10(9): 3243.
- [20] 杨建民. 基于非线性破坏准则的主动土压力上限计算[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 503-508.
- Yang Jianmin. Upper bound solution for active earth pressure based on a nonlinear failure criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 503-508 (in Chinese).
- [21] 方 薇, 唐深琛, 张万东兴, 等. 基于楔体滑动的结合式加筋重力墙主动土压力[J]. 土木工程学报, 2024, 57(11): 106-116.
- Fang Wei, Tang Shenchen, Zhang Wandongxing, et al. Active earth pressure of combined reinforced gravity wall based on wedge-sliding[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(11): 106-116 (in Chinese).
- [22] 李昭颖, 肖世国. 悬臂式挡土墙地震主动土压力计算方法[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(1): 196-205.
- Li Zhaoying, Xiao Shiguo. Method for calculating seismic active earth pressures on cantilever retaining walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(1): 196-205 (in Chinese).
- [23] Yang X L. Upper bound limit analysis of active earth pressure with different fracture surface and nonlinear yield criterion[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2007, 47(1): 46-56.
- [24] Liu H, Kong D Z. Active earth pressure of finite width soil considering intermediate principal stress and soil arching effects[J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(3): 04021294.
- [25] 刘光秀, 党发宁, 王 旭, 等. 基于极限应力状态条件的主动土压力解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(11): 2832-2845.
- Liu Guangxiu, Dang Faning, Wang Xu, et al. Analytical solution of active earth pressure under ultimate stress state conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(11): 2832-2845 (in Chinese).
- [26] 芮 瑞, 蒋 旺, 徐杨青, 等. 刚性挡土墙位移模式对土压力的影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(6): 1534-1545.
- Rui Rui, Jiang Wang, Xu Yangqing, et al. Experimental study of the earth pressure on a rigid retaining wall for various patterns of movements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(6): 1534-1545 (in Chinese).
- [27] 梁 军, 杨燕伟. 纵向增强体土石坝内置心墙受力安全性分析[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(5): 110-116.
- Liang Jun, Yang Yanwei. Safety analysis of the earth-rock fill dam with built-in longitudinal reinforced wall[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(5): 110-116 (in Chinese).
- [28] 张将伟, 卢文喜, 曲延光, 等. 基于 Monte Carlo 方法的地表水地下水耦合模拟模型不确定分析[J]. 水利学报, 2018, 49(10): 1254-1264.
- Zhang Jiangwei, Lu Wenxi, Qu Yanguang, et al. Uncertainty analysis of surface water and groundwater coupling simulation model based on Monte Carlo method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(10): 1254-1264 (in Chinese).

(责任编辑: 武立有)