

# 快速降水条件下土石坝稳定性及最安全类型分析

李现海

(临朐县水库运行维护中心, 山东 临朐 262605)

**【摘要】** 文章通过对典型土石坝(包括均质坝、心墙坝(CCD)及倾斜上游心墙坝(SUCD))在快速水位下降期间的横截面进行饱和-非饱和渗流与应力的瞬态分析,采用有限元法(FEM)结合抗剪强度折减技术,评估上游边坡的安全系数。结果表明:在水位快速下降过程中,心墙坝的安全因子降低率显著低于均质坝和上游倾斜心墙坝,分别为其0.72~0.85倍和0.17~0.40倍,表明心墙坝在水位快速下降条件下具有更高的稳定性。

**【关键词】** 土石坝;快速降水;渗流-应力耦合;稳定性分析

**【中图分类号】** TV641

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1009-6159(2026)-01-0060-04

## Stability Analysis of Earth-Rockfill Dams and Identification of the Safest Type in Terms of Rapid Water-level Drop

LI Xianhai

(Reservoir Operation and Maintenance Center of Linqu County, Linqu, Shandong 262605, China)

**Abstract:** The paper conducts transient analyses of saturated-unsaturated seepage and stress on cross-sections of typical earth-rockfill dams, including homogeneous dams, central core dams (CCDs), and sloped upstream core dams (SUCDs), during rapid water-level drop. The finite element method (FEM) combined with the shear strength reduction technique is adopted to evaluate the safety factor of the upstream slope. The results show that during rapid water-level drop, the reduction rate of the safety factor for central core dams is significantly lower than that for homogeneous dams and sloped upstream core dams, being 0.72~0.85 times and 0.17~0.40 times of the latter two respectively, indicating that central core dams exhibit higher stability in terms of rapid-water drop.

**Key words:** Earth-rockfill dams; Rapid water-level drop; Seepage-stress coupling; Stability analysis

土石坝(ERDs)作为水利工程中不可或缺的结构形式,其稳定性评估一直是设计、施工及运营阶段的重要议题。在水位快速下降过程中,土石坝内部的渗流场和应力场将发生显著变化,形成复杂的渗流-应力耦合作用<sup>[1]</sup>。这种耦合作用导致浸润线移动、土体抗剪强度降低、边界条件变化以及有效应力重分布,进而影响土石坝的整体稳定性。相较于稳态渗流分析,水位快速下降条件下的稳定性评估更为复杂且具有高度非线性特征,对计算方法和模型精度提出了更高要求。

近年来,随着计算技术的发展和数值模拟方法的不断完善,出现饱和-非饱和渗流分析<sup>[2]</sup>、渗流-应力耦合分析<sup>[3]</sup>以及抗剪强度折减有限元法(FEM)<sup>[4]</sup>。因此,研究将基于FEM框架,结合抗

剪强度折减技术,模拟不同水位下降速率、下降比和土壤渗透性条件下的土石坝响应,以揭示各类型土石坝在水位快速下降条件下的稳定性变化规律。

## 1 材料与方

### 1.1 坝型构建与快速降水水位工况设置

为研究快速降水水位(RDD)条件下不同坝型的稳定性变化,选取三类典型土石坝作为分析对象:均质坝、心墙坝(CCD)和倾斜上游心墙坝(SUCD)。三种坝型的几何尺寸保持一致,仅防渗体的布置位置不同,用以比较结构差异对渗流-

收稿日期:2025-08-22

作者简介:李现海(1976—),男,工程师

应力响应的影响。

快速降水过程通过设定随时间下降的上游水位实现,其最终下降幅度如图 1 所示。上游水位变化是影响坝体内部渗流场、孔压滞后与强度演化的关键外部参数。

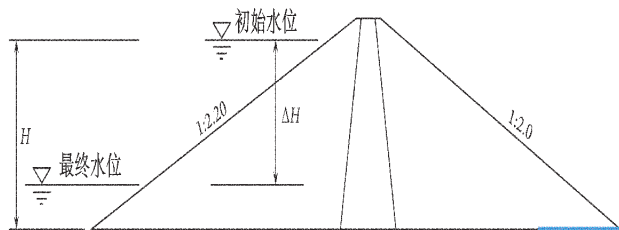


图 1 外部水位的最终落差示意图

二维坝体剖面按功能区划分为壳体、心墙和反滤层,材料参数参考常见土石坝工程经验值设定。模型底部及下游坡面设置排水条件,反映实际运行工况。快速降水工况采用不同下降幅度与下降速率组合进行模拟,其中下降速率取 0.1 m/d、0.5 m/d、1.0 m/d,分别代表缓慢调

度、中速调节与快速泄流模式。计算采用饱和-非饱和渗流-应力耦合方法,并在各水位阶段进行强度折减分析,以获得安全系数的变化过程,进而评估三类坝型在快速降水过程中的相对稳定性。

## 1.2 材料参数与性能

研究选取了均质坝、心墙坝(CCD)及倾斜上游心墙坝(SUCD)三种典型 ERD 结构,所有模型均设定为统一高度(26 m)和初始上游水位(24 m),并配备下游 15 m 长的水平排水设施。坝体材料由均质土和各向同性土构成,其物理力学与渗透性能参数见表 1 和表 2。

表 1 土的物理力学参数

材料	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	杨氏模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	内聚力 $c/\text{kPa}$	摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
外壳 砂质土壤	2 050	52	0.30	4	33
不透水 核心 砂质黏土	1 800	18	0.35	16	16

表 2 土壤渗透性参数

材料	孔隙比 $e$	渗透性 $k/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	不饱和参数		剩余体积含水量 $\theta_r$	饱和体积含水量 $\theta_s$
			$\alpha/(\text{m}^{-1})$	$n$		
外壳 砂质土壤	1.0	$10^{-5}$	7.5	1.89	0.057	0.41
外壳 砂质土壤	1.5	$10^{-4}$	7.5	1.89	0.057	0.41
不透水核心 砂质黏土	1.0	$10^{-7}$	0.8	1.09	0.095	0.41
不透水核心 砂质黏土	1.5	$10^{-6}$	0.8	1.09	0.095	0.41

## 1.3 试验条件与模拟方法

在不同水位下降比(0.415 与 0.830)及压降速率(0.1 m/d、0.5 m/d、1.0 m/d)条件下,深入探讨 ERD 稳定性的变化规律。利用 ABAQUS 软件的用户自定义子程序 DISP,成功模拟水位随时间变化的动态过程。在模拟中,将储层孔隙水压力设为 U(1),以精确反映水位快速下降过程中的水位波动。

此外,采用 ABAQUS-6.14 软件的抗剪强度折减法对边坡稳定性进行详细分析,分析过程中选用 CPE4P 元素类型,每个 ERD 模型均细分为约 500 个元素。

## 2 结果与讨论

### 2.1 坡度相同条件下的稳定性分析

在保持上下游坡度一致(上游 1:2.20,下游 1:2.0)的前提下,系统分析 2 种不同下降比(0.415

与 0.830)及 3 种下降速率(0.1 m/d、0.5 m/d、1.0 m/d)对 ERD 稳定性的影响。图 2 展示了 ERD 上游边坡稳定性随时间推移的演变规律。由图 2 可知,随着压降速率的减缓,稳定性曲线斜率逐渐趋于平缓,且达到最小安全系数所需时间显著延长。这一现象尤为显著地体现在水库水位降至谷底时,此时水压力支撑效应最弱,而孔隙水压力诱发的滑坡风险达到顶峰。

特别地,对于下降比 0.830 的土石坝,在不同压降速率下,最小安全系数分别出现于 480 h( $v_R=1.0$  m/d)、960 h( $v_R=0.5$  m/d)及 4 800 h( $v_R=0.1$  m/d),进一步验证了上述结论。值得注意的是,在下降比 0.415 的条件下,随着压降速率从 1.0 m/d 递降至 0.1 m/d,安全系数达到最小值的时间也相应延长,分别为 240 h、480 h 及 2 400 h,这同样归因于水库水位低谷时水压力支撑效应的急剧减弱与孔隙水压力破坏力的增强。

单向坝在安全系数衰减方面表现更为显著,而 SUCD 在达到最小安全系数后的稳定性恢复低于 CCD 或均质坝,如图 2 所示。这一现象可归因于 SUCD 上游坡面防渗材料在水位下降后饱和度变化不明显,在  $r=0.830, v_R=0.5 \text{ m/d}$  条件下,即便经过长时间(如 960 h 后),其饱和度仍维持

在较高水平( $>0.75$ ),且空间分布无显著改变。综上所述,水位快速下降条件下的稳定性降低相对容易,但恢复至原始状态则极为困难。

表 3 显示了水位快速下降下典型 ERDs 的稳定安全系数、最小安全系数、衰减量和衰减率。结果表明,在同一类型 ERD 中,安全系数的

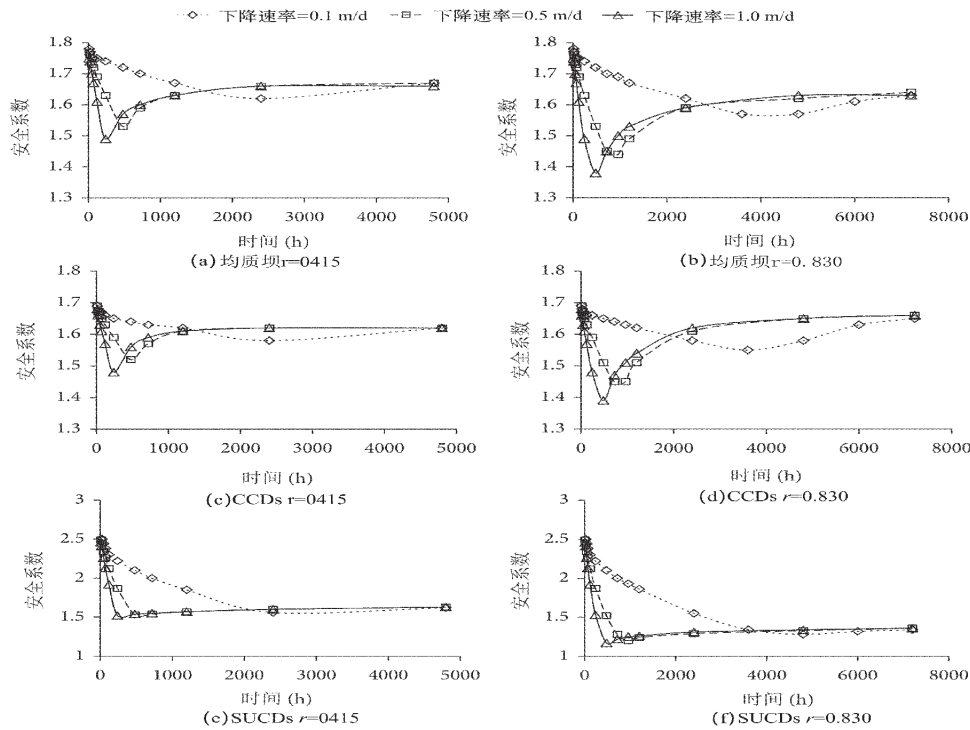


图2 不同坝体(均质坝、CCD 和 SUCD)的稳定性随时间变化的曲线图

表 3 上游坡面稳定性估算(坡度相同)

下降比 $r$	下降率 $v_R$	均质坝				CCD				SUCD			
		稳态 $F_s$	最小 $F_{min}$	下降 $F_s - F_{min}$	下降率 $R_{sf}$	稳态 $F_s$	最小 $F_{min}$	下降 $F_s - F_{min}$	下降率 $R_{sf}$	稳态 $F_s$	最小 $F_{min}$	下降 $F_s - F_{min}$	下降率 $R_{sf}$
0.415	0.1	1.75	1.62	0.13	0.074 3	1.68	1.58	0.10	0.059 5	2.22	1.56	0.66	0.297 3
	0.5	1.75	1.53	0.22	0.125 7	1.68	1.52	0.16	0.095 2	2.22	1.53	0.69	0.310 8
	1.0	1.75	1.49	0.26	0.148 6	1.68	1.48	0.20	0.119 0	2.22	1.52	0.70	0.315 3
0.830	0.1	1.75	1.57	0.18	0.102 9	1.68	1.55	0.13	0.077 4	2.22	1.28	0.94	0.423 4
	0.5	1.75	1.44	0.31	0.177 1	1.68	1.45	0.23	0.136 9	2.22	1.20	1.02	0.459 5
	1.0	1.75	1.38	0.37	0.211 4	1.68	1.39	0.29	0.172 6	2.22	1.17	1.05	0.473 0

递减率均随水位下降比和下降速率的增加而显著增大。这说明,通过控制水位下降速度,可有效缓解 ERD 在水位快速下降条件下的稳定性降低问题。

进一步对比不同类型 ERD 的性能表现,发现 CCD 在相同条件下表现出最小的安全系数衰减量和衰减率,而 SUCD 则最为显著。以  $r=0.830, v_R=0.5 \text{ m/d}$  为例,CCD 的安全系数衰减量仅为 0.23, 衰减率为 0.136 9, 远低于 SUCD 的

1.02 和 0.459 5。这一差异主要归因于 SUCD 上游坡面防渗材料在水位下降后饱和度降低不明显,导致孔隙水压力诱发的滑动破坏作用更为持久。

### 2.2 上游边坡安全系数恒定下土石坝稳定性分析

在上游边坡稳定安全系数均为 1.75 的条件下,针对均质坝(1:2.20 坡度)、心墙堆石坝(CCD, 1:2.30 坡度)及特定构造坝(SUCD, 1:1.72 坡度),研究探讨了水位快速下降过程中典型 ERD 的稳定性衰减特征。图 3 描绘了 CCDs 与 SUCD 稳定

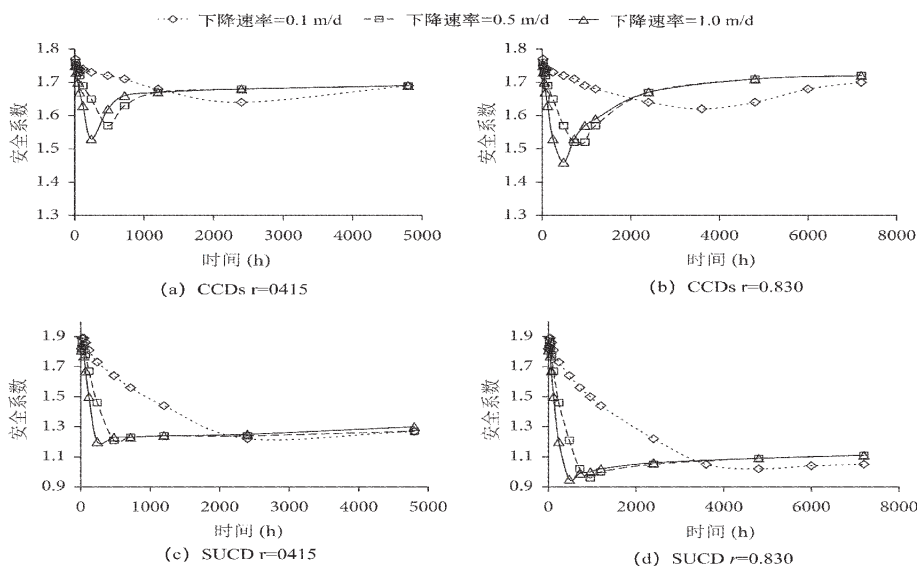


图3 CCDs 和 SUCD 的稳定性变化与时间的关系曲线图

性随时间变化的趋势。

表4总结了稳定安全系数、最小安全系数及其递减率等关键数据。研究表明:水位下降率减小直接导致稳定性变化曲线斜率降低,延长了安全系数降至最小值的时间。此外,SUCD的递减率显著高于 CCD 与均质坝,在相同的水位下降比

和下降率条件下,CCD 安全系数降幅最小,SUCD 则最大,这与前述坡度一致时 ERD 的稳定性变化规律相吻合。

### 3 结论

该研究深入分析了快速降水(水位快速下

表4 上游边坡稳定性估算(上游边坡稳定安全系数相同)

下降比 $r$	下降率 $v_R$	均质坝				CCD				SUCD			
		稳态 $F_s$	最小 $F_{min}$	下降 $F_s - F_{min}$	下降率 $R_{s,f}$	稳态 $F_s$	最小 $F_{min}$	下降 $F_s - F_{min}$	下降率 $R_{s,f}$	稳态 $F_s$	最小 $F_{min}$	下降 $F_s - F_{min}$	下降率 $R_{s,f}$
0.415	0.1	1.75	1.62	0.13	0.074 3	1.75	1.64	0.11	0.062 9	1.75	1.22	0.53	0.302 9
	0.5	1.75	1.53	0.22	0.125 7	1.75	1.57	0.18	0.102 9	1.75	1.21	0.54	0.308 6
	1.0	1.75	1.49	0.26	0.148 6	1.75	1.53	0.22	0.125 7	1.75	1.20	0.55	0.314 3
0.830	0.1	1.75	1.57	0.18	0.102 9	1.75	1.62	0.13	0.074 3	1.75	1.02	0.73	0.417 1
	0.5	1.75	1.44	0.31	0.177 1	1.75	1.52	0.23	0.131 4	1.75	0.96	0.79	0.451 4
	1.0	1.75	1.38	0.37	0.211 4	1.75	1.46	0.29	0.165 7	1.75	0.95	0.80	0.457 1

降)条件下不同类型土石坝(ERDs)的滑动稳定性,并得出以下结论:在相同的水位快速下降条件下,CCD 展现出比其他 ERD 更高的安全性。尤为显著的是,静态条件下 SUCD 在相同坡度下稳定性最优,但水位快速下降作用下却表现出相对不稳定性。对于库容较小、水位波动大的堤防,如受潮汐影响的堤防和农业水库大坝,CCD 为首选以提升整体稳定性;而在库容大、水位变化平缓的堤防中,SUCD 则因高静态稳定性及经济优势成为优选。此外,该研究还揭示了通过 ERD 类型、稳定安全系数、水位变化率等参数可近似估算水位快速下降下的最小安全系数,为水利工程

的安全设计与管理提供了有力支持。

### 参考文献

- [1] 张阳苗. 土石坝渗流场与应力场耦合及边坡稳定分析[D]. 西安理工大学,2017.
- [2] 李宏伟,高维鸿,胡冉.降雨条件下堆积体饱和-非饱和渗流场分析与稳定性演化 [J]. 中国农村水利水电,2024(8): 150-159.
- [3] 周亦良,贺其,李明,等.考虑渗流-应力耦合的不同降雨条件下非饱和土边坡稳定性分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(8):57-63.
- [4] 周薛森.基于强度折减有限元法分析边坡稳定性[J].山西建筑,2023,49(11):89-92,96.

(责任编辑 崔春梅)