

粉煤灰坝渗漏机理分析

林立相¹, 吴 勇²

(1. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川成都 610041; 2. 四川大学水利水电工程学院, 四川成都 610065)

摘 要: 通过粉煤灰坝工程实例分析, 探讨其灰体渗漏的原因, 并分析渗漏的机理。根据反滤层土拱破坏效应和灰体—反滤体颗粒级配效应, 提出渗流破坏的有效粒径比 $R_a=8$ 和 $R_a=12$ 作为阈值, 来划分为渗流冲刷的稳定、敏感和破坏区域。认为灰体、反滤层和渗流坡降是一个相互作用的有机整体, 并在此基础上确定了压密状态下反滤层破坏的临界渗流坡降 J_{cr} 的计算模式。

关键词: 灰坝; 渗流; 机理; 治理
中图分类号: TV64 **文献标识码:** A

以管涌、土流、渗流冲刷和接触冲刷为主的渗流破坏, 是引起土石坝工程事故和工程破坏的重要原因^[1]。大量历史事件表明: 各国土石坝工程破坏事件中, 由于渗流管涌引起的占 48%^[2]。在我国, 渗流破坏类工程事故约占 30%。粉煤灰坝为透水挡灰的土石坝, 通过合理设置反滤设施和控制坝体渗流, 达到煤灰渣的收集与贮存目的, 20 世纪 80 年代以来, 广泛应用于我国火力发电站。由于粉煤灰的颗粒级配与渗流特征^[3], 决定了在利用其筑坝过程中, 渗流控制的重要性应等同于荷载稳定的处理。目前尚未见有关灰坝渗流控制引起库灰漏失事件的报道, 本文将通过灰坝工程实例, 分析库灰渗漏特征与渗漏机理, 并在研究的基础上提出工程处理意见。

1 研究实例

灰坝工程场地位于四川盆周山地南缘的岷江二级支流河谷, 贮灰场初期坝为干砌条块石重力坝, 高 37m, 有效库容 640 万 m^3 , 坝顶高程 370m, 采用管道水力送灰, 现堆灰高度已至海拔 365.5m。初期坝于 1998 年 2 月开始施工, 1999 年 3 月投产运行不久出现坝后漏灰现象, 灰体顺支流进入岷江, 严重影响下游的水质和治污工程。虽采用干滩设置反滤铺垫等措施, 但渗漏现象仍未停止, 并在近坝地带形成灰水对穿态势。我们结合坝体漏灰治理工程和防洪渡讯要求, 开展了坝体、

灰体和地基的水文地质与工程地质勘察, 并以获得的第一手资料为基础, 进行本次库灰渗漏研究。

1.1 库灰的基本性质

1.1.1 库灰的物理性质

根据现场取样分析, 沉积库灰具有天然容重小、颗粒细和孔隙大的特点, 库灰颗粒组成以粉粒为主, 其中砂粒、粉粒、粘粒含量分别占 43.2%、46.7% 和 10.1%, 不均匀系数为 10.6, 属于高液限粉土(图 1)。其天然容重 $0.80 g/cm^3 \sim 1.42 g/cm^3$, 含水量 12.09%~36.72%, 孔隙比为 1.608, 干密度 $0.66 g/cm^3 \sim 1.06 g/cm^3$, 干密度平均值 $0.78 g/cm^3$, 比重 2.06。

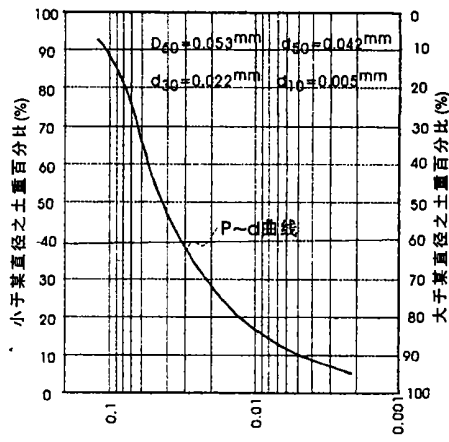


图 1 库灰颗粒组成曲线
Fig. 1 The particle size ratio of flyash

收稿日期: 2001-07-11。
作者简介: 林立相(1966-)男(汉族), 福建霞浦人, 主要从事边坡工程的科研与设计工作。

库灰的这些性质决定了其便于水流携带和冲刷流失,土体渗透性较强,通过水力放灰,易于在沉积体上部形成上层滞水,在下部迅速排干。

1.1.2 库灰的力学性质

库灰的物理力学性质,与煤源的成分、灰渣的贮存条件有关。按其干密度 0.78 g/cm^3 和含水率

13.5%控制,采用非饱和与饱和两种状态进行各项力学试验(表1)。结果表明,本地库灰属中等压缩性;其强度上具有粘性土和砂性土的双重力学性质,这有利于灰渣在大颗粒空隙中形成土拱,抵抗管涌的形成。由于自然灰的孔隙性能,其渗透性较之国内外的大多数灰渣要大得多^[4]。

表 1 库灰的力学性质

Table 1 The mechanical properties of fly—ash

密度 g/cm^3	压缩系数 $a_{1-2}(\text{Mpa})^{-1}$		压缩模量 $E_{s1-2}(\text{Mpa})$		透系数 cm/s	非饱和固结快剪		饱和固结快剪	
	非饱和	饱和	非饱和	饱和		$C(\text{kPa})$	$\varphi^{(a)}$	$C(\text{kPa})$	$\varphi^{(a)}$
0.78	0.15	0.16	8.18	17.54	3.55×10^{-3}	18.5	25.6	11.0	24.3

1.2 灰坝渗漏特征

场地基岩体裂隙水流量很小,一般小于 0.001 l/s,雨季流量稍微增大。灰坝按透水设计,坝后灰

水正常流量为 $2\text{ l/s} \sim 3\text{ l/s}$ 最小流量约 $1\text{ l/s} \sim 0.2\text{ l/s}$ 。水质为弱酸性水。坝后灰体排出量随坝前放灰迅速增大,灰面放水多少即漏失多少。

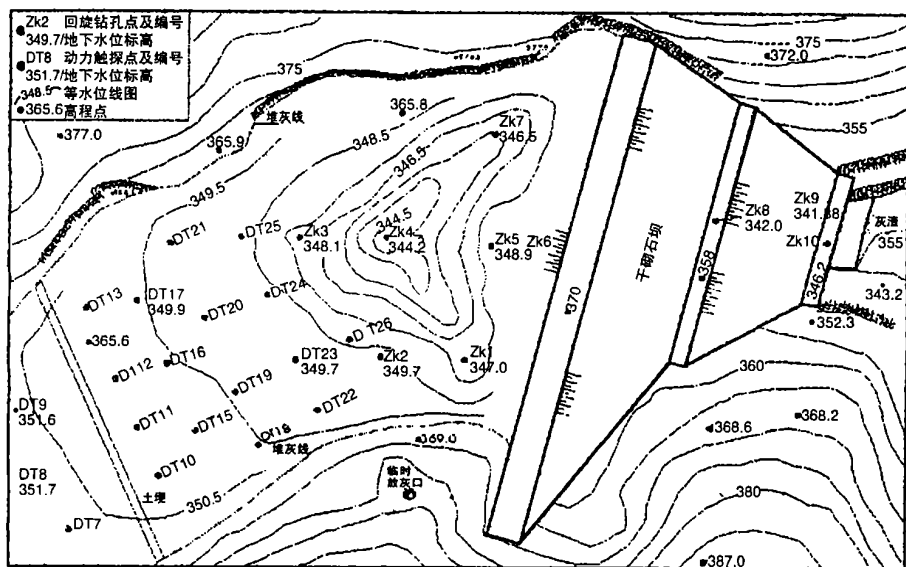


图2 灰场地下水等水位线图

Fig. 2 The isopleth of groundwater level near flyash dam

针对库灰随放灰水流向坝后渗漏问题,通过钻孔,结合人工坑槽探,查找灰体渗漏方向、范围和高度。经现场地下水位测定(图 2)。灰体地表渗入点主要集中在距坝前边缘 10m ~ 15m,顺坝轴宽度约 50m 的范围。灰体随水流入口位于坝体中部原河谷中心地带,距坝边缘约 35m,深度 > 21m 以上(海拔 < 344.0m),灰体集中渗漏于坝后干滩表面形成多处漏斗,垂直随水流进入下部人工煤渣层以下,坝前渗

漏出口高程约位于 335m 附近。

2 库灰渗漏机理分析

通过库灰渗漏现象分析,其破坏类型属于下部灰体在地下水压力作用下,从反滤层薄弱部位突破的渗流冲刷。对于灰坝土石介质来说,只要具有渗透压力,就存在渗流破坏的可能,尤其当库灰以粉粒

为主时,其渗流稳定就主要依靠重力坝支撑和反滤层控制。因此影响其渗漏方式和强度的主要因素有:灰场地下水力坡降、灰体围岩压力、松散反滤层颗粒级配与压密特征等。

2 1 土体影响

灰坝填筑选料和防渗措施不同,判断渗流冲刷

的标准差异很大^[5 6]。本例工程为干砌条(块)石重力坝,石缝均> 5mm,自然状态下难以挡灰。坝后坡设置的反滤层,海拔 350m 以上为透水土工布,其效果良好;350m 以下为原煤渣土,厚度 26m,是产生库灰渗漏的主要部位(图 3),这是在一定水头压力下,库灰—煤渣土反滤层相互作用的结果。

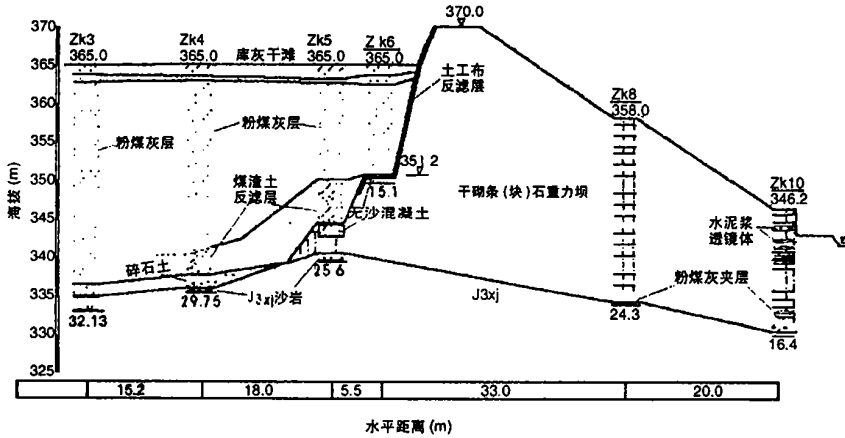


图 3 灰坝及进坝干滩结构断面图

Fig. 3 Structural profile near fly ash dam

2. 1. 1 土拱破裂效应

反滤层的作用机理是在水头压力下,允许细颗粒(库灰)土进入其骨架空隙,通过细粒土和粗粒土间的相互摩擦,以及细粒土自身的强度作用,在空隙中形成土拱,以维持渗流土体—反滤体的相对稳定,一旦土拱破裂,尤其水力坡降快速波动时,就容易产生管涌或渗流冲刷。假设库灰和煤渣土反滤体的平均粒径分别为 D_s 和 D_f , 根据美国农垦局研究成果,两个均匀介质, D_s 通过反滤体颗粒空隙的最大粒径为 $0.155D_f$, 即 $D_f/D_s \leq 6.5$ 时,细颗粒灰土无法从煤渣土颗粒的间隙通过,也就无法产生渗流破坏。

2. 1. 2 颗粒级配效应

大量研究成果表明,反滤层颗粒空隙对控制土体管涌和渗流冲刷具有非常重要的作用,这取决于其颗粒级配和压密程度。Uno. T 等人试验结果认为:有效地控制土体渗流破坏的阈值是,反滤体空隙平均直径(d_e^f),与渗流土体的孔隙比(e)和平均颗粒直径(\bar{d}_s)成正比^[7],即

$$d_e^f = \frac{1}{2} e \bar{d}_s \quad (1)$$

对自然灰体 $\bar{d}_s, e = 1.608, = 0.042\text{mm}$, 则 $d_e^f = 0.034\text{mm}$; 压密灰体, $e = 1.183, d_e^f = 0.025\text{mm}$ 。此法

对透水土工布的筛眼选择有一定的参考价值,对于砂砾石或煤渣土反滤体, d_e^f 不易测定,加之灰体和煤渣土皆非均匀介质,因此,建议采用有效直径较为合理^[9],并通常采用 D_{f15}/D_{s85} 作为评价灰体和煤渣土的颗粒级配标准。

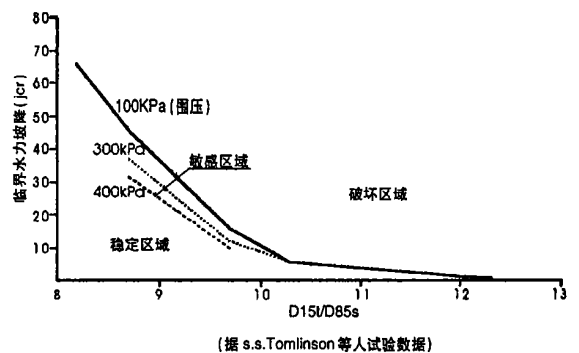


图 4 灰—反滤层系统颗粒级配与临界水力坡降关系

Fig. 4 Relationship between soil-filter system and critical gradient

$R_a = D_{f15}/D_{s85}$ 为两种非均匀介质有效直径之比,当地表渗流时,不发生反滤层失效而渗流冲刷的阈值为 $R_a \leq 5$ ^[8]。针对灰坝底部渗漏情况,煤渣土反滤层所受上部灰体和大坝的侧向压力在 350 ~ 400kPa 之间,根据现场 63.5kg 级动探结果,在下部

海拔 345m ~ 350m 处, 库灰和煤渣土平均击数分别为 2 ~ 3 击(地表 1 击)和 5 ~ 7 击(地表小于 4 及),

说明二者均处于相对压密状态, 大量现场和室内试验表明^[9~11], 当

$$\left. \begin{aligned} R_a \leq 8, \text{任何水力坡降 } j \text{ 时, 不发生渗流冲刷;} \\ 8 \leq R_a \leq 12, \text{渗流冲刷的发生取决于临界水力坡降 } j_{cr}; \\ R_a \geq 12, \text{微小的 } j, \text{即可发生渗流冲刷。} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)的系统过程反映于图 4, 在不同侧向压力作用下, 可按 $R_a = 8$ 和 $R_a = 12$ 来划分为渗流冲刷的稳定、敏感和破坏区域。根据渗漏范围内库灰和煤渣土颗粒分析结果, 库灰: $D_{s85} = 0.091\text{mm}$, $D_{s50} = 0.042\text{mm}$; 煤渣土: $D_{j15} = 0.924\text{mm}$, $D_{j50} = 1.233\text{mm}$, 库灰与煤渣土反滤体的 $R_a = D_{j15}/D_{s85} = 10.15$, 二者的级配关系正处于渗流冲刷的敏感区域, 此时, 库灰的渗漏主要受控于水力放灰时灰体内地下水力坡降的变化特征。

2.2 渗透力影响

勘探结果表明, 干砌条(块)石空隙较大, 无法形成构架起反滤作用; 上部土工布效果较好, 满足库灰土拱渗流条件(图 3)。灰坝库灰的渗漏, 是由于下部灰体—煤渣土反滤体系在渗透力作用下失效引起的。

传统的渗流破坏平衡表达方式太沙基公式

$$J_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (3)$$

以煤渣土反滤体内空隙中的库灰为对象, 其所受的作用力有: ① 渗透力; ② 灰体自重; ③ 灰体内摩擦力; ④ 灰体凝聚力 CA 。结合传统渗流破坏公式和斜坡土流的谢斯塔科夫模型, 其力的平衡式为:

$$J_{cr}\gamma_w = \gamma'v + v(\sigma + \gamma')\xi \tan \phi + CA \quad (4)$$

其中 J_{cr} —作用于灰体的临界水力坡降; v —水的容重; γ' —灰体浮容重; v —灰体的体积; σ —灰体附加应力; ξ —侧压力系数; ϕ 、 C —灰体的内摩擦角和凝聚力; A —接触面积。式(4)充分考虑了颗粒反滤体构架空间内, 在限压作用下渗流破坏的土体颗粒效应, 以及细颗粒土的自身强度和空隙内接触强度。对于判断灰坝下部灰体—煤渣土反滤体系失效引起的渗漏问题, 更具有现实意义。其分项表达式如下:

(1) 附加应力

$$\sigma = \frac{1}{2} \gamma' h^2 \quad (\text{饱和状态, } h \text{ 为灰体埋深}) \quad (5)$$

(2) 浮容重

$$\gamma' h = \frac{G-1}{1+e} \gamma_w$$

$$= \gamma_d - \frac{\gamma_w}{1+e} \quad (G \text{ 为比重, } \gamma_d \text{ 为干密度}) \quad (6)$$

(3) 体积与接触面积

灰体充满煤渣土空隙后, 才发挥其强度作用, 根据式(1), 等效 \bar{d}_s 表达为 d_{s85} , 则灰体在空隙中的体积和接触面积可近视地按球体表示:

$$v = \frac{1}{48} \pi (e d_{s85})^3 \text{ 和 } A = \frac{1}{16} \pi e^2 d_{s85}^2 C \quad (7)$$

根据实际情况, 式(4)所隐含的物理力学参数并不是一个定值, 而是随着埋藏深度而变化, 将其与式(5)、(7)结合, 可得适合本例工程的临界渗流力表达式为

$$J_{cr}\gamma_w = \frac{1}{48} \pi e^3 d_{s85}^3 \gamma' \left[1 + \left(\frac{1}{2} h^2 + 1 \right) \xi \tan \phi \right] + \frac{1}{16} \pi e^2 d_{s85}^2 C \quad (8)$$

这样, 临界渗流坡降 J_{cr} 的确定即可通过灰体埋深、强度和不同深度下孔隙比与有效粒径获得。图 5(a)和 5(b)分别为本灰坝颗粒反滤层临界渗流坡降, 与灰体埋深和空隙比的关系, 反映了颗粒反滤层和灰体自然特征与压密属性对渗流破坏的影响, 其造成的渗流破坏是在一定的限压条件下进行的。

3 结论与建议

通过上述实例分析, 认为造成库灰渗漏的主要原因有两个方面: ① 下部煤渣土反滤层颗粒级配不合理, 灰体—反滤体颗粒的相互作用时土拱效应失效, 即相对于灰体, 反滤层颗粒的有效粒径过大, 使得灰体在一定渗透压力作用下突破滤层空隙, 造成渗流冲刷; ② 近坝地带集中放灰, 使灰体地下水比降迅速增大, 达到灰体—反滤体系统的临界渗流坡降时, 产生渗流冲刷。实际上, 灰体、反滤层和渗流坡降是一个相互作用的有机整体, 在灰坝工程渗流控制中不能截然分开, 这也是本文渗流破坏模式建立的根本出发点。

粉煤灰具有粒细质轻等特点, 饱水后呈流动状, 因此水力冲填灰坝工程, 顺利地排水滤灰与否, 是工

程成败的关键。本文实例工程采用的是坝后坡反滤层和干滩上游排洪隧洞的渗流控制措施,因排洪隧洞进水口滤层堵塞,放灰时渗流坡降过大而造成近坝集中渗流冲刷,在干滩设置的反滤铺垫措施,由于主要采用砂卵石颗粒,无法阻止灰体随水流向下渗漏。根据现场情况,建议采取以下措施:

(1)尽快在坝后修建子坝,以增大地下水的渗径和降低库灰浸润线。子坝工程选址在现干滩 300m 范围,由于工程于灰体上修建,其地基承载力和二次防渗,是应重点解决的问题。

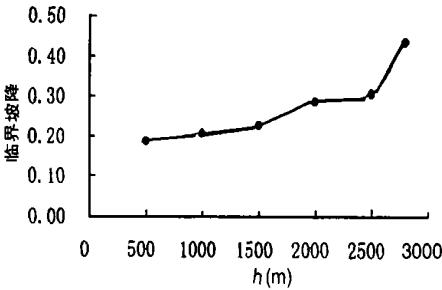


图 5(a) J_{σ} 与 h 关系图
Fig. 5(a) The relationship between J_{σ} and h

(2)库灰渗漏主要集中在海拔 350m 以下,顺坝轴 50m 范围内,可对下部煤渣土反滤层实施固结灌浆。为了克服灌浆成孔时造成灰体塌孔和堵孔现象,应采用压力洗孔和孔内灌浆一次完成。灌浆材料以活性粉煤灰水泥浆为主,可就地取材,节约成本,这项技术已有成功应用的实例^[12]。

(3)做好库灰表面排水,减少下渗量,尤其采用灌浆措施后,库灰的浸润线有所提高,可在堆灰线两侧一定深度(3m~5m)内,设置排水沟和铺垫截水设施。

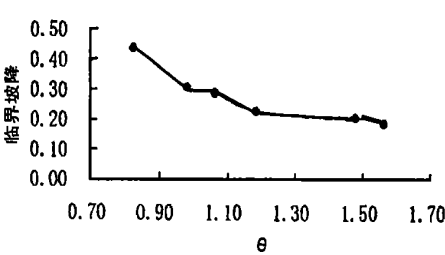


图 5(b) J_{σ} 与 e 关系图
Fig. 5(b) The relationship between J_{σ} and e

参考文献:

[1] 张启岳. 土石坝加固技术, 中国水利水电出版社, 1999: 3~14.
[2] Mark Foster et al. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Can. Geotech. J.* 37; 2000: 1000~1024.
[3] 陈愈炯, 等. 粉煤灰的基本性质[J]. 岩土工程学报, 1988 10(5): 3~16.
[4] 鵬能惠. 灰渣的贮放与利用, 岩土工程学报[J]. 1988 10(5): 17~32.
[5] 肖四喜, 等. 大堤管涌形成机理分析及治理方法[J]. 湖南大学学报, 1999 (2): 123~126.
[6] 孙淑贤. 考虑渗流力的基坑涌砂分析[J]. 工程勘察, 1998 (2): 32~35.

[7] Uno T. et al. The relationship between particle size and diameter for sand. *Inter. Proce. Geofilter '96 Conference*, 1996: 67~74.
[8] 邓恩 I. S. 等著, 土工分析基础 地质出版社, 1984: 46~48.
[9] S. S. Tomlinson & Y. P. Vaid. Seepage forces and confining effect on piping erosion. *Can. Geotech. J.* Vol: 37, 2000: 1~13.
[10] Sherard, J. L. Dunnigan, L. P. & Talbot, J. R. Basic properties of sand and gravel filters. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1984, 10(6): 684~700.
[11] Fischer G. R. & Holz R. D., A critical review of granular soil filter retention criteria. *Inter. Proce. Geofilter '96 Conference* 1996: 409~418.
[12] 陈礼仪, 等. 高活性粉煤灰注浆材料性能和应用. 探矿工程, 1999, (4): 35~37.

Seepage Mechanism Analysis of Fly Ash Dam

LIN Li-xiang¹ and WU Yong²

- (1. *Institute of mountain hazards and environment, Chinese academy of science & ministry of water conservancy, Chengdu 610041,*
2. *School of hydraulic & hydropower engineering, Sichuan University, Chengdu 610065*)

Abstract: The seepage erosion of fly ash dam is rarely documented. A case study is presented in this paper. What causes the erosion occurred is the failure of ash-filter system under variable confining pressures. The effective grain-size ratio (R_a) between the coal soil as filter and the flyash as an erosion medium is 10.15, which shows susceptible to bringing on seepage erosion under a given seepage force while the susceptible limit R_a are $R_a > 8$ and $R_a < 12$. Base on the understanding of the reciprocity among fly ash, particle filter and seepage gradient, the critical seepage force can be ascertained as follow.

In this formula, the critical gradient can be easily calculates after some parameters have been known such as pore ratio (e), effective diameter (d_{s85}), mechanical index φ & C , and depth of fly ash.

Key words: fly ash dam; seepage; mechanism; control