

# 鄂西某坝坝肩深部层状岩溶坍塌堆积物渗透特性研究

陈 强, 聂德新, 谢 晔, 周洪福  
(成都理工大学工程地质研究所, 成都 610059)

**摘 要:** 鄂西某电站右坝肩中上部缓倾坡内的层状岩体深部, 存在顺层发育的岩溶坍塌堆积物, 该坍塌堆积层厚约 2~3 m, 坍塌半径约为 20~30 m, 主要由白云质灰岩碎块、泥砂物质和钙质胶结物组成。它们的存在, 可能会构成影响坝肩岩体渗透稳定性的控制性边界条件之一, 因此, 针对该溶蚀坍塌层展开渗透试验研究, 从机械潜蚀和化学潜蚀两个方面阐述其渗透变形特征, 进而定性地评价其对工程的影响。

**关键词:** 岩溶塌陷; 渗透特性; 渗透变形; 潜蚀; 坝肩

中图分类号: P588

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)05-0005-03

## Study on Seepage Deformation of Solution Collapse Layer in the Deep Rock Body of a Dam Shoulder in West Hubei

CHEN Qiang, NIE De-xin, XIE Ye, ZHOU Hong-fu

(Institute of Engineering Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Some solution collapse accumulation develops flow the layers, which are gently inclining to the inner side or slope, in deep rock body of the left shoulder of a dam in West Hubei. With 2~3 m thickness and 20~30 m collapsing radius, the solution collapse layer mainly consist of shivers of dolomitic limestone, bedload and calcareous cement. It is the solution collapse layer that may forms one of the controlling borders which impact the seepage stability of rock body in dam's shoulder. Filtration tests are carried out aim at the solution collapse layer. The features of seepage deformation were expatiated from two aspects: physical suffosion and chemical suffosion. Then its effects on the engineering were estimated.

**Key words:** solution collapse; seepage feature; seepage deformation; suffosion; shoulder of dam

鄂西某电站大坝坝址处于岩溶地貌发育的碳酸盐岩分布区, 在勘察中发现其右坝肩中上部缓倾坡内的层状岩体深部, 有顺层发育的小规模岩溶坍塌堆积物, 该坍塌堆积层厚约 2~3 m, 坍塌半径约为 20~30 m, 发育于寒武纪中统孔王溪组下段薄层状白云质灰岩下部, 其形成是在一定的水动力环境中地下水与地表水长期联合作用下选择性溶蚀的结果。主要由白云质灰岩与泥质灰岩的异差溶蚀形成顺层发育的岩溶空间后, 上部薄层状岩体在自重应力场的作用下发生一定程度的顺层剥落松动, 再由后期次生泥质物充填混合而成。该坍塌堆积层, 处于岩体深部一定范围内, 其上部为中厚层与薄层状岩体结构交互出现的层状岩体, 受中厚层状岩体本身的“板梁”式强度效应的影响, 该坍塌仅使上部一定范围内的岩体产生差异松弛, 而并没有造成上覆岩层的连锁性塌陷并在地表形成塌陷坑(洞)。由于受到上覆岩体长期下沉变形所引的压密作用, 该塌陷堆积层结构紧密, 并且经受钙质胶结作用而表现出一定的强度特征, 这与一般文献中定义的岩溶塌陷<sup>[1-4]</sup>有一定的差别, 但是从本质上讲, 它们还是水-岩长期作用过程中的岩溶动力地质现象的一种, 应属于隐伏岩溶或埋藏岩溶塌陷的范畴<sup>[5,6]</sup>。上述顺层隐伏岩溶坍塌堆积物的存在, 可能成为影响坝肩岩体渗透稳定性的控制性边界条件之一, 本文针对其渗透变形特征展开研究, 以

便为分析它们对工程的影响提供合理可靠的依据。

### 1 地质背景

电站坝区在大地构造部位上属扬子准地台, 地层除志留系上统、泥盆系下统和石炭系缺失外, 从元古界青白口系板溪群至三叠系均有出露。

区内构造形迹以走向 NE-NEE、斜列式宽缓褶皱为主。溶蚀坍塌层所处右岸为一复式背斜构造的北西翼, 空间上分布于寒武系孔王溪组下段的薄层状白云质灰岩下部, 其上覆岩层为中厚层灰岩和白云质灰岩。岩层总体平缓, 倾向上游且略偏向右岸, 产状为 N20°~40°W, SW∠10°~15°, 走向与河流流向近于正交。区内断层特别是层间错动带也较为发育, 常见早期方解石脉被顺层错断的现象。岩溶的发育主要出现在上述岩性岩相变化的地段, 且具有顺层面裂隙或错动带优先发育的特征。

### 2 堆积层物质组成特征

溶蚀堆积层在物质组成上较为简单, 主要由白云质灰岩块石和次生充填的泥、砂物质及钙质胶结物组成。堆积物无分选和磨圆, 有的嵌合紧密, 显示为就近快速堆积特征。其中白云岩岩块约占 80% 以上, 泥、砂物质不足 10%。现场进

\* 收稿日期: 2005-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 40372127)资助

作者简介: 陈强(1973-), 男, 山西繁峙人, 成都理工大学地质工程专业博士研究生。

行的粒度分析资料表明,该堆积层的粒径级配曲线不连续(图 1),各特征粒径如表 1 所示,根据其  $C_u = 100$ ,  $C_c = 0.538$ ,可判定为粒径不均匀、级配较差的一类堆积物。由简易密度法获得该溶蚀塌陷堆积物的密度为  $2.310 \sim 2.375 \text{ g/cm}^3$ ,平均值为  $2.342 \text{ g/cm}^3$ 。

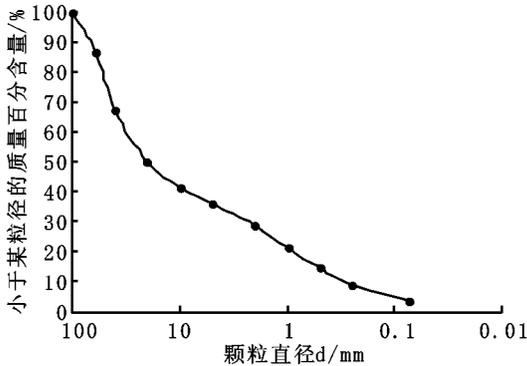


图 1 溶蚀堆积物粒径级配曲线  
表 1 溶蚀堆积物特征粒径参数值

特征粒径	$d_{60}$	$d_{50}$	$d_{30}$	$d_{10}$	$C_u$	$C_c$
取值	30	20	2.2	0.3	100	0.538

### 3 渗透变形特征

渗透变形既包括在水压力作用下发生的机械潜蚀,又包括某些可溶性组分被渗透水溶解和搬运的化学潜蚀<sup>[7]</sup>。因此,应从以上两个方面对溶蚀塌陷堆积物的渗透特性进行研究。

#### 3.1 机械潜蚀特征

为研究溶蚀塌陷层的机械潜蚀特征,在现场采集原状试样进行室内渗透试验。试验选用开口直径为 40 cm,高为 30 cm 的密封性良好的金属圆桶(带进水阀门和溢水口)进行,制备试样时,首先在圆桶底部铺垫 2~3 cm 厚、粒径约 1 cm 左右的卵石层,以保证水流畅通入渗后,进水孔不致被细颗粒物堵塞,同时使试样底部承受大致均匀的水头压力。装入试样后,周边用一定灰土比(2:1~3:1)的混凝土浇筑并静置 2~3 d 直至完全凝固为止,使试样与混凝土、混凝土与桶壁之间紧密结合,不致漏水漏气。4 组试样高度均为 28 cm,等效截面积(或平均截面积)分别为  $261.26 \text{ cm}^2$ 、 $332.61 \text{ cm}^2$ 、 $452.17 \text{ cm}^2$ 、 $440.51 \text{ cm}^2$ (表 2)。

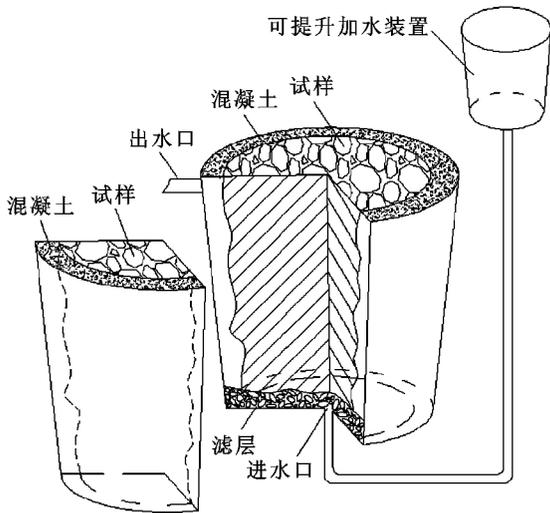


图 2 渗透试验装置示意图

用于渗透试验的简易装置如图 2 所示,试验开始前,先提升加水装置,使加水装置中的水面与试样顶面平齐,打开进水口阀门对试样进行饱水 12 h 后开始测计数数据。流速稳定后,即前后两次时间间隔的渗流速度差值小于 5% 时,加载下一级水头,每次按 0.2~0.5 m 的水头差逐级提升,直至试样表面出现气泡,有细颗粒物冒出、水流变浑浊为止,这时的水力坡降即为发生渗透破坏时的临界坡降<sup>[8]</sup>。临界坡降值由渗流速度与水力坡降的双对数曲线来确定,如图 3 所示,曲线上拐点位置对应的水力坡降,正是渗流流速骤变出现管涌时的水力坡降,4 组试验的  $\lg i \sim \lg v$  曲线,除 1# 样曲线的拐点不明显外,其他三组均有明显的拐点,4 组试验的临界水力坡降和渗透系数总体上较为接近(表 2)。由试验获得该溶蚀塌陷堆积物的渗透系数一般介于  $3.576 \times 10^{-6} \sim 1.699 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$  之间,按 GB 50287-99 中对岩土渗透性分级标准,应属于微-极微透水性<sup>[9]</sup>。因此,结合其颗粒组成特征和渗透性判定该溶蚀坍塌堆积层在库水的作用下不易产生明显的机械潜蚀。溶蚀坍塌堆积物的临界坡降为 7.536~14.804,依据该溶蚀层的分布高程并考虑水库蓄水的实际水位,选取临界坡降的 1/3 作为允许坡降,其值为 2.51~4.93,量值是比较高的。

表 2 溶蚀塌陷层渗透试验成果表

试样编号	样高 / cm	等效面积 / $\text{cm}^2$	水头 / cm	流量 / $(\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	渗透速度 / $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	渗透系数 / $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	临界坡降
1	28	261.26	211	0.097	$3.724 \times 10^{-4}$	$4.917 \times 10^{-6}$	7.536
2	28	332.61	255	0.0389	$8.892 \times 10^{-5}$	$9.670 \times 10^{-6}$	9.107
3	28	452.17	294	0.0807	$1.736 \times 10^{-5}$	$1.699 \times 10^{-5}$	10.5
4	28	440.51	414.5	0.0305	$5.384 \times 10^{-4}$	$3.576 \times 10^{-6}$	14.804

#### 3.2 化学潜蚀特征

为查明溶蚀堆积试样在渗透试验过程中有无化学潜蚀问题,在进行上述渗透试验前后都分别取水进行水化学分析,以便比较试验前后水化学成分的变化。由于试验用水是取自坝址区的山泉水,与坝址区溶蚀塌陷层实际地下水环境的水质状况可能存在一定的差异,因此研究中除对试验用水进行水化学分析外,同时还对河水以及坝址右岸岩体深部的裂隙水取样进行水质分析,水化学分析的成果如表 3 所示。

由表中的数据可以看出,渗透试验用水、江河水及坝址岩体深部的裂隙水中各类腐蚀性离子的含量较低,按 GB 50287-99 中的相关指标判定它们对混凝土均不具有腐蚀性<sup>[9]</sup>。各样品在水化学成份上差异不大,它们的 pH 值较为接近,在 8~9 之间,均呈弱碱性;阳离子中,试验用水的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  离子含量要比河水与裂隙水略低,而  $\text{K}^+ + \text{Na}^+$  离子的含量则基本相同。阴离子中除  $\text{HCO}_3^-$  离子的含量明显较低外,其他各离子的含量差别不大。因此用坝址区山泉水进行试验,基本能够代表坝址区地下水的水质情况。

对 4 组试样试验前后的水化学成分进行比较,可以看出试验后水的 pH 值有所增大,均由弱碱性变为中~强碱性。阴离子中,除  $\text{OH}^-$  离子在 4 组试样中本身差别较大外,其它  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  三种离子都有一定程度的增加,其中  $\text{Cl}^-$  含量比试验前提高了 10 倍以上,  $\text{CO}_3^{2-}$  含量约为试验前的 4~10 倍。阳离子中,  $\text{K}^+ + \text{Na}^+$  的含量显著增加,约为试验前的 25~40 倍,  $\text{Mg}^{2+}$  离子的含量无明显变化,  $\text{Ca}^{2+}$  含量较为特殊,部分有降低部分有增加,较不稳定。

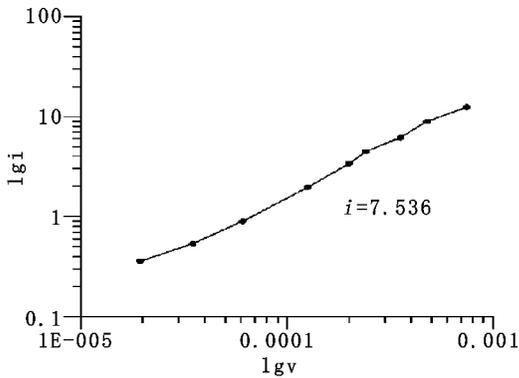
由此可见,尽管渗透水样本身的腐蚀性极弱,但渗透试验过程中,还是有一部分的组分的带入带出,上述迁移的组分中主要是含量较少的易溶氯化物的分解和迁移,对于组成堆积物主体的物质  $\text{CaCO}_3$ ,渗透水并不产生破坏性的化学潜

蚀作用,因此总体上不会影响到堆积物组织结构发生明显的 变化而导致渗漏问题。

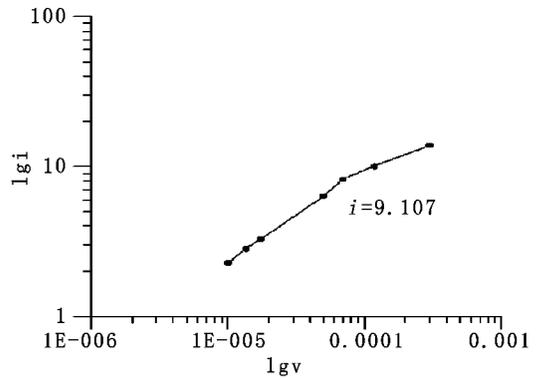
表 3 水质分析成果表

样号	取样位置	pH 值	每升水中含量/(mg·L <sup>-1</sup> )														
			阴离子				阳离子			阴阳离子合计	总硬度	暂时硬度	永久硬度	负硬度	总碱度	游离 侵蚀	
			Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	OH <sup>-</sup> (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	K <sup>+</sup> + Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>							CO <sub>2</sub>	C O <sub>2</sub>
1	渗透实验 前水样	8.54	1.4	5.75	11.71	* 102.4	5.37	37.58	1.45	165.67	99.82	99.82	0	3.72	103.5	0	0
2	1# 渗透水样	12.14	13.48	22.98	149.91	88.93	244.92	6.4	1.45	528.07	21.96	21.96	0	489.9	511.93	0	0
3	2# 渗透水样	12.07	19.65	53.62	84.33	64.38	175.51	9.59	1.94	409.02	31.49	31.49	0	298.2	330.2	0	0
4	3# 渗透水样	12.22	14.32	55.54	37.48	111.5	136.57	64.76	2.42	422.59	171.69	171.7	0	219	390.7	0	0
5	4# 渗透水样	12.35	13.59	11.49	51.53	149.99	205.39	37.58	4.29	473.86	111.8	111.8	0	415.8	527.4	0	0
6	河水	8.62	1.4	11.49	25.77	* 171.46	2.73	51.97	15.03	279.85	191.65	183.6	8.02	0	183.6	0	0
7	深部裂隙水1	7.79	3.09	26.81	0	* 211.95	5.76	47.17	18.42	313.2	193.65	173.9	19.8	0	173.9	3.52	0
8	深部裂隙水2	8.14	3.4	0.14	18.74	* 204.8	0.46	63.16	13.96	311.24	209.62	199.2	10.5	0	199.2	0	0

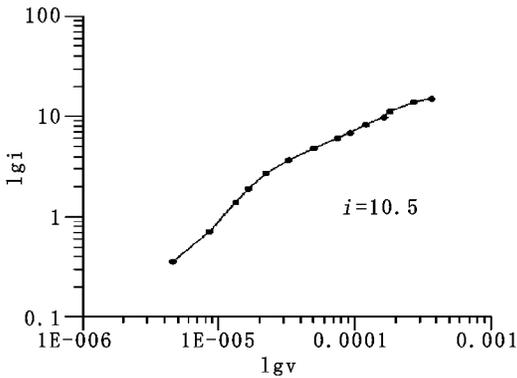
注:表中阴离子OH<sup>-</sup>(或HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)一列中,打\*号者为HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>,未打\*号者为OH<sup>-</sup>。



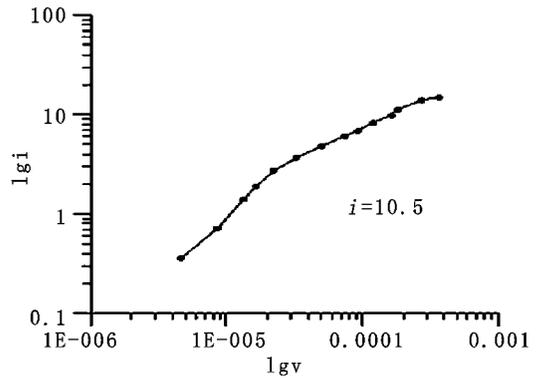
(a) 1#渗透试样lgv~lgi关系曲线



(b) 2#渗透试样lgv~lgi关系曲线



(c) 3#渗透试样lgv~lgi关系曲线



(d) 4#渗透试样lgv~lgi关系曲线

图 3 4 组渗透试样的 lgv~lgi 关系曲线

### 4 结 论

(1) 坝肩右岸的溶蚀堆积层主要由白云质灰岩岩块、泥砂物质和钙质胶结物组成,属于粒级不均匀、级配较差但密度较大的一类堆积物。

(2) 溶蚀堆积层的临界坡降为 7.536~ 14.804,允许坡

参考文献:

[1] 史俊德,连冬香,杨士臣.论岩溶塌陷问题[J].华北地质矿产杂志,1998,13(3):264-267.

[2] 杨立中,王建秀.国外岩溶塌陷研究的发展及我国的研究现状[J].中国地质灾害与防治学报,1997,8(增):6-10.

[3] 盛玉环.岩溶塌陷的勘察与防治[J].岩土工程界,2004,7(4):70-74.

[4] 刘广润,程伯禹.岩溶塌陷的类型、成因机制及防治途径——兼论武汉市岩溶塌陷勘查工作要点[J].工程地质学报,2001,9(4):414-417.

[5] 袁道先,朱德浩,翁金桃,等.中国岩溶学[M].北京:地质出版社,1994.9-22.

[6] 王滨,贺可强,高宗军.岩溶塌陷发育的时空阶段性分析[J].水文地质与工程地质,2001,(5):24-27.

[7] 张倬元,王士天,王兰生.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,1994.508-523.

[8] SL237-1999,土工试验规程[S].

[9] GB 50287-99,水利水电工程地质勘察规范[S].

降可取 2.51~ 4.93,量值总体较高。渗透系数一般介于 3.576×10<sup>-6</sup>~ 1.699×10<sup>-5</sup> cm/s 之间,属微—极微透水性。在库水的作用下不易产生明显的机械潜蚀作用;

(3) 试验前后的水质分析结果表明,研究区内地下水对溶蚀堆积层不具有破坏性的化学潜蚀作用,不会造成堆积体组织结构的改变而出现解体破坏。