

岩体软弱夹层渗透变形试验及三维有限元数值模拟

高正夏¹, 赵海滨²

(11 河海大学地质及岩土工程系, 南京 210024; 21 中南勘测设计研究院, 长沙 410014)

摘要: 渗透变形或渗透破坏是由潜蚀强烈发展而出现的一种特有的不良地质作用, 本文结合某大型水电工程坝基存在的软弱夹层, 在现场取样试验, 研究了这些软弱夹层在渗透水流作用下发生渗透变形的方式和程度, 并以试验成果为基础, 根据水工建筑物的布置以及上下游水头差等条件, 采用数值模拟的方法模拟软弱夹层的水力梯度分布情况以及软弱夹层与上下两盘基岩中的水力梯度分布, 为坝基防渗设计提供依据。

关键词: 岩体软弱夹层; 渗透变形; 三维数值模拟

中图分类号: P554; P6421.4

文献标识码: A

文章编号: 100023665(2008)0120064203

1 引言

构成地基的岩土材料由于渗流作用而出现的变形即为渗透变形。渗透变形形式与介质材料的性质、颗粒组成、渗透出口的保护程度及水力条件等因素有关, 通常为管涌、流土、接触流失、接触冲刷四种破坏形式。在单一性状的土层中, 一般发生管涌或流土破坏; 在多层土中一般发生接触冲刷或接触流失破坏^[1~2]。

某大型水电站是金沙江梯级开发中最末的一个梯级电站, 由于坝基岩层中存在软弱夹层, 这些软弱夹层在 161m 高坝形成的库水压力的长期作用下, 可能会对坝基的渗透稳定性产生影响, 因此, 有必要研究这些软弱夹层在渗透水流作用下发生渗透变形的方式和程度, 为坝基防渗设计提供依据。为此, 在坝基选取代表性的软弱夹层, 进行渗透变形现场试验及配套的基本物理、化学性质试验。通过各种试验确定软弱夹层的破坏形式, 计算其临界坡降、破坏坡降, 并依据试验成果进行三维渗流数值模型模拟分析。

2 渗透变形试验及结果分析

坝基软弱夹层的类型大体分为 4 类: 泥岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩等软弱夹层、破碎夹层、破碎夹泥层和泥化夹层, 其中泥化夹层在坝基分布少见, 坝址区以破碎夹泥类软弱夹层居多。本次试验取样主要为两类: 一类是层间错动破碎夹层(简称 Ñ 型), 另一类是破

碎泥层(简称 ò 型)。

软弱夹层原状试样渗透变形试验历时两个月(两台仪器同时试验), 层间错动破碎夹层(Ñ 型)和破碎泥层(ò 型)的试验成果见表 1。

目前我国水利工程中用来判别不同形式渗透破坏的标准有以下几点^[3]:

(1) 粘性土或不均匀系数 $C_u > 5$ 的均匀砂, 其主要破坏形式为流土。

(2) 级配不连续(缺乏中间粒径)的砂砾石, $C_u > 5$, 且填料含量小于 25% 时, 其破坏形式为管涌; 填料含量大于 35% 时, 则破坏形式常为流土; 填料含量介于 25% ~ 35% 之间时为过渡型。

(3) 正常级配的砂砾石, $C_u > 5$, 土体平均孔隙直径 D_0 大于可流动的填料直径 d_5 时, 其破坏形式为管涌; 孔隙平均直径小于可流动填料直径 d_5 时, 破坏形式为流土; 介于二者之间为过渡型。

根据颗粒大小分配曲线, Ñ - 1、Ñ - 2 破坏类型属于管涌; Ñ - 3 破坏属于流土; Ñ - 4 破坏类型属于过渡型。

试验得出的水力坡降与渗透流速关系曲线可以划分为三个阶段:

第一阶段, 即曲线的前段, 渗流速度随着水力坡降的增大而增大, 两者之间呈线性关系, 符合达西定律, 对于此段, 一般称为正常渗透范围, 在此范围内, 不会发生渗透变形;

第二阶段, 随着水力坡降的增大, 土体内一些细小的颗粒失去原来的稳定状态, 曲线出现转折, 斜率减小, 渗透速度增大。说明渗透规律不符合达西定律, 可以作为确定临界水力坡降的依据;

收稿日期: 200609218; 修订日期: 200702226

作者简介: 高正夏(1964), 男, 副教授, 博士后, 主要从事软基监测及地下水研究。

E-mail: gaozhengxia@vip.163.com

表 1 软弱夹层渗透变形试验成果表

Table 1 The result of seepage deformation field test of weak intercalation

试样编号	软弱夹层类型	临界坡降 i_k	破坏坡降 i_f	破坏形式	渗透系数 k ($@10^{-4} \text{ cmPs}$)	平均渗透系数 k (cmPs)
$\tilde{N} - 1$	层间错动破碎夹层	61.45	18.26	管涌	4191	$4.01 @10^{-4}$
$\tilde{N} - 2$		51.52	58.14		4122	
$\tilde{N} - 3$		51.34	29.78		5178	
$\tilde{N} - 4$		21.95	19.46		1109	
$\tilde{O} - 1$	破碎泥层	91.35	53.45	接触冲刷	3210	$11.36 @10^{-3}$
$\tilde{O} - 2$		61.59	32.41		5151	
$\tilde{O} - 3$		01.99	26.10		3143	

第三阶段, 随着水力坡降的继续增大, 渗流速度急剧增大, 水力坡降增加较小时, 水流速度也增加较大, 试件发生渗透破坏。此阶段称为破坏阶段。

对于 $\tilde{N} - 1$ 、 $\tilde{N} - 2$ 、 $\tilde{N} - 3$ 、 $\tilde{N} - 4$ 的试验结果, 则不能简单根据颗分曲线来判断其渗透变形类型。由于这几个试件均取砂岩与泥岩接触部位进行试验, 从试验描述看, 应属于接触冲刷破坏。尽管 $\tilde{N} - 1$ 的颗分曲线和 $J \sim V$ 关系曲线显示, 该试件渗透破坏有管涌的特征, 但其发生破坏时首先在砂岩裂隙附近出现泉眼跳动, 因此也应判断为接触冲刷破坏。

一般情况, 软弱夹层充填物与上下岩盘的接触面, 充填物内不同岩性也有接触面, 而且有裂缝, 这些都是抗渗强度的薄弱环节, 往往在这里是形成渗流的主要通道。夹层中存在裂缝, 特别当裂缝较多时, 在小坡降时, 某一充填不好的裂缝中土粒可能发生流动, 待坡降增大时, 各裂隙之间细小的通道连通, 形成大通道, 最后破坏。因此破坏类型常常为接触冲刷破坏。

3 渗透变形三维数值模拟

3.1 模型的建立

对于仅仅取了软弱夹层内的物质来进行的渗透试验, 并不能反映软弱夹层与上下两盘基岩共同的渗透特性。为此, 以室内试验成果为基础, 根据水工建筑物布置以及上下游水头差等条件, 采用数值模拟的方法模拟软弱夹层的水力梯度分布情况以及软弱夹层与上下两盘基岩中的水力梯度分布。

层间错动破碎夹层($\tilde{N}$ 型)为风化砂岩夹未完全风化的碎石, 岩体的透水性呈非均质各向同性的特点。因此, 在模拟此类夹层的时候, 认为夹层的渗透系数在空间上是随机变化的, 符合负指数分布规律, 渗流连续性方程满足式(1)。对于破碎夹泥层($\tilde{O}$ 型), 软弱夹层为呈薄层状分布灰黑色泥岩, 且裂隙较发育, 因此模拟时认为其渗透性呈各向异性, 渗流连续性方程满足式(2)。

$$K(x, y, z) \frac{\partial H}{\partial x} + K(x, y, z) \frac{\partial H}{\partial y} + K(x, y, z) \frac{\partial H}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

$$K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} + K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \tag{2}$$

在实际地质体中, 当软弱夹层两侧的岩体结构面不发育时, 夹层两侧围岩渗透系数可以认为很小(新鲜岩石渗透系数 $10^{-7} \sim 10^{-10} \text{ cmPs}$), 相对夹层中的岩体为不透水岩体, 此时可以只对软弱夹层中的渗流状态进行模拟。软弱夹层上下面边界为隔水边界, 沿着夹层长度方向(图 1), $x = 0.10 \text{ m}$ 处为上游水头, $x = 9.010 \text{ m}$ 处为下游水头, 其余边界为隔水边界。

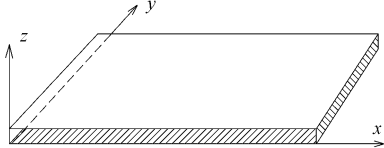


图 1 软弱夹层三维渗流计算示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of three-dimensional seepage calculation on weak intercalation

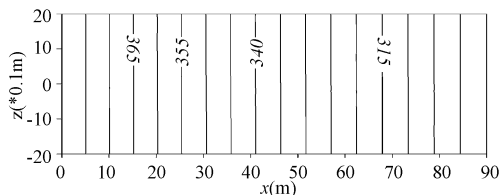
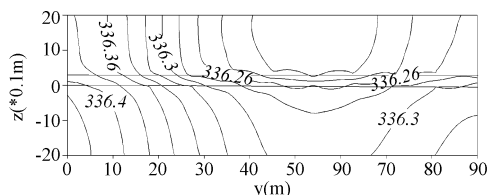
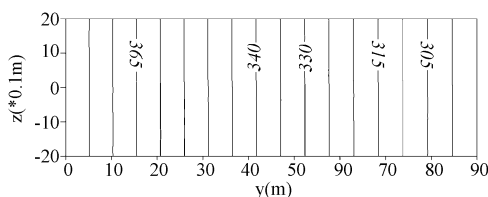
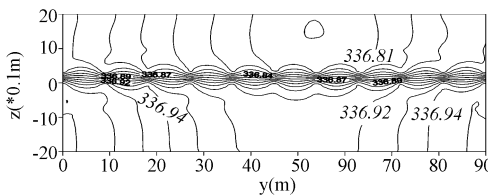
当软弱夹层两侧的岩体结构面很发育时, 围岩岩体渗透性远大于夹层岩体的渗透系数, 而且渗透呈各向异性的特点。这时需要对软弱夹层及其围岩进行整体考虑模拟, 计算时考虑软弱夹层中岩体渗透性呈均质各向异性和非均质各向同性两种情况, 其中非均质渗透系数符合随机分布规律, 模拟边界同上述。

3.2 模拟计算结果

部分模拟计算结果见图 2~ 5。

4 结论与建议

(1) 从试验结果看, 破坏坡降是临界坡降的 216~ 221.7 倍, 整体上破坏坡降与临界坡降相差较大。说明软弱夹层中充填物的成因及土质分布很不均匀, 且可能有裂缝存在, 这就使粘粒含量较小的点或细裂缝上, 可能先发生渗透变形, 其临界坡降可能较小, 但要使整

图2 围岩及软弱夹层 xz 剖面水头等值线图($\tilde{N}$ 型)Fig. 2 Contour map of xz section to rock and weak intercalation图3 围岩及软弱夹层 yz 剖面水头等值线图($\tilde{N}$ 型)Fig. 3 Contour map of yz section to rock and weak intercalation ($\tilde{N}$ type)图4 围岩及软弱夹层 xz 剖面水头等值线图($\tilde{O}$ 型)Fig. 4 Contour map of xz section to rock and weak intercalation ($\tilde{O}$ type)图5 围岩及软弱夹层 yz 剖面水头等值线图($\tilde{O}$ 型)Fig. 5 Contour map of yz section to rock and weak intercalation ($\tilde{O}$ type)

个试样破坏,其破坏坡降就可能很大。

此外,不同试样的临界坡降和破坏坡降相差也较大。随软弱带长度物质组成变化增大,在不同部位其充填物的成因及土质分布很不均匀。

(2)许多情况下,软弱夹层充填物与上下岩盘的接触面,充填物内不同岩性也有接触面,而且有裂缝,这些都是抗渗强度的薄弱环节,往往这里是形成渗流的主要通道。夹层中存在裂缝,特别当裂缝较多时,在小坡降处,某一充填不好的裂缝中土粒可能发生流动,待坡降增大时,各裂隙之间细小的通道连通,形成大通道,最后破坏。因此破坏类型常为接触冲刷破坏。

(3)数值模拟考虑了渗透性呈各向异性和随机分布的情况,模拟结果显示,层间错动破碎夹层最大水力坡降值约为112,最小约为0174。当薄层破碎泥层中岩体成层状分布时,渗透性表现出各向异性的特点,夹层中的水力梯度要比围岩大,最大值约为111,最小值为0189。在夹层与围岩接触面上有垂直于该面的水力梯度,更易发生接触冲刷变形。

(4)当夹层厚度比较大时,夹层与围岩接触部位的水力梯度变化减小,即在沿着夹层长度方向的同一 x 面上,夹层中的水力梯度随着夹层厚度的增大而有所减小。

(5)由于软弱夹层带延伸长,随长度物质组成变化大,加上水动力条件复杂,软弱带产生渗透变形破坏的因素是多方面的,应综合分析多种因素,才能客观评价其渗透变形破坏的形成机制和破坏条件。

(6)软弱夹层充填物中有机质、难溶盐、易溶盐的含量是否会因化学溶蚀导致机械作用,从而产生渗透变形,也应进一步论证。

(7)在对坝区软弱夹层的厚度、长度等几何特征和渗透性参数等物理特征充分了解的基础上,进一步模拟坝区岩体-软弱夹层的渗透变形情况,从整体上考虑不同部位、不同水动力条件下的渗流场、梯度场,才能更准确地反映坝区所有软弱夹层的渗透变形情况。

参考文献:

- [1] 陆兆溱. 工程地质学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989: 136- 144.
- [2] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1980.
- [3] 苑莲菊, 李振栓, 武胜忠, 等. 工程渗流力学及应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2001.

(下转第79页)

for estimating permeability in naturally fractured rocks

[8] Snow D T. Anisotropic permeability of fractured media

[J]. Engineering Geology, 1995, 39(1): 71- 85l

[J]. Water Resources Research, 1969(6): 35- 36.

Determination of permeability tensor of fractured rock in upper reservoir of pushihe pumped2storage power station

LI Ping¹, LU Wen2xi¹, QI Yue^{1,2}, WANG Hong2xia¹

(11 College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China;

21 Liaoning Electric Power Co. Ltd., Shenyang 110006, China)

Abstract: A method for determination of permeability tensor of fractured rock was presented, which not only can reflect the permeability characteristic of fractured rock, but also is relative accurate. First based on the measurement of spatial spread status of fractures, the permeability tensor of fractured rock was determined preliminarily using statistics method, the principle values and directions of which were obtained, then according to the permeability rate of rock from field water pressure test, the hydraulic conductivity of rock was calculated with Babushijin formula, and the correction coefficient was computed, thus the modified permeability tensor of fractured rock in the research area was obtained. Besides, the permeability tensor of fractured rock in dam site of upper reservoir of Pushihe pumped2storage power station was calculated with above method. The result shows that the method can better depict the anisotropic character of the permeability of fractured rock, and can provide scientific basis for the permeability zoning of rock and optimization of impervious curtain.

Key words: permeability tensor; fractured rock; pushihe pumped2storage power station

责任编辑: 王宏

(上接第 66 页)

Seepage deformation field test and three2dimensional finite element numerical modeling on weak intercalation in rock mass

GAO Zheng2xia¹, ZHAO Ha2bin²

(1. Department of geology engineering of hehai university, nanjing 210096, China;

2. Mid2south design & research institute, changsha 410014, China)

Abstract: Seepage deformation or seepage failure is a special bad geological processes formed in result of the intense development of suffusion. The paper combine the weak intercalation existed in the dam foundation of a large scale hydroelectric project, and study on the mode and degree of seepage deformation of this weak intercalation by field sampling test. Based on the result of field test and the arrangement of the hydraulic structure and the head difference between the up reaches and the lower reaches, the paper simulate the hydraulic gradient distribution in weak intercalation and in super and base rock mass of the weak intercalation adopted the method of three2dimensional finite element numerical modeling. The result of test and calculation is provided as the base of seepage control design of dam foundation.

Key words: rock mass; weak intercalation seepage; deformation; three2dimensional; finite element numerical modeling

责任编辑: 王宏