# 沥青混凝土防渗面板与黏土铺盖之间接触渗透性能的试验研究

郝巨涛，刘增宏，瞿 扬
(中国水利水电科学研究院结构材料研究所，北京 100038)

摘 要：结合宝泉工程进行了沥青混凝土面板与黏土铺盖之间接触渗透性能的研究。通过试验得到了不同界面连接形式和土体有无界面滑动情况下的临界渗透坡降和破坏渗透坡降，并依此对工程的接触渗漏安全性进行了评价。研究表明，对于界面设置网格加强形式，应防止土体相对于网格的滑动，避免将网格粘贴在沥青混凝土面板上。
关键词：沥青混凝土防渗面板；土体接触渗透；网格加强；宝泉工程
中图分类号：TV431.5 文献标识码：A 文章编号：1000－4548(2007)12－1800－04
作者简介：郝巨涛(1961－ )，男，辽宁辽阳人，教授级高级工程师，从事沥青混凝土工程和水工建筑物止水防渗、修补加固等方面的科研工作。E-mail: hjt@iwhr.com。

## Tests on interfacial seepage between asphalt concrete facing and soil blanket

HAO Ju-tao，LIU Zeng-hong，QU Yang
(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract**: In view of the interfacial seepage between asphalt concrete facing and soil blanket of Baoquan Pumped Storage Project in China, experiments were made to investigate the interfacial seepage characteristics. The critical and the failure hydraulic gradients were obtained for different interfacial structures with and without sliding of the soil. Safety evaluations were made for the interfacial seepage of the project. For the interface structure strengthened by the fiberglass mesh, conclusions were drawn from the test results that the soil sliding relative to the mesh should be avoided, and the method of sticking the mesh directly up to the asphalt concrete surface was not suitable.

**Key words**: asphalt concrete facing; soil blanket; interfacial seepage; fiberglass mesh; Baoquan Project

## 0 引 言

宝泉抽水蓄能电站位于河南省辉县市的峪河上，总装机容量 1200 MW。上水库采用全库防渗方案，主坝最大坝高 92.5 m，副坝坝高 36.9 m。库岸坡度 1∶1.7，坝坡、库岸均采用沥青混凝土面板简式防渗结构，厚度为 20.2 cm，防渗面积 16.6 万 $m^2$。库底采用黏土防渗，厚度 4.5 m，铺盖面积 15 万 $m^2$。沥青混凝土面板插入黏土铺盖下面形成整体防渗体系。宝泉抽水蓄能电站是国内第一座采用沥青混凝土面板和库底黏土铺盖联合防渗形式的抽水蓄能电站。以往国内也进行过沥青混凝土面板岸边接头形式的研究和工程实践[1]，但对沥青混凝土与黏土的接触防渗问题还很少研究。此前，美国于 1972 年修建的 Ludington 抽水蓄能电站也采用了这一防渗形式，但工程遇到很多问题，并进行了长时间的修补处理[2]。为此进行沥青混凝土面板与黏土铺盖联合防渗形式的研究，对于该工程今后的长期安全运行至关重要。宝泉工程在进行黏土铺盖设计时，曾对相关的重要问题之一，沥青混凝土与黏土的接触渗透特性进行了试验研究，以确定允许接触渗透坡降，为接触长度的设计提供依据。试验中考查了三种接触界面情况，即①沥青混凝土与黏土界面；②封闭层沥青玛蹄脂与黏土界面；③沥青混凝土＋网格与黏土界面。本文将就这一试验研究工作进行介绍。

## 1 试验材料及试验方法

沥青混凝土采用欢喜岭#90 水工沥青拌制，沥青含量为 6.9%（油石比），骨料最大粒径为 13.2 mm，级配指数为 0.35。封闭层沥青玛蹄脂按照沥青/矿粉＝

收稿日期：2006－11－12

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 沥青混凝土与黏土渗透试验结果汇总表

Table 1 Seepage test results of interface between asphalt concrete and soil

| 编号 | 界面类型 | 土芯直径 $d$/cm | 土芯高度 $h$/cm | 临界渗透坡降 $i_{cr}$ | 破坏渗透坡降 $i_F$ | 破坏坡降比 $r_i$ | 有无浑水情况 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| #1 | ① | 10.5 | 3.6 | 97.2 | 166.7 | 1.71 | 有 |
| #2 | ② | 10.5 | 3.6 | 97.2 | ＞136.1 | ＞1.40 | 无 |
| #3 | ② | 30.0 | 50.0 | 70.0 | 80.0 | 1.14 | 有 |
| #4 | ② | 10.0 | 18.0 | 80.6 | 144.4 | 1.79 | 无 |
| #5 | ③ | 10.0 | 20.0 | 105.0 | 127.5* | 1.21 | 无 |

*注：此时渗流流速只是略微增大，结构并没有出现破坏，并仍可以继续增大水压力。

30/70 的比例配制。黏土采用当地土料，渗透系数 $1.86\times10^{-6}$ cm/s，塑性指数 21.2，天然含水率 20.5%，最优含水率约为 19.2%，最大干密度 1.67 g/cm$^3$（25 击），比重为 2.77，液限含水率 $w_L$＝40.1%，塑限含水率 $w_P$＝20.3%，塑性指数 $I_P$＝19.8%。加强网格为 GG050 型玻璃纤维土工网格，其纵、横向抗拉强度≥50 kN/m，网孔尺寸为 25 mm×25 mm，抗拉伸长率＜4%，耐温性能为-100℃～280℃。

上述沥青混凝土、黏土和加强网格均为工程中采用的实际材料。接触渗透试验装置见图 1。采用钢法兰套筒作为试验装置外壳，内部回填沥青混凝土，中心填黏土芯，下部为进水口，上部设出水口。黏土芯按照最优含水率试验条件回填，直径为 $d$，高为 $h$，上下设砂砾石垫。试验时首先从模型下部进水口采用小压力注水，并持续足够时间，待模型顶部出水口出水黏土饱和。饱和过程需要 10 多天甚至一个月。然后开始逐步增大水压力，并进行渗流量测试，得出水压力和渗流量的关系。对于每级水压力，当渗流量稳定不变后才施加下一级水压力。当水压力增大到一定数值 $p_{CR}$，水压力－渗流量关系发生明显变化，且黏土芯未出现任何破坏迹象时，既表明黏土与沥青混凝土之间发生渗透破坏，由相应的水压力 $p_{CR}$ 可得临界渗透坡降 $i_{CR}$。这时仍可继续增大水压力，直至模型渗流量激增、水压力无法保持时试验终止，相应的渗透坡降为破坏渗透坡降 $i_F$，一般 $i_F/i_{CR}\geq1$。

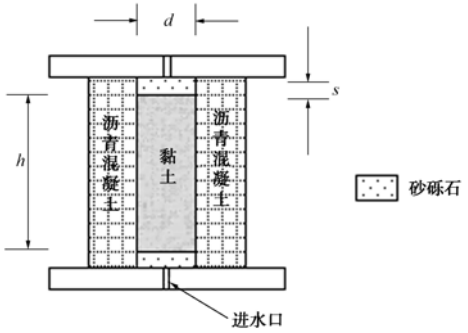



图 1 接触渗透试验装置图

Fig. 1 Test apparatus of interfacial seepage test

## 2 试验研究结果

### 2.1 界面无相对滑动

试验中采用引言部分所述的三种界面条件。其中第三种界面是在沥青混凝土表面涂刷封闭层沥青玛蹄脂后，粘贴 GG050 型玻璃纤维土工网格。铺设网格前首先在沥青混凝土上均匀地涂一层乳化沥青，然后将网格铺在沥青混凝土表面，拉平并粘好，试验中采用的网格搭接宽度为 30～50 cm。最后分层摊铺夯实黏土。不同界面及试验条件下试验结果见表 1 和图 2～图 4 所示。

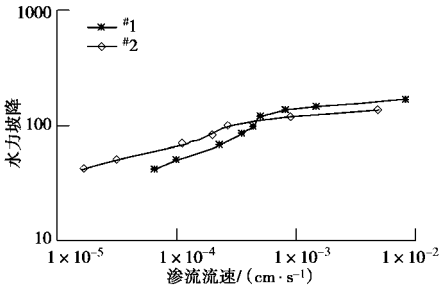



图 2 #1，#2 界面渗透试验结果

Fig. 2 Test results of interfacial seepage No. 1 and No. 2

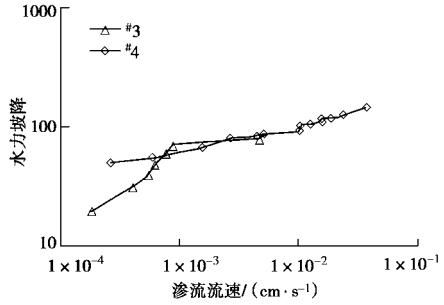



图 3 #3，#4 界面渗透试验结果

Fig. 3 Test results of interfacial seepage No. 3 and No. 4

从试验结果可以看出，界面渗透结构存在临界渗透坡降 $i_{CR}$，当渗透坡降 $i$ 超过 $i_{CR}$ 时，$\Delta V/\Delta i$ 将增大。同时界面①和界面②的 $i_{CR}$ 差别很小，为 70～97，表

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

明采用封闭层沥青玛蹄脂涂刷界面，对于提高 $i_{CR}$ 没有作用。其中#3 试验采用较大的试验模型装置，土芯直径和高度均较大，得到的 $i_{CR}$ 偏小，并且破坏时有浑水出现，根据模型制作过程分析，系由土芯击实密度略为偏小所致。对于界面③，当界面设置网格加强时，$i_{CR}$ 并没有明显增大，即 $i$ 小于 $i_{CR}$ 时网格的作用不明显。设置网格加强的作用表现在 $i$ 大于 $i_{CR}$ 时的界面渗流情况。上述各组试验整个试验过程中，未见黏土芯表面有任何破坏迹象。从图 2 和图 3 看出，界面没有网格加强时，$i$ 大于 $i_{CR}$ 后渗流流速急剧增加，致使试验终止。而从图 4 看出，界面设置网格加强且 $i$ 大于 $i_{CR}$＝105 时，当渗流流速由 $2.5\times10^{-6}$ cm/s 增至 $6.2\times10^{-6}$ cm/s 后，流速又开始减小，并持续徘徊在 $3.4\times10^{-6}$ cm/s 至 $6.9\times10^{-6}$ cm/s 之间。其间当 $i$＝250 时又出现一次渗流流速激增，由 $5.4\times10^{-6}$ cm/s 增至 $7.6\times10^{-6}$ cm/s，其后流速又徘徊在 $4.3\times10^{-6}$ cm/s 至 $6.9\times10^{-6}$ cm/s 之间。将破坏渗透坡降 $i_F$ 与临界渗透坡降 $i_{CR}$ 的比值称为破坏坡降比 $r_i=i_F/i_{CR}$，则界面没有网格加强时，$r_i$＝1.14～1.79，变动范围较大；界面设置网格加强时，$r_i$＞5，与没有网格相比，数值有很大提高。另外，有网格加强的界面，$i$ 大于 $i_{CR}$ 后渗流流速较小，为 $10^{-6}$ cm/s 量级；无网格加强的界面，$i$ 大于 $i_{CR}$ 后渗流流速较大，为 $10^{-4}$～$10^{-2}$ cm/s 量级。根据这些试验结果，如果将界面黏土颗粒开始移动、并开始在局部堆积时的渗透坡降与临界渗透坡降 $i_{CR}$ 相对应，将界面黏土堆积部位发生水力破坏、集中渗流通道即将贯通时的渗透坡降与破坏渗透坡降 $i_F$ 相对应，则图 4 试验结果说明，网格的设置可以阻止界面黏土颗粒的移动，增加局部堆积抵抗水力破坏的能力。

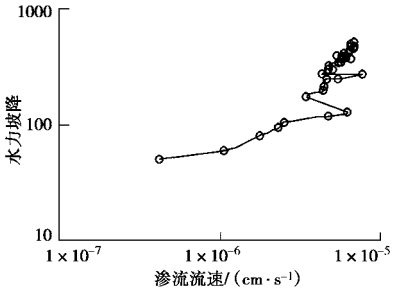



图 4 #5 界面渗透试验结果

Fig. 4 Test results of interfacial seepage No. 5

在进行沥青混凝土界面试验研究时，也曾对水泥混凝土与黏土界面进行了试验，以进行对比。发现水泥混凝土与黏土界面无网格加强时，$i_{CR}$＝67，$r_i$＝1.35，并出现浑水；有网格加强时，$i_{CR}$＝117，$r_i$＝2.85，并出现浑水。表明水泥混凝土界面的抗渗透破坏能力略逊于沥青混凝土界面，但差别不大。

### 2.2 界面有相对滑动

在以上试验基础上，采用较大的试验装置，进一步进行了黏土芯相对于沥青混凝土发生滑移时的接触渗漏试验。试验黏土芯直径 $d$＝30 cm，黏土芯上表面距离沥青混凝土顶面 5 cm。界面为两种，其一为沥青混凝土与黏土直接接触；其二为在沥青混凝土面铺设加强网格，然后与黏土芯接触。

对于沥青混凝土与黏土直接接触、无网格加强的模型，土芯高度为 $h$＝45 cm，首先在 5～10 m 水柱压力（水力坡降 10～20）作用下，缓慢移动土芯。历时 46 h，土芯累计移动 3.1 cm，相对于土芯高度的滑动比为 0.069（＝3.1/45）。期间在 4～6 h 时，土芯表面略有渗水，至 7 h 后渗水停止。土芯位移结束后，在其顶部剩余的约 2 cm 深度空间内回填砂子，上盖板以阻止土芯的进一步位移，然后施加 5～10 m 水柱的水压力。施加水压力后 48 h 开始出现渗水。当水力坡降由 82 上升至 111 时，渗透流速自 $8.7\times10^{-5}$ cm/s 开始降低，直至 $1.2\times10^{-6}$ cm/s，其间持续 4 d。当坡降增至 132 时出现浑水，渗透流速为 $8.2\times10^{-5}$cm/s，水压力无法保持，试验终止。由于土颗粒沿界面移动可能造成渗漏量的波动变化，本试验的临界渗透坡降应为 $i_{CR}$＝82，破坏渗透坡降为 $i_F$＝132，$r_i$＝1.61。

对于沥青混凝土与黏土之间设置网格加强的模型，土芯高度为 $h$＝36 cm。首先在 10～25 m 水柱压力作用下，缓慢移动土芯。历时 33 d，土芯累计滑移 1.7 cm，相对于土芯高度的滑动比为 0.047，这时土芯表面已有渗水。值得注意的是，无网格加强的模型在 5～10 m 水柱压力下，46 h 土芯的相对滑动比就达 0.069，由此可见网格起了阻止土芯滑动的作用。在土芯顶部填砂子，上盖板后加水压力，其渗透试验结果见图 5，试验总历时仅为 2.5 h。试验一开始土芯渗漏相对较大，渗流流速就达到 $3.9\times10^{-4}$ cm/s，是无网格土芯起始渗流流速（$1.7\times10^{-5}$ cm/s）的 23 倍，表明界面黏土已在网格的阻滑过程中发生了一定的破坏。当水力坡降上升至 72 时，渗漏流速激增，并在坡降达到 83 时出现浑水。此时渗流流速达 $1.1\times10^{-2}$ cm/s，是无网格土芯出浑水破坏时渗流流速（$8.2\times10^{-5}$ cm/s）的 134 倍。表明土芯界面相对于无网格试件发生了严重得多的破坏。由于最后渗漏量过大，并已出现浑水，且没有看到土芯界面破坏后有任何自愈现象，故试验终止。本试验的临界渗透坡降应为 $i_{CR}$＝72，破坏渗透坡降应为 $i_F$＝83。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

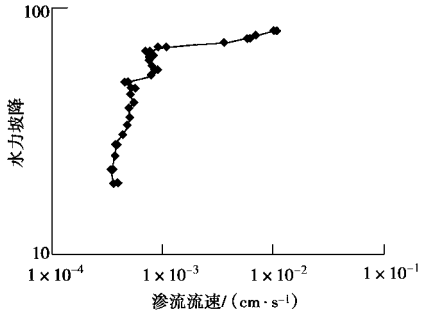



图 5 有网格及相对滑移的渗透试验

Fig. 5 Test results with geomesh reinforcement and relative sliding

上面试验结果是在土芯相对滑移 1.7 cm 下得到的。由于试验采用网格的网眼尺寸是 25 mm×25 mm，相对滑移与网眼尺寸之比达到 0.68。在这种情况下，土芯已经沿接触界面发生了严重破坏，发生了较大的接触渗漏。因此，合理地选择网眼尺寸，对于确保土在接触边界不致发生剪切破坏，是十分重要的。

## 3 结　　语

首先，在沥青混凝土面板和黏土铺盖之间的接触渗漏是存在的，试验中土芯也观察到了界面出浑水，导致渗漏量加大的现象。根据 2.1 节无界面滑移的渗透试验结果，在没有网格加强时，界面的临界渗透坡降为 70～97。根据目前设计，宝泉的黏土铺盖厚度为 4.5 m，相应的渗透坡降不大于 10。因此在无界面滑移的情况下，这一铺盖厚度是安全的。

当界面有滑移时，土体沿界面将出现一定的松动。根据 2.2 节有界面滑移、但没有网格加强的试验结果，当渗透坡降小于 82 时，土体的渗透速度随着渗透坡降的加大逐渐增大，表明其内部结构还是稳定的。但当渗透坡降在 82～111 之间时，渗透速度反而降低，表明土体颗粒发生移动，并淤堵了渗漏通道。上面也是据此判断 82 为临界渗透速度的。因此，当界面滑动比（滑移值与接触长度之比）不大于 0.069 时，4.5 m 的铺盖厚度也应是安全的。

试验研究结果表明，对于网格加强应慎重，如果使用得当，对工程是有益的。在无界面滑移的情况下，2.1 节的试验结果已表明，采用网格加强虽不能增加临界渗透坡降，却可以限制渗透坡降超过临界坡降后渗透速度的发展，制约土颗粒沿界面的移动，提高渗透破坏坡降，对于防止接触渗漏破坏是十分有益的。

但是，当网格黏贴在沥青混凝土表面且土体滑移时，土体相对于网格产生相对位移，网格将扰动界面处的土体结构，导致界面渗漏加大。此时设置网格不仅无益，而且有害。为此设置网格加强时，防止土体相对于网格的滑动十分重要。应采用不带粘结剂的加强网格，避免将网格粘贴固定在沥青混凝土面板上，使网格能够随同土体一起滑动。因此合理的设计产生的结果应当是，由土体防止界面渗漏，由网格限制土体内土颗粒的迁移。

参考文献：

[1] 郝巨涛. 沥青混凝土防渗面板与岸边混凝土结构的连接型式[J]. 水工沥青与防渗技术, 1989(1): 16－25. (HAO Ju-tao. Interfaces of asphalt concrete facings with other concrete structures[J]. Hydraulic Bitumen and Anti-seepage Technology, 1989(1): 16－25. (in Chinese))

[2] BILLINGTON E D, BASINGER M Dupuis, JOHNSON D. Real-time location methods for underwater repair of the ludington pumped storage plant foundation[C]// Proceedings of the Dam Safety ’98 Conference, Association of State Dam Safety Officials, October 11-14, 1998 Las Vegas, NV.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net