

文章编号: 1672-3031(2007)01-0033-06

沥青混凝土防渗面板滑动接头的试验研究

郝巨涛, 刘增宏, 瞿扬

(1 中国水利水电科学研究院 结构材料研究所, 北京 100038)

摘要: 通过各种模型试验, 对沥青混凝土面板在滑移过程中产生的应力和应变进行了研究。研究结果表明, BGB 塑性垫层材料可在较小的滑动位移下对面板拉应力和拉应变进行调整, 确保面板在滑移过程中不开裂。同时这种垫层材料对面板滑移速度和水压力大小均不敏感, 这对于适应面板在各种情况下的滑移十分有利。由于面板在滑移中的破坏受面板内产生的拉应力控制, 进行滑移垫层设计时应尽量减小面板中的拉应力。另外, 采用这种垫层材料能确保沥青混凝土面板在 1MPa 的水压力和不大 于 0.76 的滑移缝长比作用下不漏水。

关键词: 沥青混凝土面板; 滑动接头; BGB 塑性垫层; 模型试验

中图分类号: TV442

文献标识码: A

1 问题的提出

目前, 张河湾、西龙池、宝泉抽水蓄能电站正在开工建设, 这些工程的沥青混凝土防渗面板均存在与刚性混凝土结构的连接接头问题, 如西龙池上、下库进出水口钢筋混凝土面板与沥青混凝土面板的接头、宝泉沥青混凝土面板与副坝混凝土的接头等。参考以往的工程经验, 这些工程均采用了滑动式接头连接方式。以往工程中, 在沥青混凝土面板接头部位发生开裂导致漏水的例子很多。美国的 Ludington 抽水蓄能电站上池(1972 年)、德国 Waldeck 抽水蓄能电站上池(1973 年)均在进水口建筑物周围发生了渗漏, 全库沥青混凝土面板防渗的漏水往往发生在接头处, 接头连接结构是工程的薄弱环节^[1]。我国的牛头山、车坝等工程滑动接头滑动能力不足, 甚至不滑动, 致使接头部位的沥青混凝土面板在坝体沉陷过程中产生的拉力过大, 导致面板开裂^[2], 接头连接结构同样是工程的薄弱部位。

设置滑动接头的目的是使沥青混凝土防渗面板在坝体沉陷过程中沿刚性混凝土结构表面滑动, 减小沥青混凝土面板在沉陷过程中的受力, 防止其发生开裂破坏, 同时还应确保接头在滑动过程中不漏水。滑动接头设计的关键是接头结构和接头材料。本文通过模拟试验, 对某抽水蓄能电站的接头形式进行论证, 并为工程设计提供依据。

2 接头结构及接头材料

研究的沥青混凝土防渗面板接头形式见图 1, 图中接头搭接部分的沥青混凝土面板长度 75cm, 厚 15cm, 面板下设塑性过渡料, 或称柔性滑动垫层材料。当沥青混凝土面板发生位移时, 它应能在垫层材料上滑动, 而不被拉断, 且应不漏水。

以往工程中主要采用改性沥青类材料作为接头垫层材料。1988 年南谷洞水库施工时曾采用 SBS 改性沥青作为接头材料。1996 年天荒坪工程采用 IGAS 作为接头垫层材料, IGAS 也是一种改性沥青材料, 需要热施工涂抹在混凝土表面上。改性沥青材料的主要问题是 对温度过于敏感, 常温下变形性能较好, 低温则下降较多。本研究参照 IGAS 的性能, 对混凝土面板坝的 GB 接缝止水材料^[3]进行改进, 研制成了 BGB 塑性填料。BGB 塑性填料在原来 GB 填料的基础上, 柔性进一步加大, 更适合沥青混凝土防渗

收稿日期: 2006-11-27

作者简介: 郝巨涛(1961-), 辽宁辽阳人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水工结构研究。E-mail: hjt@iwhr.com

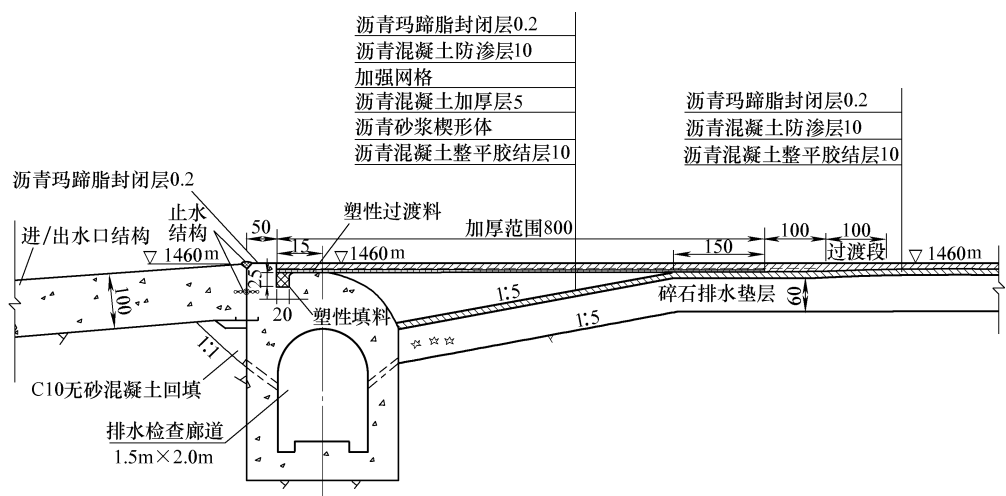


图 1 沥青混凝土防渗面板接头形式(单位: cm)

工程的特点。经常规试验, BGB 的扯断伸长率为 320%, 针入度为 136dmm, 下垂度为 0.8mm, 密度为 1.35g/cm³。

结合接头性能的特点, 采用直剪试验方法^[4]考查了 BGB 在不同温度下的剪切性能, 试验结果见图 2 和图 3。

图 2 是在恒定垂直压力 300kPa 作用下, 对不同温度下的 BGB 检测其剪切强度与剪切速率的关系。从图 2 可以看出, 在 14 ~ 16℃ 下, 剪切速率对剪切强度基本没有影响, 在 2 ~ 4℃ 低温下影响很小。这一性能表明, BGB 材料对不同的面板滑移速度适应性好, 滑移中产生的剪切力变化小, 数值也很小。

图 3 是在恒定剪切速率 0.8mm/min 作用下, 对不同温度下的 BGB 检测其剪切强度与垂直压力的关系。从图 3 可以看出, 在 14 ~ 16℃ 下, 垂直压力对剪切强度基本没有影响, 在 2 ~ 4℃ 低温下影响很小。这一性能表明, BGB 材料对不同水压力的适应性好, 滑移中产生的剪切力不会随水压力的增大发生明显变化。改进后 BGB 的这些性能对于抽水蓄能电站的运行来说是十分有利的。

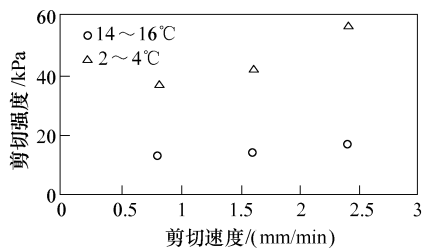


图 2 300kPa 下不同剪切速率结果

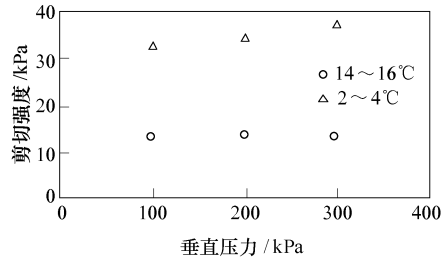


图 3 剪切速率 0.8mm/min 下不同垂直压力结果

3 接头垫层结构的模型试验

3.1 结构弹性分析 根据图 1 所示的防渗面板接头形式, 其结构分析简图见图 4。设垫层材料和沥青混凝土面板的厚度分别为 h_1 和 h_2 , 垫层搭接长度为 L , 面板在端部托曳力 F 的作用下沿垫层材料表面滑动。按照弹性分析, 假设沥青混凝土的弹性模量为 E , 垫层材料的剪切模量为 G , 依据图 4 受力分析, 可得下面平衡方程式

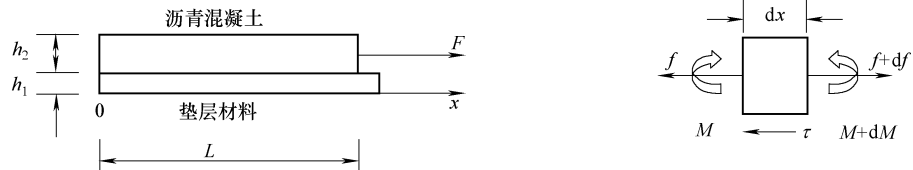


图 4 沥青混凝土面板受力分析

$$\frac{df}{dx} = \quad ; \quad \frac{dM}{dx} = \frac{h_2}{2} \tag{1}$$

式中： 为任意点 x 处面板与垫层材料之间的剪应力; f 为面板中心拉力; M 为弯矩。

假设面板某点的 x 向位移为 u , 垫层内剪应力沿垫层厚度 h_1 均匀分布, 则根据虎克定律和几何方程有

$$f = Eh_2L \frac{du}{dx}; \quad = G \frac{u}{h_1} \tag{2}$$

将式(2)代入式(1), 并考虑图 4 中的边界条件 $f|_{x=0} = 0, f|_{x=L} = F$, 可得用端部拉力 F 表示的解为

$$\frac{u}{F} = \sqrt{\frac{h_1}{GEh_2}} \frac{\cosh x}{\sinh L}; \quad \frac{f}{F} = \frac{\sinh x}{\sinh L}; \quad \frac{M}{F} = \frac{\cosh x}{\sinh L}; \quad \frac{M}{F} = \frac{h_2}{2} \frac{\cosh x}{\sinh L} \tag{3}$$

式中： $\quad^2 = \frac{G}{Eh_1h_2}$ 。

上面分析中 $\quad$ 是重要参数, 它可以用 $x = 0、x = L$ 处的实测位移值, 按照下式计算, 并相应的可以得出 $E、G$

$$= \frac{1}{L} \cosh^{-1}(\frac{uL}{u_0}); \quad E = \frac{F}{uL \quad h_2 \tanh(\quad L)}; \quad G = \quad^2 Eh_1h_2 \tag{4}$$

3 2 结构滑移模型试验 本文试验要求论证接头部位的面板是否可以滑动, 检验面板在滑动过程中是否会开裂。试验中面板沥青混凝土的沥青含量为 7 5%(油石比), 骨料最大粒径为 16mm, 矿料 0 074mm 通过率为 14%, 级配指数为 0 25。试验模型装置见图 5。

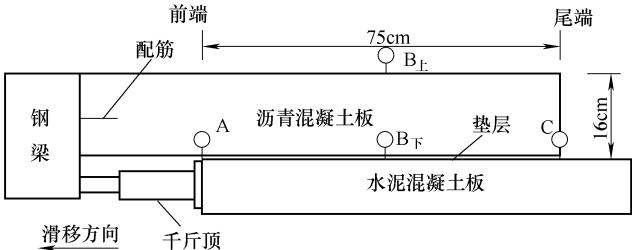


图 5 结构模型试验装置示意

模型制作采用 10cm 厚、50cm 宽的混凝土板, 其上按要求的厚度 h_1 粘贴垫层材料, 填料上摊铺 150mm 厚的沥青混凝土板, 并用振动夯板压实。沥青混凝土面板与水泥混凝土板的搭接长度为 75cm。在图中 A、B、C 点设有百分表, 可以量测沥青混凝土板和水泥混凝土板之间的相对位移。千斤顶配有压力表, 可以量测沥青混凝土面板的端部拉力 F 。试验结束时曾用 100mm 的取芯机钻取包含沥青混凝土、BGB 垫层材料和水泥混凝土的芯样, 芯样检查表明, BGB 与上下板之间粘接十分紧密。

3 2 1 不同垫层材料的差别 选用 3mm 厚的 BGB 板和 3mm 厚的沥青玛蹄脂作为垫层材料, 分别进行滑动试验。试验温度为 3 , BGB 的滑移速度为 0 45mm/min, 玛蹄脂的滑移速度为 0 08mm/min。试验结果见图 6 和图 7。图中的前端拉应变按照($U_A - U_B$) L_{AB} 计算, 后端拉应变按照($U_B - U_C$) L_{BC} 计算。

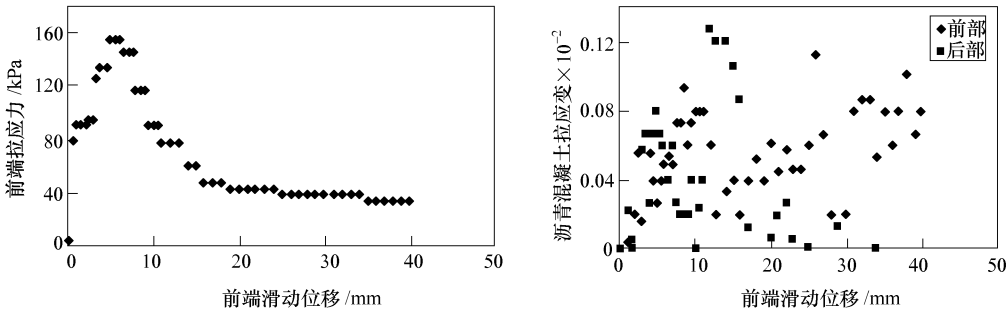


图 6 3 下 3mm 厚 BGB 板的滑移试验结果

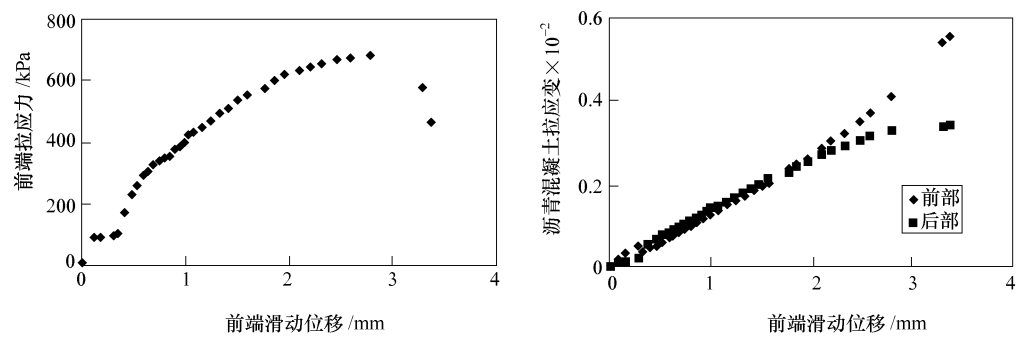


图 7 3 下 3mm 厚沥青玛蹄脂的滑移试验结果

由图 6、图 7 可知, 尽管沥青玛蹄脂的滑移速度仅为 BGB 板的 1/6, 其前端拉应力还是高于 BGB 板的前端拉应力, 最大值为 683kPa, 约为后者最大值的 4.4 倍。沥青混凝土板中的拉应变也高于 BGB 板的拉应变, 最大值为 0.56%, 约为后者最大值的 4.8 倍。

采用 3mm 的沥青玛蹄脂作为垫层材料, 沥青混凝土面板滑动很小, 前端最大滑移量仅为 3.4mm。且当拉应力达到 680kPa、拉应变达到 0.41% 时, 面板发生断裂。与之相比, 3mm 的 BGB 板作为垫层材料, 沥青混凝土面板滑动很大, 试验中前端最大滑移量已达 40mm, 面板没有任何裂纹, 且滑移仍可以继续发展, 显示出 BGB 板作为垫层材料的优势。

另外从两种垫层材料的沥青混凝土面板拉应变变化模式中看出, 对于沥青玛蹄脂垫层, 当前端滑移小于 1.7mm 时, 面板前后的拉应变完全一样, 均随滑移的变化而线性增大, 此时应可以按照弹性介质进行分析。此后由于面板开裂, 前部拉应变逐渐超过后部拉应变。另外根据实测记录, 整个过程中沥青混凝土面板的末端位移 u_e 均为零, 即末端根本没有滑动。据此, 沥青玛蹄脂应称为不滑动垫层材料。

对于 BGB 垫层材料, 当前端滑移小于 5mm 时, 面板前后的拉应变基本一样, 大致随滑移的变化线性增大。此后由于垫层材料开始屈服, 前后应变呈现跳动发展。且当前端滑移大于 20mm 时, 沥青混凝土面板的后部拉应变逐渐减小, 并趋于零, 即呈现 C 点跟着 B 点滑移的趋向。面板前部拉应变则基本保持在 0.1% 的水平, 不再增大。

3.2.2 不同温度下 BGB 板滑移的差别 选用 10mm 厚的 BGB 板分别进行 10 和 3 的滑动试验。10 试验的滑移速度为 0.45mm/min, 3 试验的滑移速度为 0.81mm/min。鉴于前面第二节所述 BGB 材料对滑移速度不敏感, 这样对比的差别不大。试验结果见图 8 和图 9。

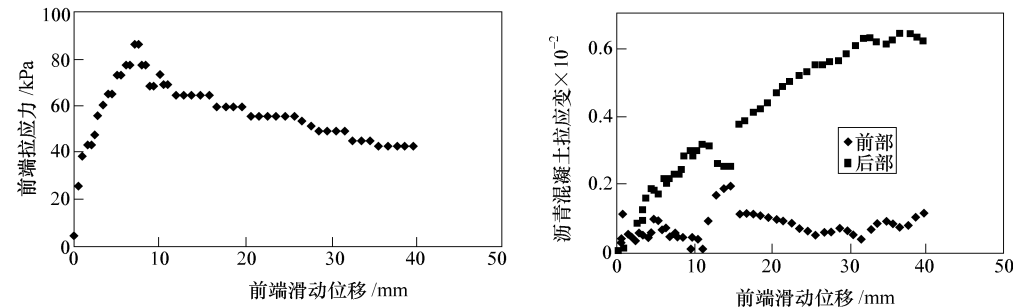


图 8 10 下 10mm 厚 BGB 板的滑移试验结果

经过对比得知, 3 试验的前端拉应力仅略大于 10 试验, 最大值为 105kPa, 比后者大 20%。但是 3 试验的拉应变却小于 10 试验, 最大值为 0.32%, 比后者小一倍。对于应变这一现象的解释是, 温度较低时, BGB 材料将在较小的应变下进入塑性状态, 因此可以较早地对沥青混凝土面板的拉应变进行调整。这一点与下面厚度的对比是类似的。

将图 6 和图 9 进行对比可以看出, 同是 3 试验, BGB 厚度较小时虽然前端拉应力较大, 前者最大值为 155kPa (3mm 厚), 后者为 105kPa (10mm 厚), 但是 BGB 厚度较小时的应变却较小, 前者最大值为 0.127% (3mm 厚), 后者为 0.324% (10mm 厚)。理由是类似的。因为厚度较小的 BGB 板可以较早地进

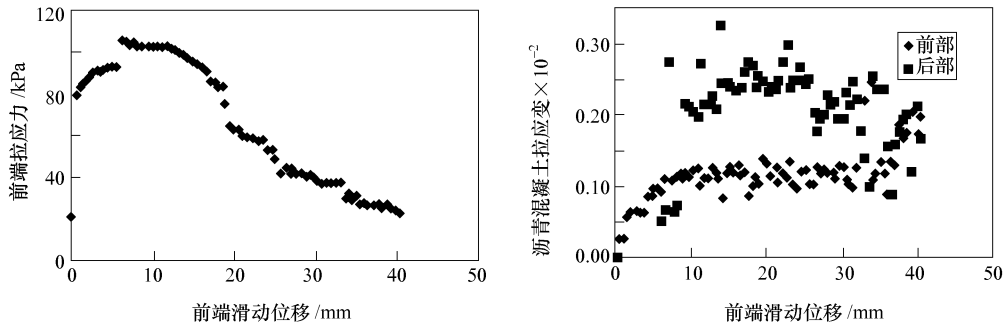


图 9 3 下 10mm 厚 BGB 板的滑移试验结果

入塑性状态, 较早地对沥青混凝土面板的拉应变进行调整, 相应的沥青混凝土拉应变也较小。

上述结果对于选择垫层材料的厚度是有意义的。即当沥青混凝土面板的断裂受拉应力控制时, 应当选择较厚的 BGB 板; 当沥青混凝土面板的断裂受拉应变控制时, 应当选择较薄的 BGB 板。对比同为 3 的滑移试验图 7 和图 9, 玛蹄脂垫层材料的断裂拉应变为 0.41%, 其与 BGB 垫层材料的最大拉应变 0.324% 相差无几, 但应力相差很大。由于前者发生了断裂, 表明沥青混凝土在低温下的断裂应当受拉应力控制, 这时选择较厚的 BGB 板是有利的。

4 接头滑移渗漏模型试验

试验目的是检验 1cm 厚 BGB 垫层材料在经历滑动后, 是否可以承受 1MPa 水压力不漏水。试验温度为 23 。

试验模型采用内径 50cm 的钢筒, 钢筒内侧浇注厚 15cm 的混凝土筒, 筒内填筑 20cm 50cm 的沥青混凝土芯。填筑前, 将圆筒水泥混凝土内壁表面清理干净, 涂刷环氧粘剂后粘贴 1cm 厚的 BGB 垫层板。填筑沥青混凝土前, 圆筒下部放置混凝土垫块作为模板, 垫块下设千斤顶支撑。沥青混凝土填筑温度为 160 , 用夯锤夯实。首先填筑底部 10cm, 夯实后放入 4 2cm 40cm 的加强钢栅管, 然后在钢栅管外侧继续分层填筑沥青混凝土。钢栅管壁厚 4mm, 其作用是在沥青混凝土芯的中心形成 4 2cm 40cm 的注水孔, 试验时可从该中心孔向外侧的沥青混凝土施加水压力, 以模拟沥青混凝土面板表面实际承受水压力作用的情况。钢栅管还可起配筋作用, 防止沥青混凝土芯被水压力拉裂。试验模型见图 10。

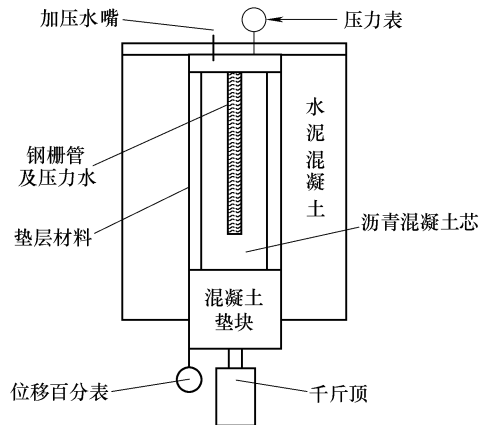


图 10 接头滑移渗漏试验模型

试验时水压力为 1MPa。通过调节千斤顶对混凝土垫块的支撑, 使沥青混凝土芯在水压力作用下以 1cm/h 的速率向下滑移, 并观察渗漏情况。在试验前 15h 内, 渗漏量维持在 86~ 5ml/h, 并逐渐减小, 且压力始终维持在 1MPa。渗漏是由于 BGB 垫层材料粘贴不完全密封造成的。随着时间延长, BGB 垫层板发生滑移自密实、渗漏逐渐减少, 直至小于 50ml/h。至第 20h, 当累计滑移达到 20cm 时, 渗漏完全停止。此后一直无渗漏发生。到第 56h, 当累计滑动位移达 38cm 时, 出现大量漏水, 水压力下降, 试验终止。由于起始接缝长度为 50cm, 此时达到的滑移缝长比(滑移值与接缝长度之比)为 0.76。试验结束后检查发现, 沥青混凝土芯依然完好, BGB 垫层已发生破坏。

试验结果表明, 采用 10mm 厚 BGB 板作为垫层材料, 在常温 23 下, 可以承受 1MPa 水压力以及 0.76 的滑移缝长比作用不漏水。

5 结论

通过本文试验和分析可以得出以下结论: BGB 塑性填料可以作为沥青混凝土防渗面板的垫层材料使用。它对面板滑移速度和面板表面的水压力作用不敏感, 滑移中产生的剪切应力变化及数值都较小; 当面板滑移 0.5~1cm 时, BGB 垫层材料(3~10mm 厚, 75cm 长) 就开始进入塑性滑移状态, 此时在沥青混凝土面板端部产生的拉应力以及面板前部产生的拉应变将不再增大, 使面板在较小的拉应力和拉应变状态下发生滑动; 采用 3~10mm 厚、75cm 长的 BGB 垫层材料可确保 15cm 厚的沥青混凝土面板在滑移过程中不产生裂纹。同样情况下, 采用 3mm 厚沥青玛蹄脂作为垫层材料, 沥青混凝土面板在端部位移不到 3mm 时就被拉断; 沥青混凝土面板的断裂破坏在低温下基本受拉应力控制, 此时选用相对较厚的 BGB 垫层材料可以有效地减少沥青混凝土面板在滑移中的拉应力, 确保面板不开裂; 在 10mm 的 BGB 垫层材料上, 沥青混凝土面板在 1MPa 的水压力和不大于 0.76 的滑移缝长比作用下, 可确保不漏水。

参 考 文 献:

[1] Billington E, Basinger D, Dupuis M, Johnson D. Real-time Location Methods for Underwater Repair of the Ludington Pumped Storage Plant Foundation[A]. Proceedings of the Dam Safety 98 Conference[C]. Association of State Dam Safety Officials Las Vegas, NV, 1998.

[2] 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- 2).

[3] 中国水利水电科学研究院. 适应大变形的接缝止水结构和材料研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2000.

[4] SL237- 1999, 土工试验规程[S].

Experiment on sliding connection parts of asphalt concrete impervious facing

HAO Ju-tao, LIU Zeng-hong, QU Yang
(Dept. of Structures and Materials, IWHR, Beijing 100038, China)

Abstract: Model tests are made to check the stress and strain of asphalt concrete facing during sliding. The test result show that BGB plastic cushion material can restrict the tensile stress and strain and prevent the facing from crack under a relatively small sliding displacement. BGB is not sensitive to sliding speed and water pressure, so it can suit various situations of facing. Because crack failure of the facing is governed by the aroused tensile stress, measures to reduce the tensile stress in designing cushion structures should be taken. In the end, the test showed that BGB cushion material can prevent the facing from leaking under the action of water pressure of 1 MPa and sliding with its end displacement ratio to the length of cushion not larger than 0.76.

Key words: asphalt concrete facing; sliding connection; BGB plastic cushion; model tests
(责任编辑: 王冰伟)