

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221683

沥青混凝土面板与土工膜防渗连接结构试验研究

王樱峻^{1,2}, 宁志远^{1,2}, 叶 谦¹

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 浙江省抽水蓄能工程技术研究中心, 浙江 杭州 311122)

摘要: 针对库岸沥青混凝土面板与库底土工膜的连接型式, 提出了取消混凝土连接板, 利用钻孔回填弹性环氧砂浆的方式将两种防渗体直接连接的新型结构设计方案, 并通过模型试验, 研究防渗连接结构锚固区接头部位的力学性能、抗渗性能及锚固参数。结果表明, 所提方法锚固区抗拉拔、抗扭性能安全可靠, 建议的双道锚固方案可更好地适应 0.4 MPa 水头下土工膜发生滑移大变形时的防渗要求。根据试验结果提出了优化钻孔参数, 具有成孔性好、防渗可靠、对面板整体性影响较小的特点, 可为实际工程设计提供参考。

关键词: 沥青混凝土面板; 土工膜; 锚固; 弹性环氧砂浆; 抗渗试验

中图分类号: TV42

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)08-0113-04

1 工程概况

某抽水蓄能电站上水库由主坝、副坝和库周山岭围成。水库正常蓄水位 267.00 m, 死水位 239.00 m, 总库容 $1\ 748 \times 10^4\ \text{m}^3$ 。主、副坝均为面板堆石坝, 坝顶高程 272.40 m, 主坝最大坝高 182.30 m, 坝顶长 811.45 m, 坝顶宽 10.0 m。主坝坝体上游面坡比 1:1.7, 采用筒式沥青混凝土面板防渗。237.00 m 高程以上的坝体分区自上游至下游依次为沥青混凝土面板、垫层料、过渡料及上、下游堆石料; 237.00 m 高程以下, 上游以反滤料代替垫层料。主坝坝体分区见图 1。库盆采用半挖半填布置, 库底高程 237.00 m, 回填高度约 120 m, 总填筑方量 $1\ 124 \times 10^4\ \text{m}^3$ 。开挖回填后, 采用“库岸沥青混凝土面板+库底土工膜”防渗。由于库盆采用土石混合料填筑, 水库蓄水后变形大, 局部基础不均匀沉降会对表面防渗体及连接结构产生不利影响^[1]。山东泰安抽水蓄能工

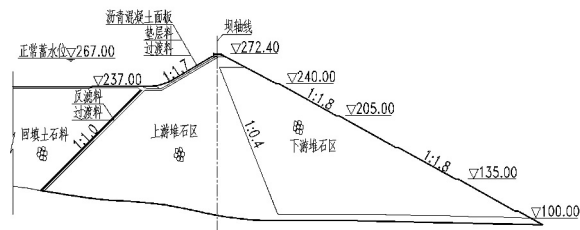


图 1 主坝分区典型断面(单位:m)

Fig. 1 Typical partitions of main dam

程曾设置混凝土连接板衔接大坝混凝土面板和库底土工膜, 采用机械固定结合化学粘结的双重防渗方式^[2](图 2(a))。然而当前研究工程的库盆填筑方量大、填筑高度约为泰安工程的 2 倍多, 若仍将连接接头置于回填体上, 蓄水后刚性混凝土连接板较难适应基础变形, 存在开裂风险。大坝三维有限元仿真计算表明^[3], 蓄水后连接板基础堆石体沉降达 32.9 cm。水库运行期堆石体承受库循环水荷载后, 将进一步加大局部不均匀沉降, 导致接头的可靠性存疑^[4]。此外, 因混凝土连接板刚度与沥青混凝土面板、土工膜的刚度相差数十倍, 会使连接板的连接部位出现应力集中。计算分析^[5]表明, 连接板两端最大拉应力达 4.38 MPa, 已超过混凝土抗拉强度。因此, 若依照现有经验进行防渗系统设计, 极有可能造成大坝面板与库

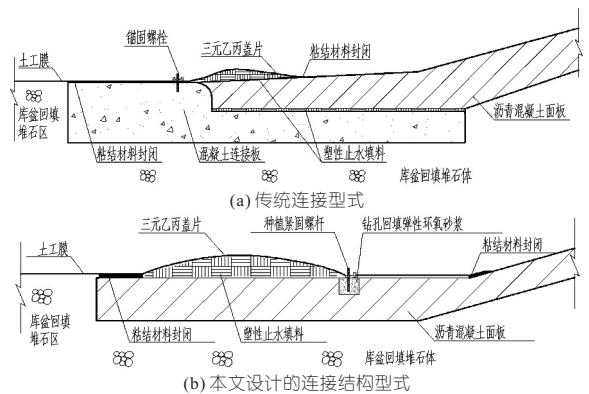


图 2 面板与土工膜的连接型式

Fig. 2 Connection type between face slab and geomembrance

收稿日期: 2022-08-15, 修回日期: 2022-11-01

作者简介: 王樱峻(1969-), 男, 正高级工程师, 研究方向为水电工程水工设计与咨询, E-mail: wang_yj1@hdec.com

底土工膜连接结构的渗漏和破坏。鉴此,结合本文工程特点,提出取消混凝土连接板,将沥青混凝土面板与土工膜直接连接的设计方案;沥青混凝土与土工膜均为柔性防渗体,在蓄水后可随基础变形而下沉,可提高变形协调性;由于沥青混凝土材料强度低,无法承受机械锚固力,提出在沥青混凝土面板上钻孔回填环氧砂浆并种植螺杆的方法,将土工膜与面板直接锚固(图 2(b));与传统连接型式(图 2(a))相比,所提方案可充分利用沥青混凝土的柔性变形特点和适应大变形能力,避免局部结构刚度差异过大引起的应力集中,改善沥青混凝土无法承受机械锚固力的不利条件,且对混凝土本体损伤小,施工简便,可操作性强;据此开展连接接头的强度试验和整体抗渗试验,深入研究其可靠性;分别设计了锚固螺杆在 5 种环境温度、4 种钻孔孔径和 2 种植植基材下的拉拔和抗扭试验及土工膜在大滑移变形情况下单道、双道锚固方案的抗渗试验,发现弹性环氧砂浆基材优于沥青混凝土基材,且存在最优钻孔孔径,在实际运行环境下温度对锚固区力学性能的影响不大;双道锚固方案可更好地保持填料的完整性,抗渗性能更优。

2 试验设计

2.1 研究内容

根据所提方案,拟定试验研究内容为:①锚固区力学性能试验。制作锚固区结构局部模型,在不同基材上种植螺杆测试抗拉拔和抗扭性能,研究回填环氧砂浆方案的技术可行性。设计不同钻孔孔径的螺杆种植方式,分析其对锚固效果的影响。考虑到施工期环境温度对沥青混凝土性能的影响,试验在不同的环境温度下进行。②防渗结构整体模型试验。制作防渗结构整体模型,研究水压力作用下土工膜受力发生滑移变形时,锚固结构整体的抗渗性能。特别考虑抽水蓄能电站库水位频繁升降的运行条件,探讨水压反复增减状态下锚固结构的安全性、进一步研究设置双道锚固措施必要性。

2.2 试验方案

2.2.1 锚固区强度试验

锚固区强度试验在规模为 $600\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高)的现浇沥青混凝土面板上进行。用混凝土取芯机分别钻取孔径为 100、80、70、60 mm 的圆柱形孔各 3 个进行平行试验。间孔取芯方案对面板损伤小。考虑到筒式

结构面板防渗层厚度为 100 mm,钻孔深度统一取 $h=100\text{ mm}$ 。经取芯造孔、风水清洗、自然晾干后,填充环氧砂浆,并在其中央埋种直径为 14 mm 螺杆做垂直定位。待环氧砂浆固化 5 d 后,用螺杆拉拔仪进行螺杆握裹力测试。试验过程见图 3。



图 3 锚固区强度试验过程

Fig. 3 Strength test of anchorage zone

作为对照,在另一块沥青混凝土面板上直接种植 14 mm 锚固螺杆,并用环氧胶泥封边处理,研究沥青混凝土本体和回填环氧砂浆两种不同种植基材对锚固结构力学性能的影响。考虑施工期沥青混凝土性能受环境温度的影响,将整体模型置于恒温水箱中,温度分别保持在 4、15、25、35、45 °C 条件下进行试验。

抗扭试验在沥青混凝土面板上钻取孔径为 80 mm、孔深 $h=100\text{ mm}$ 的 3 个钻孔,并回填环氧砂浆种植螺杆。对照组同样在沥青混凝土面板上直接种植直径 14 mm 的锚固螺杆。试验在 4、45 °C 的极端工作温度下进行,测试螺杆种植在沥青混凝土上和环氧砂浆上锚固螺栓所能承受的最大扭矩,并观察结构破坏形态。锚固区强度试验方案见表 1。

表 1 锚固区强度试验方案

Tab. 1 Scheme of strength test

试验内容	种植基材	钻孔孔径/mm	钻孔深度/cm	环境温度/°C
拉拔试验	环氧砂浆	60、70、80、100	10	4、15、25、35、45
	沥青混凝土		10	4、15、25、35、45
抗扭试验	环氧砂浆	80	10	4、45
	沥青混凝土		10	4、45

2.2.2 模型整体滑移抗渗试验

为优化钻孔工作量、减小对沥青混凝土面板整体性的影响,需确定间孔种植螺杆方案的锚孔数量和布置方式。需要说明的是,在春秋季节自然环境下,沥青混凝土面板摊铺后,经过一个月后面板平均温度在 40 °C 左右。因此,在进行整体抗渗模型试验时,考虑温度不利影响,采用面板 45 °C 时抗扭力矩加固螺栓。采用两种不同的锚固方案进行整体模型试验:①方案 1。单道锚固方案。在防渗结构连接接头部位,设置 SR 塑性材料鼓包,上覆三元乙丙盖片粘接封闭。左端与库底土工膜连成一体,右侧锚固在回填环氧砂浆上。单道锚固结构鼓包横跨范围大(约 300 mm),可较好地适应水压力作用下可能发生的大变形,见图

2(b)。②方案 2。双道锚固方案。相比方案 1, 在 SR 塑性止水鼓包左侧增设一道锚固螺栓, 其参数同方案 1, 两道锚孔排距 400 mm。土工膜左端与库底土工膜连成一体, 增加一道锚固后能更好地限制鼓包内塑性填料移动, 维持结构稳定性, 见图 4。

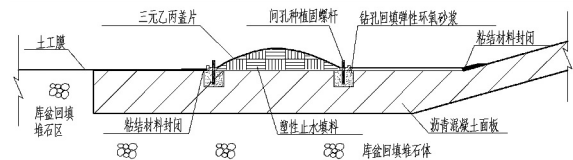


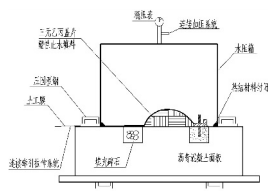
图 4 双道锚固方案示意图

Fig. 4 Schematic diagram of double-channel anchorage scheme

整体模型抗渗试验在规模为 1 000 mm×800 mm×200 mm(长×宽×高)的现浇沥青混凝土面板上进行, 见图 5(a)。根据强度试验确定钻孔孔径 80 mm, 孔深 $h=100$ mm, 孔距 500 mm, 排距 400 mm。土工膜左侧连接夹固牵引拉伸系统, 模拟土工膜受水压力发生拉伸滑移变形。右端采用夹固螺栓固定在面板上。将矩形水压桶置于模型之上, 安装加水加压系统, 对铁箱四周缝隙进行封闭处理。



(a) 抗渗试验装置



(b) 装置简图

图 5 整体模型抗渗试验

Fig. 5 Impermeability model test device

考虑到电站运行时库底回填区不均匀沉降加剧鼓包变形, 从而对结构稳定性产生不利影响, 在单道锚固方案的鼓包左侧 350 mm 处设置凹槽, 填充碎石子, 用以模拟实际工作环境。试验装置示意图见图 5(b)。

分两个阶段进行试验: ①第 1 阶段。为加载过程抗渗性能试验。通过加水加压系统对密封铁箱按 0.1 MPa→0.2 MPa→0.3 MPa→0.4 MPa 的方式逐级加压, 最终压力稍大于面板实际承受的水压力, 观察此过程中模型渗漏情况。②第 2 阶段。为滑移过程抗渗性能试验。保持压力一定, 通过左侧千斤顶施加外部牵引力, 拉动土工膜分别发生 20、40、60、80 mm 的滑移变形, 观察此过程系统的稳压性能及渗漏情况, 研究土工膜极限安全滑移距离。为探究循环加载下系统的抗渗性能, 在安全滑移距离下将体系稳压 20 h 无渗漏时的压力逐渐释放至 0, 再逐渐加载至目标压力值。重复此过程, 分析模型整体的稳压循环次数。

3 试验结果与分析

3.1 锚固区强度试验

3.1.1 不同孔径拉拔试验

表 2 为不同钻孔孔径的回填环氧砂浆种植螺杆拉拔试验结果(15℃), 图 6 为拉拔试验破坏现象。由表 2、图 6 可知, 回填环氧砂浆后螺杆平均拉拔力随锚固孔径的增大呈先增后减的规律。当孔径为 80 mm 时平均拉拔力最大, 为 39.92 kN。当孔径为 60 mm 时平均拉拔力仅为孔径 80 mm 时的 1/2。当孔径增至 100 mm 后, 拉拔力开始下降, 可能与钻孔取芯过程中对孔壁造成的损伤有关。不同孔径钻孔难度差别不大, 但 60~80 mm 孔径的钻孔芯样能用撬别法直接取出, 形成完整的螺杆种植孔, 而 100 mm 孔内芯样不能撬别取出, 须局部凿碎, 会对孔壁造成损伤。从方便施工的角度考虑, 钻孔孔径不宜过大。当孔径小于 70 mm 时, 锚固区破坏模式为面板碎裂; 当孔径大于等于 80 mm 时, 面板上形成较完整的破坏面, 此时回填环氧砂浆的拉拔芯样完整, 破坏面均断裂在沥青混凝土本体基材上, 说明环氧砂浆与沥青混凝土的粘结强度大于沥青混凝土本体强度。根据试验结果, 采用孔径 80 mm、孔深 $h=100$ mm 回填环氧砂浆在沥青混凝土上种植螺杆方案最优。

表 2 不同孔径环氧砂浆拉拔试验结果

Tab. 2 Results of pull-out elastic epoxy mortar test

孔径 /mm	测试拉拔力/kN	平均拉拔力/kN	破坏现象
60	22.04 16.60 21.20	19.95	沥青混凝土面板发生碎裂
70	28.50 22.02 26.77 25.76	25.76	沥青混凝土面板发生碎裂
80	38.40 41.10 40.25 39.92	39.92	面板上形成相对完整的环形破坏面
100	32.74 40.84 38.75 37.44	37.44	面板上形成完整的环形破坏面



图 6 不同孔径拉拔试验破坏现象

Fig. 6 Failure phenomenon of pull-out test

3.1.2 螺杆种植基材和温度的影响

测试螺杆种植在沥青混凝土和环氧砂浆上的拉拔力和扭力值, 并观察锚固部位沥青混凝土破坏情况, 见图 7。不同温度和种植基材锚固区强度试验结果见图 8(孔径 80 mm)。由图 7、8 可知, 无论采取何种锚固基材, 锚固螺杆的拉拔强度和抗扭强度整体上均表现为随种植基材的温度上升而降低, 但沥青混凝土基材的降低程度更大。锚固螺杆直接种植在沥青混凝土上时, 在温度从



(a) 沥青混凝土基材 (b) 环氧砂浆基材
图 7 不同基材抗扭试验(孔径 80 mm, 4 °C)

Fig. 7 Torsional test of different substrates
($\Phi=80\text{ mm}, 4\text{ }^{\circ}\text{C}$)

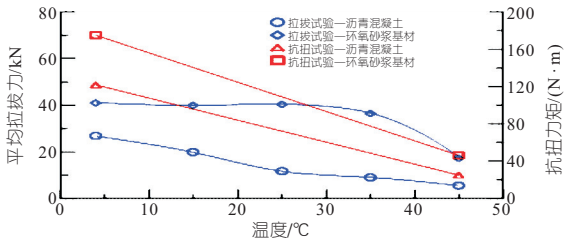


图 8 锚固区强度随温度的变化

Fig. 8 Strength of anchoring zone changing with temperatures

4 °C 升至 45 °C 时, 3 组平行试验的平均拉拔力从 26.71 kN 急剧降至 5.54 kN, 降幅 79.3%。拉拔破坏后, 螺杆上会附着部分沥青混凝土一同带出, 造成螺杆周边的沥青混凝土碎裂, 对面板本体造成破坏。锚固螺杆种植在回填环氧砂浆上时, 温度低于 35 °C 时平均拉拔力受温度变化影响不大, 最大拉拔力基本保持在 36 kN 以上; 当温度超过 35 °C 后, 抗拉拔力降至 17.33 kN, 与 4 °C 相比降幅为 57.7%。拉拔破坏时, 螺杆处的环氧砂浆发生轻微破损, 对面板本体未造成明显损伤。对于抗扭试验, 在相同温度条件下, 种植在环氧砂浆上的平均最大扭矩约为种植在沥青混凝土上的 1.44~1.84 倍。4、45 °C 时环氧砂浆基材的平均最大扭矩分别为 174.75、121.68 N·m, 而沥青混凝土基材的平均最大扭矩分别为 121.68、25.01 N·m。锚固结构位于面板底部与库底土工膜连接处, 低于水库死水位, 水温常年低于 10 °C。因此大坝运行期不会因温度变化对锚固区力学强度造成显著影响, 但需采取一定措施控制施工期面板温度, 避免因高温造成锚固结构性能衰退。根据试验结果, 锚固螺杆种植在环氧砂浆上的方式明显优于直接种植在沥青混凝土本体上。

3.2 模型整体滑移抗渗试验

根据锚固区抗扭强度试验结果, 模型整体抗渗试验采用沥青混凝土面板 45 °C 时 45 N·m 的扭矩加固螺栓。

(1) 方案 1。单道锚固方案。在试验第 1 阶段逐级加载至 0.4 MPa 的过程中, 整体能保持较好的稳压性能, 未发生渗漏现象。第 2 阶段土工膜发生滑移变形后, 当滑移距离小于 40 mm 时,

模型在 0.4 MPa 压力下能保持 20 h 以上的稳压时间; 当滑移距离达到 60 mm, 压力达到 0.3 MPa 时, 模型稳压 10 h 后开始发生轻微漏水情况; 当滑移距离达到 80 mm 时, 在压力由 0.2 MPa 升至 0.3 MPa 的过程中, 模型水箱四周防渗封边材料被水压击穿而发生大量渗漏。图 9 为试验前后 SR 塑性鼓包形态。由图 9 可知, 经过牵引拉伸并在水压下运行后的鼓包变得扁平, 其内部填料发生坍塌并向未做锚固的模型左侧流失。



图 9 鼓包形态试验前后对比

Fig. 9 Comparison of shapes of plastic bulge

(2) 方案 2。双道锚固方案。无论是试验第 1 阶段逐级增压过程, 还是第 2 阶段土工膜发生最大 80 mm 滑移过程, 系统均能较好地维持压力稳定 20 h 以上无渗漏发生。表明双道锚固方案能有效限制鼓包内填料变形, 更好地适应土工膜的滑移, 防渗性能更可靠。在单道锚固模型防渗体系经历循环的升降压过程中, 循环次数小于 15 次时在 0.4 MPa 水压作用下能稳压 20 h 以上且无渗漏发生。当循环次数达 18 次时, 由于加载水箱受到较大扰动, 水流从试验装置四周喷射而出, 系统失稳。但在面板背面锚固区未见渗水现象, 表明循环加压下单道锚固结构能起到良好的防渗作用。可推测若采用双道锚固方案, 结构稳压安全性将进一步增加。

根据试验结果, 对鼓包采用单道锚固, 依靠滑移层材料贴合和重物辅助压固, 填料会在土工膜滑移后发生坍塌流失, 防渗效果差。采用双道锚固方案, 可保证鼓包在沥青混凝土面板发生不均匀沉降和土工膜受到外力拉伸时的良好完整性, 从而保持防渗结构的整体稳定。

4 结论

a. 采用在沥青混凝土面板上钻孔回填环氧砂浆的锚固方法, 可较好地适应水库 0.4 MPa 水头下土工膜发生的滑移大变形, 具有成孔性好、防渗可靠、工序相对简便的特点。

b. 鉴于室内试验的局限性, 可在施工时待沥青混凝土面板摊铺完成后开展现场试验, 进一步验证室内试验结论、优化设计参数、检验方案可操作性, 保证工程安全运行。

- 型研究设计暴雨雨型对城市内涝的影响[J]. 中国农村水利水电, 2019(12):80-85.
- [2] 石赞赞, 万东辉, 陈黎, 等. 基于 GIS 和 SWMM 的城市暴雨内涝淹没模拟分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(6):57-60, 12.
- [3] DEJENE TESEMA BULTI, BIRHANU GIRMA ABEBE. A review of flood modeling methods for urban pluvial flood application [J]. Modeling earth systems and environment, 2020, 6(3):1293-1302.
- [4] 苏晓天, 杨翠巧, 栾清华, 等. 基于 MIKE URBAN 的典型北方城区防洪排涝模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(3):368-375.
- [5] 张旭, 李占斌, 张洋, 等. 基于 MIKE 耦合模型的绿化率对城市内涝影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(3):137-144.
- [6] 梁巧茵, 张明凯, 李帅杰. 基于 MIKE FLOOD 的深圳市机场排涝泵站工程设计及运行模拟[J]. 水电能源科学, 2021, 39(3):86-90.
- [7] 邵蕊, 邵薇薇, 苏鑫, 等. 基于 TELEMAC-2D 模型分析不同洪涝情景对城市应急响应时间的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 62(1):60-69.
- [8] 张旭. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的西咸新区沣西新城内涝模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.

Study of Waterlogging Simulation of University Campus Based on GIS-Mike Flood Coupling Model

YE Pei-cheng¹, GUO Shuai¹, CHEN Chuan-hui², HU Teng-yu²,
YUAN Wei³, CAO Guang-xue¹, XU Qiao¹

(1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China; 3. Hefei Surveying and Mapping Design Institute, Hefei 230001, China)

Abstract: Aiming at the problem of campus waterlogging in Hefei City, this paper constructs a 1D-2D coupled model based on Mike Flood. Firstly, GIS was used to obtain the distribution information of the five types of land surface in the study area by analyzing satellite images, and to automatically divide the catchment areas. Secondly, combined with the measured elevations by using the RTK device, the 3 m×3 m high-precision DEM data of the study area were obtained. A 1D pipeline model and a 2D surface model in the study area were constructed using Mike Urban and Mike 21 respectively, and the two models were coupled on Mike Flood. At the same time, a flowmeter, a liquid level meter and a rain gauge were installed in the campus. The model was calibrated by two measured rainfall events according to R^2 and E_{NSE} . Finally, the Chicago rainfall pattern was used to design rainfall scenarios for the 5, 10, 30 and 50 years of recurrence periods, and the severity, inundation range and inundation depth of nodes and pipelines in different rainfall processes were simulated. The simulation results show that main causes for the waterlogging in the campus are due to unreasonable sub-catchment designs, which resulted in limited absorption of rain peak runoff and serious overload of the pipe network.

Key words: urban waterlogging; Mike Flood; pipe network; flood range; inundation depth

(上接第 116 页)

参考文献:

- [1] 王樱峻, 赵琳, 雷显阳. 某抽水蓄能电站高面板堆石坝坝体分区优化[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(5):47-52.
- [2] 李岳军, 吴毅瑾, 何世海, 等. 抽水蓄能电站水库土工膜防渗技术的研究和应用[J]. 水力发电, 2006(3):67-69.
- [3] 浙江省抽水蓄能工程技术中心. 句容抽水蓄能电站库盆及地下厂房三维渗流场分析报告[R]. 杭州: 浙江省抽水蓄能工程技术中心, 2014.
- [4] 张博, 朱晟. “蓄水一泄水”循环荷载作用下高面板堆石坝的稳定性分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(11):81-83, 80.
- [5] 王樱峻, 雷显阳, 姜晓桢, 等. 基于子模型法的某抽水蓄能电站库盆土工膜锚固处局部适应性研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(10):131-134.

Experimental Study on Anti-seepage Connection Structure of Asphalt Concrete Slab and Geomembrane

WANG Ying-jun^{1,2}, NING Zhi-yuan^{1,2}, YE Qian¹

(1. Power China Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, China;

2. Zhejiang Pumped Storage Engineering Technology Research Center, Hangzhou 311122, China)

Abstract: A new anti-seepage structure between the asphalt concrete slab and geomembrane is proposed, which eliminates the concrete connecting plate and adopts backfilling elastomeric epoxy mortar into drilling holes. The mechanical and impervious properties, as well as anchoring parameters of the connecting joints in the anchorage area, are experimentally studied. It is found that the torsional and anti-pulling performance of the proposed anchoring approach is reliable. The suggested double-channel anchoring approach is more compatible with the large deformation of the geomembrane under a pressure of 0.4MPa. According to the results, optimal drilling parameters are proposed, which have the features of good porosity, reliable impermeability and less impact on the asphalt slab, providing a reference for engineering design.

Key words: asphalt concrete slab; geomembrane; anchoring; elastomeric epoxy mortar; impermeability test