

花岗岩骨料水工沥青混凝土面板关键性能研究

陈晨¹, 王亚萍¹, 焦凯¹, 李昇², 张锦涛¹

(1. 中国水利水电第三工程局有限公司, 陕西 西安 710024; 2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为推广酸性骨料在水工沥青混凝土面板中的应用,研究了不同酸性骨料与沥青黏附性增加方案对沥青混凝土面板关键性能的影响,利用变异系数 TOPSIS 法综合评价酸性骨料与沥青最优增黏方案。结果表明:5种增黏方案均不同程度地提高了花岗岩骨料沥青混凝土的抗水损性能,水稳定系数、斜坡流淌值均满足规范限值;分析水损害对沥青混凝土各项性能的影响,抗压强度对水损害的敏感性最低,弯拉应变、斜坡流淌值敏感性最高。变异系数 TOPSIS 法综合评价结果为石灰岩沥青混凝土综合性能最优;添加抗剥落剂可使花岗岩骨料沥青混凝土的抗水损性提高 18%~25%,其增加骨料与沥青之间黏附性的效果最优,但添加非胺类抗剥落剂的沥青混凝土变形较大,后续研究酸性骨料在沥青混凝土面板中的应用时,应重点关注其变形性能。

关键词: 水工沥青混凝土; 面板; 酸性骨料; 增黏措施; 变异系数 TOPSIS 法

中图分类号:TV42; TV431+.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)02-0149-08

Key properties of hydraulic granite asphalt concrete panels

CHEN Chen¹, WANG Yaping¹, JIAO Kai¹, LI Sheng², ZHANG Jintao¹

(1. Sinohydro Bureau 3rd Co., Ltd., Xi'an 710024, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: To promote the application of acid aggregates in hydraulic asphalt concrete panels, the effects of different acid aggregates and asphalt viscosity enhancement schemes on the key properties of asphalt concrete panels were studied, and the optimal acid aggregate and asphalt viscosity enhancement scheme were evaluated comprehensively using the variation coefficient TOPSIS method. The results showed that all five different viscosity enhancement schemes improved the water damage resistance of the granite asphalt concrete to different degrees, and the water stability coefficient and slope flow value all met the specification limits. According to the analysis of the effect of water damage on various properties of asphalt concrete, the compressive strength was the least sensitive to water damage, whereas the flexural strain and slope flow value were the most sensitive. Variation coefficient TOPSIS comprehensive evaluation results showed that limestone asphalt concrete had the optimal comprehensive performance; the addition of anti-spalling agent could increase the resistance of granite asphalt concrete to water damage by 18%~25% which was optimal for increasing the adhesion between the aggregate and the asphalt, but non-amine anti-spalling agent could lead to a larger deformation of the asphalt concrete. Therefore, the subsequent study of the application of acid aggregates in asphalt concrete panels should focus on its deformation performance.

Key words: hydraulic asphalt concrete; panel; acid aggregate; viscosity enhancement measure; variation coefficient TOPSIS method

收稿日期:2022-08-29; 修回日期:2023-02-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51922088,52179143); 陕西省科技创新团队项目(2022TD-01)

作者简介:陈晨(1985—),女,陕西西安人,硕士,高级工程师,研究方向为高性能水工沥青混凝土。

通讯作者:王亚萍(1993—),女,陕西咸阳人,硕士,工程师,研究方向为高性能水工沥青混凝土。

1 研究背景

在“双碳”战略目标驱动下,抽水蓄能电站建设迎来了发展高峰。沥青混凝土由于其优异的防渗性、适应变形能力、自愈能力及易施工性,在抽水蓄能水库设计中作为防渗面板广受青睐^[1]。但因沥青混凝土受碱性骨料需求和工程区域岩性不匹配的限制,使其在部分区域抽水蓄能电站库盆面板中的应用受到了制约,不利于抽水蓄能电站的快速发展,因此研究酸性骨料在沥青混凝土中的应用具有重要的科学和实用价值。

路面工程沥青混凝土中采用酸性碎石并添加抗剥落剂等增黏措施已相对普遍^[2-7]。水工沥青混凝土中沥青心墙建设也已积累了不少采用酸性砂砾石料的成功经验。最先在沥青混凝土中使用酸性碎石料的是北欧几个国家^[8],我国已运行 40 多年的党河水库砂砾坝沥青混凝土心墙也采用了酸性砂砾石料。研究学者分别从填料选择、配合比试验、骨料选择等方面对砂砾石骨料沥青混凝土性能进行分析。一些学者以砾石为骨料,以水泥为填料制备了砾石骨料沥青混凝土,并研究了其水稳定性,结果表明,以水泥作为填料可以提高骨料与沥青之间的黏附性,能够改善沥青混凝土的水稳定性^[9-14]。部分学者对沥青混凝土采用酸性砂砾石骨料进行了配合比试验研究,结果表明,酸性砂砾骨料沥青混凝土级配指数为 0.33~0.40、填料用量为 10%~14%、沥青用量为 8%~9% 时,沥青混凝土各项性能均满足要求^[15-18]。杨耀辉等^[19]分别制备了以破碎天然砾石和破碎大理岩为骨料的沥青混凝土,通过试验表明,以破碎天然砾石骨料和水泥填料配制的沥青混凝土性能好于破碎大理岩骨料配制的沥青混凝土;刘亮等^[20]分别以石灰岩、天然河砂为粗骨料,以石灰石破碎的人工砂、天然河砂为细骨料,以石灰石粉、水泥为填料制备了两种沥青混凝土,性能测试结果表明,天然砾石骨料抵抗变形能力强于人工破碎岩石骨料,而两者力学性能相近;全卫超等^[21]分别以天然砾石和破碎砾石为粗骨料,以天然河砂为细骨料制备沥青混凝土,性能测试结果表明,沥青混凝土用天然砾石作为骨料满足规范要求。在碱性岩石储量少但拥有丰富砾石骨料的新疆地区,近期建设了一大批采用酸性砾石料的沥青混凝土心墙坝^[22-25]。由于沥青混凝土面板防渗层直接与水体长期接触,至今尚未有工程采用酸性骨料。基于此,汪正兴^[26]从骨料与沥青的黏附性及沥青混凝土的长期水稳定

性两方面研究了水工沥青混凝土的水损害问题,提出了表面能理论可定量评价骨料与沥青的黏附性,抗压强度对水损害的敏感性最低。高博^[27]在提高沥青与酸性骨料黏附性措施的基础上,研究了水损害对水工沥青混凝土斜坡稳定性的影响,提出随着温度升高和浸泡时间的加长,斜坡流淌值呈对数形式增大。目前,通过对于酸性骨料沥青混凝土的研究已得到大量改善沥青与酸性骨料黏附性的材料及配合比,为酸性骨料在沥青混凝土中的应用发挥了重要作用。但现有文献中多为对酸性骨料沥青混凝土水稳定性的研究,而关于其他关键性能的研究较少,且多是针对在道路和心墙中应用,对面板工程中应用研究较少。

针对上述问题,本文从实用性角度考虑,将花岗岩骨料与石灰岩骨料以不同比例、不同形式混合,采用碱性填料水泥、消石灰,添加抗剥落剂以增加沥青与花岗岩骨料的黏附性,制备沥青混凝土,开展水损害对其各项性能影响的研究,并结合变异系数 TOPSIS 法综合比选各项性能最优的增黏措施,为推广酸性骨料沥青混凝土面板在抽水蓄能电站中的应用奠定基础。

2 材料与研究方法

2.1 试验材料

沥青:克拉玛依 90[#] 沥青;骨料:花岗岩酸性骨料、石灰岩碱性骨料;填料:水泥、消石灰、石灰石粉,其相关技术指标均满足《水工碾压式沥青混凝土施工规范》(DL/T 5363—2016)^[28];抗剥落剂:TJ-066 型非胺类抗剥落剂。

2.2 试验方案

试验采用之前研究获得的水工沥青混凝土面板防渗层最优配比,即级配指数 r 为 0.39、填料含量 F 为 12%、油石比 B 为 7.0%。配合比的矿料级配采用丁朴荣公式计算,见表 1,各级骨料采用单档筛分。设置石灰岩碱性骨料基准组,将石灰岩与花岗岩以不同比例和不同形式混合;填料采用水泥、消石灰、石灰岩;添加抗剥落剂以增强花岗岩骨料与沥青的黏附性,具体试验方案如表 2 所示。按照表 2 中方案对水损害后每组的水稳定性、小梁弯、斜坡等沥青混凝土面板性能进行试验研究,综合各项性能比选最优增黏措施。

2.3 测试方法

水稳定性测试按照《水工沥青混凝土试验规程》(DL/T 5362—2018)^[29]中的试验方法进行。水

表 1 水工沥青混凝土配合比的矿料级配

筛孔尺寸/mm	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	<0.075
总通过率/%	100.0	87.8	66.6	50.4	38.1	28.9	21.7	16.2	12

表 2 水工沥青混凝土性能试验方案

组次	粗集料	细集料	填料	TJ-066 抗剥落剂
1	石灰岩	石灰岩	石灰岩矿粉	无
2	花岗岩	花岗岩	石灰岩矿粉	无
3	花岗岩 50%+ 石灰岩 50%	花岗岩 50%+ 石灰岩 50%	石灰岩矿粉	无
4	花岗岩	石灰岩	石灰岩矿粉	无
5	花岗岩	花岗岩	石灰岩矿粉	0.4%
6	花岗岩	花岗岩	消石灰	无
7	花岗岩	花岗岩	水泥	无

稳定性、小梁弯、斜坡流淌试验均成型 2 组试件,每组各 3 个试件,第 1 组试件放置在 20 ℃ 的空气中不少于 48 h;第 2 组试件置于 60 ℃ 水中浸泡 48 h,然后在 20 ℃ 水中恒温放置 2 h,之后分别对各组试件进行水稳定性、小梁弯、斜坡流淌试验,各试件及试验方法参见图 1。

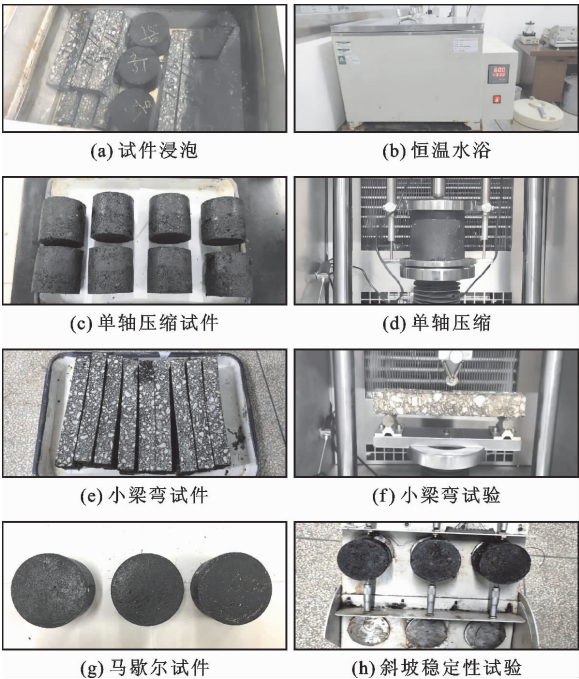


图 1 各试件及试验方法

3 结果与分析

3.1 沥青混凝土关键性能试验结果分析

按照上文所述的配合比和试验方案进行沥青混

凝土性能试验,试件密度在 2.4 ~ 2.5 g/cm³ 之间,试件孔隙率在 1.5% ~ 2.0% 之间,小于 3%,满足规范要求。

3.1.1 水稳定性试验结果分析 各试验组次沥青混凝土水稳定性试验结果见图 2。

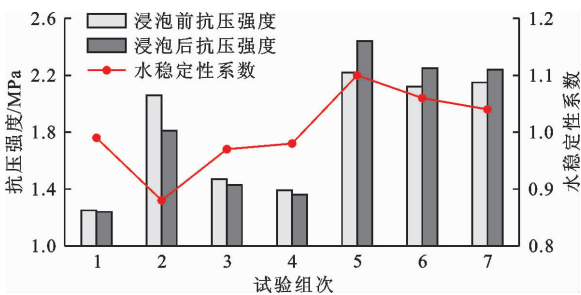


图 2 各试验组次沥青混凝土水稳定性试验结果

由图 2 可见,石灰岩骨料沥青混凝土的抗压强度较花岗岩骨料低,这主要是因为花岗岩骨料自身硬度较石灰岩高;石灰岩骨料与花岗岩骨料按 1: 1 的比例混合,则强度值介于花岗岩骨料与石灰岩骨料沥青混凝土之间,与粗骨料采用花岗岩、细骨料采用石灰岩的试验组次 4 相比,其抗压强度差异不大;由水稳定系数可以看出,花岗岩骨料与石灰岩骨料混合与沥青的黏附性高于纯花岗岩、低于纯石灰岩,但其抗压强度高于石灰岩骨料沥青混凝土,低于花岗岩混凝土,由此分析前 4 组沥青混凝土抗压强度主要受骨料影响。第 5 组 ~ 7 组通过添加抗剥落剂或用水泥、消石灰替代石灰岩矿粉改善花岗岩与沥青的黏附性,与第 2 组进行对比可知,改善骨料与沥青之间的黏附性可显著提高沥青混凝土的抗压强度,其中添加抗剥落剂的强度最高,水稳定系数最大,由此可知沥青混凝土采用的骨料相同时,黏附性是影响其抗压强度的主要因素。

各组的水稳定系数在 0.88 ~ 1.10 之间,均大于 0.85,满足规范要求。花岗岩与石灰岩骨料混合,对花岗岩与沥青的黏附性略有改善;第 5、6、7 组分别添加抗剥落剂、用消石灰替代矿粉、用水泥替代矿粉,对花岗岩骨料沥青混凝土的水稳定性改善较为显著,添加 0.4% 抗剥落剂的沥青混凝土水稳定性比不添加抗剥落剂可提高 25%。

3.1.2 小梁弯试验结果分析 各试验组次沥青混凝土小梁弯试验结果见图 3。

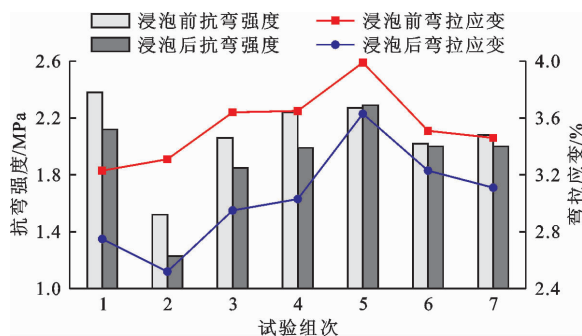


图3 各试验组次沥青混凝土小梁弯试验结果

由图3可见,石灰岩沥青混凝土抗弯强度明显高于花岗岩,弯拉应变最小,花岗岩骨料沥青混凝土的弯拉强度最低,这主要是因为花岗岩与沥青的黏附性差,自由沥青含量多于石灰岩骨料沥青混凝土,其易于从骨料与沥青的界面处破坏,同时变形比石灰岩大。骨料与沥青之间增加黏附性措施后,沥青混凝土的抗弯强度均有提高,其中添加抗剥落剂沥青混凝土的抗弯强度和弯拉应变最大,而填料选用水泥、消石灰两组弯拉应变相对较小,这主要是因为添加非胺类抗剥落剂改变了沥青性质,使沥青的延度增加导致变形增大,因此其变形能力增强,塑性增大,故其弯拉应变最大;水泥、消石灰与沥青中酸性物质发生化学反应,增加了黏性,导致花岗岩骨料与沥青有更好的裹附效果,减少了自由沥青含量,因此其变形减小。

3.1.3 斜坡流淌试验结果分析 各试验组次沥青混凝土斜坡流淌试验结果见图4。

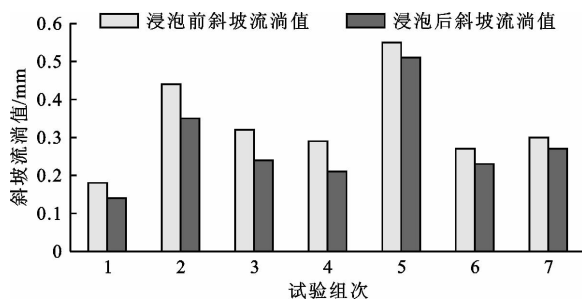


图4 各试验组次沥青混凝土斜坡流淌试验结果

由图4可见,各试验组次的斜坡流淌值试验结果均小于0.8 mm,满足规范要求。添加抗剥落剂沥青混凝土的斜坡流淌值最大,花岗岩次之,石灰岩的斜坡流淌值最小。这主要是因为添加非胺类抗剥落剂增加了沥青的黏性,使其软化点略有降低,导致沥青混凝土温敏性增加,在高温环境下沥青发生软化、流淌,因此其斜坡流淌值最大^[27];花岗岩酸性骨料与沥青黏附性差,在高温作用下,易发生变形。其他

两种增黏措施的斜坡流淌值差异较小。

3.2 沥青混凝土关键性能的水损害敏感性分析

按表2中的试验方案,仿照水稳定试验,进行水损害对沥青混凝土弯拉性能、斜坡稳定性能的影响研究,分别用经水中浸泡后试件的小梁弯和斜坡试验结果与空气中放置试件的相应试验结果之比作为抗弯强度系数、弯拉应变系数、斜坡流淌系数,以这些系数来评价水损害对沥青混凝土弯拉性能及斜坡稳定性的影响,试验结果见图5。

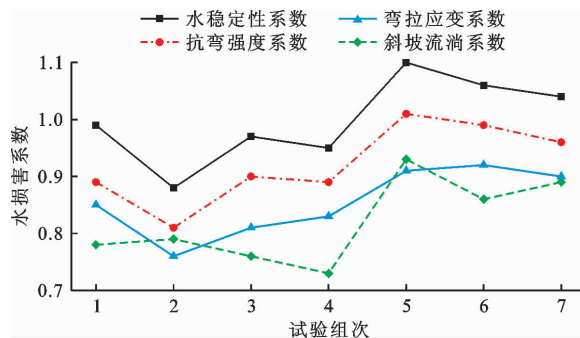


图5 各试验组次沥青混凝土水损害系数

由图5可见,7个试验组次中纯花岗岩骨料沥青混凝土的水稳定性、抗弯强度、弯拉应变受水损害影响最大,花岗岩与石灰岩混合骨料沥青混凝土的各项性能均优于纯花岗岩骨料沥青混凝土,但较纯石灰岩沥青混凝土差;添加抗剥落剂组次的各项性能最优,各项性能的抗水损能力较不添加抗剥落剂的花岗岩骨料沥青混凝土提高了18%~25%;其次为消石灰、水泥替代石灰石矿粉的组次,花岗岩骨料沥青混凝土采用消石灰、水泥替代矿粉其抗水损性优于石灰岩骨料沥青混凝土。

沥青混凝土试件浸泡前后的强度、变形值损失的大小反映了水损害对该项性能影响的大小,其损失值越大,表明水损害对该项性能越敏感。从图5中可看出,水损害对沥青混凝土的水稳定性最不敏感,对弯拉应变及斜坡流淌值等涉及变形的指标影响较大,敏感性较强。这主要是因为试件强度除了受骨料与沥青黏附性的影响外,还受骨料自身强度的影响,而变形主要受骨料与沥青黏附性的影响。后续对酸性骨料沥青混凝土在水工面板中的应用研究中,应重点关注沥青混凝土的变形和斜坡稳定性。

3.3 沥青混凝土性能综合评价

在上述试验结果分析中存在多项性能对增黏措施优劣的评价,而各项性能对结果的评价指向又存在差异。因此需要对试验各项性能所占权重进行分析,利用权重计算优选综合性能最优的方案。本试

验的目的是对酸性骨料沥青混凝土采用增黏措施后的水稳定性、抗弯、变形、斜坡稳定性等多项性能进行综合评价,选出酸性骨料最优的增黏措施。

变异系数法是根据统计学方法计算系统各指标变化程度的方法,该方法是一种客观赋权法^[30],以变化程度反映指标的重要性,变化差异大,则指标权重重大,变化差异小,则指标权重小。TOPSIS法(technique for order preference by similarity to an ideal solution)的计算原理一般是根据任意有限个评价对象与理想化评价目标间的最接近程度来进行解排序,是研究多变量属性评价决策方法问题求解中常用到的一种基本方法,也称为逼近理想解排序法^[31]。将变异系数法与TOPSIS法相结合得到变异系数TOPSIS法,可用于定量分析综合方案的优劣。

本文选用变异系数TOPSIS法计算沥青混凝土性的水稳定性系数、抗弯强度、弯拉应变、斜坡流淌值4个指标权重,综合评价各增黏措施。

3.3.1 变异系数TOPSIS法计算步骤

步骤1:首先建立相关指标的评价矩阵。假设有 m 个待评价样本, n 项评价指标,建立原始评价指标数据矩阵如下:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: y_{ij} 为第 i 个样本的第 j 项评价指标, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。

步骤2:对各指标进行同向化和去量纲化处理。对于一个评价指标矩阵 Y ,如果评价指标中包含负向化指标,即其值越小表示其实际性能越好,则要求对这些指标先进行同向化处理,转化为正向指标,然后再进行去量纲化处理,处理后得到标准矩阵 Y' 。

步骤3:指标权重计算。将指标处理得到标准矩阵 Y' ,并根据公式(2)和(3)分别计算出指标平均值 $\bar{y}_j$ 和标准差 s_j :

$$\bar{y}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y'_{ij} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y'_{ij} - \bar{y}_j)^2} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

各项指标的变异系数 v_j 可用公式(4)表示为:

$$v_j = \frac{s_j}{\bar{y}_j} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

利用变异系数计算各项指标的权重 w_j ,可用公式(5)表示为:

$$w_j = \frac{v_j}{\sum_{j=1}^n v_j} \quad (5)$$

步骤4:采用TOPSIS法进行综合评价。确定权重后采用TOPSIS法对评价对象进行综合评价。先确定所有样本参考点,计算各评价组与参考点之间的距离,各组综合性能与最优点的距离呈负相关。

利用变异系数法确定出的权重对标准矩阵进行修正可以确定加权数据矩阵 Y'' ,可用公式(6)表示:

$$Y'' = (w_j y'_{ij})_{m \times n} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

指标正向化后,所有样本中各指标的最大值构成一组正理想解 Y''^+ ,各指标的最小值构成一组负理想解 Y''^- 。以 d_i^+ 、 d_i^- 分别表示样本点到最优点、最劣点的距离,可用公式(7)、(8)计算如下:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y''_{ij} - y_j^+)^2} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y''_{ij} - y_j^-)^2} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

式中: y_j^+ 和 y_j^- 分别为正、负理想解中第 j 列元素。

因此相对接近度 D_i 可用公式(9)表示为:

$$D_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (9)$$

D_i 值越大表明评价对象的评价结果越优,可以根据 D_i 的优劣次序对各评价对象进行排序。

3.3.2 评价与结果优选 根据上述步骤建立评价矩阵,本文所选沥青混凝土性能评价指标有水稳定性系数、抗弯强度、弯拉应变、斜坡流淌值,共4个。设第 i 组沥青混凝土评价指标向量为 $Y_i = [y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}, y_{i4}]$,其中 y_{i1} 为水稳定系数, y_{i2} 为抗弯强度; y_{i3} 为弯拉应变, y_{i4} 为斜坡流淌值。本文设计试验方案中有7组不同的沥青混凝土,则评价矩阵表示为 $Y = [Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7]^T$,则各组沥青混凝土评价指标权重为 $w = [w_1, w_2, w_3, w_4]$ 。

对评价矩阵进行同向化、去量纲化处理,得到标准矩阵 Y' 如下:

$$Y' = \begin{bmatrix} 0.3723 & 0.4289 & 0.3440 & 0.4408 \\ 0.3309 & 0.2739 & 0.3525 & 0.3356 \\ 0.3648 & 0.3712 & 0.3876 & 0.3772 \\ 0.3685 & 0.4036 & 0.3887 & 0.3049 \\ 0.4137 & 0.4091 & 0.4249 & 0.3892 \\ 0.3896 & 0.3640 & 0.3738 & 0.3976 \\ 0.3911 & 0.3748 & 0.3685 & 0.3851 \end{bmatrix}$$

根据变异系数法计算得到各指标的权重见表3。

表3 沥青混凝土所选各性能评价指标权重计算表

指标	平均值 $\bar{y}_j$	标准差 s_j	变异系数 v_j	权重 w_j
水稳定性系数	0.3771	0.0270	0.0716	0.1817
抗弯强度	0.3751	0.0504	0.1344	0.3409
弯拉应变	0.3771	0.0268	0.0711	0.1805
斜坡流淌值	0.3758	0.0440	0.1171	0.2970

从表3可以看出,各指标权重大小的排序为抗弯强度>斜坡流淌值>水稳定系数>弯拉应变。

根据各指标权重,结合公式(6)得到加权数据矩阵 Y'' 如下:

$$Y'' = \begin{bmatrix} 0.0676 & 0.1462 & 0.0621 & 0.1309 \\ 0.0601 & 0.0934 & 0.0636 & 0.0997 \\ 0.0663 & 0.1265 & 0.0700 & 0.1120 \\ 0.0669 & 0.1376 & 0.0702 & 0.0905 \\ 0.0751 & 0.1394 & 0.0767 & 0.1156 \\ 0.0724 & 0.1241 & 0.0675 & 0.1181 \\ 0.0710 & 0.1278 & 0.0665 & 0.1144 \end{bmatrix}$$

相应计算得出理想解 Y''^+ 和负理想解 Y''^- :

$$Y''^+ = (0.0751 \quad 0.1462 \quad 0.0767 \quad 0.1309)$$

$$Y''^- = (0.0601 \quad 0.0934 \quad 0.0621 \quad 0.0905)$$

再计算得出 d_i^+ 和 d_i^- :

$$d_i^+ = (0.0164 \quad 0.0645 \quad 0.0295 \quad 0.0426 \quad 0.0167 \quad 0.0273 \quad 0.0271)$$

$$d_i^- = (0.0669 \quad 0.0093 \quad 0.0408 \quad 0.0455 \quad 0.0565 \quad 0.0434 \quad 0.0435)$$

最后计算得出相对接近度 D_i , 根据 D_i 的优劣次序评价7组不同沥青混凝土的综合性能, 评价结果见表4。

表4中的评价结果表明, TOPSIS法综合评价排序中第1组石灰岩沥青混凝土的综合性能最优, 其次为花岗岩添加抗剥落剂沥青混凝土, 第2组花岗岩沥青混凝土的综合性能最差。因而0.4% TJ-066型抗剥落剂的掺加较其他增加骨料与沥青黏附性措施的效果更优。

表4 设计试验方案7组不同沥青混凝土综合性能评价结果

组数	D_i	排序
1	0.803	1
2	0.126	7
3	0.580	5
4	0.516	6
5	0.771	2
6	0.614	4
7	0.616	3

4 讨论

由于酸性骨料与沥青之间的黏附性较差, 导致以酸性骨料制备的沥青混凝土抗剥落性差, 其性能不及碱性骨料沥青混凝土, 因此难以应用于水工面板工程中。当工程选址附近无碱性岩石或运输距离较远时, 沥青混凝土的应用就会受到限制。目前, 国内外学者对酸性骨料在沥青混凝土中的应用进行了大量研究, 通过添加抗剥落剂等手段增强酸性骨料与沥青之间的黏附性, 进而研究酸性骨料沥青混凝土的水稳定性, 但对其抗弯强度、弯拉应变、斜坡流淌值等性能研究较少。

针对以上问题, 本文对不同骨料沥青混凝土的水稳定性、抗弯强度、弯拉应变、斜坡流淌值进行了试验及理论研究。本研究得出的添加抗剥落剂花岗岩骨料沥青混凝土的水稳定性试验结果与文献[26]中的结论基本一致, 在抗剥落剂的作用下, 花岗岩骨料与沥青之间的黏附性增强, 使得花岗岩骨料沥青混凝土的水稳定系数显著提升; 小梁弯试验结果与文献[32]的结论基本一致, 添加抗剥落剂的试件抗弯强度大于无抗剥落剂试件; 斜坡流淌试验结果与文献[27]结论基本一致, 添加抗剥落剂试件的斜坡流淌值大于无抗剥落剂试件, 主要因为抗剥落剂提高了沥青的黏度, 降低了沥青的软化点, 导致沥青软化、流淌, 因此斜坡稳定性下降。本研究通过变异系数 TOPSIS 法对沥青混凝土的水稳定系数、抗弯强度、弯拉应变和斜坡流淌值4种主要性能进行综合评价分析, 最终得出不同性能指标权重大小的排序依次为抗弯强度>斜坡流淌值>水稳定系数>弯拉应变, 添加抗剥落剂花岗岩骨料沥青混凝土的综合性能排序为第2, 仅次于石灰岩骨料沥青混凝土, 而未添加抗剥落剂的花岗岩骨料沥青混凝土排名第7, 可见抗剥落剂对花岗岩骨料沥青混凝土的综合性能影响很大。

本研究较为全面地考虑了沥青混凝土的各项重要性能, 通过对不同骨料沥青混凝土、相同骨料不同填料沥青混凝土及相同骨料是否添加抗剥落剂沥青混凝土进行对比研究, 分析其水稳定性、抗弯强度、弯拉应变和斜坡流淌值, 找到花岗岩骨料沥青混凝土综合性能最优组分的增黏措施, 对推广酸性骨料沥青混凝土面板在抽水蓄能电站中的应用具有重要意义和实用价值。

5 结论

本文对花岗岩酸性骨料在水工面板中的适用性

进行研究,通过将其与石灰岩骨料以不同比例和不同形式混合、利用水泥和消石灰等碱性填料替代矿粉、添加抗剥落剂等增黏措施,研究增黏措施及水损害对水工面板沥青混凝土关键性能的影响,得出以下结论:

(1)水工面板沥青混凝土抗压强度主要受骨料自身强度及骨料与沥青之间黏附性的影响,采用的5种增加花岗岩骨料与沥青黏附性措施可不同程度地改善纯花岗岩骨料沥青混凝土的水稳定性及抗弯、抗压性能。各试验组次沥青混凝土的水稳定系数在0.88~1.10之间,斜坡流淌值均小于0.8 mm,二者均满足规范要求。添加抗剥落剂的沥青混凝土变形大于填料为消石灰、水泥以及花岗岩与石灰岩混合骨料的沥青混凝土。

(2)将变异系数法与TOPSIS法相结合,评价花岗岩骨料与沥青的不同增黏措施对沥青混凝土性能的影响,各指标权重大小依次为抗弯强度>斜坡流淌值>水稳定系数>弯拉应变。经过综合评价得出:石灰骨料沥青混凝土综合性能最优,花岗岩骨料添加抗剥落剂沥青混凝土次之,纯花岗岩骨料沥青混凝土最差,添加0.4% TJ-066型抗剥落剂较其他增加骨料与沥青黏附性措施的效果更优。

(3)添加抗剥落剂可使花岗岩骨料沥青混凝土的抗水损性能提高18%~25%,其效果最优;水泥和消石灰替代矿粉可使花岗岩抗水损性优于石灰岩骨料沥青混凝土,花岗岩骨料与石灰岩骨料混合沥青混凝土抗水损性低于石灰岩骨料沥青混凝土。沥青混凝土的抗压强度对水损害的敏感性最低,而斜坡流淌值和弯拉变形对水损害的敏感性最高,后续对酸性骨料沥青混凝土在水工面板中的应用研究中,应重点关注其变形和斜坡稳定性。

参考文献:

- [1] 王国华.海水侵蚀对水工沥青混凝土力学性能影响的试验研究[D].西安:西安理工大学,2021.
- [2] 邓冲,罗蓉,陈烜捷,等.基于表面能理论的沥青混凝土抗剥落剂最佳掺量研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2016,40(2):326-330.
- [3] 王富强,阳利君,莫品疆.提高花岗岩沥青混合料水稳定性试验研究[J].公路,2020,65(11):328-330.
- [4] NAZIRIZAD M, KAVUSSI A, ABDI A. Evaluation of the effects of anti-stripping agents on the performance of asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2015, 84: 348-353.
- [5] 王伟,罗蓉,蒋兵,等.酸性安山岩集料黏附性能改善研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021,45(6):1158-1162.
- [6] 丁才.抗剥落剂对沥青及花岗岩沥青混合料性能影响研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.
- [7] 吴登睿.水泥与胺类抗剥落剂协同作用对沥青路面路用性能的影响研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
- [8] HOEC K. Asphaltic concrete cores for embankment dams [M]. Norway: Stikka Press, 1993.
- [9] 马军,柳莹,何建新.天然砾石沥青混凝土心墙水稳定性技术研究[J].水利规划与设计,2021(2):110-114.
- [10] 杨耀辉,宋建鹏,何建新,等.沥青混凝土水稳定性影响因素分析[J].新疆农业大学学报,2016,39(6):495-499.
- [11] 郭寅川,魏自玉,申爱琴,等.砾石沥青混合料水稳定性复合改善技术研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(12):41-48.
- [12] 何建新,杨武,杨耀辉,等.水泥填料对心墙沥青混凝土长期水稳定性的影响[J].水利水电科技进展,2017, 37(4):59-62.
- [13] 王文政.天然砾石骨料在沥青混凝土心墙中的适用性研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2014.
- [14] 游光明,何建新,杨海华.延长浸水时间对心墙沥青混凝土水稳定性影响分析[J].粉煤灰综合利用,2016 (3):11-13.
- [15] 李瑞.西北高寒区浇筑式沥青混凝土心墙配合比优选试验[J].吉林水利,2019(6):23-26.
- [16] 张庆春.努尔加水库碾压式土石坝沥青混凝土心墙酸性砂砾石料的配合比试验研究[J].水资源与水工程学报,2014,25(4):215-220.
- [17] 郭鹏飞,何建新,刘亮,等.采用天然砾石骨料的浇筑式沥青混凝土配合比设计及性能研究[J].水资源与水工程学报,2012,23(3):148-150.
- [18] 闫小虎,姚新华,王晓军,等.土石坝沥青混凝土心墙材料配合比试验研究[J].长江科学院院报,2017, 34 (6):143-148.
- [19] 杨耀辉,蔡宝柱,何建新.天然砾石与大理岩矿料对沥青混凝土性能的影响[J].新疆农业大学学报,2017,40 (3):229-234.
- [20] 刘亮,杨海华,朱西超.天然砾石骨料对心墙沥青混凝土力学性能影响分析[J].水资源与水工程学报,2016, 27(4):194-198.
- [21] 全卫超,何建新,王怀义.砾石骨料破碎对心墙沥青混凝土的性能影响分析[J].水资源与水工程学报,2016, 27(1):175-179.
- [22] 李泽鹏,何建新.土石坝心墙沥青混凝土原材料选用问题的探讨[J].水电能源科学,2022,40(3):91-94.
- [23] 马军,柳莹,何建新.若羌水库天然砾石在混凝土心墙黏附性试验研究[J].水利技术监督,2021(4):106-110.
- [24] 袁磊,孔晓阳.新疆若羌水库骨料配制沥青混凝土试验研究[J].水科学与工程学报,2017(1):90-93.

- [25] 李江,柳莹,何建新. 新疆碾压式沥青混凝土心墙坝筑坝技术进展[J]. 水利水电科技进展,2019,39(1):82-89.
- [26] 汪正兴. 骨料与沥青黏附性评价方法及水工沥青混凝土长期水稳定性评估研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2020.
- [27] 高博. 水损害对水工沥青混凝土斜坡稳定性的影响研究[D]. 太原:太原理工大学,2021.
- [28] 国家能源局. 水工碾压式沥青混凝土施工规范 DL/T 5363—2016 [S]. 北京:中国电力出版社,2016.
- [29] 国家能源局. 水工沥青混凝土试验规程 DL/T 5362—2018 [S]. 北京:中国电力出版社,2018.
- [30] 张文朝,顾雪平. 应用变异系数法和逼近理想解排序法的风电场综合评价[J]. 电网技术,2014,38(10):2741-2746.
- [31] 张朝飞,黄川友,殷彤,等. 改进的逼近理想解排序法在地表水水质综合评价中的应用[J]. 水电能源科学,2018,36(4):37-40+48.
- [32] 吴森. 花岗岩沥青混合料路用性能研究[J]. 山东交通科技,2016(2):57-60.

(上接第 148 页)

- [15] 周招,王均星,杨凡,等. 角木塘水电站非完全宽尾墩联合消能试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(9):760-765.
- [16] 吴战营,牧振伟. 辅助消能工联合运用试验研究及数值模拟[J]. 中国农村水利水电,2013,38(7):115-121.
- [17] 孙文博,牧振伟,高尚. 趾墩悬栅联合消能紊动及荷载特性数值模拟[J]. 长江科学院院报,2020,37(1):73-78.
- [18] 孙文博,牧振伟,高尚. 低弗劳德数趾墩悬栅联合消能工数值模拟[J]. 水电能源科学,2019,37(7):81-85.
- [19] 高尚,牧振伟,俞晓伟. 趾墩-悬栅消力池水力特性及消能效果研究[J]. 水电能源科学,2021,39(6):108-111.
- [20] 吴战营,牧振伟. 消力池内悬栅辅助消能工优化试验[J]. 水利水电科技进展,2014,34(1):27-31.
- [21] 吴战营. 消力池内辅助消能工试验研究及数值模拟[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2013.
- [22] 王海军,张凡,李会平. 溢洪道泄流临底流速仿真模拟研究[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(5):128-132.
- [23] LI Shicheng, ZHANG Jianmin. Numerical investigation on the hydraulic properties of the skimming flow over pooled stepped spillway[J]. Water, 2018, 10(10): 1478.
- [24] ZHANG Wenchuan, WANG Junxing, ZHOU Chuangbing, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics in a vortex drop shaft[J]. Water, 2018, 10(10): 1393.
- [25] 罗凯文,杨易,谢壮宁. 基于 $k-\varepsilon$ 模型模拟平衡态大气边界层的比较研究[J]. 工程力学,2018,35(2):21-29.
- [26] 刘沛清,冬俊瑞. 消力池及辅助消能工设计的探讨[J]. 水利学报,1996,40(6):48-56.
- [27] 朱玲玲,牧振伟,杨力行. 悬栅消能工均匀正交设计及投影寻踪回归试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(6):210-214.

