

改性沥青混凝土在面板堆石坝中的应用研究

葛士磊

(浙江广川工程咨询有限公司, 浙江 杭州, 310000)

摘要:为提升沥青混凝土面板的服役性能,提出利用消石灰和废胶粉对沥青混凝土进行改性,对不同废胶粉掺量水平和消石灰掺量水平下的改性沥青混凝土进行了孔隙度、低温抗裂、斜坡流淌、水稳定性等试验。结果表明:两种改性材料在改善沥青混凝土低温抗裂性能和热稳定性方面具有较显著的效果,且存在一定的正向协同作用。综合考虑试验结果和工程经济性,推荐同时掺入3%的消石灰和10%的废胶粉,与掺入单一改性剂方案相比,该方案在改善沥青混凝土低温和高温性能方面均有良好作用,推荐在沥青混凝土面板堆石坝建设中采用。

关键词:沥青混凝土;消石灰;废胶粉;改性

Title: Study and application of modified asphalt concrete in concrete face rockfill dam// by GE Shilei// Zhejiang Guangchuan Engineering Consulting Co., Ltd.

Abstract: To improve the service performance of asphalt concrete panels, it is proposed to modify asphalt concrete with hydrated lime and waste rubber powder. Porosity, low-temperature crack resistance and slope flow tests of modified asphalt concrete with different contents of waste rubber powder and hydrated lime are conducted. The results indicate that the two modified materials have significant effects on improving the low-temperature crack resistance and thermal stability of asphalt concrete, and there is certain positive synergistic effect. Taking into account the experimental results and engineering economics, it is recommended to simultaneously add 3% hydrated lime and 10% waste rubber powder. Compared with the scheme of adding a single modifier, this scheme has good effect on improving the low-temperature and high-temperature performance of asphalt concrete, which is recommended for use in construction of asphalt concrete face rockfill dams.

Key words: asphalt concrete; hydrated lime; waste rubber powder; modification

中图分类号:TV641

文献标志码:B

文章编号:1671-1092(2026)02-0022-06

0 引言

沥青混凝土是由沥青和骨料两种性能完全不同的材料构成的一种特殊建筑材料,具有良好的抗渗、抗蚀和抗裂能力,在水利工程中有着广泛应用^[1]。沥青混凝土面板堆石坝以沥青混凝土作为面板材料,不仅具有良好的基础变形适应能力,在出现裂缝缺陷的情况下也易于修补,具有显著的工程优势。但是,沥青作为一种温敏性材料,其性能受温度变化的影响较大^[2]。在夏季太阳直射的情况下,面板表层的温度可达70℃左右,高温环境会导致骨料和沥青材料分离,使面板发生软化流动。在冬季低温期间,面板低温收缩产生的拉力超过其拉伸强度时面板会开裂。因此,展开水工混凝土面板高温稳定性和低温抗裂性研究具有重要

意义。

针对上述问题,工程界从理论和实践层面入手进行了广泛而深入的研究,在优化沥青混凝土配合比、选择粘稠度大的沥青材料、掺加各种掺和料及设置喷淋措施等方面提出了一系列行之有效的方法和举措,但是并没有从根本上解决高温和低温环境对沥青混凝土面板的破坏性影响。目前,这方面的研究逐渐转向改性沥青领域,研究成果也比较突出。例如,利用SBS改性沥青可有效改善沥青材料的低温脆性,是目前应用最广泛的沥青改性材料^[3]。但是,这种材料价格十分昂贵,每吨高达18 000元。因此,寻找价格低廉、性能优异的沥青改性材料就显得尤为重要。有研究显示,废胶粉改性剂来源广泛,价格低廉,与SBS改性剂相比具有显著的环境效益和经济效益。如果能将废胶

粉用于水工沥青混凝土,不仅可以提升沥青混凝土的低温抗裂性能,还有助于减少废旧轮胎堆积,达到降低施工成本的目的。消石灰的主要成分是氢氧化钙,是一种十分常用的沥青改性剂,可以和沥青中的弱酸性物质发生一系列化学反应,生成不溶性有机钙盐,增强沥青和骨料之间的黏附性,从而提升沥青混凝土的热稳定性^[4]。鉴于目前改性沥青混凝土研究大多针对掺入单一改性剂的视角展开,导致无法兼顾沥青混凝土高温和低温环境下的性能。基于此,此次研究同时掺入废胶粉和消石灰两种不同的沥青改性剂,并优化其掺入比例,试图获取一种价格低廉、同时具有良好高温和低温性能的沥青混凝土,有助于解决沥青混凝土面板低温开裂和高温流淌问题。

1 材料与方法

1.1 试验材料

此次试验使用的材料主要有骨料、沥青和改性剂,试验用骨料包括粗骨料和细骨料。其中,粗骨料为人工石灰岩碎石,粒径范围为5~16 mm,级配良好;鉴于人工骨料近年来在沥青混凝土施工中的使用比例不断增加,试验中的细骨料选择天然河砂与机制砂,天然河砂细度模数为2.71,机制砂细度模数为2.75。骨料的各项技术指标均满足《土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范》中的相关要求。试验用沥青为克拉玛依90号沥青;消石灰使用的是试验用瓶装消石灰制剂;废胶粉为废旧轮胎经过机械粉碎、研磨、过筛而成的粉末,平均粒径为0.25~0.30 mm,物理力学性能如表1所示。

表1 废胶粉物理力学性能检测结果

Table 1 Results of physical and mechanical properties of waste rubber powder

项目	检测结果	技术标准
密度/(g/cm ³)	1.17%	1.10~1.30
加热减量	0.61%	< 1%
灰分	7.76%	< 8%
铁含量	0.027%	< 0.3%
纤维含量	0%	< 1%
筛余物	0.014%	< 10%

1.2 试验方法

1.2.1 试验方案设计

目前,沥青改性包括湿法改性和干法改性两种主要方式^[5]。考虑施工工艺尽量简单,本研究采用干法改性,即在沥青混凝土制作过程中,将一定掺量水平的废胶粉和消石灰与集料一同倒入拌和锅拌和一段时间,待搅拌均匀之后再加入沥青继续拌和,获得改性沥青混凝土^[6]。显然,在其他条件不变的情况下,废胶粉和消石灰两种改性剂的掺入量是影响材料性能的关键因素。选择油石比为7.2%,细骨料和粗骨料之比为2:3,设置不同的废胶粉和消石灰掺量水平进行交叉试验,探讨两种改性剂相互作用条件下沥青混凝土的高温 and 低温性能。在参考该领域相关研究成果的基础上,以沥青质量为标准,设计0%、5%、10%、15%、20%、25%六种不同的废胶粉掺量水平,以及0%、1%、2%、3%、4%、5%六种不同的消石灰掺量水平。

1.2.2 孔隙度试验

面板堆石坝的沥青混凝土面板对抗渗性有较高的要求,在满足抗渗性要求的基础上提升其低温和高温性能才具有工程意义^[7]。鉴于目前尚无就同时掺入两种不同属性改性剂对沥青混凝土抗渗性影响的研究,试验中对各试验方案试件的孔隙率进行测定,并将其作为试件抗渗性的评价依据。孔隙率的测定采用排水置换法,具体流程按照《水工沥青混凝土试验规程》的相关要求确定。

1.2.3 低温抗裂性能试验

采用小梁弯曲试验探究沥青混凝土的低温抗裂性能,以-10℃条件下的试验结果峰值作为评价标准^[8]。试验中将制备成型的沥青混凝土试件进行切割,获取尺寸为250 mm×35 mm×40 mm的小梁试件。试验前先将试件在-10℃的玻璃水中浸泡4 h,然后使用伺服压力机对试件进行加载,加载速率设定为1.5 mm/min,在试样发生破坏后结束试验。

1.2.4 斜坡流淌试验

沥青混凝土斜坡流淌试验采用底面直径101.6 mm、高63.5 mm的圆柱形马歇尔试件,试验需要的设备有斜坡流淌仪、万用电表、烘箱、位移计、高性能AB胶等。在试验前,首先将切割成型的试件用AB胶粘贴在斜坡流淌仪的底座上,并在距离

试件底部 50 mm 的位置粘贴一个小铁片,然后将导线和图钉连接好并粘贴到铁片上。在调整好位移计并读取初始读数后,将试件放入烘箱加热到 70℃。试验过程中读取和记录读数,计算获取各方案试件的 8 h 斜坡流淌值。

1.2.5 水稳定性试验

浸水马歇尔试验主要用于检测沥青混凝土在遭受水损害情况下的抗剥落能力,是检测沥青混凝土材料水稳定性的重要指标之一。试验中按照相关规程要求成型马歇尔试件,其直径为 101.6 mm,高 63.5 mm。试验中将试件置于 60℃ 的标准恒温水浴箱内浸水 48 h,然后取出进行马歇尔稳定度试验,以测得的残留稳定度作为评价指标。

2 结果分析与讨论

2.1 孔隙率

根据试验中获得的数据,计算获取不同方案条件下沥青混凝土试件的孔隙率,结果如图 1 所示。由图 1(a)可以看出,在所有试验方案中,沥青混凝土的孔隙率均小于《土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范》中 3% 的要求。由此可见,采用两种改性剂制备的沥青混凝土完全满足沥青混凝土面板防渗要求。从试验结果也可以看出,不同改性剂掺量水平下沥青混凝土的孔隙率存在一定差异,优化改性剂掺量对提升沥青混凝土抗渗性具有一定的积极意义。在废胶粉掺量水平一定的情况下,沥青混凝土的孔隙率随着消石灰掺量的增加呈现出先减小后增大的变化趋势,消石灰掺量为 3% 时的孔隙率最小。但是,过量掺入消石灰会影响沥青材料的流动性,导致制备的沥青混凝土孔隙率有所增大。另一方面,在消石灰掺量不变的情况下,沥青混凝土的孔隙率随着废胶粉掺量的增加而不断增大,且增幅也不断增大。从具体试验数据来看,当废胶粉掺量不超过 15% 时,对孔隙率的影响较小;当废胶粉掺量大于 15% 时,对孔隙率的影响较大。试验表明,消石灰掺量 3% 左右,废胶粉掺量不超过 15% 时,沥青混凝土具有优良的抗渗性。从图 1(b)可以看出,在使用机制砂的情况下,沥青混凝土孔隙率的试验结果与天然砂比较接近,15% 废胶粉掺量、1% 消石灰掺量试验方案和 25% 废胶粉掺量、4% 消

石灰掺量试验方案的结果存在较大差异,但是偏差值均不超过 15%。总体来看,在沥青混凝土制备过程中使用天然砂或机制砂不会对孔隙率产生显著影响,这也从侧面印证了机制砂取代天然砂的可行性,以及本次试验结果的可靠性。

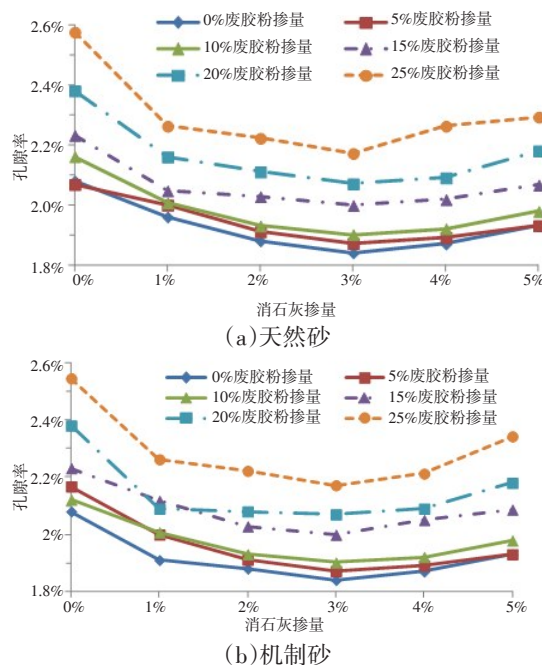


图 1 孔隙率试验结果

Fig. 1 Results of porosity test

2.2 抗裂性

根据低温小梁弯曲试验获得的数据,计算不同试验方案的抗弯强度,结果如图 2 所示。

由图 2(a)可知,掺入消石灰改性剂和废胶粉改性剂均可以提升沥青混凝土的抗裂性能。但是,这两种改性剂对沥青混凝土抗弯强度的影响特征与程度有所不同。具体来看,在废胶粉掺量一定的情况下,沥青混凝土的抗弯强度随着消石灰掺量的增加呈现出先增大后减小的变化趋势,当消石灰掺量为 3% 时的抗弯强度最大。在消石灰掺量一定的情况下,沥青混凝土的抗弯强度随着废胶粉掺量的增加呈现出不断增大的变化趋势,但是增幅不断减小,特别是当废胶粉掺量超过 15% 时,再增加废胶粉掺量对抗弯强度的改善作用极为有限。以消石灰掺量 3% 方案的试验结果为例,当废胶粉掺量由 0% 增大到 15% 时,沥青混凝土的抗弯强度由 2.24 MPa 增大到 3.24 MPa,增加了约 44.64%;当废胶粉掺量由 15% 增大到 25% 时,沥青混凝土的抗弯强度由 3.24 MPa 增大到 3.39 MPa,仅增加了约 4.63%。

从试验结果可以看出,两种改性剂相比,废胶粉对提升沥青混凝土抗弯强度的作用更显著。例如,在未掺加消石灰的情况下,将废胶粉掺量从0%增大到15%时,沥青混凝土的抗弯强度由2.17 MPa增大到3.03 MPa,增加了约39.63%;在未掺加废胶粉的情况下,将消石灰掺量从0%增加到3%时,沥青混凝土的抗弯强度由2.17 MPa增大到2.24 MPa,增加了约3.23%。虽然消石灰在提升沥青混凝土抗弯强度方面的作用有限,但是试验结果显示两种改性剂在提升沥青混凝土抗弯强度方面具有一定的正向协同作用,在掺入废胶粉的情况下,当消石灰掺量从0%增大到3%时,沥青混凝土抗弯强度的增幅明显偏大。例如,在未掺加废胶粉的情况下,将消石灰掺量从0%增加到3%时,沥青混凝土的抗弯强度增加了约3.23%,而掺入15%消石灰时的增幅为6.93%。

由图2(b)可以看出,在使用机制砂的情况下,沥青混凝土的抗弯强度变化规律与使用天然砂时基本一致,说明无论是使用天然砂还是机制砂,掺入一定量的废胶粉和消石灰改性剂均有助于提升沥青混凝土的抗弯强度,改善其低温抗裂性能,且废胶粉的作用效果更显著。同时,在提升沥青混凝土的抗弯强度方面,两种改性剂还具有一定的正向协同作用。此外,使用机制砂的情况下,沥青混凝土的抗弯强度整体上看略高于天然砂方案,平均提高幅度在5%左右。究其原因,主要是机制砂表面较天然砂粗糙,与沥青的黏结性能略高于天然砂。

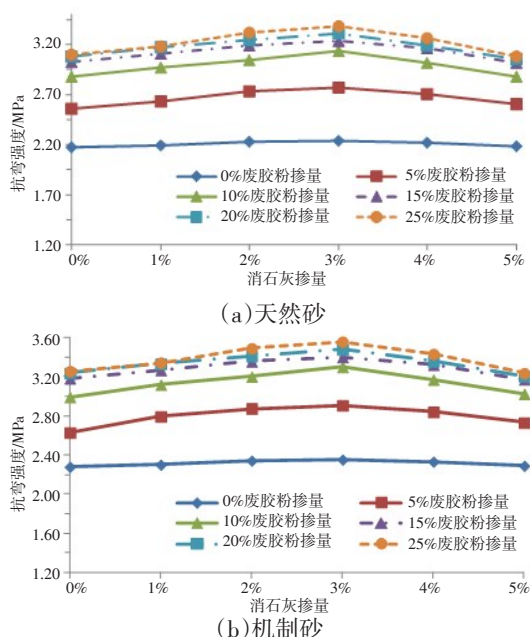


图2 抗弯强度试验结果

Fig. 2 Results of bending strength test

2.3 热稳定性

根据低温小梁弯曲试验中获得的数据,计算不同试验方案的斜坡流淌值,以此评价不同改性剂方案沥青混凝土的热稳定性,结果如图3所示。

由图3(a)可知,掺入消石灰改性剂和废胶粉改性剂均可以降低沥青混凝土的斜坡流淌值。但是,这两种改性剂的影响特征与程度有所不同。具体来看,在废胶粉掺量一定的情况下,沥青混凝土的斜坡流淌值随着消石灰掺量的增加呈现出不断减小的变化趋势,即消石灰掺量越大,沥青混凝土的热稳定性越好,但是随着掺量的增大,上述作用会趋于减弱。从具体试验数据来看,当消石灰掺量小于3%时,斜坡流淌值的减小幅度较大;当消石灰掺量大于3%时,斜坡流淌值的减小幅度有限。以未掺加废胶粉方案为例,当消石灰掺量从0%增加到3%时,斜坡流淌值由15.87 mm减小到5.14 mm,减小幅度为67.6%;当消石灰掺量从3%增加到5%时,斜坡流淌值由5.14 mm减小到4.81 mm,减小幅度为6.42%。在消石灰掺量一定的情况下,沥青混凝土的斜坡流淌值随着废胶粉掺量的增加呈现出不断减小的变化趋势,说明掺入废胶粉对改善沥青混凝土的热稳定性也有一定作用,但是这种作用与消石灰相比明显偏弱。例如,未掺加消石灰的情况下,废胶粉掺量从0%增加到25%时,斜坡流淌值由15.83 mm减小到15.65 mm,减小幅度仅为1.14%。由此可见,在提升沥青混凝土热稳定性方面,消石灰改性剂起着较为关键的作用。此外,试验结果还显示,在掺入消石灰的情况下,随着废胶粉掺量的增加,斜坡流淌值的减小幅度相对更大,特别是消石灰掺量为3%时最为显著,说明两种改性剂在改善沥青混凝土热稳定性方面具有一定的正向协同作用,同时掺入两种改性剂比单掺一种改性剂能发挥更好的改善作用。

由图3(b)可知,在使用机制砂的情况下,沥青混凝土斜坡流淌值的变化规律与使用天然砂时基本一致,说明无论是使用天然砂还是机制砂,掺入一定量的废胶粉和消石灰改性剂均有助于降低沥青混凝土的斜坡流淌值,改善其热稳定性能,且消石灰的作用效果更显著。同时,在提升沥青混凝土热稳定性方面,两种改性剂还具有一定的正向协同作用。此外,使用机制砂的情况下,沥青混凝土的斜坡流淌值整体上看略低于天然砂方案,平均降低幅度在4%左右。究其原因,主要是机制砂表面较

天然砂粗糙,与沥青的黏结性能略高于天然砂,因此高温稳定性相对较好。

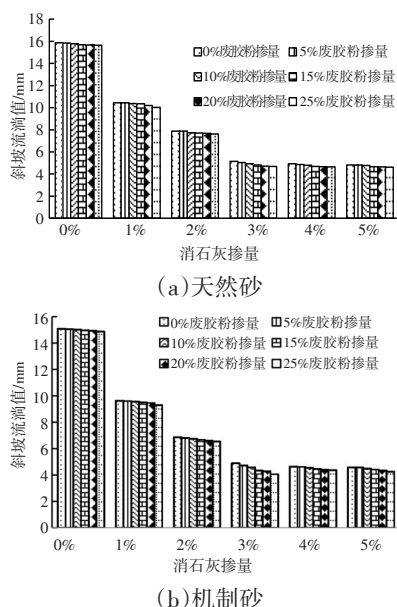


图3 斜坡流淌值试验结果

Fig. 3 Results of slope flow test

2.4 水稳定性

根据浸水马歇尔试验获得的数据,计算不同试验方案的残留稳定度,以此评价不同改性剂方案沥青混凝土的水稳定性,结果如图4所示。

由图4(a)可以看出,掺入消石灰改性剂和废胶粉改性剂均可以提升沥青混凝土的水稳定性。但是,这两种改性剂对沥青混凝土水稳定性的影响特征与程度有所不同。具体来看,在废胶粉掺量一定的情况下,沥青混凝土的残留稳定度随消石灰掺量的增加呈现出先增大后减小的变化趋势,当消石灰掺量为3%时,残留稳定度最大。消石灰掺量一定的情况下,沥青混凝土的残留稳定度随着废胶粉掺量的增加呈现出不断增大的变化趋势,但是增幅不断减小,特别是当废胶粉掺量超过15%时,再增加废胶粉掺量对残留稳定度的提升作用有限。另一方面,试验结果显示两种改性剂在提升沥青混凝土水稳定性方面具有一定的正向协同作用,在掺入废胶粉的情况下,当消石灰掺量从0%增加到3%时,沥青混凝土残留稳定度的增幅明显偏大。例如,在未掺加废胶粉的情况下,将消石灰掺量从0%增加到3%时,沥青混凝土的残留稳定度增幅约2.63%,而掺入15%消石灰时的增幅约8.92%。

由图4(b)可知,在使用机制砂的情况下,沥青

混凝土的残留稳定度变化规律与使用天然砂时基本一致,说明无论是使用天然砂还是机制砂,掺入一定量的废胶粉和消石灰改性剂均有助于提升沥青混凝土的水稳定性。此外,使用机制砂的情况下,沥青混凝土的残留稳定度整体略高于天然砂方案,平均提高幅度在2%左右,说明机制砂相对于天然砂在提升沥青混凝土水稳定性方面具有一定的优势。

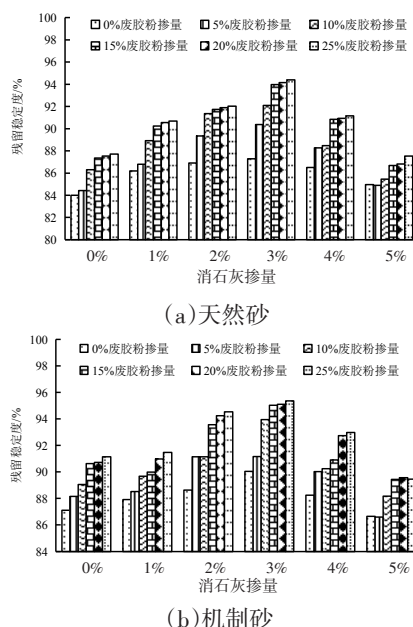


图4 残留稳定度试验结果

Fig. 4 Results of residual stability test

3 结 语

此次研究利用室内试验,探讨同时掺入消石灰和废胶粉对沥青混凝土性能的影响,并获得如下主要结论:

(1)掺入消石灰和废胶粉的情况下,沥青混凝土的孔隙率均低于3%,完全满足工程规范要求。同时,掺入消石灰有助于降低沥青混凝土的孔隙率,且掺入量为3%时效果最佳;掺入废胶粉会导致沥青混凝土孔隙率增大,但掺量不超过10%时影响极为有限。

(2)掺入一定量的废胶粉和消石灰改性剂均有助于提升沥青混凝土的抗弯强度,改善其低温抗裂性能,且废胶粉的作用效果更显著。同时,在提升沥青混凝土的抗弯强度方面,两种改性剂还具有一定的正向协同作用。

(3)掺入一定量的废胶粉和消石灰改性剂均有助于降低沥青混凝土的斜坡流淌值,改善其热稳定性,且消石灰的改善效果更显著。

(4)掺入一定量的废胶粉和消石灰改性剂均有助于提升沥青混凝土的水稳定性。

(5)综合考虑沥青混凝土的抗渗性、低温性能、高温性能及工程经济性,在本试验采用材料及配合设计的前提下,推荐掺入3%的消石灰和10%的废胶粉制备改性沥青混凝土。

本研究样本还不够丰富,特别是没有选择更多的沥青混凝土配合比展开试验,后续研究可选择更多参数和不同的材料样本展开,以获得通用性更高的结论,为工程建设和理论研究提供参考。

参考文献:

[1] 陈帅军,董成鹏,杨武.填料掺量对水工沥青混凝土力学性能影响的研究[J].吉林水利,2025(3):13-17.
[2] 宁逢伟,毛春华,隋伟,等.寒区防渗层SBS改性沥青混

土抗弯性能及三轴静动力特性研究[J].水电与抽水蓄能,2024,10(5):100-108,114.
[3] 方伟,李洋,贺晶晶,等.水工沥青混凝土裂缝愈合特性研究[J].水利与建筑工程学报,2024,22(4):35-41.
[4] 付涵,柴军瑞,许增光,等.变温条件下胶粉改性沥青混凝土抗裂特性研究[J].水力发电学报,2024,43(6):53-62.
[5] 靳平超,张祖莲,谢道春,等.配合比对沥青混凝土刚度和强度的影响研究[J].中国水运,2023,23(24):141-143.
[6] 余梁蜀,李加明,庞渊,等.水工沥青混凝土粘弹性特性试验研究[J].水电能源科学,2023,41(9):139-142,179.
[7] 次仁云旦,王柳江,扎西顿珠,等.温度对水工沥青混凝土强度及剪胀特性的影响试验研究[J].长江科学院院报,2024,41(1):190-195.
[8] 邹长根,余浩,闫小虎,等.沥青高温性能对防渗层沥青混凝土斜坡流淌的影响[J].建材世界,2022,43(6):47-51.

收稿日期:2025-06-26;修回日期:2025-09-09

作者简介:葛士磊(1990—),男,江苏扬州人,工程师,主要从事水利水电工程咨询工作。

作者邮箱:gejujie7700966@163.com

(上接第21页)

表4 典型溃坝案例溃口参数预测结果

Table 4 Prediction results of breach parameters of typical dam failure cases

溃坝名称	溃坝模式	坝型	坝高/m	Q_p/m^3			B_{max}/m		
				实测值	计算值	相对误差	实测值	计算值	相对误差
板桥水库	漫顶	心墙坝	24.5	78 100	77 417	0.87%	291	225.8	22.4%
Apishapa 水库	管涌	均质坝	34.1	6 850	6 423	6.22%	86.5	87.9	1.63%
Centralia 水库	漫顶	均质坝	5.2	71	52.7	25.8%	10.1	10.5	4.22%

型堤坝(包括湖泊堤防),研究方法对河道型堤坝溃口参数预测有参考意义。

参考文献:

[1] 陈生水,陈祖煜,钟启明.土石坝和堰塞坝溃决机理与溃坝数学模型研究进展[J].水利水电技术,2019,50(8):27-36.
[2] 韩瑞芳,康秀宝.土石坝下游坝坡失稳危险度分析[J].大坝与安全,2014(1):9-11.
[3] Walder J S,O'Connor J E.Methods for predicting peak discharge of floods caused by failure of natural and constructed earthen dams[J].Water Resources Research,1997,33(10):2337-2348.
[4] Qiming Z,Shengshui C,Zhongzhi F,et al.New empirical model for breaching of earth-rock dams[J].Natural Hazards Review,2020,21(2):1-5.
[5] 段文刚,刘备,黄卫.非黏性堤防溃口发展过程计算模型

[J].长江科学院院报,2024,41(2):67-75.
[6] Froehlich D C.Peak outflow from breached embankment dam[J].Journal of Water Resources Planning and Management,1995,121(1):90-97.
[7] 盛金保,李宏恩,盛韬桢.我国水库溃坝及其生命损失统计分析[J].水利水运工程学报,2023(1):1-15.
[8] 何玉花,张东水,韩用顺,等.基于Ward系统聚类方法的黄河上游干流地区滑坡分类及其特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(1):46-53.

收稿日期:2024-11-26;修回日期:2025-03-13

基金项目:国家自然科学基金项目(52479062、52309086);江苏省水利科技项目(2024009、2023013)

作者简介:张美满(1996—),男,浙江瑞安人,博士,主要从事水力学及河流动力学研究工作。

作者邮箱:zhangmeiman@hhu.edu.cn