

· 施工 ·



## 龙溪口库区粉土地基上建设胶固土(石) 堤防试验研究

张 浩<sup>1</sup>, 冯 炜<sup>2</sup>, 徐乐毅<sup>1</sup>, 代礼红<sup>1</sup>, 陈水兵<sup>1</sup>, 丁易峰<sup>3</sup>

(1. 四川岷江港航电开发有限责任公司, 四川 乐山 614000;

2. 中国水利水电科学研究院, 水利部水工程材料重点实验室, 北京 100038;

3. 四川江源工程咨询有限公司, 四川 成都 610041)

**摘要:** 针对龙溪口库区大量粉土地基不能直接作为堤防的持力层, 且粉土废弃带来诸多环保方面不利影响等问题, 开展了固化土(加石或不加石)筑堤材料的试验研究。通过一定量的胶凝材料和专用外加剂将土(石)胶结固化后, 具有一定力学强度和抗渗性能等优点, 胶固土(石)经过 3 a 泡水后未崩解, 满足筑堤材料的强度要求。经过处理的粉土地基上建设胶固土(石)堤防具有创新性, 新的建堤材料使粉土得到废物利用, 固结材料特性比传统土石坝的散粒体材料具有更高的安全性, 拓宽了建堤材料的应用范围, 具有较好的推广应用价值。

**关键词:** 胶固土(石); 堤防; 配合比; 试验研究

中图分类号: TU528; U654

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)10-0083-06

### Experiment on construction of cemented soil (stone) embankment on silt foundation of Longxikou Reservoir area

ZHANG Hao<sup>1</sup>, FENG Wei<sup>2</sup>, XU Leyi<sup>1</sup>, DAI Lihong<sup>1</sup>, CHEN Shuibing<sup>1</sup>, DING Yifeng<sup>3</sup>

(1. Sichuan Minjiang Port & Shipping & Electricity Power Development Co., Ltd., Leshan 614000, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Key Laboratory of Water Engineering Materials,  
Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China;

3. Sichuan Jiangyuan Engineering Consulting Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Since a large amount of silt foundation in the Longxikou Reservoir area cannot be directly used as the bearing layer for embankments, and the disposal of silt will cause adverse environmental effects, this paper carries out experimental research on solidified soil (with or without stone) embankment materials. After a certain amount of cementitious materials and specialized additives are used to solidify the soil (stone), the cemented soil (stone) has certain advantages such as mechanical strength and impermeability and does not collapse after three years of soaking in water, meeting the strength requirements of embankment materials. The construction of cemented soil (stone) embankment on a silt foundation is innovative. The new embankment building materials enable waste utilization of silt. The safety of the consolidated material is higher than that of the granular material of the traditional embankment dam, and it broadens the application range of embankment building materials and has good promotion and application value.

**Keywords:** cemented soil (stone); embankment; mix proportion; experimental research

我国堤防多以土石堤防为主, 尽管造价较低, 但存在漫顶溃决风险, 根据对 3 500 座溃坝的统

计, 其中土石坝溃决占 98%。漫顶溃决给国家和人民生命财产造成巨大的损失。混凝土坝具有较

收稿日期: 2023-06-07

作者简介: 张浩 (1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口航道和水利水电工程建设管理。

高的安全性,即使遭受地震剪切破坏也不会发生重大次生灾害,但造价高,使用率低。因此在两类坝型中发展一种即经济又安全的新坝型具有重大意义<sup>[1-2]</sup>。胶结颗粒料坝(包括胶结砂砾石、胶结土、胶结堆石)介于混凝土坝和土坝之间,具有少弃渣或不弃渣、绿色环保、安全性高,且工程造价低等优点,在犍为航电枢纽的库区防护项目中已成功运用胶凝砂砾石筑堤技术<sup>[3-5]</sup>。胶固土(石)堤防属于胶结颗粒料坝范畴,但不同于胶凝砂砾石,扩展了筑坝材料的使用范围,不仅能利用砂砾石,而且可以利用土(土中加石或不加石)。胶凝材料将土(石)胶固后由原来的散粒体改性为固结体,可提高工程的安全度。

土(石)胶固建坝或堤防的工程应用具有创新性,在工程实践中有许多深厚粉土地基覆盖层的实例,如将粉土弃用,则涉及到环保和产生弃渣费用等,在当前砂石骨料匮乏的大建设环境下,浪费资源不符合绿色低碳筑坝的指导方针。

## 1 工程概况

岷江龙溪口航电枢纽工程在库区沿岸涉及下渡乡、黄旗坝、虎吼坝、机场坝及河口地区、丁家坝、康家坝、孝姑镇、铁炉乡、五一坝、龙孔镇等10个防护区(图1),布置防护堤总长47.41 km,防护区有大量的土地、企业、居民,因此防护堤的安全性尤其重要,借鉴犍为枢纽的成功经验,考虑沿途砂卵石料丰富,具备采用胶结颗粒料新型筑坝技术的有利条件,防护堤优先选用胶固土(石)堤,但龙溪口工程库区防护工程堤基相对犍为存在较厚的粉土层(大部分堤段厚3~4 m,部分厚6~8 m),不能直接作为持力层,需进行地基处理,如果大量粉土开挖后弃用,不仅不利于环保,而且弃渣处理费用支出巨大。因此提出合理运用粉土的课题,对沿江的市镇河滩地中存在的大量粉土地基合理利用取得应用突破,有望推广到岷江航电工程乃至我国其他粉土地基的堤防工程<sup>[6-7]</sup>。

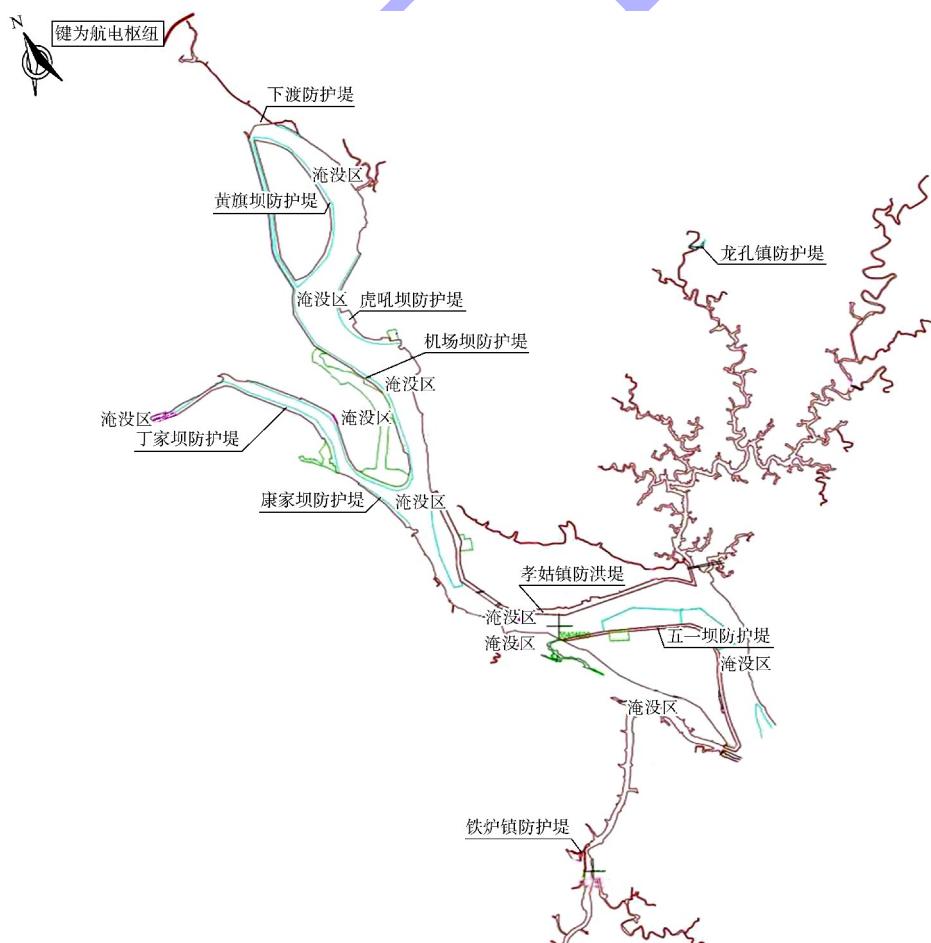


图1 岷江龙溪口航电枢纽工程库区防护工程

龙溪口航电枢纽区防护工程堤防粉土地基面临以下工程问题: 1) 地震液化问题: 根据地勘成果判断龙溪口堤防地基粉土层为可液化土, 在地震条件下, 如果不处理可能发生液化; 2) 承载力问题: 胶结砂砾石堤防自身重力引起的最大基底压力约 200 kPa, 粉土地基地勘建议承载力特征值为 150 kPa, 地基承载力不满足要求; 3) 变形问题: 粉土地基结构松软、厚薄不均、沉降量大且不均匀, 导致堤身出现变形破坏; 4) 渗透稳定问题: 粉土黏粒含量较少, 抗冲刷能力低, 易发生砂卵石管涌及流土破坏、冲刷破坏等问题。

综上, 粉土不能直接作为地基持力层, 需进行处理。按传统的处理方案进行挖除换填将增加堆放场地和建材用量, 加大对环境的影响, 因此开展粉土利用的研究十分有益, 利用开挖粉土或粉土加石胶固进行地基换填、修建堤防等试验至关重要。

胶固土(石)坝堤防占地小于土石坝堤防, 且安全度更高, 成本低于混凝土坝。在岷江等粉土多的区域将具有广阔的应用价值, 尤其对老木孔和东风岩航电枢纽区堤防工程具有借鉴和指导作用。

## 2 研究内容

### 2.1 研究目的

研究的核心目标是粉土在堤防工程上的利用, 采用胶固土(石)进行地基换填以及修建胶固土低堤坝的可行性。具体研究包括: 1) 充分利用开挖粉土, 研究胶固土(石)换填、胶固土(石)低堤防、砂砾石(低含砂率)掺入一定比例的粉土作为筑堤材料等; 2) 研究软弱地基上胶固土(石)坝替代砂砾石填筑均质坝, 对贫浆和富浆的胶固土进行配合比设计、结构设计以及性能研究; 3) 根据地基处理的研究成果进行堤防的防渗方案研究; 4) 研究胶固土(石)的施工工艺以及施工质量控制标准等。

### 2.2 地基物理力学指标

以五一坝防护工程为例, 现场选取代表性位置, 钻孔取样(有条件时取原状样)或采用原位试验等手段进一步测定堤基粉土/砂卵石层的物理性质以及变形、强度和渗透等工程力学特性。

查明该段堤基埋深方向上粉土层、砂砾石层和基岩的分层界面, 纵横方向的厚度变化。辅以少量地质钻孔查明粉土、砂砾石层和基岩地质界线, 以及各层厚度和变化规律。

### 2.3 胶固土(石)关键技术

利用堤防开挖的粉土制作胶固土(石)进行地基处理, 解决粉土地基的工程问题, 开展胶固土(石)堤防典型结构设计。

针对不同材料性质的粉砂土开展试验研究, 探究适宜的胶结料和比例, 以及对应的力学和渗透性指标, 在此基础上提出最优的材料配比, 为开展胶固土现场试验以及计算分析提供数据支撑。

在胶固土(石)地基处理后, 对堤防、基础、防渗结构进行整体结构计算, 论证地基处理措施的有效性。根据地形条件, 对于高度较小的堤防, 研究利用开挖粉土料直接浇筑胶固土堤防的可行性, 提出适用范围、细部构造等设计。

现场选取典型试验段开展胶固土(石)堤防施工建设的试验研究。充分掌握胶固土(石)在碾压施工控制参数下的渗透、压实、承载力和抗剪强度特性; 通过取胶固土原状试样, 测定其强度、变形和渗透参数。验证配合比及渗控系统的可行性、适应性, 进行贫浆和富浆的胶固土(石)性能测试试验。

现场胶固土(石)摊铺碾压试验场地选择在施工条件好、远离水边线、地形平坦、有村道的区域, 初拟试验段长 100 m、宽 50 m。通过现场试验获得各项施工参数, 检测试验成果是否满足设计要求。检测项目包括: 密度、抗压、抗剪、渗透、变形观测等。

### 3 技术路线和创新点

拟采用现场与实验室试验以及数值模拟相结合的技术路线,通过现场试验确定原状土物理力学参数,通过实验室试验确定胶固土(石)等材料物理力学参数,以此为基础进行承载力、渗流等有限元分析,具体技术路线见图 2。

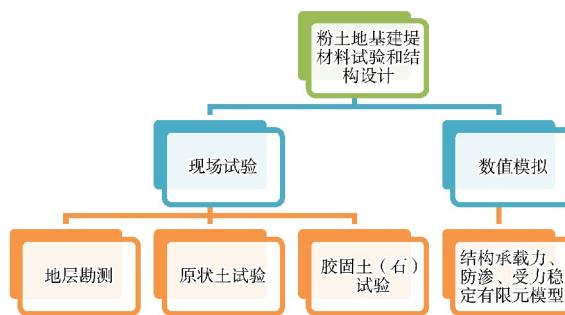


图 2 技术路线

#### 3.1 主要技术难点

1) 以原状土为测试目标,准确确定地基土的物理力学参数是进行合理化堤防结构设计和开展后续筑堤材料试验的基石。

2) 胶固土(石)作为一种新型材料,其配合比设计不同于胶凝砂砾石<sup>[8-9]</sup>,需通过室内试验确定物理力学性质及耐久性等。

#### 3.2 项目创新点

胶固土(石)新型筑堤材料相比传统土石堤防具有更高的安全性。通过水泥、粉煤灰和专用外加剂等胶结作用,将粉土(石)等散粒体胶固为物理和力学性质明显改性的固结体,既解决了地基处理问题,又解决了粉土开挖的堆积问题。

### 4 胶固土(石)筑堤材料的试验研究

胶固土主要指黏土类、亚黏土类、亚砂土类、粉土类中掺入各类水泥,熟石灰与磨细生石灰所组成的改性土。胶固土整体性较强,与砂石材料相比具有一定的强度和水稳定性。

基于对胶固土开展的试验研究,采取某特定工程的粉土开展的科研结果表明:

1) 最优振碾成形时间为 40 s,且试件应一次

成形,分层振碾会导致试件呈现分层结构;基于土样的最大干密度和压实度要求,提出胶固土试件的成形方法,其主要步骤为通过测试碾压后的密度确定最优含水率,计算成形时所需拌和物的理论质量,先称重然后一次振碾成形。

2) 研究含水率对胶固土振动成型后密实度的影响,结果表明单掺水泥改性时最优含水率为 18%;而单掺石灰胶固和水泥、石灰混掺胶固时最优含水率为 20%。

3) 开展不同水泥掺量对胶固土性能的影响研究,结果表明水泥掺量为 4%时,试件 7 d 强度大于 1.0 MPa, 28 d 强度大于 2.0 MPa,且 28 d 抗渗系数为  $1.85 \times 10^{-8}$  m/s, 90 d 抗渗系数为  $0.93 \times 10^{-8}$  m/s。

4) 对石灰胶固土进行试验研究,结果表明石灰的胶固效果远远低于水泥;随着石灰掺量的增加,胶固土的抗压强度增大,但 20% 石灰掺量下 28 d 强度仅为 1.0 MPa。

5) 对水泥、石灰混掺胶固土性能进行试验研究,结果表明掺入石灰影响了水泥早期强度的发展,其 28 d 强度低于单掺水泥。

6) 实际工程应用时建议水泥掺量  $\geq 4\%$ 。

以上成果为开展龙溪口堤防胶固土的试验研究提供指导和参考,根据龙溪口五一坝现场地质条件和粉土特性,开展针对性的试验研究。采用五一村防护堤线附近低液限粉质黏土,基于粉土地基置换成胶固土以及用于水平铺盖防渗的需求,开展贫浆和富浆胶固土的配合比设计以及强度试验。考虑经济和功效,胶凝材料体系确定为水泥和粉煤灰,不采用石灰等其他材料。胶凝材料(单掺 42.5 普通硅酸盐水泥和复掺Ⅱ级粉煤灰)掺量 4%~20%。并使用了针对含泥、含粉高的专用外加剂(掺量为胶凝材料用量的 1.0%~1.3%)。各胶固土的配合比及其强度见表 1,不同水泥掺量与强度的关系见图 3,不同水泥和粉煤灰掺量与强度的关系见图 4。各配合比的胶固土密度为 1 926~2 050 kg/m<sup>3</sup>。

表 1 胶固土配合比和强度

| 序号 | 水泥/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | 粉煤灰/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | 土/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | 胶凝材料<br>含量/% | 水含量/% | 抗压强度/MPa |      |
|----|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------|-------|----------|------|
|    |                              |                               |                             |              |       | 28 d     | 90 d |
| 1  | 63                           | 0                             | 1 580                       | 4            | 20    | 0.9      | 1.2  |
| 2  | 93                           | 0                             | 1 550                       | 6            | 20    | 1.4      | 2.1  |
| 3  | 122                          | 0                             | 1 521                       | 8            | 20    | 2.4      | 3.0  |
| 4  | 147                          | 0                             | 1 470                       | 10           | 22    | 3.2      | 4.8  |
| 5  | 173                          | 0                             | 1 440                       | 12           | 22    | 4.1      | 6.4  |
| 6  | 198                          | 0                             | 1 415                       | 14           | 22    | 5.6      | 8.1  |
| 7  | 222                          | 0                             | 1 390                       | 16           | 22    | 6.8      | 10.0 |
| 8  | 269                          | 0                             | 1 344                       | 20           | 22    | 8.0      | 13.0 |
| 9  | 61                           | 61                            | 1 521                       | 8            | 20    | 0.8      | 1.3  |
| 10 | 88                           | 88                            | 1 447                       | 12           | 20    | 1.8      | 2.4  |
| 11 | 113                          | 113                           | 1 416                       | 16           | 20    | 2.5      | 3.7  |
| 12 | 137                          | 137                           | 1 369                       | 20           | 20    | 2.8      | 4.7  |
| 13 | 113                          | 113                           | 1 416                       | 16           | 22    | 1.8      | 2.8  |
| 14 | 113                          | 113                           | 1 416                       | 16           | 26    | 1.4      | 2.2  |

注: 胶凝材料含量是指胶凝材料占干土的比例, 水含量指水占干土的比例。

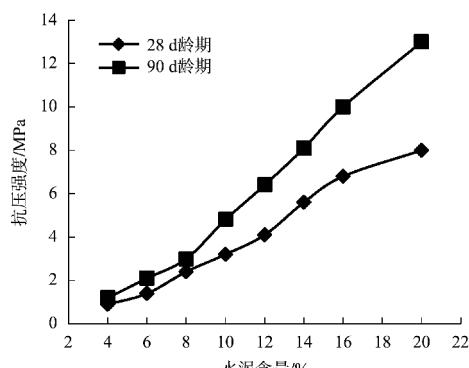


图 3 不同水泥含量与强度的关系

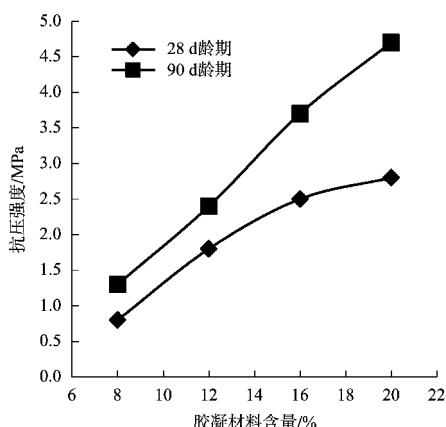


图 4 不同胶凝材料含量与强度的关系

胶固土配合比和强度测试结果表明: 水泥含量为 4% 时, 28 d 抗压强度为 0.9 MPa, 90 d 抗压

强度为 1.2 MPa; 水泥含量为 6% 时, 28 d 抗压强度为 1.4 MPa, 90 d 抗压强度为 2.1 MPa; 水泥含量为 8% 时, 28 d 抗压强度为 2.4 MPa, 90 d 抗压强度为 3.0 MPa; 水泥含量增加到 20% 时, 28 d 抗压强度为 8.0 MPa, 90 d 抗压强度为 13.0 MPa。后期 180 d 强度还将有所增长。根据目前的结果表明, 当水泥含量为 8%, 即单方用量 122 kg 的胶固土, 28 d 强度达到 2.0 MPa 以上, 90 d 强度达到 3.0 MPa, 作为粉土地基置换为胶固土已达到承载力的要求。掺用粉煤灰的胶固土强度试验结果表明: 胶材含量到 12%, 即水泥和粉煤灰单方用量均为 88 kg 的胶固土, 28 d 强度达到 1.8 MPa, 90 d 强度达到 2.4 MPa, 作为粉土地基置换为胶固土也达到承载力的要求。目前的试验结果表明对强度影响最大的因素是水灰比和水泥用量, 粉煤灰在胶固土中对强度的贡献较小。用水量对胶固土工作性质和强度影响明显, 如胶材含量 16% 的胶固土, 不同含水量 20%、22% 和 26% 的胶固土 28 d 强度分别为 2.5、1.8、1.4 MPa, 90 d 强度分别为 3.7、2.8、2.2 MPa, 可见随着用水量的增加, 强度明显下降, 且当水含量为 26% 时, 易发生陷碾问题不适宜碾压成形。

开展胶固土渗透性试验, 测试水泥占干土比例为 10%、14%、16%, 胶凝材料占干土 12% 和 20% (水泥和粉煤灰各占 50%) 的胶固土渗透系数, 测试结果见表 2。

结果表明 10% 胶凝材料的胶固土渗透系数达到  $10^{-9}$  m/s 数量级, 16% 胶凝材料的富浆胶固土渗透系数达到  $10^{-10}$  m/s 数量级。胶固土渗透试验后测试其抗压强度, 结果表明 10% 水泥掺量和 20% 胶凝材料 (水泥和粉煤灰各一半) 的胶固土渗透后抗压强度为 2.8 和 2.6 MPa, 对比未渗透试件, 强度下降了约 40%。胶固土试件进行渗透试验后已产生渗漏裂缝, 但未发生渗透崩解, 仍具有一定的力学强度。

胶材 4%、8%、12% 的胶固土泡水崩解试验表明, 28 d 龄期后泡水历时 3 a 后, 试件直观显示基本无变化, 质量损失率小于 2%。

表 2 胶固土渗透系数测试结果

| 序号 | 水泥/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 粉煤灰/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 干土/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 胶凝材料含量/% | 水含量/% | 90 d 渗透系数/(10 <sup>-9</sup> m·s <sup>-1</sup> ) | 抗渗等级 |
|----|--------------------------|---------------------------|--------------------------|----------|-------|---|------|
| 1  | 147                      | 0                         | 1 470                    | 10       | 22    | 5.30  | W1   |
| 2  | 88                       | 88                        | 1 447                    | 12       | 20    | 9.40  | W1   |
| 3  | 198                      | 0                         | 1 415                    | 14       | 22    | 0.88  | W1   |
| 4  | 222                      | 0                         | 1 390                    | 16       | 22    | 0.59  | W2   |
| 5  | 137                      | 137                       | 1 369                    | 20       | 20    | 5.90  | W1   |

开展胶固土弹性模量和抗剪强度的试验,选取的胶凝材料含量为 14%,其中水泥和粉煤灰各占一半,水含量为 19%。测试 90 d 龄期的胶固土抗压强度 3.1 MPa,轴向压缩强度 1.9 MPa,直径 150 mm 圆柱体与边长 150 mm 立方体抗压强度之比为 0.61,轴向压缩弹性模量为 2.4 GPa。

胶固土试件抗剪破坏后发现,黏聚力的大小与胶固本质密切相关。胶固土的延塑性强于混凝土和胶结砂砾石,因此试件在抗剪破坏时发生多道不沿水平方向(水平剪切推力方向)的裂缝。试件破坏后起伏差大,胶结砂砾石和混凝土沿中间剪切区水平剪开,破坏面的起伏差较小。龄期为 180 d 的胶固土的抗剪试验得出摩擦系数  $f$  为 0.79,内摩擦角为 38.3°,黏聚力  $c'$  为 0.69 MPa。

在建设胶固土(石)堤防中,上游对抗渗、抗冻有一定要求且难以碾压施工,因此探索胶固土振捣施工的可行性。室内振捣常态胶固土发现无粗骨料的震动传递,单纯振捣胶固土,振捣扩散度小且不易施工。目前已开展初步探索性试验,土:石为 1:2,胶材单方用量为 200 kg,180 d 的抗压强度达到 10.0 MPa 以上,且在使用专用外加剂的情况下,抗渗达到 W4 等级,抗冻达到 F50 等级,满足龙溪口库区堤防防渗层材料的要求,配制的振捣性胶固土石满足施工需求。为进一步利用工程废弃料,开展相关胶凝砂砾石围堰废弃料再生利用试验,利用围堰废弃料配制振捣性胶凝砂砾石,均满足施工需求,在适宜胶材的用量下满足工程对强度的设计要求。振捣性胶固土石和废弃料胶结砂砾石的初步试验为进一步拓宽材料的利用空间提供了有益的参考,并将在下一阶段的工艺性试验研究中进行深化。

## 5 结语

1) 根据胶固土有关力学强度、泡水崩解性、渗透性和抗剪性能等试验,结果表明胶固土具有一定力学强度、抗剪、抗渗耐久性能等,满足粉土地基置换后所需的工程设计要求。

2) 综合考虑成本和胶固土的可碾压工作性、浆体包裹性、后期强度增长以及现场粉土可能含水量超标等,建议胶材使用水泥和粉煤灰填充,胶凝材料含量为 12%~14%,则抗压强度 180 d 龄期可达 2.0 MPa 以上,渗透系数达 10<sup>-9</sup> m/s 数量级。

3) 防渗层利用振捣胶固土石进一步降低了胶材用量,提高了材料强度和耐久性能,更有利于施工。

4) 开展室内试验研究后还需进行现场实践验证,从而确定胶固土(石)施工配合比、施工工艺和施工质量控制标准等,预期将取得粉土地基上建设胶固土(石)堤防的实践创新,胶固土和胶固土石配合比设计的技术创新,掺用粉土代砂配制胶结砂砾石的技术创新等。

5) 研究成果将为粉砂土地基上修建胶固土(石)堤防提供技术支撑,完善胶结颗粒料筑坝(堤)技术体系和质量控制标准,扩大筑坝材料范围,拓展坝工建设理念。胶固土(石)堤防结合绿化设计比传统土堤更适合临近城市的堤防工程,在中小型水利工程和航道工程中的应用具有十分重大的意义。

## 参考文献:

- [1] 贾金生,刘宁,郑瑾莹,等.胶结颗粒料坝研究进展与工程应用[J].水利学报,2016,47(3):315-323.
- [2] 贾金生,郑瑾莹,王月,等.胶结颗粒料坝筑坝理论探讨与实践进展[J].中国科学(技术科学),2018,48(10):1049-1056.

(下转第 114 页)