

水泥-固废基固化膨胀土路基填料路用性能研究

李建飞

(中交第三公路工程局有限公司,北京市 101304)

摘要: 针对因膨胀土强烈胀缩性引发的路基不均匀沉降、路面开裂等工程病害,以及传统水泥固化剂能耗高、工业固废资源化途径匮乏等问题,提出赤泥、粉煤灰、脱硫石膏工业固废协同水泥固化膨胀土的处治方案。通过击实试验确定了固化膨胀土的最佳含水率与最大干密度,并通过无侧限抗压强度试验,系统分析了压实度、固化剂掺量及龄期对固化土强度的影响;同时通过水稳定性试验和冻融循环试验,分别对固化土的水稳定性与抗冻融能力进行了分析。结果表明,随着固化剂用量增加,固化膨胀土试件最大干密度变大、水稳系数提高。在固化剂掺量不变的情况下,随着压实度增加,无侧限抗压强度也随之增大。在压实度不变的情况下,随着固化剂掺量增加,其无侧限抗压强度也随之增大。随着龄期的增加,固化土的无侧限抗压强度明显增大。

关键词: 固废基固化;赤泥;粉煤灰;脱硫石膏

中图分类号: U416.1;TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0089-06

Study on Pavement Performance of Cement-Solid Waste-based Solidified Expansive Soil Subgrade Fillers

LI Jianfei

(China Communications Third Highway Engineering Bureau Co., Ltd., Beijing 101304, China)

Abstract: To address the engineering issues such as subgrade differential settlement and pavement cracking caused by the significant swelling and shrinkage characteristics of expansive soil, as well as the problems such as high energy consumption of traditional cement stabilizers and the lack of resource utilization channels for industrial solid waste, a treatment scheme for industrial solid wastes such as red mud, fly ash and desulfurization gypsum in combination with cement-solidified expansive soil is proposed. The compaction tests are conducted to determine the optimum moisture content and the maximum dry density of the solidified expansive soil. The unconfined compressive strength tests are performed to systematically analyze the effects of compaction degree, stabilizer content and curing age on the strength of the solidified soil. The water stability tests and the freeze-thaw cycle tests are carried out to analyze the water stability and freeze thawing resistance of solidified soil respectively. The results indicate that with an increase of stabilizer content, the maximum dry density of solidified expansive soil specimens increases and the water stability coefficient of the specimens improves. When the stabilizer content remains constant, the unconfined compressive strength increases with an increase of compaction degree. Under a constant compaction degree, the unconfined compressive strength also increases with an increase of stabilizer content. Furthermore, the unconfined compressive strength of the solidified soil obviously increases with the curing age increasing.

Keywords: solid waste-based solidification; red mud; fly ash; desulfurized gypsum

0 引言

膨胀土因富含蒙脱石等强亲水性黏土矿物,表现出明显的胀缩性、裂隙性及超固结性^[1]。自然环境干湿交替作用下,这类土体易发生剧烈体积变形,从而导致路基不均匀沉降、路面开裂等工程问题^[2-5]。在膨胀土边坡工程中,其特殊的物理力学性

质易导致边坡失稳,引发滑坡灾害并造成重大经济损失^[6]。我国膨胀土面积约占陆地总面积的1/3,每年因膨胀土工程地质灾害造成的经济损失达数百亿元^[7]。

因此,如何有效抑制膨胀土的胀缩性并控制其裂隙发育,是学术界与工程界多年来共同面对的问题与挑战^[8]。近年来,膨胀土改良研究主要围绕矿物调控^[9]、力学增强^[10]、环境模拟^[11]这3部分展开。工程上通常采用土质改良的方法来降低其危害,土体改良法主要分为物理和化学改良两大类^[12]。叶万

收稿日期: 2025-11-09

作者简介: 李建飞(1987—),男,学士,工程师,从事工程管理工作。

军等^[13]通过室内试验系统研究了干湿循环作用下膨胀土的开裂与收缩特性。谭波等^[14]深入分析了膨胀土裂隙发育的时空规律及关键影响因素。吕海波等^[15]开展了膨胀土强度在干湿循环作用下的衰减试验研究。徐彬等^[16]系统揭示了膨胀土强度的影响因素与演化规律。为此,学者们进行了广泛研究,并取得了丰富的研究成果^[17]。边加敏等^[18]通过试验研究了石灰对膨胀土强度的改良效应。高建伟等^[19]做了一系列用水泥改良膨胀土强度的试验。冯美果等^[20]则聚焦粉煤灰对膨胀土水稳定性的改性效果。

本文以典型山东枣庄膨胀土为研究对象,用水泥、粗粉煤灰、赤泥、脱硫石膏为固化剂原材料,通过击实试验、无侧限抗压强度试验及水稳定性试验,分析了固化膨胀土的力学及耐久性能,为固化膨胀土

路基填筑材料提供理论支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料及物理力学性能

本文所采用的水泥为海螺牌P·O 42.5 普通硅酸盐水泥(ordinary portland cement, OPC),所用粗粉煤灰(coarse fly ash, CFA)、赤泥(red mud, RM)、脱硫石膏(flue-gas desulfurization, FGD)来自山东宽信工贸有限公司,外加剂为三聚磷酸钠(sodium tripolyphosphate)。所用土为山东枣庄膨胀土(expansive soil)。拌合用水为自来水。

1.1.1 化学成分

通过X 荧光射线显微镜(XRF)来分析各材料化学成分^[21],如表 1 所示。

表 1 原材料化学成分(%)

材料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	CaSO ₄ ·2H ₂ O
OPC	20.94	6.12	64.34	3.18	1.18	1.68	0.56	2.20	—	—
CFA	52.22	34.68	4.09	5.60	0.31	0.56	0.45	2.09	—	—
RM	10.27	18.26	7.84	46.67	0.56	2.39	6.38	0.10	7.53	—
FGD	—	—	—	—	—	—	—	—	—	93.37
ES	54.38	30.30	0.082	5.69	4.53	0.52	0.13	0.04	—	—

1.1.2 激光粒度分析

通过激光粒度分析仪测得各原材料的粒径特性^[22],如表 2 所示。由表 2 可知,四种原材料平均粒径由大到小分别为:FGD>RM>OPC>CFA。

表 2 原材料粒度参数、比表面积与密度

样品	粒度参数/ μm			比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	表观密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
	D10	D50	D90		
OPC	1.55	11.33	42.36	478	2.89
CFA	1.38	6.87	13.17	624	2.23
RM	2.38	20.73	63.82	317	2.11
FGD	11.28	40.22	88.06	289	2.35

综上所述,CFA 的粒径活性高,利于强度发展;OPC 的高 CaO 含量(64.34%)与较细粒径($D_{50}=11.33\ \mu\text{m}$)协同促进水化反应,生成胶凝产物;赤泥的高比表面积($317\ \text{m}^2/\text{kg}$)则增强其水化活性,为固废材料提供碱性激发环境。

1.2 试验方法

1.2.1 击实试验

土的最大干密度和最佳含水率是后续固化土试验制件的基础数据。依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024),采用多功能电动击实仪进行击实试验,分 5 层装土击实,每层击实 25 次并用削土刀对固化土顶面进行拉毛。

1.2.2 无侧限抗压强度试验

依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020),采用应变控制式无侧限抗压强度仪进行测试。试验时在试件上下放置垫片,确保受压面均匀受力,连续加载至试件破坏,每组制备 6 个平行试件。

1.2.3 水稳定性试验

目前没有明确规定固化土水稳定性的试验方法,许多研究人员通过对水浸泡后和未经水浸泡的固化土无侧限抗压强度的比值来评价固化土水稳定性。分别测试浸水 24 h、未经浸水固化土无侧限抗压强度。固化土水稳系数 r_w (%)计算公式如下:

$$r_w = \frac{R_w}{R_0} \times 100\%$$

式中: R_w 为水中浸泡 24 h 后试件的无侧限抗压强度,MPa; R_0 为不经过水中浸泡的试件的无侧限抗压强度,MPa。

1.2.4 冻融循环试验

在试件冻融循环 1、3、5 次时测试其无侧限抗压强度试验,抗冻性能的对比研究主要依据两项指标:一是冻融后与冻融前饱水无侧限抗压强度的比值,二是冻融循环后试件质量的平均损耗率。依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024),引入抗冻系数 D_f (%)计算公式如下:

$$DF = \frac{R_{FT}}{R_{FS}} \times 100\%$$

式中: D_F 为抗冻系数,%; R_{FT} 为经 n 次冻融循环后试件的饱水无侧限抗压强度,MPa; R_{FS} 为未经冻融循环的试件在饱水状态下的无侧限抗压强度,MPa。

通常认为,抗冻系数 $D_F \geq 70\%$ 时,材料具有良好的抗冻性能,能够满足一般寒区工程的要求; $D_F \geq$

80% 则表明抗冻性能优异。

2 固化剂配合比试验

经过预试验结果,固定固化剂中脱硫石膏掺量为 5%、水泥掺量为 20%,压实度为 97%。研究不同赤泥/粉煤灰比值对强度的影响^[23]。具体试验方案及结果分别如表 3,图 1 所示。

表 3 试验方案及结果

试验编号	固化剂				灰土比	无侧限抗压强度 Rd/MPa	
	FGD 掺量/%	RM 掺量/%	FA 量/%	Cement 掺量/%		7 d	28 d
1	5	60	15	20	20%	1.47	2.54
2		50	25	20		1.72	2.94
3		40	35	20		2.01	3.15
4		30	45	20		2.25	3.69
5		20	55	20		2.12	3.51
6	—	—	—	100		1.76	3.13

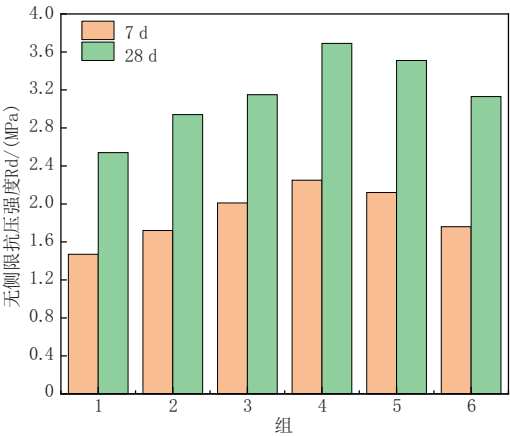


图 1 不同赤泥-粉煤灰比例下固化土无侧限抗压强度(7、28 d)

由表 3、图 1 可知,7、28 d 龄期时,4 组的无侧限抗压强度值最高,3 组和 5 组的稍微次之,1 组的无侧限抗压强度最低。在 7 d 龄期的时候,4 组达到 2.25 MPa,是 1 组、2 组、3 组、5 组和 6 组的 1.53、1.31、1.12、1.06、1.28 倍;在 28 d 龄期的时候,4 组强度最高,高达 3.69 MPa,而最低为 1 组的 2.54 MPa。

固化土强度随赤泥粉煤灰比例先增大而后降低,呈先升后降趋势。赤泥比例过高(如 60%、50%)或粉煤灰比例过低(如 15%、25%)时(第 1、2 组),7 d 和 28 d 的无侧限抗压强度均显著偏低,表明赤泥过量可能抑制胶凝活性;而粉煤灰比例提升至 35%~45% 时(第 3、4 组),强度显著增强,但粉煤灰继续增至 55%(第 5 组)时,强度增幅趋缓甚至下降,可能与胶凝材料协同作用阈值有关。

作为对比,第六组试验采用纯水泥+脱硫石膏固化体系(未掺入赤泥与粉煤灰),其 7 d 和 28 d 无侧限抗压强度分别为 1.76 MPa 和 3.13 MPa。该组强度在

7 d 龄期时略高于第 1、2 组,但低于第 3、4、5 组;28 d 龄期强度虽高于第 1、2 组,但仍显著低于第 4 组(3.69 MPa)和第 5 组(3.51 MPa)。这表明,单一水泥+脱硫石膏体系虽具备一定的胶凝能力,但其强度发展潜力有限。相比之下,掺入适量赤泥与粉煤灰的复合固化体系(如第 4 组)表现出更优的强度性能,说明赤泥与粉煤灰的加入不仅发挥了固废材料的填充效应,还在碱性激发环境下促进了更多胶凝产物的生成,增强了体系的整体胶结能力。

综上所述,为探究固化土无侧限抗压强度,选取第 4 组(ORFG4)进行后续试验。

3 改良膨胀土路用性能研究

3.1 击实试验结果分析

设置 ORFG4 固化剂灰土比分别为 5%、10%、15%、20%、25%,对其进行击实试验,试验结果见表 4 和图 2。

表 4 不同 ORFG4 固化剂掺量下固化土的最佳含水率及最大干密度

指标	ORFG4 固化剂掺量/%				
	5	10	15	20	25
最佳含水率/%	17.29	16.90	16.99	17.16	17.07
最大干密度/(g·cm ⁻³)	1.70	1.72	1.74	1.76	1.76

根据表 4 分析,固化土试样 ORFG4 的最大干密度随固化剂比例提升呈现规律性变化。当材料中固化剂掺量增加时,试样的最大干密度持续增大,这种变化特征主要源于 3 个协同作用机制:首先,随着掺量增加,固化剂颗粒填充基体中的孔隙,置换部分空气,使单位体积内固体质量增加,从而提高干密度;

其次,固化剂可能改善基体材料的颗粒级配,使细颗粒填充粗颗粒间的空隙,减少整体孔隙率;最后,固化材料的水化反应生成的胶凝产物会黏结基体颗粒并填充微观孔隙,使结构更致密。而最佳含水率并没有规律性变化。

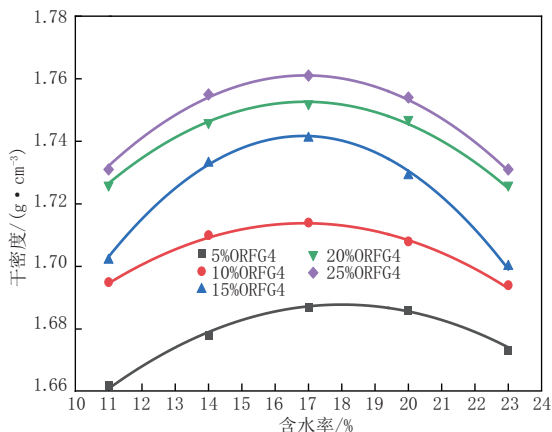


图2 不同赤泥-粉煤灰比例下固化土干密度-含水率曲线

根据图2分析可知,ORFG4固化土的干密度与含水率随着固化剂掺量呈现规律性变化。在固化剂掺量不变的情况下,固化土的干密度随着含水率的持续增加呈先增后降的趋势。这是因为适当增加含水率可使土颗粒表面水膜增厚,降低摩擦阻力,更易压实排列,达到最佳含水率时,颗粒间结合紧密,孔隙最小,干密度达到峰值,超过最佳含水率后,多余水分占据颗粒间孔隙,无法被排出,导致空隙体积增加。

固化土的干密度随固化剂掺量增加呈单调递增趋势。这种变化主要是因为固化剂颗粒会填充土体孔隙,优化级配,减少空隙率,使结构更致密,其次固化剂的水化反应生成的胶凝产物会减少固化土微观孔隙。

3.2 无侧限抗压强度试验结果分析

为系统研究固化剂掺量、压实度及龄期对固化土无侧限抗压强度的作用规律,本文开展了系列对比试验。在标准养生7 d条件下,分别测试了不同压实度(92%、95%、98%)下固化土的无侧限抗压强度随固化剂掺量变化的规律,结果如图3所示。通过试验可知,固化土的强度随固化剂掺量的增高而不断提升。这主要是因为固化剂水化产生的胶凝物质增强了颗粒之间的连接,同时填充了土体中的孔隙,从而提高了结构的密实度。

进一步地,在相同试验条件下分析了压实度对强度的影响,结果如图4所示。可以看出,固化土的强度随压实度的提高而明显变大。压实度的提升促

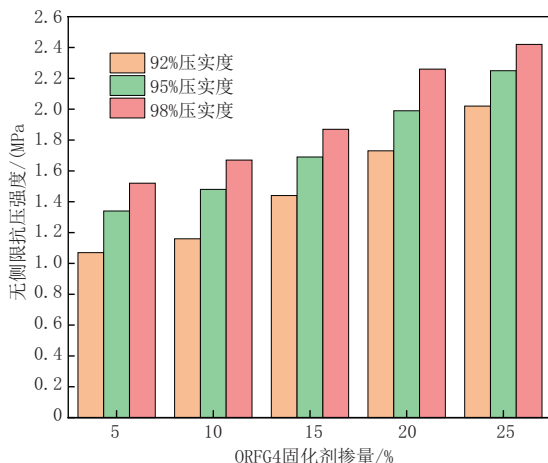


图3 固化剂掺量与固化土强度的关系

使土体颗粒排列更紧密、孔隙减少,从而增大了颗粒间的接触面积与摩擦力,同时也有利于固化剂与土颗粒的充分接触与水化反应,增强整体胶结效果。

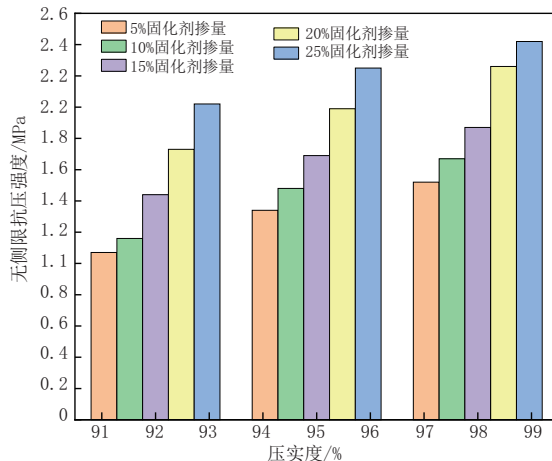


图4 压实度与无侧限抗压强度的关系

此外,为探究龄期的影响,设置了不同固化剂掺量(5%~25%),在98%压实度下分别测试了7 d与28 d标准养生试件的强度,结果如图5所示。试验表明,ORFG4固化土的无侧限抗压强度随龄期增长显著提升,其28 d强度普遍高于7 d强度。这是因为随着养护时间延长,固化剂水化反应更趋充分,生成的胶凝产物不断填充微观孔隙,进一步提升了结构的密实性与整体强度。

综上所述,固化剂掺量、压实度与龄期对固化土无侧限抗压强度的增长均具有促进作用,3者共同作用决定了材料的力学性能发展规律。

3.3 水稳定性试验结果分析

本试验参照《城市道路工程施工与质量验收规范》(CJJ 1—2008)中对稳定土水稳定性的评价逻辑,采用浸水24 h强度比作为指标。通过计算浸水后与浸水前固化土无侧限抗压强度的比值,以评估其水稳定性。

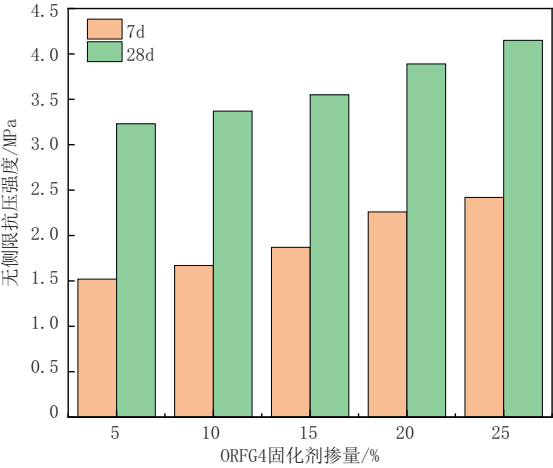


图5 龄期与无侧限抗压强度的关系

首先,在 95% 压实度下,测试了不同固化剂掺量 (5%~25%) 试件在 7 d 与 28 d 龄期下的水稳系数,结果如图 6 所示。研究表明,固化土的水稳定性随固化剂掺量增加而显著提升。这是由于固化剂用量增加时,水化生成的胶凝物质形成更致密的网状结构,有效包裹土颗粒并填充孔隙,从而抑制了水分的渗透与软化作用。

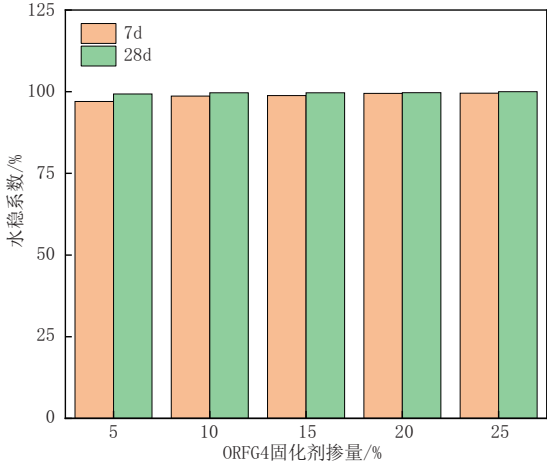


图6 固化剂掺量与水稳定性的关系

其次,通过设置不同压实度 (92%、95%、98%) 并与不同固化剂掺量进行组合试验,分析了压实度对水稳定性的影响,结果如图 7 所示。结果表明,提高压实度可明显提升固化土的水稳系数。压实度的增加使得土体更为密实、孔隙减少,不仅阻碍了水分渗入,也增强了颗粒间的胶结效果,从而提高了材料遇水后的结构完整性。

最后,在 98% 压实度下,对比了不同固化剂掺量试件在 7 d 与 28 d 龄期的水稳定性,结果如图 8 所示。可以看出,固化土的水稳定性随龄期延长而有所增强,28 d 龄期的水稳系数普遍高于 7 d。这是因为延长养护时间能使固化剂水化反应更为充分,进

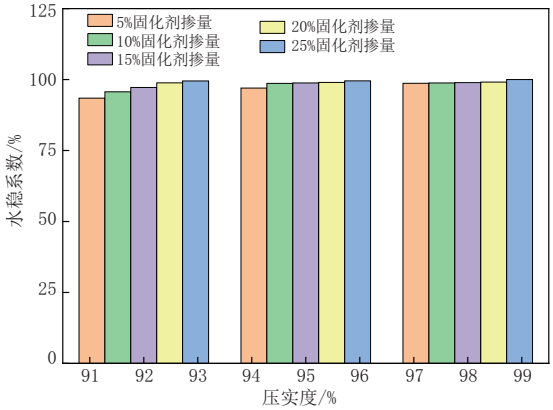


图7 压实度与水稳定性的关系

而促使胶结产物不断生成并填充毛细孔隙,最终形成更致密的结构,提升抗水侵蚀性能。

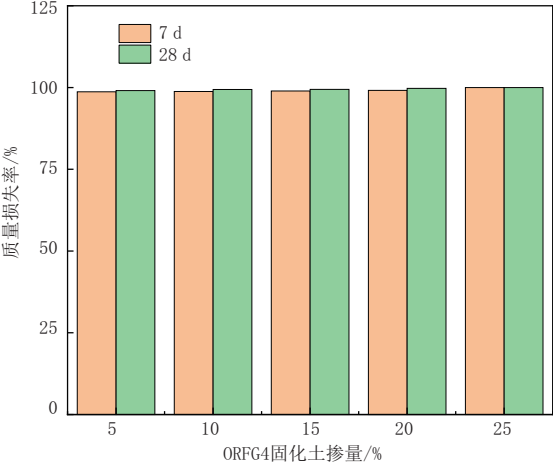


图8 龄期与水稳定性的关系

综上,固化土的水稳定性受固化剂掺量、压实度和龄期的共同影响,3 者均对提升材料的耐水性能具有积极作用。

3.4 冻融循环试验结果分析

在 95% 压实度下,不同冻融循环次数作用下试样的质量变化以及抗冻系数分别如图 9、图 10 所示。

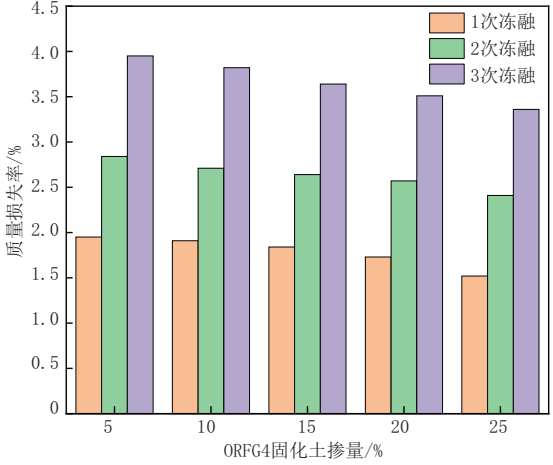


图9 不同冻融次数的质量损失率

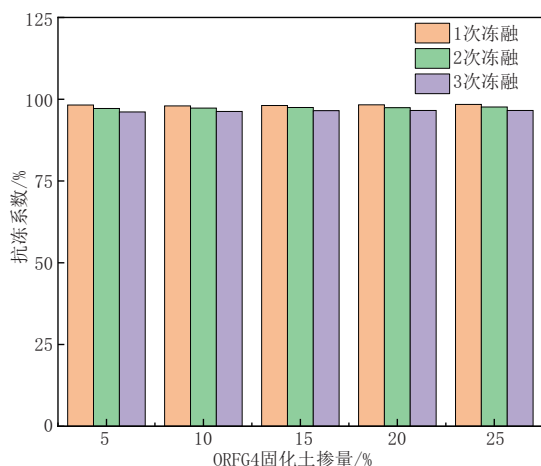


图10 不同冻融次数的抗冻系数

试验结果显示,冻融次数增加,固化土的质量损失率也随之增加。核心原因是冻融次数越多,水冰相变引发的机械应力循环作用越频繁,固化土结构从微裂纹萌生发展为宏观破坏,最终导致质量损失逐渐累积。固化剂掺量越大,冻融循环的质量损失率越小。因为固化剂掺量增加通过“密实孔隙、强化胶结、约束水分、化学稳定”的协同作用,系统性提升固化土抵抗冻融循环的能力。掺量越高,结构损伤阈值越高,质量损失率随冻融次数的增长速率越慢,甚至趋于稳定。

结合试验数据进行抗冻等级判定:当固化剂掺量 $\geq 20\%$ 时,经5次冻融循环后,计算得到的抗冻系数 D_f 均 $\geq 80\%$ 且质量损失率 $\leq 4\%$ 。这表明,在此掺量下的固化土不仅质量损失控制良好,其抗冻系数也达到了规范中对寒区路基填料抗冻性能的合格要求。这一规律在工程中常用于通过优化固化剂配比提升寒区土体结构的耐久性。

4 工程应用建议

基于室内系统试验结果,本文提出的水泥-固废基固化膨胀土技术方案在山东枣庄地区膨胀土路基工程中具备良好的适用性与推广潜力。建议该方案优先应用于填方路基高度不大于3 m的中低填方路段,在此条件下固化土可有效抑制胀缩变形,保障路基长期稳定。

若采用文中确定的最佳配合比(脱硫石膏5%、水泥20%、赤泥30%、粉煤灰45%)进行现场施工,预计可实现路基压实度 $\geq 98\%$,7 d无侧限抗压强度 ≥ 2.3 MPa,满足《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中对路基填料强度指标的要求。同时,固化剂掺量 $\geq 20\%$ 时,水稳系数 $\geq 90\%$,冻融5次后质量损失

率 $\leq 4\%$,可适应枣庄地区多雨、寒冻交替的气候条件,具备较好的耐久性。

目前,该方案尚未进行大规模工程试铺,后续计划在枣庄地区某一级公路路基工程中设置试验段,开展现场验证工作。预计实施后,相较于传统水泥固化工艺,可降低膨胀土路基材料与养护综合成本15%~20%,兼具经济效益与环境效益。传统水泥固化成本达160元/ m^3 ,本文固废基方案可降低成本20%,且满足当地路基设计要求(JTG D30—2015)。工程应用中需重点控制填料含水率、分层压实厚度及初期养护条件,以确保固化土路用性能充分发挥。

5 结论

首先分析了原材料的化学成分与固化剂的粒径;随后,考察了对水泥-固废基固化膨胀土路基建筑材料路用性能;最后研究了改良膨胀土的路用性能。主要研究结果如下:

(1)所采用的固化剂原材料均具有水硬性胶凝活性。通过固化剂配合比试验确定脱硫石膏5%、水泥20%、赤泥30%、粉煤灰45%的配合比为最佳固化剂配合比。

(2)当固化剂掺量固定时,提高压实度可提升无侧限抗压强度;当压实度固定时,增加固化剂掺量也能提高强度。此外,延长龄期对固化土强度的增长具有明显促进作用。

(3)固化剂掺量 $\geq 20\%$ 时,固化土水稳系数 $\geq 90\%$,冻融5次后质量损失率 $\leq 4\%$,抗冻系数 $\geq 80\%$,可满足枣庄地区多雨、寒区膨胀土路基的耐久性要求。

(4)山东枣庄地区膨胀土路基施工中,传统水泥固化成本达160元/ m^3 ,本文固废基方案可降低成本20%,且满足当地路基设计要求(JTG D30—2015)。

参考文献:

- [1] 麻潇文,黄晓虎,杨岚峤.降雨与库水作用下大型膨胀土滑坡变形机制研究[J].中国地质灾害与防治学报,2025,36(5):21-32.
- [2] 许雷,刘斯宏,鲁洋,等.冻融循环下膨胀土物理力学特性研究[J].岩土力学,2016,37(增刊2):167-174.
- [3] 顾义磊,李晓红,赵瑜,等.通渝隧道涌突泥成因分析[J].岩土力学,2005(6):920-923.
- [4] 姜德义,刘春,张广洋,等.公路隧道全断面揭煤防突技术[J].岩土力学,2005(6):906-909.
- [5] 李利平,李术才,张庆松.岩溶地区隧道裂隙水突出力学机制研究[J].岩土力学,2010,31(2):523-528.
- [6] 杨和平,曲永新,郑健龙,等.中国西部公路建设中膨胀土工程地

(下转第175页)