

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.125



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



水泥-石灰复合固化含强风化岩碎石土的路用性能

张新锐¹, 陈炜², 武健², 丁建文¹, 王岩³, 杨铮涛¹

(1. 东南大学 交通学院, 南京 211102; 2. 南京城建城市运营集团有限公司, 南京 210008; 3. 南京城建隧桥智慧管理有限公司, 南京 210036)

摘要:为实现含强风化岩碎石土的资源化利用,基于水泥和石灰对其进行化学改良。通过室内击实试验、无侧限抗压试验、加州承载比试验和干湿循环试验,研究单掺石灰、单掺水泥以及双掺复合改良下含强风化岩碎石土的力学性能、水稳性能以及长期耐久性能,综合比选并获得基于水泥和石灰的最优改良方案。结果表明:经过水泥和石灰两种无机结合料改良后,含强风化岩碎石土的力学性能均不同程度的提高。相较而言,单掺水泥和双掺复合改良后强度提升显著优于单掺石灰,且除7 d龄期的单掺石灰改良外,经其余方案改良后的碎石土均能满足路用底基层强度要求;碎石土经改良后的水稳性能同样获得显著提升。其中,双掺组试样水稳性能最优,单掺水泥组次之,单掺石灰组的提升效果则相较最小。此外,通过干湿循环试验发现,双掺水泥和石灰组在干湿循环作用下的性能劣化显著低于单掺水泥组,其在循环期间的结构剥落、质量损失和高度损失均远小于单掺水泥组。综上所述,含强风化岩碎石土经过不同方案的石灰和水泥改良后均具有良好的路用力学性能,可作为路基填料使用。经强度性能、水稳性能、抗干湿循环性能和经济效益的综合比选,双掺(4%水泥+2%石灰)为建议方案。

关键词:路基;强风化岩;碎石土;无机结合料;干湿循环

中图分类号:U416.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-10

Pavement performance of gravelly soil containing strongly weathered rock stabilized with cement-lime combination

ZHANG Xinrui¹, CHEN Wei², WU Jian², DING Jianwen¹, WANG Yan³,
YANG Zhengtao¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211102, P. R. China; 2. Nanjing Urban Construction Investment Holding (Group) Co, LTD, Nanjing 210008; 3. Nanjing urban construction tunnel & bridge intelligent management CO, LTD, Nanjing 210036)

Abstract: To achieve resource utilization of gravel soil containing highly weathered rock, chemical stabilization was conducted using cement and lime. A series of laboratory tests, including compaction, unconfined compression, California bearing ratio (CBR), and wet-dry cycle tests, were carried out to evaluate the

收稿日期:2025-09-10

基金项目:国家自然科学基金(52378330)

作者简介:张新锐(2000-),男,主要从事工业固废资源化利用研究,E-mail:220233425@seu.edu.cn。

丁建文(通信作者),男,博士,教授,博士生导师,E-mail:jwding@seu.edu.cn。

Received: 2025-09-10

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52378330)

Author brief: ZHANG Xinrui (2000-), main research interest: resource utilization of industrial solid waste, E-mail: 220233425@seu.edu.cn.

DING Jianwen (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: jwding@seu.edu.cn.

mechanical properties, water stability, and long-term durability of the soil treated with lime alone, cement alone, and a cement - lime combination. The optimal stabilization scheme was identified through comprehensive comparison. The results demonstrate that both cement and lime treatments improved the mechanical properties of the gravel soil to varying degrees. Specifically, the cement-only and combined cement-lime treatments provided significantly higher strength gains than lime-only stabilization. With the exception of the lime-treated specimens cured for 7 days, all other stabilization schemes met the strength requirements for road subbase applications. The water stability of the stabilized soil was also markedly enhanced, with the combined cement-lime treatment exhibiting the best performance, followed by cement-only, while lime-alone showed the least improvement. Moreover, wet-dry cycle tests revealed that the cement-lime combination experienced significantly less deterioration than the cement-only group, with much reduced structural spalling, mass loss, and height loss throughout the cycles. In summary, cement and lime stabilization effectively improved the gravel soil containing highly weathered rock to a condition suitable for road construction. Based on a comprehensive evaluation of strength, water stability, resistance to wet-dry cycles, and economic efficiency, the combined treatment with 4% cement and 2% lime (C4L2) is recommended as the optimal solution.

Keywords: subgrade; highly weathered rock; rock-soil mixtures; inorganic binder; wet-dry cycle

随着公路建设蓬勃发展,路基填料的需求量日益增长,为了践行绿色交通工程建设理念,大量基坑开挖和隧道开挖弃渣被用于路基填筑^[1]。土石混合料是一种常见路基填料,但由于土石粒径差距大,性质完全不同,且不同石料因风化程度不同从而强度存在较大差异,所以确定土石混合料的种类非常重要,当混合料中含有崩解性岩石时不得直接用于路堤填筑^[2]。风化岩作为一种强崩解性的特殊填料,具有强度低、抗风化能力差的特性。其遇水后水沿岩石表面裂隙通道渗入,导致矿物骨架薄弱面破裂而发生崩解,存在着遇水软化、承载力急剧下降等特点,且不同风化程度下压实特性、破碎特性、长期稳定性有显著差异。郭寅川^[3]等研究了影响4种风化岩路基长期稳定性的因素,发现水循环模拟试验能较好地判别风化岩的长期路用性能;赵建军等^[4]研究了香港地区强风化花岗岩的力学性能;郑明新等^[5]分析了大量风化泥质粉砂岩和千枚岩的崩解特性,结合力学试验和击实试验得出了风化软岩用作路基填筑的可行性判别方法。

强风化碎石土用于路基填筑,必须满足包括颗粒组成、强度、变形、水稳定性以及耐久性等在内的路用性能要求。若不作改良,直接作为路基填料很容易造成遇水后路基沉降、路面开裂,甚至道路垮塌等病害。如要解决强风化碎石土遇水崩解软化、强度降低的问题,必须掺入外加剂对其进行固化改良,同时配合合理的施工工艺,以达到利用风化岩作为路基填料的目的。朱彦鹏等^[6]对采用黄土、水泥、膨润土和泵送剂改良强风化岩做为流态填筑材料,发现改良后水稳定性和整体强度显著提高。王章琼等^[7]采用石灰改良红砂岩残积土,结果表明,石

灰掺量为7%时,重塑土的压缩模量最大。张渭军等^[8]采用水泥和黄土固化红层软岩,发现水泥掺量7%、黄土掺量20%时,压缩模量最优。陈欣等^[9]探究了MICP固化花岗岩残积土的崩解特性,结果表明,在MICP作用下,随着碳酸钙含量增加,土体抗崩解能力显著增强。刘文骏等^[10]为提高花岗岩残积土的抗崩解性能,采用水泥进行加固处理,结果表明随着水泥含量提高,土样抗崩解性逐步得到提升。汤连生等^[11]发现高岭土、水泥、石灰均能在不同程度上提高土体的抗崩解性能。通常对于不良路基填料,工程中一般采用掺灰改良^[12-14],通过加入石灰来降低路基含水率、减小变形的同时提升路用性能。大量工程实践表明,单掺石灰对颗粒粒径较小且级配均匀的土体的水稳定性及长期耐久性能有一定的提升^[15],但若用于风化岩碎石土这种特殊材料中,可能效果受限,且成本较高,值得一提的是,近年来水泥价格下降,且水泥用于改良碎石土的效果更好,复合掺入进行碎石土性能改良能进一步提升经济性。

笔者依托南京雨花台区机场二通道快速路项目,开展水泥与石灰复合改良隧道基坑开挖出的强风化碎石土的路用力学性能研究。依托工程基坑开挖土为含有强风化岩的碎石土,该碎石土遇水易崩解软化,并导致承载力急剧下降。针对强风化岩碎石土,考虑石灰土水稳定性差、耐久性受限、成本高的问题,选取水泥、石灰进行复合固化,设计9组不同配比,开展系列室内击实试验、无侧限抗压试验、加州承载比试验、水稳试验以及干湿循环试验,探究不同配比下物理力学特性变化规律,以及长期性能劣化规律。期望通过以上研究,将其改良后用

作路基填料,从而减少工程成本、缓解填料短缺,实现资源化循环利用。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用土为南京雨花台区机场二通道快速路项目隧道基坑开挖土,开挖土原貌如图1所示。开挖土为土石混合体,成分较为复杂,由粉质黏土、强-中风化凝灰岩、强风化砂砾岩、强-中风化泥质粉砂岩组成,基本物理力学性质指标如表1、表2所示,土中含石量为53.7%,级配曲线如图2所示。



图1 碎石土原貌

Fig.1 Original appearance of the gravel soil

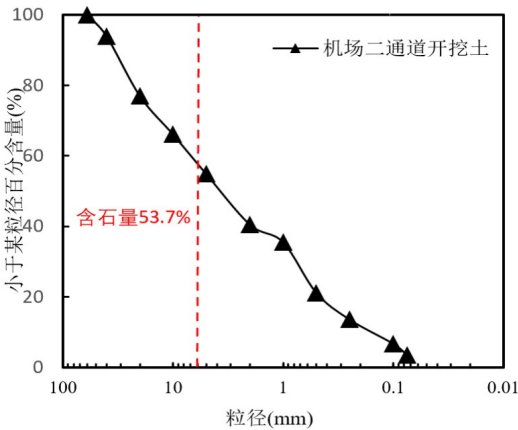


图2 级配曲线

Fig.2 Particle distribution curve

表 1 基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters

天然含水率	密度/(g/cm ³)	孔隙比	液限/%	塑限/%	塑性指数
22.6%	1.91	0.726	31.9	19.3	12.6

土中含有大量风化岩,以砂砾岩为主,砾径2~

3cm,成分为硅质,含量为20%左右,绝大部分风化岩风化程度较高,易破碎,同时裂隙中的黏土矿物结构松散,风化岩泡水后迅速产生张裂纹并崩解,水稳性能极差。图3所示为素土泡水照片,可以看出,素土样在浸水20 min后就迅速崩解形成砂土状碎屑,水稳系数几乎为0,无法直接应用于实际工程,需经改良处理后方能路用。

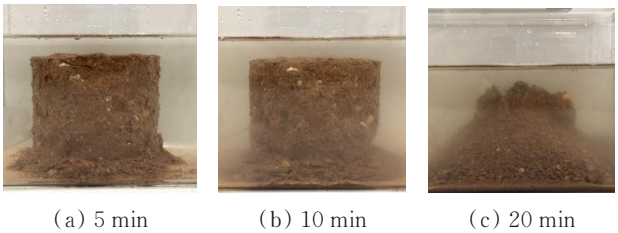


图3 素土浸水崩解情况

Fig.3 Disintegration of the untreated soil

通过筛分法剔除碎石后,重塑土基本物理参数如表1所示,天然含水率为22.6%。根据地勘报告,开挖土中含有砂砾岩、泥质粉砂岩、凝灰岩。表2所示为土中所包含岩石的试验指标,其中砂砾岩主要为中风化,少量强风化,砾石成分为硅质岩,砾径2~3 cm,浸水后软化现象一般,不易崩解;泥质粉砂岩为强风化岩,单轴饱和抗压强度只有0.16 MPa,浸水后软化现象明显,容易产生张裂纹并崩解;凝灰岩风化程度更高,可徒手掰碎,制样无法成型,未能给出该种类岩石试验指标。

1.2 试验方法

水泥、石灰能一定程度提升土体抗崩解性能,选取水泥、石灰作为改良材料,试验方案设计单掺水泥组、单掺石灰组,以及双掺水泥石灰组。现有研究表明,石灰、水泥掺量设置在3%~9%之间对土体固化效果较好^[15-17],掺量过高后的性能提升不明显,且会成本过高,不利于工程应用。考虑到在土石混合料中固化剂会存在反应不完全的问题,根据以往研究^[15-17],研究选取总改良材料掺量分别为3%、6%、9%,双掺组水泥石灰比例为2:1设计配比,如表3所示。

试验前将现场取回的土摊铺晾晒使其自然风干,并测量风干含水率,之后根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[18]以及《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024)^[19]开展击

表 2 风化岩岩石试验指标

Table 2 Test parameters of weathered rock

名称	密度/(g/cm ³)	单轴抗压强度/MPa	单轴饱和抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	风化程度
砂砾岩	2.4	1.33	0.97	5.1	0.26	强-中风化
泥质粉砂岩	2.3	1.46	0.16	4.2	0.23	强风化

表 3 试验配比设计

Table.3 Experimental mix proportion

组别	水泥含量/%	石灰含量/%	组别	水泥含量/%	石灰含量/%
A0	0	0	L6	0	6
C3	3	0	L9	0	9
C6	6	0	C2L1	2	1
C9	9	0	C4L2	4	2
L3	0	3	C6L3	6	3

实试验、无侧限抗压试验、CBR 试验、水稳试验。

击实试验采用重型Ⅱ-2击实进行,为了避免尺寸效应,按照粒径小于试筒 1/5 的原则,将土过 3 cm 筛后进行试验。根据不同配比,每组配比预先准备 5 个含水率,每级含水率递增 2%,将结果通过二次多项式拟合为击实曲线从而得出不同配比最优含水率和最大干密度,为后续无侧限、CBR 试验制样时的压实度控制提供依据。击实试验前一天备土并闷料 24 h,石灰可预先加入拌和均匀闷料,水泥则在加入后 1h 内完成击实。CBR 试验根据击实结果按照 96% 压实度制样,制样方法参考击实试验,每组配比 3 个平行样,击实成型后泡水 4d,测量膨胀量并进行 CBR 贯入试验。

无侧限抗压强度试验中,综合考虑粒径大小、土量、试验难度并参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441-2024)^[19]规定,中粒材料选用 $\Phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 圆柱体试样进行试验。按照规范要求过 26.5 mm 筛后进行制样,按照最优含水率、最大干密度、压实度 96% 备料并闷料 24 h,将试样少量多次填入模具。石灰在闷料前加入,水泥加入拌匀后 1h 内完成制样,试样一次静压成型且每组每个龄期制备 6 个平行样,设定养护龄期为 7、14、28 d。到养护龄期前 1 d 时,取出 3 个试样泡水 1 d,在对应养护龄期与正常养护样同时进行抗压试验,将同一养护龄期泡水抗压强度与标准养护抗压强度的比值作为衡量水稳定性的指标。

为了进一步查明固化风化碎石土在不良条件下的性能劣化规律,选取两个配比进行多级干湿循环试验,干湿循环试验操作步骤参考相似研究^[20-21]。将试样标准养护 28 d 后,取出放入烘箱 60℃ 烘干直至质量无明显变化,称重并测量高度、直径,接着将试样放入水中浸泡 24 h,为一次干湿循环。干湿循环后进行无侧限抗压试验并重复烘干和浸泡操作,每次湿循环和干循环之后都以初始值为标准测量重量、高度与强度变化,共进行 15 级干湿循环。

2 试验结果分析

2.1 击实试验结果分析

10 组配比的击实结果如表 4 所示。从表格数据可以看出,单掺水泥时,最大干密度呈先增后降趋势。3% 掺量时达到最大值 1.98 g/cm³,随水泥掺量增加到 6%、9%,最大干密度有所下降。其因为,低掺量时(3%)水泥颗粒填充土体中粗颗粒(卵石)与细颗粒(粉质黏土)间的孔隙,以物理填充的方式直接提高了干密度。此外,反应初期,大部分水泥以细颗粒的状态存在于土中,对土石颗粒起到良好的“润滑”作用,协助其在击实功下重排并达到更密实状态。值得注意的是,水泥掺量较低时,水泥的水化作用较小,吸收水分较少而不影响水对土石颗粒的润滑效果,且其形成的水化产物规模对抵抗击实功几乎没有作用。故该阶段水泥颗粒的物理填充作用造就了最大干密度增大现象。

表 4 击实试验结果

Table.4 Compaction test results

组号	配比	最大干密度/(g/cm ³)	最优含水率/%
A0		1.89	8.8
C3	3% 水泥	1.98	9.8
C6	6% 水泥	1.96	9.8
C9	9% 水泥	1.95	10.2
L3	3% 石灰	1.90	10.3
L6	6% 石灰	1.86	10.7
L9	9% 石灰	1.87	11.3
C2L1	2% 水泥+1% 石灰	1.93	9.9
C4L2	4% 水泥+2% 石灰	1.92	10.2
C6L3	6% 水泥+3% 石灰	1.91	11.1

水泥掺量提高后,水泥水化需吸收更多水分,并在短时间内水化初步形成一定规模具有强度的絮状结构。一方面减少了原本用于润滑的水分,另一方面具有结构强度的絮状结构会抵抗击实功的压实作用,阻止颗粒向更紧密的状态发展,表现为最大干密度随水泥含量上升而下降。单掺石灰时,最大干密度随掺量增加而持续下降,从 3% 掺量时的 1.90 g/cm³ 下降到 9% 掺量时的 1.85 g/cm³,这主要是因为石灰的相对密度小于碎石土^[22],物理层面上导致加入后试样总体的干密度下降。另一方面,石灰消耗水的能力比水泥更强,其更易吸收水分而减少用以土石颗粒间润滑的水分。化学层面上,石灰表面钙离子的正电荷会中和土颗粒表面携带的负电荷,经由范德华力作用相互吸引形成絮凝结构,该结构包含大量无法被击实功排出的团粒内部孔隙,使其与原结构相比更加松散,该絮凝效应随石灰掺量提高而增强,团粒结构也更稳定,最大

干密度随之持续减小^[20]。

对于双掺改良碎石土,最大干密度随总掺量呈先增加后稳定的趋势,低掺量(3%总掺量)时水泥的物理填充效应占据主导地位,干密度升高至 1.93 g/cm^3 ;随着总掺量的升高,石灰引起的絮凝团粒结构逐渐发挥作用,且水泥绝对含量的增加消耗了更多原本用于颗粒间润滑的水分,二者共同导致最小干密度的减小。单掺水泥或石灰都会使最优含水率有所增加。添加3%~9%水泥后,最优含水率有少量增加(1%~1.4%),而添加石灰对最优含水率的提升更明显,不同掺量分别增加1.5%、1.9%、2.5%,由此可见,石灰具有较高的吸水性和较强的持水能力。对于双掺改良碎石土,最优含水率随着总掺量提高而有所升高,但增幅低于纯石灰改良土。

2.2 CBR 试验结果分析

根据试验结果,素土 CBR 值为 7.3%,膨胀量为 1.1%,虽然强度基本满足规范要求,但膨胀量较大(规范要求 $<0.5\%$)。图 4 为 9 组固化土的 CBR 值以及膨胀量,由图 4 可以看出,单掺水泥时,随着掺量增加, CBR 值分别较素土提升 76.3%、102.7%、177.9%。C3 组膨胀量相较素土降低 1%,但随水泥掺量增加,膨胀量也相继有少量增加,由此可见添加水泥后,水泥水化产物(C-S-H 凝胶等)能迅速填充孔隙,阻止水分进入,且水化产物黏结细颗粒形成团聚结构,并于粗颗粒之间形成“胶结桥”。固化前,因粒径 5mm 以上的粗颗粒含量较少(小于 20%),粗颗粒悬浮在土体中间,不参与受力,而固化后水泥的胶凝作用使得细颗粒团聚体和粗粒之间形成稳定结构,粗颗粒受力比例明显提高,整体强度有显著提升。随掺量提高,强度上升的同时,膨胀量也有所增加,这可能是因为水泥添加量过多时($>6\%$)导致胶凝产物过于饱和,形成收缩裂缝从而导致水分浸入引发膨胀量回弹。

单独添加石灰时,随掺量增加, CBR 值相较素土分别提升 46.9%、58.8%、91.7%,膨胀性相比素土有所改观且膨胀量呈先降后增趋势,为 0.3%~

0.4%。加入石灰后,生石灰吸水生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,随后 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与土中的活性硅、铝离子发生火山灰反应生成水化硅酸钙、水化铝酸钙,这些成分填充了土体孔隙,形成胶凝结构并和粗颗粒组成紧密的土体结构;且 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会与二氧化碳缓慢反应生成 CaCO_3 ,最终表现为强度有所提高。但石灰由于反应速率不及水泥且反应生成产物的强度远低于水泥水化产物强度,最终强度提升远小于单掺水泥。在膨胀性方面,在低掺量(3%)时,石灰与土颗粒表面的离子交换作用占据了主导地位,土颗粒表面的低价阳离子与石灰材料中的高价阳离子置换,颗粒表面扩散层变薄,从而减小了膨胀性,与素土相比膨胀量减小了 0.7%;而当掺量增高到 9% 时,颗粒表面的低价阳离子置换已完成, CaO 吸水产生的膨胀效应占据了主导地位,致使膨胀量有所上升。

从图中后 3 列双掺组数据可以看出,在总掺量不变的情况下(3%、6%、9%)双掺能极大提高土体的强度,并减小膨胀量。随总掺量提高, CBR 值分别增加 82.1%、122.9%、218.9%,强度提升超过了单掺水泥。这可能是因为土中含有大量砾石、强风化岩,水分分布不均匀导致部分风化岩块崩解缓慢,单独添加水泥时很难均匀拌和。加入石灰后,离子交换作用使得黏土颗粒扩散层厚度减少,一些微小的黏粒形成较大团粒,此时水更多储存在团粒之间的孔隙中,在搅拌和压实过程中,土中水分分布更加均匀,使得部分含水量较低风化岩块加速崩解。石灰颗粒填充风化岩块孔隙后,也能通过润滑作用进一步加速风化岩崩解,最终使得拌合均匀度明显改善,拌合时间减少。双掺时水泥混合更加均匀,反应更为充分,强度更高。在膨胀方面,石灰的加入使黏土矿物扩散层中高价阳离子浓度增加,扩散层变薄从而减少膨胀性,结合水泥水化的收缩效应使最终膨胀量控制在 0.2% 以下。总体而言,在总掺量不变的情况下,综合考虑 CBR 值以及膨胀数据,双掺组改良效果最好,单掺水泥次之,单掺石灰相对最差。

2.3 无侧限抗压试验结果分析

图 5 为各组无侧限抗压强度随龄期的变化,以及泡水前后的强度对比,未加固化剂的素土无侧限抗压强度极低,只有 0.13 MPa。

从图 5 中实线可以看出,加入固化剂后,同一龄期内无侧限抗压强度随水泥、石灰掺量增加而增大,总掺量相同时,固化效果为水泥最好、复合固化其次、石灰效果最差。单掺水泥时,三种掺量 7d 强度分别为 1.48、2.01、2.18 MPa,对比素土分别提高 1.35、1.88、2.05 MPa。

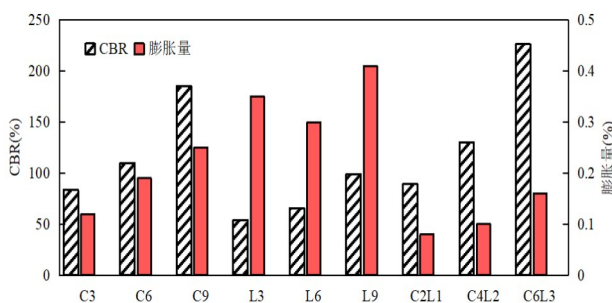


图 4 CBR 试验结果

Fig.4 CBR test results

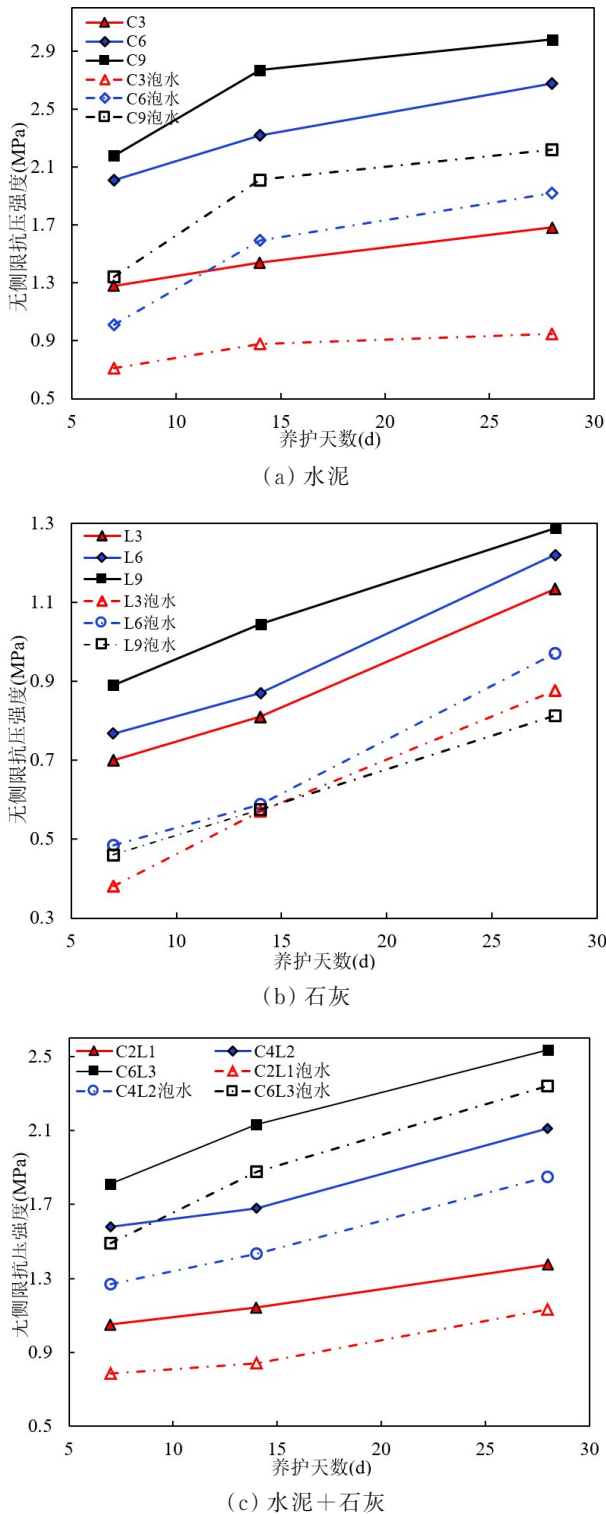


图5 无侧限抗压试验结果

Fig.5 Unconfined compressive strength test results

水泥在初期就能迅速进行水化反应,生成的水化产物填充土颗粒孔隙,形成的团聚体与砾石之间形成胶结连接,极大提升整体强度。掺量从3%提高到6%时,强度上升了36%;从6%提高到9%时,部分水泥颗粒可能因被土石包裹或局部水化环境差异导致反应不充分,导致强度上升只有8%左右。3种掺量28 d强度分别为1.68、2.68、2.98 MPa,比

7d强度分别提高了0.4、0.67、0.81 MPa,强度增长主要在7~14 d完成。3种石灰掺量试验组在7d龄期的无侧限抗压强度分别为0.70、0.77、0.89 MPa,对比素土分别提高了0.57、0.64、0.76 MPa。石灰中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会与二氧化碳发生缓慢反应生成 CaCO_3 ,但反应产物的强度远不及水泥水化产物,强度提升较少,在9%掺量时强度仍不能满足规范规定的高速、一级公路的底基层无侧限抗压强度要求(石灰稳定材料的7d无侧限抗压强度 ≥ 0.8 MPa)。28 d强度分别为1.13、1.22、1.29 MPa,强度增长较为缓慢。

采用水泥石灰双掺改良(水泥:石灰=2:1)后,总掺量3%、6%、9%的7d龄期强度分别为1.05、1.48、1.81 MPa,相比素土增加0.92、1.35、1.68 MPa;28 d强度为1.37、2.11、2.53 MPa,相比素土提升分别为1.24、1.98、2.4 MPa。这可能是因为石灰的加入能显著改善土体的和易性,同时石灰颗粒渗入风化岩的孔隙内部并通过润滑、膨胀作用加速风化岩崩解,石灰良好的持水性能也为水泥充分进行水化反应提供了所需条件。在总掺量一定时,复合固化的强度能达到单掺水泥强度的80%左右,可见采用石灰部分替换水泥能够减少拌合时间和提高拌合均匀度^[23],并保证强度削减不大。

在水稳定性方面,如图3所示素土浸水后在短时间(20 min)内完全崩解,且崩解物主要为泥状、颗粒状,水稳系数几乎为0,根据吴道祥等^[24]对软岩崩解程度研究可定性划分为强崩解岩。风化岩在浸水环境中持续吸水,产生的不均匀张力加速了裂隙发展,从而进一步降低岩石耐崩解性^[25]。图7中L6、C4L2泡水1d仍无明显变化,仅C6表面出现少许裂缝。图5中的虚线为不同龄期不同配比的泡水强度,可以看出,各组28 d龄期内水稳系数不断上升,28 d达到最大。从图6中三组水稳试验结果对比可以看出,双掺固化强度下降最小、单掺水泥其次、石灰对水稳性能的提升最弱。水泥组28 d水稳系数分别为0.56、0.72、0.75,掺量从6%增加到9%变化不大;石灰组28 d水稳系数为0.54、0.67、0.64,从结果可以看出,单掺水泥或石灰都能显著改善土体水稳定性,水化产物能形成致密的结构防止水分渗入,但当石灰掺量从6%提高到9%时,水稳系数反而下降,这可能是因为石灰吸水膨胀,且早期生成的碳酸钙产物较少无法完全填补孔隙,水分进入导致结构劣化强度降低,水稳系数降低。

反观双掺组,28 d三种掺量水稳系数分别高达0.82、0.88、0.92,远大于单掺组。石灰的加入能改善水泥的掺拌均匀性^[23],提高了土体的保水性使得

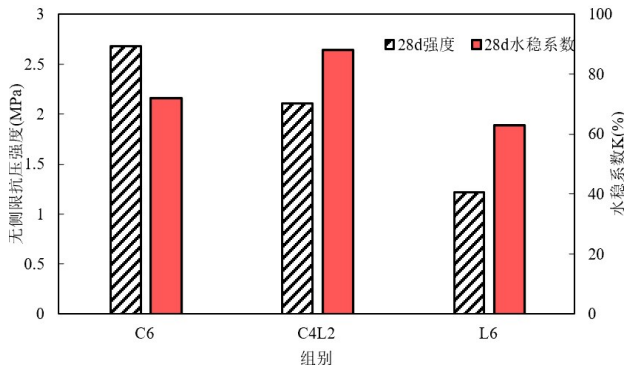


图6 6%掺量28d强度水稳系数对比

Fig.6 Comparison of 28d strength and water stability coefficients at 6% dosage

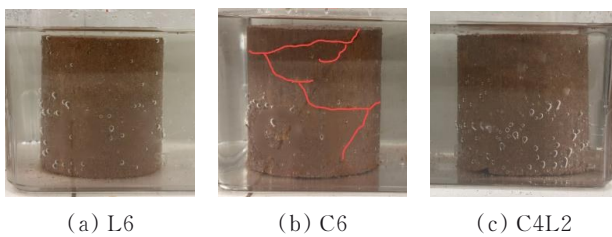


图7 固化土浸水崩解情况

Fig.7 Disintegration of the treated soil

反应更为充分,水泥水化产物填充孔隙的同时胶凝产物包裹石灰的碳化产物,在砾石与团聚体之间形成联结,进一步提高了整体稳定性,3种掺量试样泡

水后虽然强度有所下降(17%~29%),但28d水稳系数相比7d都提高了0.1左右。总体来说,3种配比在6%掺量时就能达到较好的固化效果,掺量进一步提高到9%时,对强度和水稳定性的提升效果逐渐变弱。从图7可以看出,C4L2的28d强度比L6高73%,水稳系数高0.21,强度为C6的78.7%,但水稳系数高出0.16,进一步证明水泥石灰双掺相比单掺有更好的固化效果。

2.4 干湿循环试验分析

考虑到工程项目所在地南京市夏季气温高,时常遭受暴雨侵袭,在降水与蒸发的季节性作用下,道路路基长期处于饱和与非饱和交替的环境中^[26],因此,有必要考虑多次干湿循环对路基填料的影响。结合CBR、无侧限抗压强度试验结果,选取两组6%总掺量(C6、C4L2)进行15级干湿循环试验,为了使试验效果更明显,每两级循环测量无侧限抗压强度。

图8为标准养护28d两个配比(C6、C4L2)干湿循环后的顶面和侧面照片对比。由图8可见,试验过程中,C6试样在第3级循环开始侧面掉块严重,顶面也有较大损失,整体虽然未出现裂缝,但随着循环级数增加掉块愈发明显;反观C4L2,仅试样侧面有少量剥离,直到7级循环都未见明显掉块。

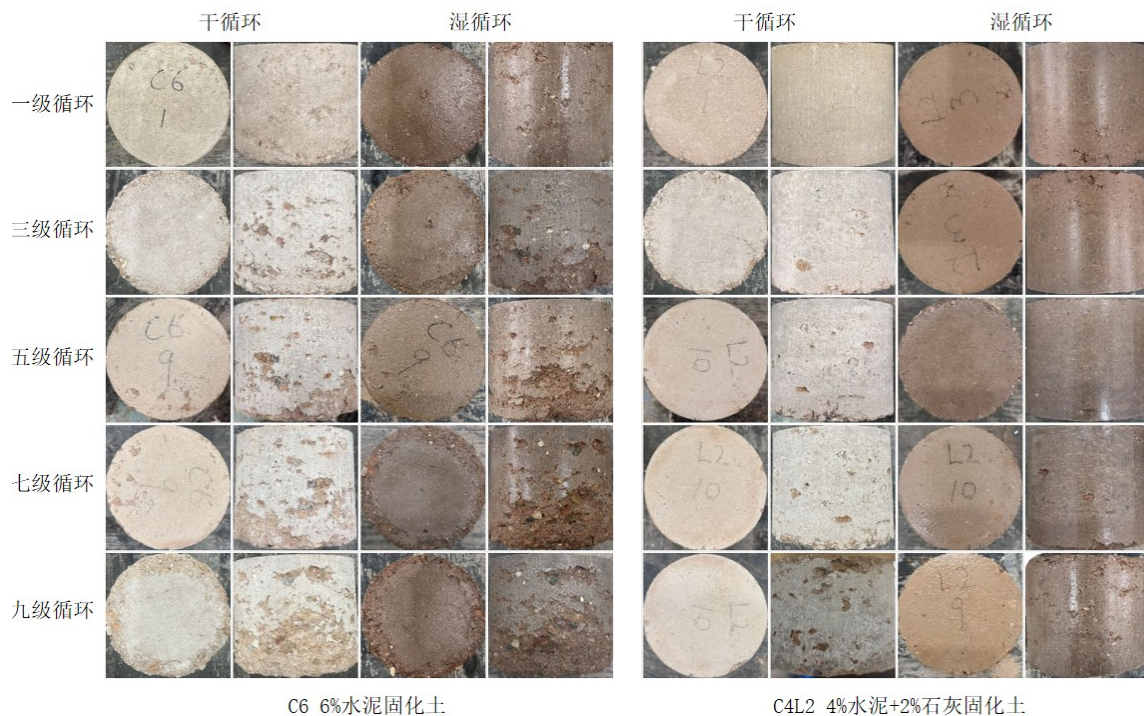


图8 干湿循环作用下试样表观状态变化

Fig.8 Apparent state changes of samples under wet-dry cycles

图9为两组配比每级循环后的质量损失与高度损失,干循环为60°持续烘干24h,质量损失为试样

在完全干燥状态下的质量变化值。由试验结果可见,第1~5级循环时,质量损失和高度损失逐渐增

大,第5级C6、C4L2质量损失分别为2.2、6.3 g,从第5级开始有所下降并逐渐稳定。C6质量损失最大为19.5 g,高度损失最大为0.62 mm,而C4L2两者分别为6.4 g和0.25 mm,抗干湿循环的能力更优。结合图8试验过程中试样外观状态对比可知,随着循环不断进行,试样逐渐劣化,浸水后侧面掉块,顶面剥落造成质量和高度减少,从第9级循环开始,试样内部结构劣化趋于稳定,质量高度损失逐渐下降并逐渐稳定。

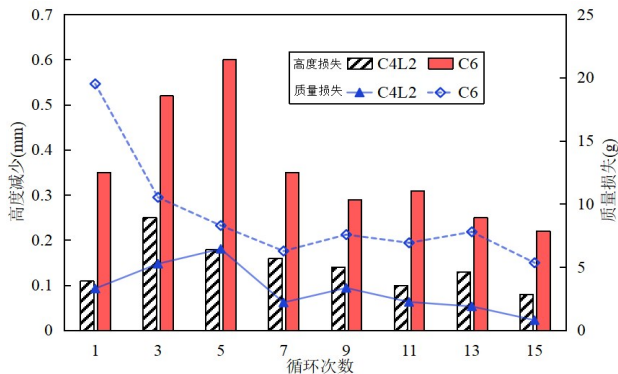


图9 干湿循环作用下高度与质量损失曲线

Fig.9 Curve of mass loss and height loss under wet-dry cycle

两组试样无侧限抗压强度随干湿循环级数变化规律如图10所示,经过多次干湿循环后颗粒间的界面脱黏和裂缝扩展导致整体力学性能下降^[26]。

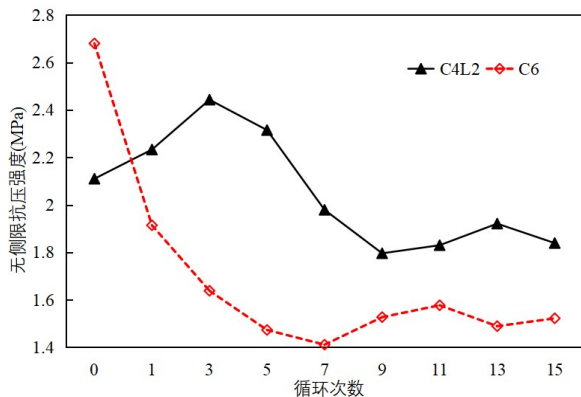


图10 干湿循环作用下无侧限抗压强度变化曲线

Fig.10 Curve of unconfined compressive strength under wet-dry cycles

从图中黑色实线可以看出,C4L2强度先升后降,第3级循环后最高为2.44 MPa,对比28 d标养试样增加了15.8%。随着循环级数增加,强度逐渐下降并在9次循环过后趋于稳定,9级干湿循环后C4L2、C6的强度分别为初始值(标养28 d)的85.1%、56.9%。

在未进行干湿循环时,C6的无侧限抗压强度高于C4L2。干湿循环开始后,C4L2的无侧限抗压强度随循环级数呈现先增后减的趋势,这似乎与干湿

循环导致的性能劣化结论不符。其实不然,在历经28 d标准养护后,水泥基本完全水化,而石灰激发的火山灰反应则仍处初期阶段,其对C4L2组别的强度贡献尚未完全发挥。值得注意的是,谢荣等^[27]指出干湿循环提供的高温(70°)和高湿条件能够对火山灰反应起到显著的加速作用,促使胶结产物的补充生成,再次增强颗粒间胶结作用并提升试样强度。而当火山灰反应基本完成后,进一步干湿循环对试样的性能劣化效应则将占据主导地位,强度会因干湿劣化而逐渐减小。

干湿循环试验结果表现为C4L2组试验初期(1~3级循环)强度有所上升。4~5级循环开始试样内部结构随干湿循环有所损坏,强度开始大幅下降,但历经9级循环后强度仍能稳定在1.8 MPa以上,最大强度损失率为14.9%。而经过3级循环后C6强度降幅较大,只有初始值的61.1%。与此同时,由于试样内外含水率不同,表面会产生拉应力,而颗粒间的胶结力无法抵抗拉应力,并且水分沿裂隙渗入^[28],胶结体被破坏导致掉块严重,强度进一步下降。虽然在9级循环后强度也能稳定在1.5 MPa左右,但仅为初始值的56.9%,强度损失率最大高达47.4%。可见,双掺C4L2相较于单掺水泥C6试样保水性强、反应更加充分,干湿循环后强度仍有上升空间,试样内部更加密实的同时耐久性能更优,整个过程强度波动幅度小于C6,稳定性更好。

3 结论

以南京机场二通道某明挖隧道基坑和路基填筑工程为依托,针对施工开挖产生的强风化碎石土资源化利用问题开展了系列改良试验,探究了风化碎石土经过水泥与石灰改良后的路用力学性能,主要结论如下:

1)采用水泥与石灰固化改良后,风化碎石土力学性能得到极大改善,28 d内无侧限抗压强度普遍提升30%~40%,且强度增长主要在7~14 d完成;CBR值提升较大,且膨胀量控制在0.5%以内。

2)改良后风化碎石土的水稳性能显著提升。素土泡水20 min完全崩解,双掺对水稳系数提升最大,水泥固化其次,单掺石灰提升效果最小。6%总掺量下双掺比单掺水泥水稳系数高出16%。

3)双掺改良风化碎石土在干湿循环过程中性能劣化小于单掺水泥组。单掺6%水泥在第3次循环就出现明显掉块,强度在9次循环后稳定在初始值的57%左右;4%水泥+2%石灰土在整个循环中无明显掉块,表现出更优秀的耐久性和稳定性,强度在前3次循环中上升15%,之后逐渐下降并稳

定在 1.8 MPa 左右。

4)经不同方案的水泥和石灰改良后,强风化岩碎石土的力学性能、水稳性能、抗干湿循环性能均有显著提升,能够满足路用需求,有效解决原风化碎石土遇水易崩解问题。相较而言,双掺水泥石灰并控制总掺量为 6%(C4L2)的改良方案为兼顾路用要求和经济效益的最优方案。

参考文献

- [1] PATEL S, SHAHU J T. Comparative study of slags stabilized with fly ash and dolime for utilization in base course [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(10): 04017168.
- [2] 公路路基施工技术规范: JTG/T 3610—2019 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
Technical Specifications for Construction of Highway Subgrades: JTG/T 3610—2019 [S]. Beijing: China Communications Press, 2019. (in Chinese)
- [3] 郭寅川, 申爱琴, 高韬, 等. 风化岩路基填料路用性能试验与风化程度评价[J]. *交通运输工程学报*, 2014, 14(3): 15-23.
GUO Y C, SHEN A Q, GAO T, et al. Assessment of weathering degree and road performance test of weathered rock as subgrade filling [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2014, 14(3): 15-23. (in Chinese)
- [4] 赵建军, 王思敬, 尚彦军, 等. 全风化花岗岩抗剪强度影响因素分析[J]. *岩土力学*, 2005, 26(4): 624-628.
ZHAO J J, WANG S J, SHANG Y J, et al. Control factors on shear strength of completely decomposed granite [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(4): 624-628. (in Chinese)
- [5] 郑明新, 方焘, 刁心宏, 等. 风化软岩填筑路基可行性室内试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(增刊 1): 53-56.
ZHENG M X, FANG T, DIAO X H, et al. Experimental study on feasibility of filled subgrade with weathered soft rock [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(Sup 1): 53-56.
- [6] 朱彦鹏, 王浩, 刘东瑞, 等. 基于正交设计的风化砂岩流态固化土抗剪强度试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(增刊 1): 46-51.
ZHU Y P, WANG H, LIU D R, et al. Experimental study on shear strength of fluid solidified soil of weathered sandstone based on orthogonal design [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(Sup 1): 46-51.
- [7] 王章琼, 高云, 沈雷, 等. 石灰改性红砂岩残积土工程性质试验研究[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(2): 416-421.
WANG Z Q, GAO Y, SHEN L, et al. Engineering properties of lime-modified red sandstone residual soil [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(2): 416-421. (in Chinese)
- [8] 张渭军, 王永胜, 马滔. 基于正交设计的红层软岩改良土压缩模量试验研究[J]. *地震工程学报*, 2022, 44(2): 264-269.
ZHANG W J, WANG Y S, MA T. Experimental study on the compression modulus of red-bed soft rock improved soil based on orthogonal design [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2022, 44(2): 264-269. (in Chinese)
- [9] 陈欣, 安然, 张先伟, 等. MICP 固化花岗岩残积土的崩解特性[J]. *长江科学院院报*, 2025, 42(2): 138-144, 171.
CHEN X, AN R, ZHANG X W, et al. Disintegration characteristics of MICP-treated granite residual soils [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2025, 42(2): 138-144, 171. (in Chinese)
- [10] 刘文骏, 陈秋南, 赵磊军, 等. 水泥改良花岗岩残积土的强度和崩解特性研究[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 31(1): 54-59.
LIU W J, CHEN Q N, ZHAO L J, et al. Research on the strength and disintegration characteristics of the granite residual soil improved with cement [J]. *Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 31(1): 54-59. (in Chinese)
- [11] 汤连生, 许瀚升, 刘其鑫, 等. 改良花岗岩残积土崩解特性试验研究[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(10): 75-87.
TANG L S, XU H S, LIU Q X, et al. Experimental study on disintegration characteristics of improved granite residual soil [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(10): 75-87. (in Chinese)
- [12] SHINAWI A E L. Instability improvement of the subgrade soils by lime addition at Borg El-Arab, Alexandria, Egypt [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2017, 130: 195-201.
- [13] VIET DUC N. Experimental water quality analysis from the use of high sulfuric fly ash as base course material for road building [J]. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 2019, 9(5): 4627-4630.
- [14] 赵天宇, 曹志伟, 张宗伟, 等. 石灰与水泥对甘肃省黄土路基填料改良效果研究[J]. *公路*, 2021, 66(10): 51-57.
ZHAO T Y, CAO Z W, ZHANG Z W, et al. Research on improvement effect of lime and cement on loess subgrade filler in Gansu Province [J]. *Highway*, 2021, 66(10): 51-57. (in Chinese)
- [15] 张赛, 章剑青, 尚石磊, 等. 南京长江漫滩废弃粉土改良用作路基填料的室内试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(3): 33-40.
ZHANG S, ZHANG J Q, SHANG S L, et al. Laboratory investigation on solidified waste silt from

- Nanjing Yangtze River floodplain as subgrade filling [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(3): 33-40. (in Chinese)
- [16] 刘雨, 陈俊桦, 朱自强. 水泥改良泥质板岩粗粒土的静力特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(1): 139-145.
- LIU Y, CHEN J H, ZHU Z Q. Static mechanical properties of argillaceous slate coarse-grained soil improved by cement [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(1): 139-145. (in Chinese)
- [17] 姜起斌. 深茂铁路阳西至马踏段高液限土改良研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- JIANG Q B. Study on improvement of high liquid limit soil in Yangxi-mata section of Shenzhen-Maoming railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国交通运输部. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020. Test Methods of Soils for Highway Engineering: JTG 3430—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese)
- [19] 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG 3441—2024 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2024.
- Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering: JTG 3441—2024[S]. Beijing: China Communications Press, 2024.
- [20] 陈康, 刘先峰, 蒋关鲁, 等. 干湿循环下石灰改良红层泥岩填料力学性能劣化规律研究[J]. 岩土力学, 2025, 46(1): 43-54.
- CHEN K, LIU X F, JIANG G L, et al. Degradation on mechanical properties of lime-treated red mudstone fill material subjected to wetting-drying cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(1): 43-54. (in Chinese)
- [21] 郭沁颖, 李白云, 丁建文, 等. 工业废渣改良泥水盾构渣土的路用性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(2): 66-75.
- GUO Q Y, LI B Y, DING J W, et al. Road performance investigation of slurry shield tunnel residue improved by industrial waste residues [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(2): 66-75. (in Chinese)
- [22] 孙树林, 郑青海, 唐俊, 等. 碱渣改良膨胀土室内试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1608-1612.
- SUN S L, ZHENG Q H, TANG J, et al. Experimental research on expansive soil improved by soda residue [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1608-1612. (in Chinese)
- [23] 吴建涛, 伍洋, 金科羽, 等. 水泥+石灰复合改性膨胀土对水质的影响[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 82-87.
- WU J T, WU Y, JIN K Y, et al. Effects of cement-lime compound modification of expansive soil on water quality [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 82-87. (in Chinese)
- [24] 吴道祥, 刘宏杰, 王国强. 红层软岩崩解性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 4173-4179.
- WU D X, LIU H J, WANG G Q. Laboratory experimental study on disintegration of red bed soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup 2): 4173-4179.
- [25] WEN Y Z, NI G H, LI Z, et al. Influence of hygroscopic expansion of clay minerals on the dynamic evolution of coal permeability [J]. Fuel, 2022, 330: 125670.
- [26] 李彦君, 于鹏, 史金权. 干湿循环作用下不同含水率砂岩的力学性能及声发射特性[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025: 1-11. (2025-04-08). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20250407.1658.002.html>.
- LI Y J, YU P, SHI J Q. Mechanical properties and acoustic emission characteristics of sandstone with different water contents under wet-dry cycles [J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025: 1-11. (2025-04-08). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20250407.1658.002.html>. (in Chinese)
- [27] 谢荣, 扈胜霞, 李勇, 等. 废玻璃-水泥固化红黏土强度水理特性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(6): 2595-2609.
- XIE R, HU S X, LI Y, et al. Experimental study on strength and water-physical property of red clay solidified by waste glass and cement [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(6): 2595-2609. (in Chinese)
- [28] 李芳菲, 华渊, 刘文化, 等. 干湿循环条件下水泥固化疏浚淤泥的物理力学特性[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(2): 344-350.
- LI F F, HUA Y, LIU W H, et al. Physico-mechanical characteristics of cement-solidified dredged sludge under drying and wetting cycle [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(2): 344-350. (in Chinese)