

文章编号:1671-1637(2026)07-0053-16

电石渣与磷石膏改良隧道渣土路基的力学性能与 微观机理

焦 宁¹, 张立师², 丁建文^{*1}, 薛传荣¹, 王首杰¹

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

摘 要:为解决废弃隧道渣土和工业固废的堆存导致的土地资源浪费与潜在的环境威胁,尝试使用工业固废电石渣与磷石膏协同改良废弃隧道渣土,将其转变为良质的工程填料。通过一系列室内试验,探究不同固废配比对改良土的物理与力学性能的影响规律,选最优配比;通过微观测试,分析了其微观改良机理和作用机制;通过路用力学性能测试,验证了改良土用作路基填料的可行性。研究表明:电石渣与磷石膏的组合掺加表现出显著的协同作用,特别是在增强废弃渣土的力学性能方面,其效果远超电石渣单掺(以4%总质量掺量为例,C3P1改良土的平均抗压强度可达电石渣单掺的1.35倍);电石渣与磷石膏的最佳配比为3:1,在这一配比下其对废弃渣土的改良效果最为显著,改良土的力学性能与稳定性均达到最优状态;电石渣和磷石膏以及土壤中的活性组分发生水化反应及离子交换反应,生成了具有胶凝性的C-S-H(水化硅酸钙)、C-A-S-H(水化硅铝酸钙)和AFt(钙矾石)等产物,它们通过填充、黏结和吸附土颗粒,显著提高了土体的密实度,从而增强改良土的宏观力学性能;归因于产物钙矾石膨胀作用的双刃性与其他胶凝产物的组合作用,在最佳配比(3:1)下,随着总掺量的增加,改良土的力学性能并非呈线性增长趋势;适当配比的电石渣与磷石膏改良土满足公路路基设计规范要求,初步验证了改良土用作路基填料的可行性。

关键词:路基工程;隧道渣土路基;室内试验;力学性能;微观机理;电石渣;磷石膏

中图分类号:U416.1 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.111

Mechanical properties and micro-mechanisms of tunnel spoil roadbed improved by calcium carbide slag and phosphogypsum

JIAO Ning¹, ZHANG Li-shi², DING Jian-wen^{*1}, XUE Chuan-rong¹, WANG Shou-jie¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;

2. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, Jiangsu, China)

Abstract: To solve the problems of land resource waste and potential environmental threats caused by the stockpiling of abandoned tunnel spoils and industrial solid wastes, an attempt was made to synergistically improve abandoned tunnel spoils using industrial solid wastes, namely calcium carbide slag and phosphogypsum, to transform them into high-quality engineering fillers. A series of laboratory tests were conducted to investigate the influence patterns of different solid waste ratios on

出版历程:2025-03-31收稿,2025-09-24修回,2025-11-27录用

基金项目:国家自然科学基金项目(52378330);江苏省水利厅科技项目(2024014)

作者简介:焦 宁(1995-),男,河南泌阳人,工学博士研究生,E-mail:ljaoning@seu.edu.cn。

*通信作者:丁建文(1975-),男,江苏泰兴人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:jwding@seu.edu.cn。

引用格式:焦 宁,张立师,丁建文,等. 电石渣与磷石膏改良隧道渣土路基的力学性能与微观机理[J]. 交通运输工程学报,2026,26(7):53-68.

Citation: JIAO Ning, ZHANG Li-shi, DING Jian-wen, et al. Mechanical properties and micro-mechanisms of tunnel spoil roadbed improved by calcium carbide slag and phosphogypsum[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(7): 53-68.

the physical and mechanical properties of the improved soil, and the optimal ratio was selected. Microscopic tests were performed to analyze the microscopic improvement mechanisms and action mechanisms. Road mechanical property tests were carried out to verify the feasibility of using the improved soil as roadbed fillers. The results indicate that the combined addition of calcium carbide slag and phosphogypsum exhibits a significant synergistic effect, especially in enhancing the mechanical properties of abandoned spoils, with an effect far exceeding that of adding calcium carbide slag alone (taking a total mass fraction of 4% as an example, the average compressive strength of the C3P1 improved soil is 1.35 times that of the soil with calcium carbide slag alone). The optimal ratio of calcium carbide slag to phosphogypsum is 3:1, under which the improvement effect on abandoned spoils is the most significant, and both the mechanical properties and stability of the improved soil reach the optimal state. Hydration reactions and ion exchange reactions occur among calcium carbide slag, phosphogypsum, and the active components in the soil, generating cementitious products such as calcium silicate hydrate (C-S-H), calcium aluminosilicate hydrate (C-A-S-H), and ettringite (AFt). These products significantly increase the compactness of the soil through filling, bonding, and adsorbing soil particles, thereby enhancing the macroscopic mechanical properties of the improved soil. Attributed to the double-edged nature of the expansion effect of the product ettringite and the combined action of other cementitious products, under the optimal ratio (3:1), the mechanical properties of the improved soil do not show a linear growth trend with the increase of the total additive content. The improved soil with an appropriate proportion of calcium carbide slag and phosphogypsum meets the requirements of highway subgrade design specifications, preliminarily verifying the feasibility of using the improved soil as roadbed fillers.

Keywords: subgrade engineering; tunnel spoil roadbed; laboratory test; mechanical property; micro-mechanism; calcium carbide slag; phosphogypsum

Publication history: Received 2025-03-31; Received in revised form 2025-09-24; Accepted 2025-11-27

Funding: National Natural Science Foundation of China (52378330); Jiangsu Provincial Department of Water Resources Science and Technology Project (2024014)

* **Corresponding author:** DING Jian-wen, professor, PhD, E-mail: jwding@seu.edu.cn.

0 引 言

随着城市化进程加快,大规模基础设施建设持续推进。在此背景下,工程建设产生的废弃渣土总量急剧攀升,其中隧道施工形成的盾构渣土、顶管渣土等特殊类型弃土,因其复杂的物理力学特性,通常被直接抛弃或堆存处理,导致土地资源的浪费^[1-2]。与此同时,电石渣、磷石膏等工业固废因缺乏高效利用路径,长期以堆存方式处理,不仅占用大量土地资源,更对周边生态环境构成潜在威胁^[3]。目前,常用的路基填料主要包括天然砂石材料、土料以及工业废渣等。天然砂石材料如砾石、碎石,具有较高的强度和良好的透水性,但其来源往往受限于天然采砂场和矿山开采,过度开采易引发生态环境问题。土料如黏土、粉土,来源广泛且成本相对较低,是路基填料的常用选

择,但是面临渣土短缺问题。因此,若能够通过工业固废对废弃渣土进行改良,将其转化为良质的工程材料,例如路基填料^[4-7],既符合循环经济发展理念,又能有效缓解环境压力,推动工程建设的可持续发展。

当前废弃渣土资源化利用方式主要集中于施工辅助材料、免烧砖及免烧陶粒等再生建材领域^[8-9]。钟小春等^[10-11]通过室内试验开展了粉细砂地层盾构渣土替代壁后注浆浆液中砂骨料的可行性研究,指出盾构渣土可以直接替代壁后注浆浆液中砂骨料,也可以与黏土或砂质物按适当的质量比混合,间接用于同步注浆。李海斌等^[12-13]以废弃的地铁盾构渣土、稻草秸秆和氧化镁为主要原料,通过烧结法制备了盾构渣土基复合陶粒。尽管这些技术在一定程度上实现了废弃物的消纳,但普遍存在利用规模有限、周期冗长、成本高等瓶颈,且再利用过程仍需消耗可

观的能源,难以满足大规模工程需求。

在工业固废改良土体的研究方面,已有学者针对电石渣、磷石膏等材料开展了组合固废方面的试验研究。研究表明,与单一固废改良相比,组合固废对土体的改良效果更全面,不仅能更显著提升土体的力学性能,还能有效规避单一固废改良时的性能短板。2种固废通过合理配比和组合,可实现物理性质(如颗粒级配、孔隙结构)和化学性质(如胶凝活性、离子交换作用)的优势互补,产生协同增强效应。电石渣等碱性固废可通过提供碱性环境促进火山灰反应,其碱性成分与土壤颗粒的胶结作用能够显著提升土体的抗剪强度与抗压强度^[14-15]。通过扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)、X射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)、X射线荧光光谱(X-ray Fluorescence, XRF)等微观测试,进一步揭示改良土中生成的水化硅酸钙、水化铝酸钙凝胶可优化土体微观结构,增强密实度并降低渗透性^[16-18]。

针对磷石膏在路基填筑中的应用,现有研究多采用磷石膏与水泥、石灰、粉煤灰等复合胶凝材料对弃土进行改性,研究手段包括物理力学试验、微观分析及现场试验^[19-20]。一些学者通过击实试验、无侧限抗压强度试验(Unconfined Compressive Strength, UCS)及加州承载比(California Bearing Ratio, CBR)试验发现,磷石膏掺量对改良土力学性能呈现非线性影响,存在最佳掺量区间^[21-23]。此外微观机制研究表明,磷石膏释放的钙离子与硫酸根离子可与土体中的活性 Al_2O_3 发生水化反应,生成具有膨胀特性的水化硫铝酸钙(钙矾石)。适量钙矾石的填充效应可改善土体结构,但过量生成则会因膨胀应力破坏既有胶凝体系,导致材料性能劣化^[3,24-25]。值得注意的是,目前关于磷石膏改良土的最佳掺量尚未形成统一结论。

鉴于此,本研究提出将碱性较强电石渣与弱酸性磷石膏组合改良废弃渣土,探究二者对废弃渣土的协同改良效应。通过开展一系列室内物理力学试验,探究电石渣与磷石膏掺量对改良土物理与力学

特性的影响规律,确定最优配比方案。结合SEM、XRD等微观测试技术,揭示复合改良剂与土体的作用机理。最终通过路用力学性能测试,验证改良土作为路基填料的工程可行性。研究结论可为固废改良土用作路基填料方面提供研究方法和机理参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

研究选用的废弃渣土取自南京市秦淮区南部新城某顶管施工项目,顶管隧道穿越的土层主要为粉质黏土和粉质黏土夹粉土。其中砂粒(0.075~2.000 mm)占比15%~20%、粉粒(0.005~0.075 mm)占比50%~55%、黏粒(<0.005 mm)占比25%~30%。其颗粒级配连续无明显间断,属级配良好的粉质黏土。如图1所示,挖掘出的渣土含水率约为37.4%,呈膏状,难以直接利用。顶管渣土的基本物理参数如表1所示。选用的工业固废电石渣和磷石膏分别取自连云港某乙炔厂和无锡某磷肥厂。采用XRF和SEM对电石渣和磷石膏的化学成分及微观结构进行了测试,结果如表2和图2所示。结果表明:电石渣的主要成分为氧化钙(CaO),含量高达92.34%;磷石膏主要由氧化钙(CaO)和三氧化硫(SO₃)组成,两者总含量达95.14%。此外,SEM分析显示,电石渣的微观形貌主要呈现为不规则颗粒状或块状结构,而磷石膏则表现为规则板状、针状或纤维状晶体结构。

1.2 试验方法

表3为本研究的配合比设计方案。通过调整电



图1 渣土现场取样
Fig. 1 On-site sampling of spoils

表1 取样渣土的基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of sampled spoils

物理参数	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	初始含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	最佳含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)
数值	29.19	15.17	14.02	37.40	1.91	12.50	1.946

表2 试验材料的主要化学成分

Table 2 Main chemical compositions of test materials

试验材料	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	MgO	Cl	P ₂ O ₅	SrO	CuO
顶管渣土	62.10	5.70	17.96	5.99	3.06	0.81	0.98	2.24	0.07		0.04	
电石渣	4.98	92.34	1.94	0.14	0.25	0.15			0.10		0.06	0.02
磷石膏	4.23	42.73	0.33		0.10	52.41				0.17	0.01	0.02

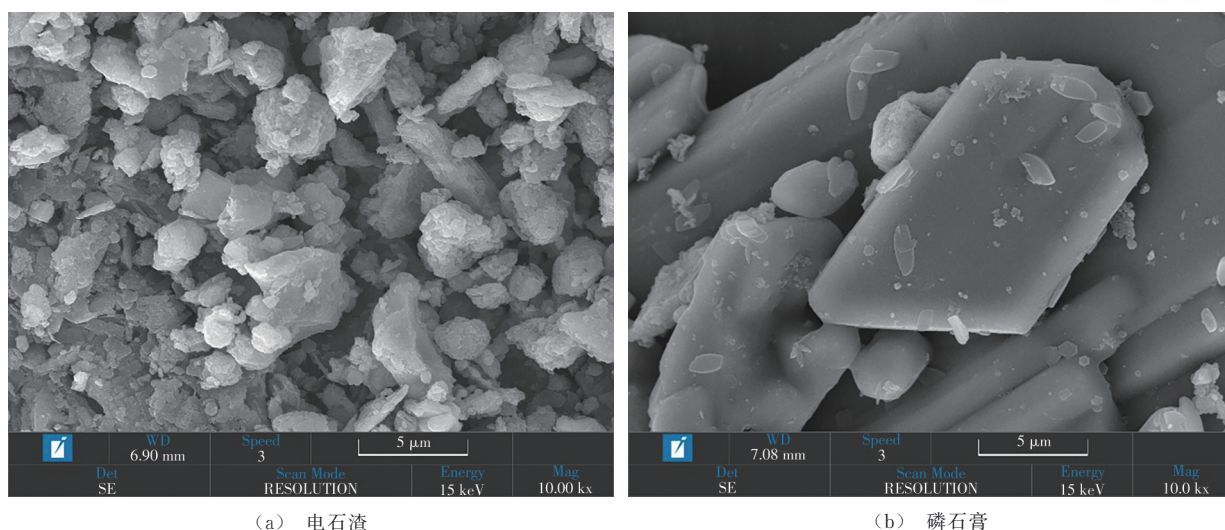


图2 电石渣与磷石膏的微观形貌
Fig. 2 Microscopic morphology of calcium carbide slag and phosphogypsum

石渣(CCS)和磷石膏(PG)掺量,研究单掺和复合掺加对改良土物化特性及力学性能的影响规律。复合配比设置总质量掺量为4%、6%、8%、10%四个水平(以下均为质量掺量),每个总掺量下设置5种掺量比(CCS:PG为0:1、1:3、1:1、3:1、1:0)。试验数据以电石渣掺量占比(即电石渣掺量:总掺量)为横坐标绘制曲线,对应比值依次为0、0.25、0.50、0.75、1.00。材料命名采用CmPn格式,例如C4P0(4%CCS)、C3P1(3%CCS+1%PG)。

表3 试验方案
Table 3 Test scheme

试验内容	分析类型	掺量/%	
		电石渣	磷石膏
击实试验 电导率测试 UCS	单掺	0、2、4、6、8、10	0
	组合双掺	0	2、4、6、8、10
SEM XRD CBR	素土	0	0
	组合双掺	总掺分别为4、8	

1.2.1 击实试验

击实试验依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020),采用干土法配料:将原状土样风干至目标含水率(预估最优含水率 $\pm 3\%$ 范围)以下,过5 mm筛后制备5组不同含水率(间隔1%~2%)的试样。每组称取5 kg土样,按预定含水率计算所需加水量,采用喷雾法均匀洒水后装入密封袋,室温($20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$)闷料24 h。击实试验采用重型II-2型击实仪(试筒内径为152 mm,高度为170 mm,击锤质量为4.5 kg,

落距为457 mm),分5层击实,每层击数98次。击实后刮平试样表面,称量试筒及试样总质量,计算湿密度,取3个平行试样测定含水率,最终绘制干密度-含水率关系曲线,确定最优含水率与最大干密度。

1.2.2 电导率测试

电导率测试参照《土壤 电导率的测定 电极法》(HJ 802—2016),称取20 g土样,加入100 mL去离子水,恒温振荡30 min后静置,使用电极法在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下测定电导率,取平均值。

1.2.3 力学性能测试

采用数显材料强度仪,按配比静压成型试件,在标准条件下养护至龄期,以 $1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 速率加载至破坏,取3个平行试件均值。加州承载比试验依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020),按最佳含水率和最大干密度制备试件,浸水96 h,浸水期间,每隔24 h读取百分表读数,记录试件高度变化,浸水结束后计算膨胀量,以评估改良土浸水后的体积稳定性;膨胀量测试完成后,采用贯入仪以 $1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 速率加载,取2.5 mm和5.0 mm贯入量时的较大CBR值。

1.2.4 微观测试

此外,微观测试取28 d龄期UCS试验后的断裂面试样,经 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、真空度小于10 Pa条件下冻干48 h去除水分后,采用D8 Advance型X射线衍射仪(扫描范围为 $5^{\circ}\sim 90^{\circ}$,扫描速率为 $5^{\circ}\cdot\text{min}^{-1}$,步长为 0.02°)分析矿物组成及晶体结构变化;用于SEM测试的试样首先进行表面喷金处理(镀层厚度10~15 nm),然后利用SU8010型扫描电镜(加速电压为15 kV,工

作距离为8~10 mm)在2 000、5 000、10 000放大倍数下观察胶凝产物分布、颗粒界面结合状态及孔隙结构等微观形貌特征。

2 改良土的基本物理化学特性

2.1 击实试验

图3(a)为不同电石渣掺量对改良土的最佳含水率和最大干密度的影响。可以明显看出,随着电石渣掺量的增大,改良土的最佳含水率有明显的增大趋势。电石渣掺量从0增加到10%时,改良土最佳含水率从12.5%增大至16.1%,增幅约为3.5%。此外,随着电石渣掺量的增加,最大干密度呈现轻微下降趋势,随着电石渣掺量从0增加至10%时,改良土的最大干密度由 $1.95 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 降至 $1.93 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,降幅约为1.5%。这可归因于电石渣细颗粒的掺入破坏了原有较为均匀的颗粒级配,降低了土体的紧密嵌挤结构,从而导致最大干密度的

轻微下降。而电石渣因高比表面积强化物理持水能力,其氢氧化钙与土壤活性成分发生火山灰反应,消耗水分,需额外补水,同时钙离子引发颗粒表面阳离子交换改变电荷分布与双电层结构,结合其填充作用及水化产物对孔隙结构的改造,共同导致土体需水量增加以达到最佳压实状态,最终提升了最佳含水率^[14]。

图3(b)为单掺磷石膏时其掺量对最大干密度和最佳含水率的影响。可以发现其影响规律与电石渣相似:随着磷石膏掺量的增加,改良土的最佳含水率逐渐增大,而最大干密度逐渐减小。然而,与电石渣相比,磷石膏的掺量变化对最大干密度和最佳含水率的影响均相对较小。这是由于电石渣中含有较多的活性成分,其与土中的活性物质发生水化反应、离子交换等更复杂、程度更剧烈的物理化学反应,进而在改变土颗粒表面性质、颗粒级配及生成新物质等方面发挥了更强的作用。

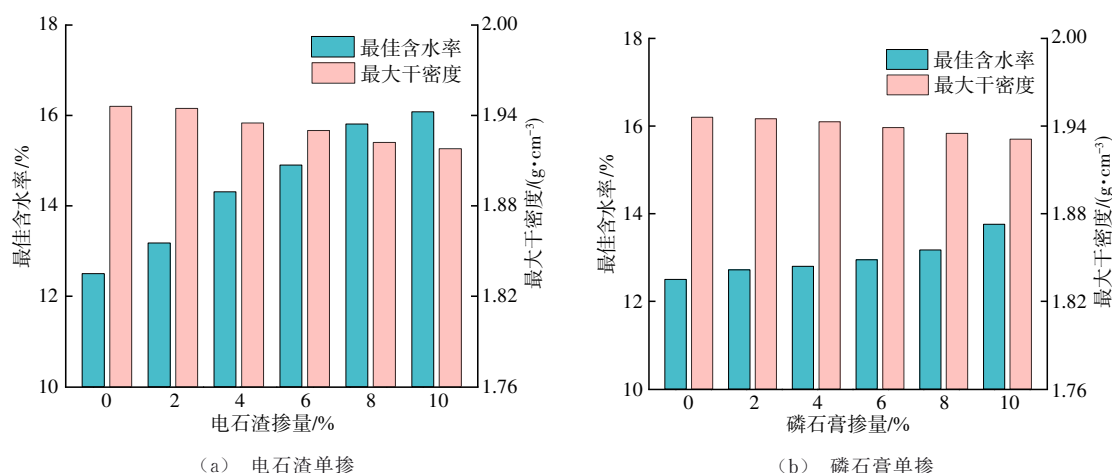


图3 不同电石渣或磷石膏掺量下改良土的击实特性

Fig. 3 Compaction characteristics of improved soil with different contents of calcium carbide slag or phosphogypsum

电石渣与磷石膏不同组合配比下改良土的最佳含水率和最大干密度如图4所示。可以明显看出,在相同的电石渣掺量占比情况下,固废总掺量越高,改良土的最佳含水率越高。这表明固废掺入量增多,强化了对最佳含水率的提升效果,更多固废加入带来更多活性成分参与反应,或改变土体结构,使土体吸水能力增强。另外,随着电石渣掺量占比的增大,改良土的最佳含水率均呈明显的增大趋势。这是由于与磷石膏中的活性成分较少相比,电石渣的主要成分氢氧化钙具有较强化学活性,与渣土颗粒发生物理化学反应。渣土中的土颗粒表面性质会因电石渣的作用发生改变,如产生离子交换、吸附等现象,使土颗粒间需要更多水分来保持

适宜的物理状态,进而导致最佳含水率升高。这一现象与单掺改良土时的影响规律一致,进一步验证了前述对比结论。此外,发现随着电石渣掺量占比的增加,最大干密度呈轻微下降趋势。而在相同的电石渣掺量占比下,固废总掺量越高,最大干密度越低,同样说明电石渣对渣土的影响效果远大于磷石膏。

2.2 电导率测试

图5为电石渣或磷石膏单掺时,不同掺量下改良土的电导率,图中 t 为养护龄期。经对比分析可知,随着电石渣或磷石膏掺量的增加,改良土的电导率均呈现出显著的先增大后增速逐渐放缓的对数型增长趋势。然而,电石渣改良土的电导率增长趋势远远

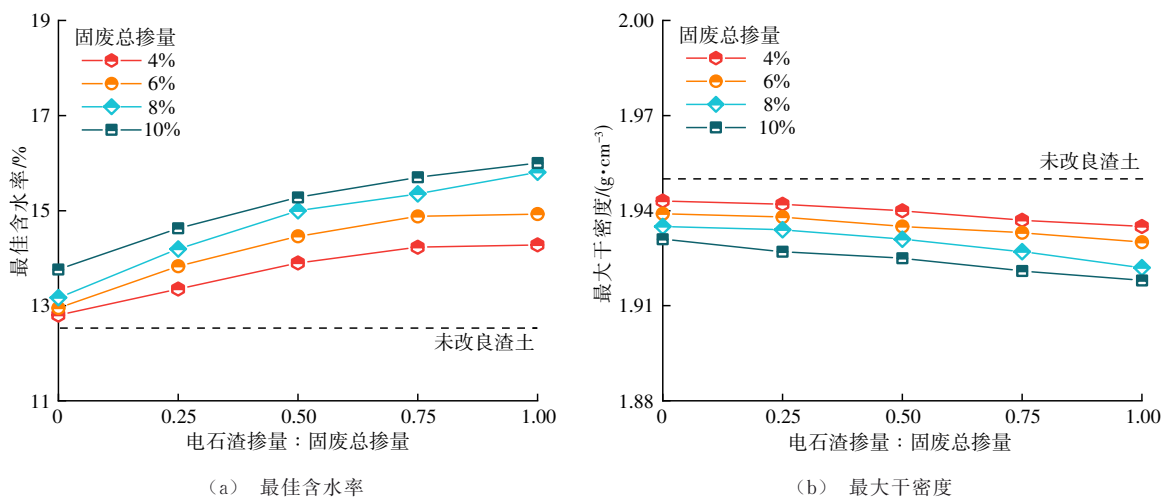


图4 不同电石渣与磷石膏组合配比改良土的击实特性

Fig. 4 Compaction characteristics of improved soil with different combination ratios of calcium carbide slag and phosphogypsum

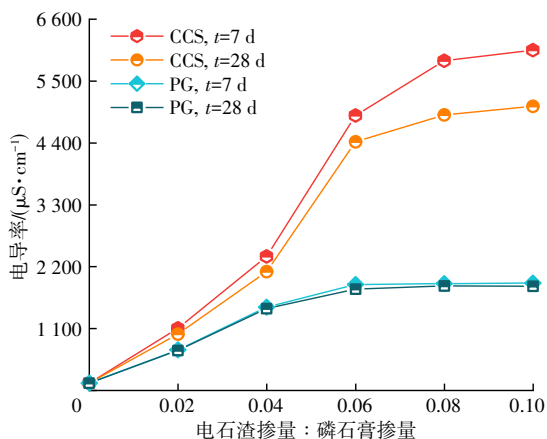


图5 不同电石渣或磷石膏掺量下改良土的电导率

Fig. 5 Electrical conductivity of improved soil with different contents of calcium carbide slag or phosphogypsum

超过磷石膏,随着掺量从0增大到10%,磷石膏改良土的电导率从 $130 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 增大到 $1850 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,而电石渣改良土的电导率增大至约 $6100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。这是因为电石渣的主要成分是氢氧化钙 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$,在土壤中溶解后会大量电离出钙离子(Ca^{2+})和氢氧根离子(OH^-),显著增加土壤孔隙水中离子的浓度,进而大幅提升电导率。相比之下,磷石膏虽含有硫酸钙(CaSO_4)等成分,能电离出钙离子(Ca^{2+})和硫酸根离子(SO_4^{2-}),但由于其本身溶解度相对较低,且酸性较弱,电离出的离子数量有限,因此对电导率的提升作用远不及电石渣^[26]。磷石膏改良土电导率随龄期无显著变化,而电石渣改良土电导率随龄期显著降低且高掺量降幅更显著,因电石渣与土壤活性物质持续发生火山灰反应(消耗 Ca^{2+} 和 OH^- 生成水

化产物)及离子交换反应(稳定颗粒表面吸附离子),双重作用降低孔隙水离子浓度,高掺量提供更多反应离子故降幅更明显^[17]。

不同电石渣与磷石膏组合配比下改良土的电导率如图6所示,对比发现,随着电石渣掺量占比的逐步增大,改良土的电导率呈现出逐渐上升的趋势,且固废总掺量越高,电导率的增长幅度越显著。这进一步证实,相较于磷石膏,电石渣对改良土电导率的影响更为突出。在养护龄期方面,随着电石渣掺量占比的增大,改良土中7 d与28 d养护龄期的电导率差值均呈现出先增大后减小的趋势,且均在电石渣掺量占比为0.75时达到最大值。这进一步表明当电石渣与磷石膏组合掺加时,二者之间存在一定的协同效应。其本质是碱激发反应、硫酸盐激发反应与离子调控反应的耦合作用,二者通过成分互补与反应促进,形成“离子供给-产物生成-体系稳定”的良性循环。可促使体系中生成更多复杂的胶凝物质和有序的晶体结构,这些新生成的物质会通过离子交换、吸附等作用,大量消耗体系中的游离离子,使得土壤孔隙水中的离子浓度降低更为显著,最终导致电导率降低幅度增大。

3 改良土的基本力学特性

3.1 无侧限抗压强度测试

图7为不同电石渣掺量改良土不同养护龄期的峰值无侧限抗压强度。对比结果表明,在相同养护龄期内,随着电石渣掺量的增加,抗压强度呈现对数型增长

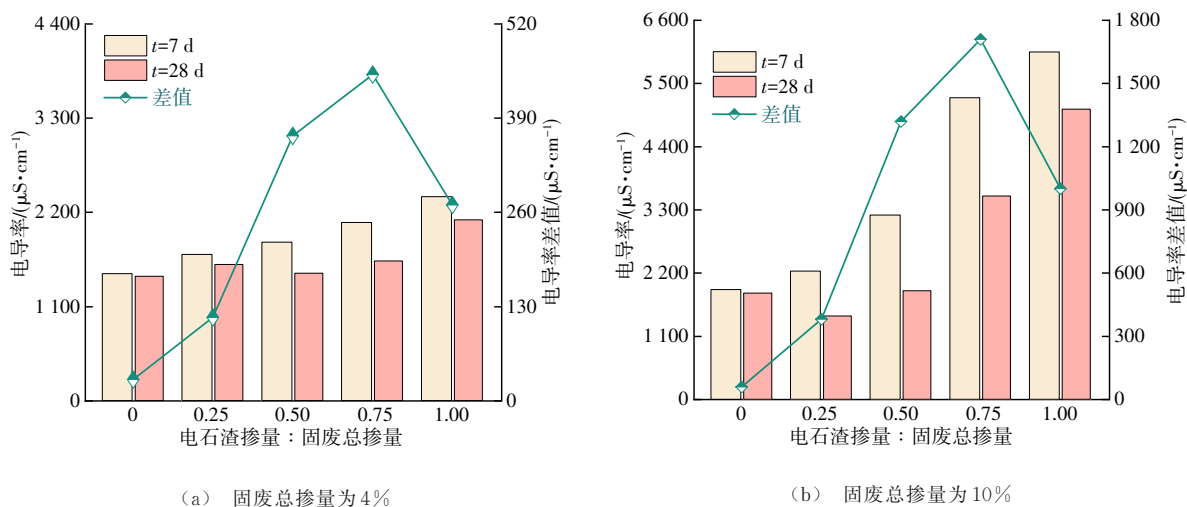


图6 不同电石渣与磷石膏组合配比改良土的电导率

Fig. 6 Electrical conductivity of improved soil with different combination ratios of calcium carbide slag and phosphogypsum

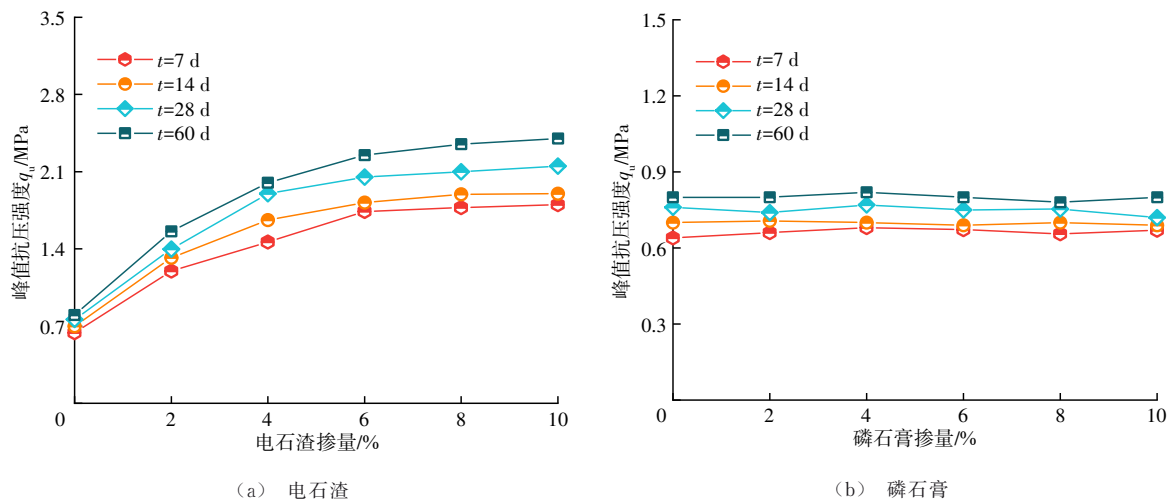


图7 不同电石渣或磷石膏掺量下改良土的单侧抗压强度

Fig. 7 Unconfined compressive strength of improved soil with different contents of calcium carbide slag or phosphogypsum

趋势,初期增长较快,随后增速减缓。例如,28 d 固化时,当电石渣掺量从0增至4%,抗压强度从0.76 MPa 增至1.90 MPa,增幅约为150.0%。但当掺量从4% 增至8%时,抗压强度仅增0.2 MPa,增幅约为10.5%。这种变化与电石渣与渣土中活性成分的火山灰反应等化学过程有关。初期,电石渣与渣土中的活性成分反应生成胶凝物质,迅速填充空隙,导致强度快速增加。随着掺量增加,可参与反应的成分减少,强度增长放缓。过多的电石渣可能无法完全反应,反而可能进一步阻碍强度增长。对比不同养护龄期下相同电石渣掺量的强度变化发现,随着养护时间延长,改良土的峰值抗压强度持续增加。例如,4%电石渣掺量下,养护龄期从7 d 延长至60 d 时,强度由1.46 MPa 增至2.00 MPa,增幅约37.0%,明显大于素土的增幅

(25.0%)。这是由于火山灰反应、水化反应等化学过程持续进行,生成的胶凝物质增多,改良土结构逐步致密,强度不断提高。此外,随着磷石膏掺量的增加,改良土的抗压强度变化不明显。在相同掺量下,养护龄期从7 d 延长至60 d 时,强度增长23.5%~25.5%,与素土变化相似。这表明,磷石膏的单独掺入对抗压强度改善效果不显著,原因在于磷石膏的弱酸性导致其在渣土中的化学反应活性较低,无法有效提升土体力学性能。

不同电石渣与磷石膏组合配比改良渣土的抗压强度如图8所示。结果表明,随着电石渣掺量占比的增加(磷石膏相应减少),抗压强度呈先增大后减小的趋势,并在电石渣占比为0.75时达到最大值,且高于单掺电石渣时的强度。这表明电石渣与

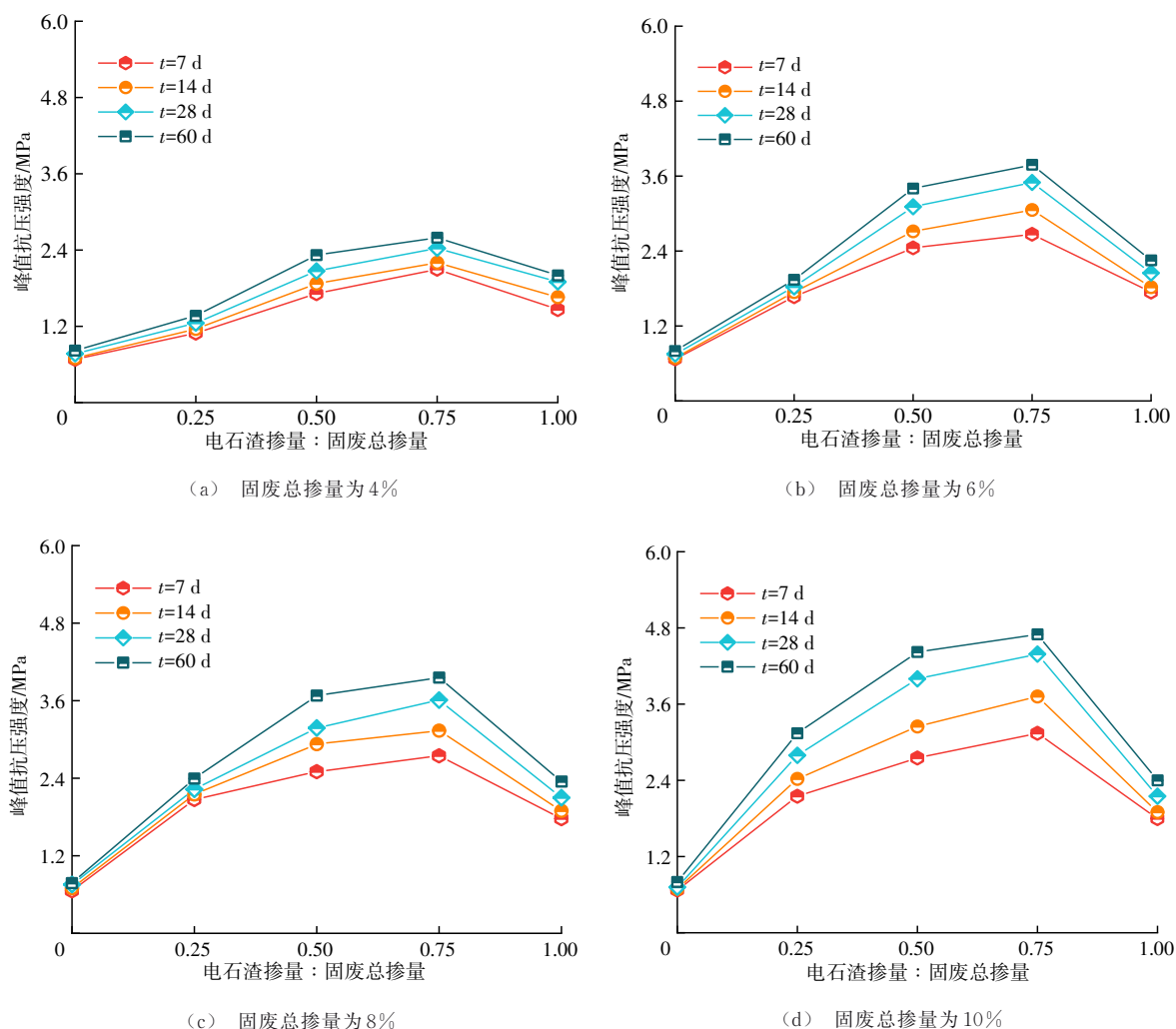


图8 不同电石渣与磷石膏组合配比改良土的无侧限抗压强度

Fig. 8 Unconfined compressive strength of improved soil with different combination ratios of calcium carbide slag and phosphogypsum

磷石膏的组合具有显著的协同增强效应,并存在最优配比。以总掺量8%、28 d养护期为例,电石渣占比为0.75时强度最大(3.61 MPa),且高于1.0时的单掺强度。此现象可能源于电石渣、磷石膏与土颗粒间的化学反应,生成新的胶凝物质,改善土体结构和密实性,尤其在适当配比下,表现出更强的协同效应。对比不同固废总掺量下的抗压强度变化可发现,随着总掺量增加,电石渣占比从0增至0.25时的强度增长幅度逐渐增大。在总掺量为4%和6%时,电石渣占比从0增至0.25时的增长幅度最小,而从0.25增至0.50时增长幅度最大。当总掺量超过6%时,电石渣占比从0增至0.25时的抗压强度增长幅度最大。这是因为随着总掺量增加,电石渣量增多,参与水化反应等化学过程的活性物质增多,从而显著提升了抗压强度。此外,随着固废总掺量的增加,改良土的抗压强度逐渐增大,养护

龄期对强度提升的效果更为明显,特别是在电石渣占比为0.50和0.75时。这是因为总掺量增多使改良土中的活性物质增多,水化反应和离子交换等反应需要更长时间才能平衡,从而在较长养护期内进一步提升抗压强度。

3.2 强度增益

3.2.1 单位掺量强度增益

在第3.1节通过对比发现了电石渣和磷石膏组合双掺具有明显的协同效应,本节将对改良土的强度增长速率进行分析,分析不同固废掺量增阶段大引起的强度增长量。为便于分析,本节定义一个新的参数叫做单位固废掺量(1%)增加引起的改良土强度的增长收益 $G_a^{x \rightarrow y}$,简称单位掺量强度增益,其含义为某一段固废掺量增加引起的强度增量与该段掺量增加量的比值,计算如下

$$G_a^{x \rightarrow y} = \frac{q_u(y) - q_u(x)}{100(y - x)} \quad (1)$$

式中: $G_a^{x \rightarrow y}$ 为固废总掺量从 x 增大到 y 对应的强度增益, $x \rightarrow y$ 为固废掺量的增段; $q_u(x)$ 、 $q_u(y)$ 为对应固废总掺量的抗压强度。

图9为不同固废总掺量增段对应的改良土的单位掺量强度增益,其中 R 为电石渣的掺量(α_{CCS})占固废总掺量(α_{sum})的占比。对比发现,随着龄期延长,单位掺量强度增益普遍增大,且电石渣占比越大,增益越显著。这是因为固废掺量增多,改良土中有效活性成分增多,水化和离子交换反应所需时间延长。电石渣中的活性成分较多,因此增益效果更明显,电石渣对强度提升起主要作用;当电石渣占比为0.25时,单位掺量增益在8→10段最大,在0→4段最小。由于电石渣掺量较小,固废总掺量从0增至4%时,强度提升有限。随着总掺量增加,电石渣增多,导致后续增段增益显著增大。当电石渣掺量占比增大至0.75时,各个掺量增段的单位掺量强度增益呈现先增大后减小再增大的趋势,表明改良土强度经历了快速增长、增速减缓再到增大的过程。强度变化可分为3个阶段:第1阶段,电石渣水化生成的胶凝物质与钙矾石共同作用,迅速提升强度;第2阶段,过量的钙矾石膨胀作用产生应力,破坏胶结物质,导致强度增速减缓;第3阶段,胶凝产物增多,增强了胶结作用,克服了膨胀的负面影响,强度增速再次提升,但由于有效活性成分减少和钙矾石膨胀影响,增速仍低于第1阶段。

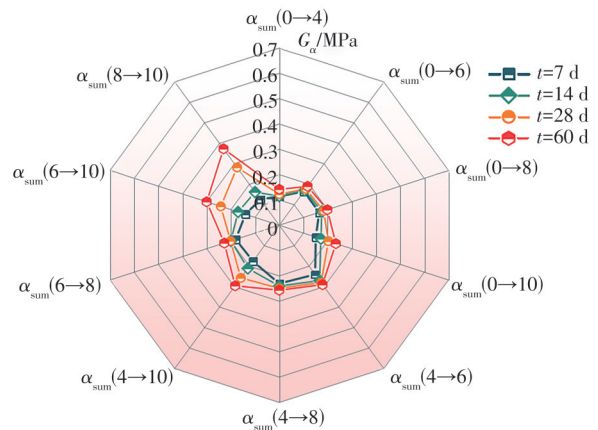
3.2.2 单位增比强度增益

为分析固废配比变化对改良土的强度提升作用,与单位掺量强度增益分析类似,定义单位增比强度增益 $G_R^{a \rightarrow b}$,表示电石渣掺量占比增大0.01对应提升的抗压强度,计算如下

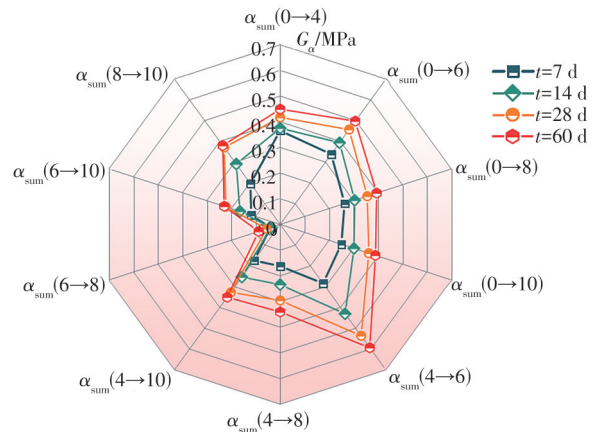
$$G_R^{a \rightarrow b} = \frac{q_w(b) - q_w(a)}{100(b - a)} \quad (2)$$

式中: a 、 b 均为电石渣掺量。

图10展示了不同固废总掺量下改良土的单位增比强度增益,对比发现:随着龄期增加,单位增比强度增益逐渐增大,且固废总掺量越大,增幅越显著,表明固废总掺量增加导致活性成分增多,水化和离子交换反应所需时间延长;电石渣掺量增比0.25→1.00、0.50→1.00和0.75→1.00段均呈现负增益,其中0.75→1.00段增益最小,表明电石渣与磷石膏的协同作用增强了强度;当固废总掺



(a) $R=0.25$



(b) $R=0.75$

图9 不同固废配比下各掺量增段改良土的单位掺量强度增益
Fig. 9 Unit strength gain of improved soil with different solid waste ratios at various additive content increments

量为4%和6%时,最大单位增比强度增益出现在0.25→0.50段;而当总掺量为8%和10%时,0→0.25段的增益最大。这是由于电石渣与磷石膏的组合具有协同增强作用,使得大部分组合配比的强度大于单独掺入电石渣的强度,因此使得它们呈现负增益,并且负增益越大,则说明它们的协同作用越强。

3.3 应力应变曲线

图11(a)展示了 $t=28$ d 时不同电石渣掺量下改良土的应力应变曲线。对比发现,各掺量下的曲线走势相似,均先上升至峰值后下降,经历弹性变形、塑性变形至破坏。随着电石渣掺量增加,应力和曲线斜率有所提升,表明电石渣影响了改良土的弹性和塑性特性。具体来看,应力应变曲线的上升和下降段更陡,表明强度变化更快;初始阶段曲线急剧上

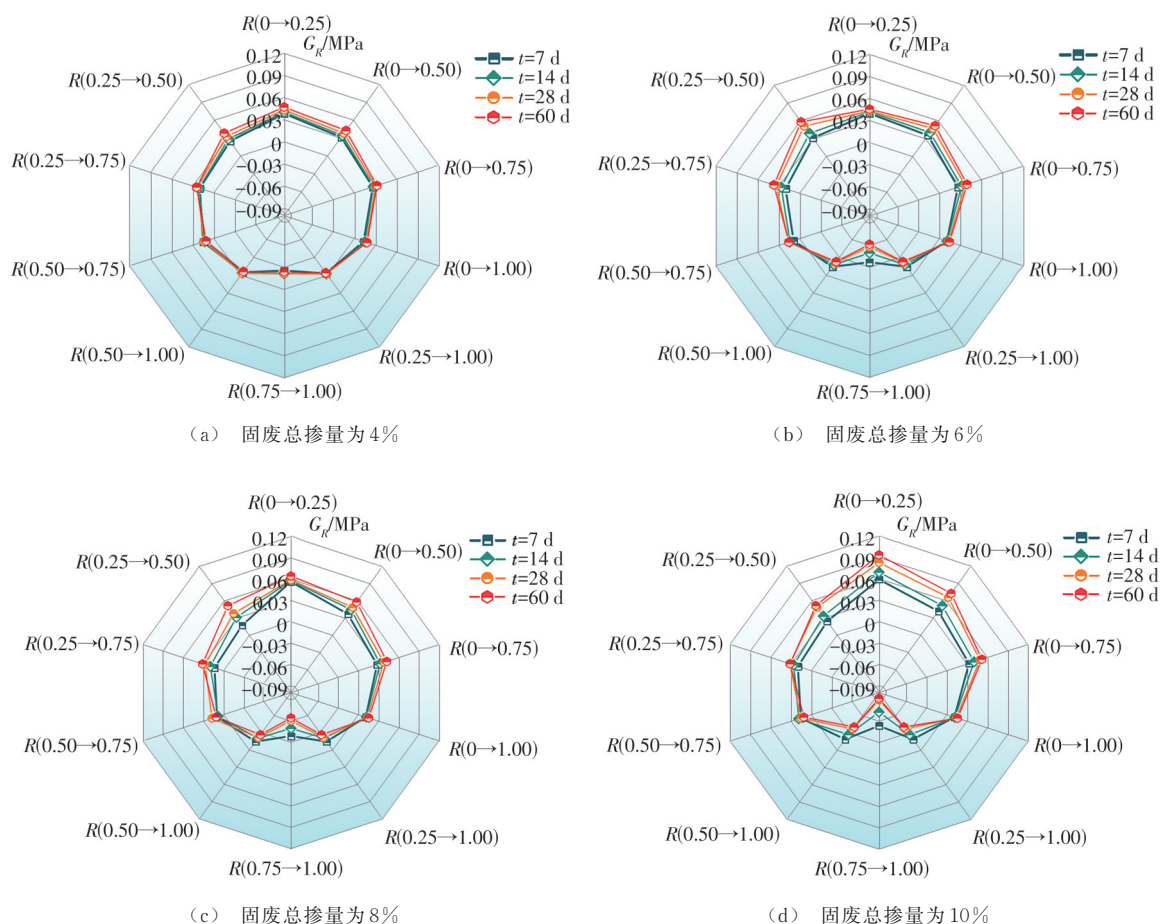


图 10 不同固废总掺量改良土的单位增比强度增益

Fig. 10 Strength gain of improved soil on the unit rising ratio with different total solid waste contents

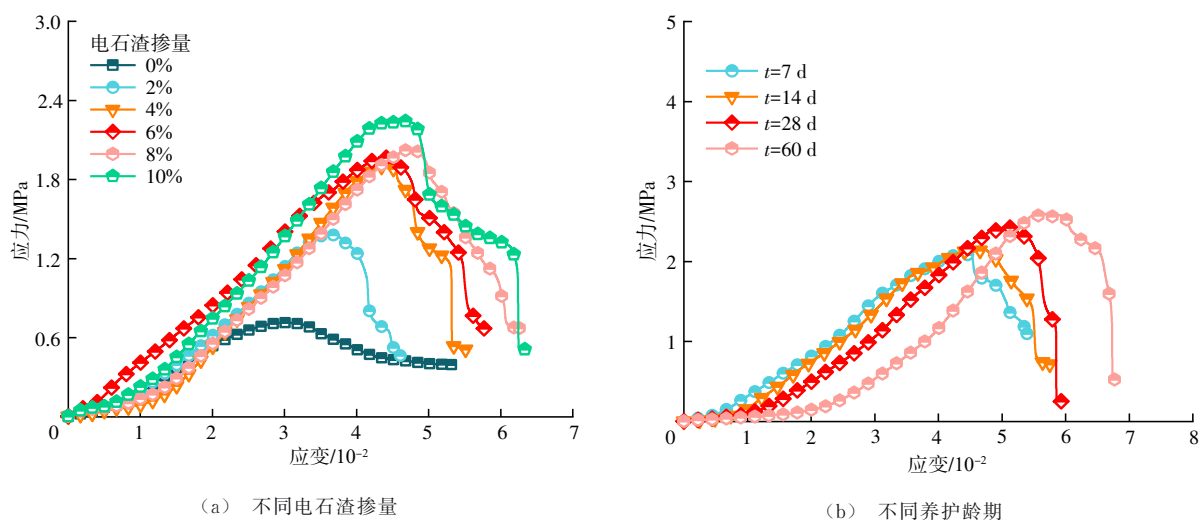


图 11 不同电石渣掺量与养护龄期下改良土的应力应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves of improved soil with different calcium carbide slag contents and curing ages

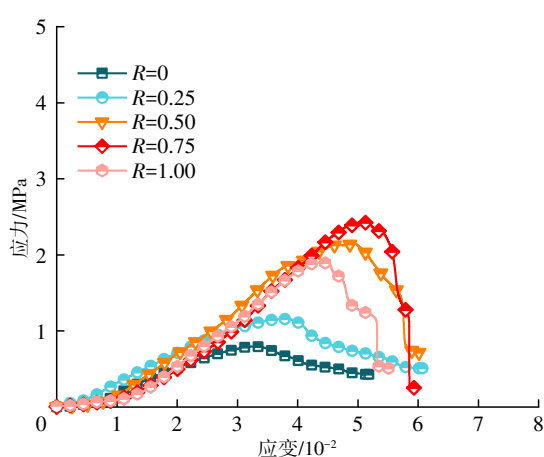
升,表明较高的初始弹性模量;峰值后,曲线迅速下降,显示出较强的承载力和破坏急剧性。随着电石渣掺量增大,破坏应变逐渐增大,表明电石渣

促进了渣土内部更紧密且韧性的连接,使改良土在破坏前能够承受更大的变形。图 11(b)为不同养护龄期下改良土的应力应变曲线(C3P1),对比

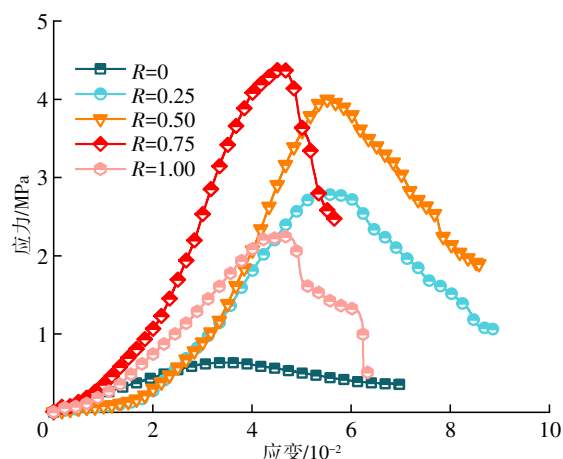
发现,随着养护龄期从7 d增至60 d,改良土的应力峰值逐渐上升,并在60 d龄期时达到最高。这表明,随着养护时间的延长,改良土内部的固化反应愈加充分,颗粒间的连接更加紧密,从而使改良土的强度不断提升。此外,随着龄期的增大,初始阶段应力应变曲线的斜率逐渐变小,表明养护龄期对其初始弹性模量影响较大,初始抵抗变形能力逐渐增大。在破坏特性方面,随着龄期的增大,改良土的破坏应变逐渐增大,改良土在达到应力峰值后曲线下降速度逐渐增大,表现出更加明显的脆性破坏特征。

图12展示了 $t=28$ d时不同电石渣与磷石膏组合配比下改良土的应力-应变曲线。对比图12(a)、(b)发现,无论4%还是10%的固废总掺量,随着电石渣掺量增大,改良土的应力峰值先增大后减

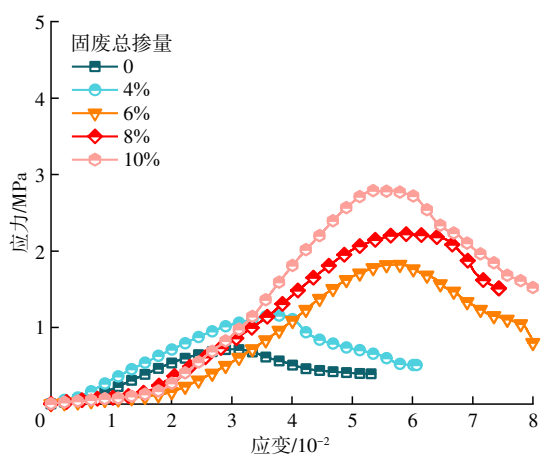
小,最大值出现在0.75处。并且峰值应力较大的配比下,曲线下降更迅速,表现出脆性破坏特征。10%总掺量下,曲线下降更快。破坏应变方面,4%固废总掺量时,随着电石渣掺量占比的增大,破坏应变逐渐增大;而10%时,破坏应变呈先增大后减小趋势。可能是因为电石渣掺量在不同总掺量下作用机制不同,4%时促进了更稳定的结构,10%时过多电石渣可能导致化学反应过度或填充不合理,导致结构在一定程度上被削弱^[19]。对比图12(c)、(d)发现,随着固废总掺量增加,应力整体呈现上升趋势,初始弹性模量无显著变化;破坏特性上,随着总掺量增大,曲线下降速度加快,脆性破坏特征更明显,破坏应变呈现先增大后减小趋势,在8%时最大,且随着总掺量的增大,这一现象愈加显著。



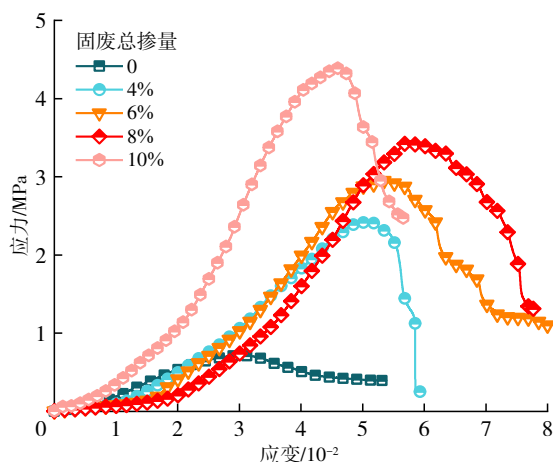
(a) 配比影响(固废总掺量为4%)



(b) 配比影响(固废总掺量为10%)



(c) 固废总掺量影响($R=0.25$)



(d) 固废总掺量影响($R=0.75$)

图12 电石渣与磷石膏不同组合配比改良土的应力-应变曲线

Fig. 12 Stress-strain curves of improved soil with different combination ratios of calcium carbide slag and phosphogypsum

4 微观测试与改良机理

4.1 XRD

不同电石渣与磷石膏组合配比下改良土的 XRD 图谱如图 13 所示。分析表明,与未改良土相比,磷石膏单掺的 C0P4 中仅硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)特征峰明显,无其他新产物生成;电石渣单掺时,则显著出现氢氧化钙、C-S-H、C-A-S-H 衍射峰。双掺体系中,C1P3 中可见微弱的氢氧化钙峰,同时微弱呈现 C-S-H、C-A-S-H 及钙矾石(Aft)特征峰,因电石渣掺量低,反应程度受限,胶凝产物生成较少。C2P2 中的氢氧化钙峰强度增

加,C-S-H、C-A-S-H 特征峰强化,钙矾石峰更突出,为钙源更多,反应充分,胶凝产物生成量提升。C3P1 中的氢氧化钙峰强度进一步增强,C-S-H、C-A-S-H 特征峰显著,钙矾石峰强度更高,该配比下,电石渣提供大量钙源,有力促进火山灰反应及钙矾石生成,胶凝产物更为丰富。整体来看,与未改良土相比,单掺磷石膏仅引入硫酸钙,无新产物;单掺电石渣生成氢氧化钙、C-S-H、C-A-S-H。而电石渣与磷石膏双掺时,不同配比改良土均出现氢氧化钙、C-S-H、C-A-S-H 及钙矾石衍射峰,且因掺量配比差异,峰值强度有所不同,其中 C3P1 的峰值强度最高。

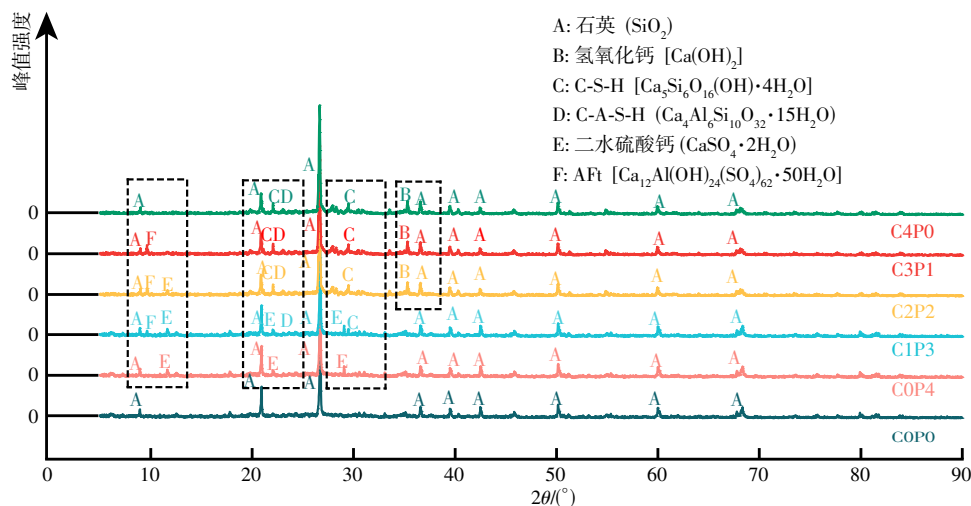


图 13 不同电石渣与磷石膏组合配比下改良土的 XRD 衍射图谱

Fig. 13 XRD diffraction patterns of improved soil with different combination ratios of calcium carbide slag and phosphogypsum

4.2 SEM

图 14 展示了不同电石渣与磷石膏配比改良土的 SEM 微观形貌特征。未改良土[图 14(a)]呈现松散的颗粒堆积结构,土颗粒间缺乏有效胶结,孔隙率较高,表明其原生结构稳定性较差。当单掺 4% 电石渣时[图 14(e)],土体微观结构显著致密化,孔隙明显减少,可见片状氢氧化钙晶体与团聚状或花瓣状的水化硅酸钙(C-S-H)、水化铝酸钙(C-A-S-H)凝胶体。这些胶凝产物通过填充孔隙、黏结土颗粒,形成了更紧密的结构,显著提升了土体的整体性。当电石渣与磷石膏双掺时[图 14(b)~(d)],除片状氢氧化钙外,各配比均有团聚状的 C-S-H、C-A-S-H 凝胶及针棒状钙矾石(Aft)生成,但产物含量与结构的致密程度随配比不同有显著差异。C1P3[图 14(b)]中胶凝产物生成量较少,土体仍保留较多孔隙,结构相对松散;C2P2[图 14(c)]的孔隙明显减小,C-A-S-H 凝胶与钙矾石含量增加,颗粒间

胶结增强;C3P1[图 14(d)]中氢氧化钙、C-S-H、C-A-S-H 凝胶及钙矾石的生成量进一步增大,三者相互交织并吸附土颗粒,形成高度致密的微观结构,孔隙率极低。这一现象表明,电石渣与磷石膏之间存在显著的协同效应:电石渣提供的钙源与碱性环境促进了火山灰反应,而磷石膏释放的硫酸根离子与钙源结合,形成了针棒状的钙矾石结晶。在 C3P1 配比中,较高的电石渣掺量为反应提供了充足的钙源,促进了离子交换反应,生成了更多的胶凝产物,同时电石渣、磷石膏颗粒与土颗粒间的物理填充作用也进一步优化了结构密实度^[26-28]。此外,对比图 14(d)~(f)可见,随着养护龄期延长,水化产物生成量显著增多,土体结构逐渐趋向致密,孔隙率逐渐减少。这一微观演变过程与宏观力学性能的提升趋势形成良好对应关系,进一步验证了前节所述改良土力学性能随养护龄期延长而逐渐增大的结论。

微观结构特征与宏观力学性能呈现显著对

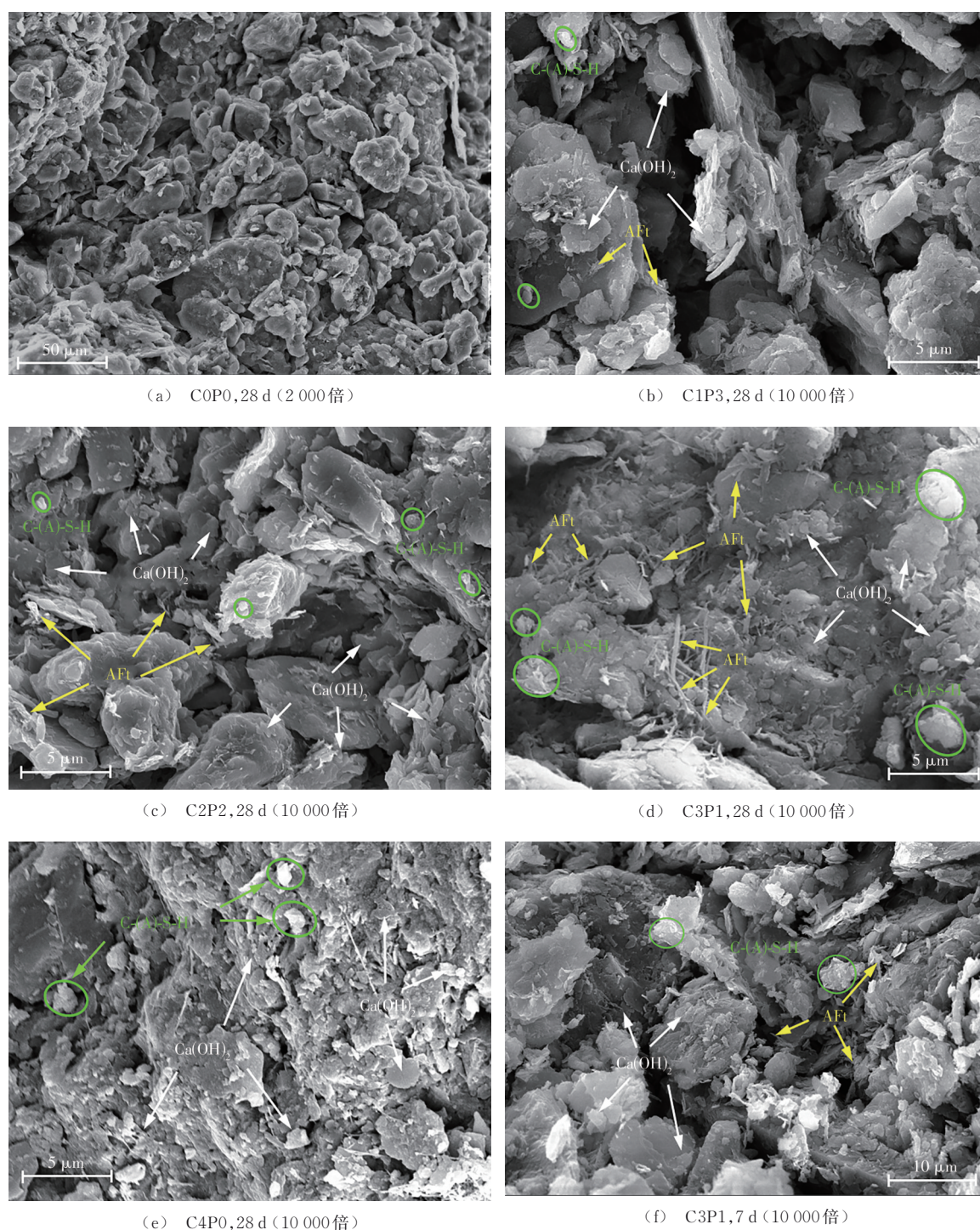


图 14 不同电石渣与磷石膏配比改良土的 SEM 图像

Fig. 14 SEM images of improved soil with different ratios of calcium carbide slag and phosphogypsum

应关系:单掺电石渣时,片状氢氧化钙与 C-S-H/C-A-S-H 凝胶通过填充孔隙、胶结颗粒形成连续网络,对应 28 d 抗压强度从素土 0.76 MPa 增至 1.90 MPa(增幅 150%),初期快速增长源于胶凝产物的高效填充胶结;双掺体系中,C3P1 配比(高电石渣掺量)因充足钙源驱动生成大量 AFt 针棒晶体与 C-A-S-H 凝胶^[29-30],28 d 强度达 3.61 MPa,

较单掺体系提升 89%,体现钙源供给-产物生成-结构密实的协同强化,与电石渣占比 0.75 时最优配比的宏观强度峰值形成机制呼应;养护龄期延长时,C3P1 胶凝产物产量增大,密实度提高,对应 4% 电石渣掺量下 60 d 强度较 7 d 增长 37%(素土仅 25%),表明微观结构渐进致密化直接驱动强度长期增长。

5 改良土的路用力学性能验证

图 15 展示了不同电石渣与磷石膏组合配比下改良土的 CBR 值与膨胀量的变化规律。从图 15 中可以看出,不同对比对 CBR 值的影响与对 UCS 值的变化趋势基本一致。当磷石膏单独掺加时,与未改良土相比, CBR 值几乎没有明显变化,膨胀量则略有增加;而当电石渣单独掺加时, CBR 值显著增大,且膨胀量明显减少。当电石渣与磷石膏组合掺加时,二者呈现出明显的协同改良效果,且存在最佳配比。当总掺量为 4% 时, C3P1 配比下的 CBR 值达到最大值,同时膨胀量最小,表明该对比对土体的改良效果最佳,土体整体的抗压性能和密实度达到最优,且水稳性和抗膨胀性能最强。此外,当增至 C6P2 时, CBR 值进一步增加,膨胀量进一步减小。C3P1 和 C6P2 的 CBR 值分别为 28.36% 和 35.18%,较未改良土的 CBR 值分别增大 4.46 倍和 5.54 倍,远超《公路路基设计规范》(JTGD30—2015)中对路基填料最小承载比的要求(高速公路和一级公路路床填料的承载比应不低于 8%)验证了电石渣与磷石膏改良土用作路基填料的可行性。

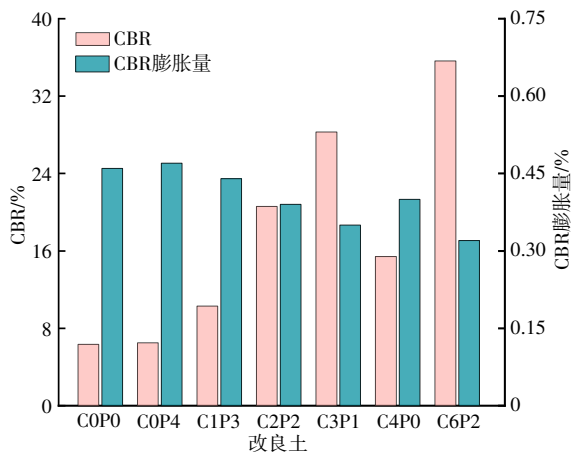


图 15 不同电石渣与磷石膏组合配比下改良土的 CBR 与膨胀量
Fig. 15 CBR and swelling amount of improved soil with different combination ratios of calcium carbide slag and phosphogypsum

6 结 语

(1)电石渣单独掺入废弃渣土中能显著改善其物理与力学性能,而磷石膏单独掺入则未表现出明显的改良效果。电石渣与磷石膏的组合掺加表现出显著的协同作用,特别是在增强废弃渣土的力学性能方面,其效果远超电石渣单掺(以 4% 总掺量为例, C3P1 改良土的平均抗压强度可达电石渣单掺的 1.35 倍)。

(2)电石渣与磷石膏的最佳配比为 3:1,在这一配比下其对废弃渣土的改良效果最为显著,改良土的力学性能与稳定性均达到最优状态,表现为抗压强度显著提升,同时破坏应变也同步提高,显示出改良土塑性与承载能力的协同优化。随着总掺量的增加,各掺量增段增益呈“先增后减再增”,对应改良土强度经历“快速增长、增速减缓、再次提升”三阶段,表明改良土强度增长与固废掺量并非线性关系。

(3)电石渣与磷石膏改良废弃渣土的微观机理为:电石渣和磷石膏以及土壤中的活性组分发生水化反应及离子交换反应,生成了具有胶凝性的 C-S-H、C-A-S-H 和钙矾石等产物,它们通过填充、黏结和吸附土颗粒,显著提高了土体的密实度,从而增强改良土的宏观力学性能。

(4)在最佳配比(3:1)下,随着总掺量的增加,改良土的力学性能并非呈线性增长趋势,力学性能初期呈现快速增长,随后增速减缓,但在更高掺量下增速再次提升,这一现象归因于产物钙矾石膨胀作用的双刃性与其他胶凝产物的组合作用:早期钙矾石快速生成产生适度膨胀增强结构密实度,中期过度膨胀引发微裂纹破坏胶结,后期大量胶凝产物形成抑制了钙矾石的膨胀。

(5)适当配比的电石渣与磷石膏改良土满足公路路基设计规范要求,初步验证了改良土用作路基填料的可行性。本文暂未考虑干湿循环等环境影响作用下改良土的劣化趋势和路基填筑现场应用,未来将开展改良土在环境营力作用下的劣化规律研究,以及改良土路基填筑的现场试验,评估其路用性能与耐久性,以进一步验证其可行性并探索推广应用的潜力。

参 考 文 献:

Reference :

- [1] 刘 顿,李嘉芳,陈 雷,等. 盾构渣土在道路工程中资源化利用与性能分析[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(增1): 175-182.
LIU Dun, LI Jia-fang, CHEN Lei, et al. Analysis on resource utilization and performance of shield tunnelling mucks in road engineering[J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(S1): 175-182.
- [2] 吴 坚,邵红彬,唐绍明,等. 盾构渣土原地资源化利用研究[J]. 浙江工业大学学报, 2024, 52(5): 499-506.
WU Jian, SHAO Hong-bin, TANG Shao-ming, et al. Research on the on-situ resource utilization of shield tunneling spoil[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2024, 52(5): 499-506.
- [3] WU F H, REN Y, QU G F, et al. Utilization path of bulk

- industrial solid waste: A review on the multi-directional resource utilization path of phosphogypsum[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 313: 114957.
- [4] 邓友生,李 龙,孙雅妮,等. 水泥粉煤灰处理湿陷性黄土路基承载性能[J]. 交通运输工程学报,2023,23(4):92-103.
DENG You-sheng, LI Long, SUN Ya-ni, et al. Bearing capability of collapsible loess subgrade through cement-fly ash treatment[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(4): 92-103.
- [5] 季 节,梁 彝,韩秉烨,等. 中国道路工程中土壤固化技术综述[J]. 交通运输工程学报,2023,23(2):47-66.
JI Jie, LIANG Ben, HAN Bing-ye, et al. Review on soil solidified technologies in road engineering in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(2): 47-66.
- [6] 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 Yin-chuan, SHEN Ai-qin, GAO Tao, 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.
- [7] 赵秀绍,赵林浩,王梓尧,等. 全风化千枚岩复合改良土路用性能[J]. 交通运输工程学报,2021,21(6):147-159.
ZHAO Xiu-shao, ZHAO Lin-hao, WANG Zi-yao, et al. Road properties of completely weathered phyllite composite improved soil[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(6): 147-159.
- [8] ZHANG C, YANG J S, FU J Y, et al. Recycling of discharged soil from EPB shield tunnels as a sustainable raw material for synchronous grouting[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 268: 121947.
- [9] 习智琴,侯亚康,李水生,等. 地质聚合物基细粒盾构渣土免烧砖性能试验研究[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2022,32(2):83-88.
XI Zhi-qin, HOU Ya-kang, LI Shui-sheng, et al. Experimental study on performance of geopolymers based unfired bricks with fine-grained shield muck[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering (Natural Science Edition), 2022, 32(2): 83-88.
- [10] 钟小春,左 佳,刘泉维,等. 地层中粉细砂在盾构壁后注浆中的再利用研究[J]. 岩土力学,2008,29(增1):293-296.
ZHONG Xiao-chun, ZUO Jia, LIU Quan-wei, et al. Reuse of excavated fine sand for back grouting of shield tunnelling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S1): 293-296.
- [11] ZHOU S H, LI X, JI C, et al. Back-fill grout experimental test for discharged soils reuse of the large-diameter size slurry shield tunnel[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(3): 725-733.
- [12] 李海斌. 复合陶粒的制备及其磷吸附性能研究[D]. 合肥:安徽建筑大学,2016:21-23.
LI Hai-bin. Preparation of composite ceramsite and their adsorption phosphate properties[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2016: 21-23.
- [13] CHEN S B, JIANG H, XING H T, et al. Research on preparation and performance of clay-based shield tunnel nonsintered bricks[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021: 8186851.
- [14] GONG X Z, ZHANG T, ZHANG J Q, et al. Recycling and utilization of calcium carbide slag-current status and new opportunities[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 159: 112133.
- [15] 何 俊,张 驰,管家贤,等. 碱渣固化疏浚淤泥的动变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(增1):3712-3721.
HE Jun, ZHANG Chi, GUAN Jia-xian, et al. Study on dynamic deformation characteristics of dredged sludge solidified by alkali residue[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(S1): 3712-3721.
- [16] 常 锦,杨和平,肖 杰,等. 酸性环境对百色膨胀土胀缩性能的影响及其微观解释[J]. 交通运输工程学报,2019,19(1): 24-32.
CHANG Jin, YANG He-ping, XIAO Jie, et al. Effect of acid environment on swelling-shrinkage properties of Baise expansive soil and its microscopic interpretation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(1): 24-32.
- [17] LV X F, XIANG L. The generation process, impurity removal and high-value utilization of phosphogypsum material [J]. Nanomaterials, 2022, 12(17): 3021.
- [18] 杜延军,刘松玉,覃小纲,等. 电石渣稳定过湿黏土路基填料路用性能现场试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014,44(2):375-380.
DU Yan-jun, LIU Song-yu, QIN Xiao-gang, et al. Field investigations on performance of calcium carbide residues stabilized over-wet clayey soils used as highway subgrade materials[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(2): 375-380.
- [19] 朱剑锋,汪正清,陶燕丽,等. 电石渣-草木灰复合固化剂固化废弃软土微观特性研究[J]. 土木工程学报,2023,56(10): 180-189.
ZHU Jian-feng, WANG Zheng-qing, TAO Yan-li, et al. Study on micro characteristics of waste soft soil solidified by calcium carbide slag plant ash composite curing agent[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(10): 180-189.
- [20] GUO W C, ZHANG Z Y, ZHAO Q X, et al. Mechanical properties and microstructure of binding material using slag-fly ash synergistically activated by wet-basis soda residue-carbide slag[J]. Construction and Building Materials, 2021, 269: 121301.
- [21] 胡建荣,张 宏,张海龙,等. 沙漠区风积沙路基水盐迁移规律[J]. 交通运输工程学报,2017,17(3):36-45.
HU Jian-rong, ZHANG Hong, ZHANG Hai-long, et al. Water-salt migration laws of aeolian sand subgrade in desert area[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(3): 36-45.
- [22] 张莎莎,刘亚超,杨晓华,等. 粗粒硫酸盐渍土区高速铁路

- 水泥固化级配碎石变形特性[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(1): 93-104.
- ZHANG Sha-sha, LIU Ya-chao, YANG Xiao-hua, et al. Deformation characteristics of cement stabilized macadam aggregate of high-speed railway in coarse-grained sulfate soil area[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(1): 93-104.
- [23] 杨进博, 李葱葱, 文海家, 等. 软土路基透明相似材料最优配比联合设计方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2025, 45(4): 29-38.
- YANG Jin-bo, LI Cong-cong, WEN Hai-jia, et al. Integrated design method of optimal mix proportion of transparent similar materials for soft soil subgrade[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition) 2025, 45(4): 29-38.
- [24] DING J W, SHI M L, LIU W Z, et al. Failure of roadway subbase induced by overuse of phosphogypsum[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2019, 33 (2): 04019013.
- [25] 金佳旭, 秦志发, 刘 磊, 等. 工业固废-水泥固化腐殖土的力学响应和微观机制[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(11): 2410-2419.
- JIN Jia-xu, QIN Zhi-fa, LIU Lei, et al. Mechanical response and micro-mechanism of humus soil solidified by industrial solid waste-cement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(11): 2410-2419.
- [26] ZHANG B L, CHEN K S, ZHANG K, et al. Mechanical properties and modification mechanism of phosphogypsum stabilized soil[J]. SN Applied Sciences, 2022, 4(8): 241.
- [27] JIAO N, WAN X, DING J W, et al. Mechanical properties and microstructure of lime-treated shield tunnel muck improved with carbide slag and soda residue[J]. Construction and Building Materials, 2024, 428: 136419.
- [28] ZHOU Y X, LI Z Q, ZHANG P, et al. Research status, hot spots, difficulties and future development direction of microbial geoengineering[J]. Journal of Road Engineering, 2024, 4(2): 234-255.
- [29] 章定文, 刘文俊, 侯 爵, 等. 循环湿化条件下粉土联合石灰改良弱膨胀土的动力累积变形特性[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(4): 71-79.
- ZHANG Ding-wen, LIU Wen-jun, HOU Jue, et al. Dynamic cumulative deformation characteristics of weak expansive soil improved by silt and lime under cyclic wetting[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25 (4): 71-79.
- [30] 黄轩嘉, 刘维正, 陈钊锋. 不同加载方式和含水率下路基红黏土回弹和累积塑性变形特性[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(5): 145-158.
- HUANG Xuan-jia, LIU Wei-zheng, CHEN Zhao-feng. Resilient and accumulative plastic deformation characteristics of subgrade lateritic soil under different loading modes and moisture content[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(5): 145-158.