

工业废渣协同水泥固化渠道地基盐渍土 强度及微观机理研究

丁永发¹, 李宏波^{1,2,3*}, 张轩硕¹, 李盛¹

(1.宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021; 2.宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 银川 750021; 3.旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 银川 750021)

摘要:【目的】宁夏银北平原引黄灌溉区混凝土渠道板易受盐渍土地基冻胀、腐蚀及溶陷发生破坏,为解决渠道盐渍土地基工程病害问题开展固化盐渍土试验研究。【方法】针对宁夏地区全盐量为 23%超硫酸盐渍土,通过正交试验方法,研究了不同水泥掺量(2%、4%、6%)、粉煤灰掺量(10%、20%、30%)、硅灰掺量(1%、3%、5%)及脱硫石膏掺量(3%、6%、9%)对固化盐渍土无侧限抗压强度的影响;利用 XRD、SEM 和 EDS 探究了较高强度配合比固化盐渍土的反应产物、微观结构和固化机理。【结果】各因素对抗压强度影响的主次顺序为水泥>硅灰>粉煤灰>脱硫石膏;粉煤灰、硅灰、脱硫石膏协同水泥固化盐渍土无侧限抗压强度较未固化盐渍土有大幅提升,且 6%掺量水泥+10%掺量粉煤灰+6%掺量脱硫石膏+5%掺量硅灰固化效果最佳;4 种固化剂间的交互协同作用促进了混合物中的硅氧、铝氧微晶格溶解,与盐渍土中 Ca^{2+} 结合生成 C-S-H、C-A-H 凝胶以及 AFt 等物质,这些胶凝体相互堆叠构成整体空间骨架结构,增加了固化盐渍土的抗压强度;EDS 能谱检测分析 SEM 微观图中典型形貌生成物,验证了其生成物成分。【结论】将 10%粉煤灰、5%硅灰、6%脱硫石膏协同 6%水泥用于渠道盐渍土固化具有可行性,为 3 种工业废渣协同水泥固化盐渍土工程应用提供参考。

关键词: 固化盐渍土; 抗压强度; 微观结构; 固化机理

中图分类号: TU411.7

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022053

OSID:



丁永发, 李宏波, 张轩硕, 等. 工业废渣协同水泥固化渠道地基盐渍土强度及微观机理研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 113-120.

DING Yongfa, LI Hongbo, ZHANG Xuanshuo, et al. Using Mixture of Industrial Waste Residues and Cement to Reinforce Channel Foundation in Salinized Soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 113-120.

0 引言

【研究意义】随着宁夏银川平原引黄灌溉区域面积逐渐扩大,银川平原以北灌溉区面临土地盐渍化。盐渍土作为渠道的地基土,土中的盐分易受含水率、温度的影响迁移聚集至混凝土渠道板,产生盐-冻胀、溶陷、腐蚀等破坏,对农业生产和水资源高效利用构成直接威胁。实现盐渍土固化并使之具有良好的强度和耐久性能,是实现渠道地基加固的基础和前提,对银川平原盐渍土地区渠道加固和修复具有重要意义。

【研究进展】近年来,随着工业固体废物渠道利用不断开拓,国内外研究人员对不同改性材料固化盐渍土开展了许多探索,取得了突出成果。张莎莎等^[1]研究发现粗粒盐渍土中掺加石灰和火山灰土壤结构性、

抗变形能力增强,盐渍温度敏感区间和溶陷率均降低。李宏波等^[2-4]通过研究发现,将不同掺比的水泥、粉煤灰、硅灰和镁渣作为固化剂,对提高固化硫酸盐渍土的力学性能、收缩性能、抗冻性能效果明显。张立力等^[5]使用高镁镍渣-磷石膏基胶凝材料等工业固体废物开展现场加固淤泥盐渍土试验,对试验段采样进行强度、电导率、pH 等多项指标检测分析,结果表明,固化淤泥盐渍土理化性质明显得到改善。王一名等^[6]用混凝土再生微粉分别替代水泥和粉煤灰固化硫酸盐渍土,研究了其强度特性和固化机理,证实了一定替代率的混凝土再生微粉可以有效提高盐渍土的强度。吕擎峰等^[7-8]开展了水玻璃联合水泥、粉煤灰强度特性和水盐运移相关研究,认为水玻璃有效降低了盐渍土中的硫酸根离子浓度,抗压强度随水玻璃掺量增加呈线性增长,有效抑制了盐胀。张洋等^[9]发现天然沸石结合有机材料对滨海盐渍土进行改良,能有效减低 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 质量分数和全盐量。Abbasi 等^[10]将火山灰和粉煤灰用于伊朗粉质沙土改良,改良后强度特性优化明显。Cristelo 等^[11]将强碱作为粉煤

收稿日期: 2022-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(52069025); 宁夏高等学校一流学科(水利工程学科)资助项目(NXYLXK2021A03)

作者简介: 丁永发(1999-),男,宁夏海原人。硕士研究生,主要从事盐渍土固化研究。E-mail: NXUMrDing@163.com

通信作者: 李宏波(1977-),男,陕西蓝田人。副教授,博士研究生,主要从事水工结构及道路材料研究。E-mail: lhbiongo@126.com

灰拌合土激发剂, 分析了硅铝酸盐(N-A-S-H)凝胶体对强度的影响。【切入点】上述研究结果表明, 目前利用 1~2 种固化剂改良弱中盐渍土的强度及固化机制较为完善, 针对临水设施病害严重的超盐渍土地区, 采用复合固化剂固化超盐渍土的强度及固化机制研究较少。宁夏地区每年因工业生产、火力发电产生的大量粉煤灰、脱硫石膏、硅灰等工业固体废物大量露天堆放, 不仅占用土地、污染环境, 而且浪费资源。工业废渣协同水泥处理技术应用于渠道地基加固, 不仅能提高渠道地基土强度, 还能实现工业固体废物再生利用。

【拟解决的关键问题】为此, 本文选取粉煤灰、硅灰、脱硫石膏协同水泥固化渠道盐渍土, 开展了无侧限抗压强度试验、利用 X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、能谱分析(EDS), 研究盐渍土改良前后矿物成分、微观结构、元素量, 对固化机理进

行了深入探讨。旨在为宁夏地区工业固废应用于渠道盐渍土地基加固提供参考。

1 试验部分

1.1 试验材料

试验所用盐渍土取自宁夏平罗县前进农场渠道地基, 经过去除杂质、晾晒碾压, 用 2 mm 筛筛分处理, 取用筛下土样。土样的颗粒级配分布曲线如图 1 所示, 基本物理指标及离子成分见表 1, 其中 $Cl^-/SO_4^{2-}=0.296<0.30$, 含盐量大于 6%, 属于超硫酸盐渍土^[12], XRD 检测结果显示盐渍土主要矿物成分为石英、斜方钙沸石、方解石(图 2)。粉煤灰和脱硫石膏取自宁夏银川市西夏区热电厂, 硅灰为中通伟业工程材料有限公司生产, 水泥采用赛马牌 P·O 42.5 水泥, 固化剂主要成分如表 2 所示。

表 1 盐渍土物理指标与离子组成

Table 1 Physical characteristics and state of ion composition in saline soil

基本物理指标				离子组成/(mmol kg ⁻¹)								全盐量/%	pH 值
塑限/%	液限/%	最佳含水率/%	最大干密度/(g cm ⁻³)	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺		
14.10	31.80	16.17	1.90	8.71	0.57	2.78	9.41	0.83	0.15	2.30	2.23	23	8.9

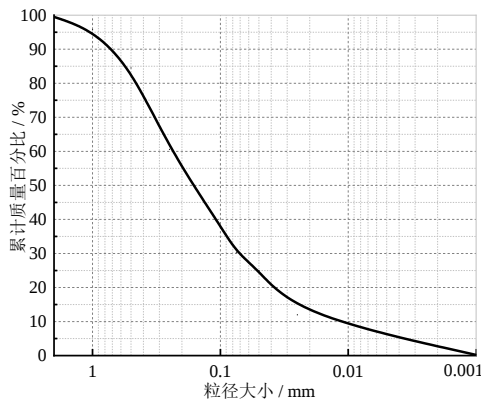


图 1 盐渍土颗粒级配分布曲线

Fig.1 Particle size distribution curve of saline soil

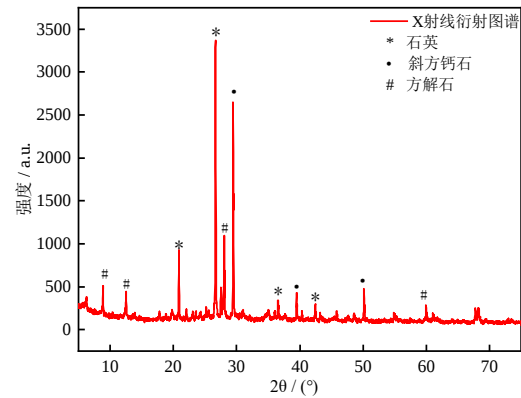


图 2 天然盐渍土 XRD 图谱

Fig.2 XRD pattern of natural saline soil

表 2 固化剂化学成分及其量

Table 2 Chemical composition and content of curing agent

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	CO ₂	Cl	%
水泥	22.39	6.83	3.81	56.94	1.56	0.74	0.29	-	-	-	-	
粉煤灰	28.56	37.92	12.80	12.28	2.10	1.69	1.48	1.06	0.54	-	-	
硅灰	89.42	2.30	0.72	0.67	3.22	2.91	-	0.03	-	-	-	
脱硫石膏	7.20	2.04	2.86	42.26	2.38	0.64	0.33	0.19	30.26	9.68	1.34	

1.2 试验方案及试件制备

研究表明, 粉煤灰掺量低, 固化效果不明显, 掺量过高影响早期强度。粉煤灰掺加 25% 固化盐渍土性能较优^[2], 为提高工业利用率, 减少水泥熟料使用, 水泥经济掺量不大于 6%, 硅灰掺量宜控制在 10% 以内^[3-4]。基于此, 为了较为全面的研究水泥、粉煤灰、硅灰和脱硫石膏混掺对渠道盐渍土固化后强度特性的影响规律, 采用 4 因素 3 水平正交试验方案, 试验

方案见表 3 所示; 由于本试验水泥、硅灰、脱硫石膏相对粉煤灰掺量小, 影响固化盐渍土最佳含水率与最大干密度的主要影响因素为粉煤灰掺量, 故对粉煤灰掺量为 0%、10%、20%、30% 的盐渍土进行击实试验, 击实试验结果见表 4, 粉煤灰掺量变化引起混合土最佳含水率和最大干密度波动较大。

为保证试样均匀性, 将固化剂和盐渍土放入净浆搅拌机搅拌 5 min, 称量自来水加入喷壶边喷边搅拌

至均匀,然后用保鲜膜包裹密封 24 h 至水分散布均匀,试样模具为高度 50 mm、直径 50 mm 的钢模,设计压实度 96%,装样时严格控制质量,分 3 层装入并采用双向静力压实法制样,放置养护箱恒温恒湿进行标准养护。

无侧限抗压强度采用 YAW-300 kN 微机控制电子压力试验机,加载速率 1 mm/min,以每组 3 个平行试样强度平均值作为代表性结果;XRD 使用日本理学公司生产的 Dmax2200/PC X 射线粉末衍射仪,射线管功率 2.0 kW,扫描范围:3°~85°;SEM 及 EDS 能谱分析使用德国 ZEISS 公司生产的 EVO 18 钨灯丝扫描电子显微镜。

表 3 正交试验方案

Table 3 Orthogonal test scheme

掺量水平	掺量百分比/%			
	A	B	C	D
1	2	10	1	3
2	4	20	3	6
3	6	30	5	9

注 A、B、C、D 分别表示水泥、粉煤灰、硅灰、脱硫石膏掺量百分比。

表 4 粉煤灰盐渍土击实试验结果

Table 4 Results of compaction test of fly ash saline soil

粉煤灰掺量/%	最佳含水率 $\omega_{opt}/\%$	最大干密度 $\rho_d/(\text{g cm}^{-3})$
0	16.17	1.90
10	18.80	1.82
20	20.00	1.68
30	20.80	1.58

2 无侧限抗压试验结果分析

正交试验结果分析采用极差分析法,表 5 给出了不同配比固化盐渍土 7、28 d 无侧限抗压强度;以各因素 k_{ij} 为纵坐标,因素水平为横坐标绘制极差指标图如图 3 所示。

表 5 无侧限抗压强度试验结果

Table 5 Unconfined compressive strength test results

方案	不同材料掺量/%				无侧限抗压强度/MPa	
	A	B	C	D	7 d	28 d
A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	2	10	1	3	1.69	1.91
A ₁ B ₂ C ₂ D ₂	2	20	3	6	1.62	1.83
A ₁ B ₃ C ₃ D ₃	2	30	5	9	1.93	2.04
A ₂ B ₁ C ₂ D ₃	4	10	3	9	3.82	4.63
A ₂ B ₂ C ₃ D ₁	4	20	5	3	3.96	4.05
A ₂ B ₃ C ₁ D ₂	4	30	1	6	2.97	3.16
A ₃ B ₁ C ₃ D ₂	6	10	5	6	5.01	6.24
A ₃ B ₂ C ₁ D ₃	6	20	1	9	3.30	4.37
A ₃ B ₃ C ₂ D ₁	6	30	3	3	3.60	5.91
A ₀ B ₀ C ₀ D ₀	0	0	0	0	0.33	0.31

注 A、B、C、D 分别表示水泥、粉煤灰、硅灰、脱硫石膏掺量百分比,下标代表掺量水平。

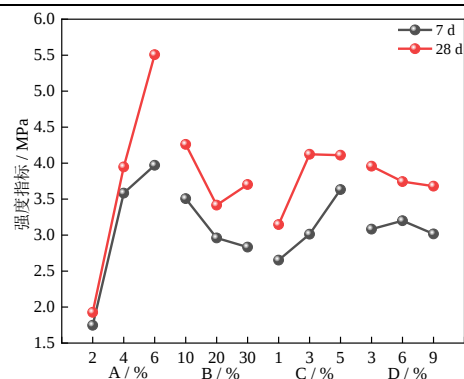


图 3 极差指标图

Fig.3 Range index diagram

由试验结果可知,7 d 龄期,水泥、粉煤灰、硅灰、脱硫石膏因素对固化盐渍土无侧限抗压强度的极差分别为 2.223、0.673、0.980、0.183,各因素对抗压强度影响的主次顺序为水泥>硅灰>粉煤灰>脱硫石膏,从极差指标图可以看出水泥取 6% (A₃)、粉煤灰取 10% (B₁)、硅灰取 5% (C₃)、脱硫石膏取 6% (D₂) 固化盐渍土抗压强度最大,较优配比为 A₃B₁C₃D₂,同抗压强度试验结果一致;28 d 龄期,水泥、粉煤灰、硅灰、脱硫石膏因素对固化盐渍土无侧限抗压强度的极差分别为 3.580、0.550、0.963、0.063,各因素对抗压强度影响的主次顺序为水泥>硅灰>粉煤灰>脱硫石膏,从极差指标图可以看出水泥取 6% (A₃)、粉煤灰取 10% (B₁)、硅灰取 5% (C₃)、脱硫石膏取 3% (D₂) 固化盐渍土抗压强度最大,较优配比为 A₃B₁C₃D₁,试验配合比无此设计组合,与此配合比相近的试验组合 A₃B₁C₃D₂ 抗压强度达到 6.24 MPa。各因素效应极差直观分析可以看出,同 7 d 相比,28 d 水泥掺量变化对抗压强度影响更显著,粉煤灰、硅灰、脱硫石膏随掺量变化对不同龄期固化盐渍土抗压强度影响显著性变化较小。较优配合比方案 A₃B₁C₃D₂ 7 d 和 28 d 抗压强度分别达到 5.01、6.24 MPa,是未固化盐渍土强度的 15、20 倍,均为最大值,A₃B₃C₂D₁ 组合强度增长幅度最大,28 d 强度较 7 d 提高了 64.1%。

3 XRD 试验结果分析

对试验结果较优、强度增长明显的两组配比 (A₃B₁C₃D₂、A₃B₃C₂D₁) 进行 XRD 分析,对比天然盐渍土图 2,7 d 和 28 d 养护龄期下的固化盐渍土均新增水化硅酸钙 $x\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ (C-S-H)、水化铝酸钙 $x\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ (C-A-H) 晶体衍射峰,且 28 d 养护龄期较 7 d SiO_2 晶体衍射峰值明显减小,C-S-H、C-A-H 衍射强度更高,这是因为固化盐渍土中的 SiO_2 参与水化反应生成 C-S-H、C-A-H。XRD 中 ($2\theta=52^\circ$) 存在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰,固化剂中存在部

分游离的 CaO 和 Ca(OH)_2 , CaO 与 H_2O 反应生成 Ca(OH)_2 , 水泥中的 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 水化作用也会产生一定量的 Ca(OH)_2 , 28 d 衍射峰值较 7 d 有所减弱, 这主要是因为粉煤灰硅灰提供的 Ca(OH)_2 和水泥水化产生的 Ca(OH)_2 逐渐被消耗。图 4 (a)、图 4 (b) 中均存在明显的 AFt 衍射峰, 28 d 衍射峰较 7 d 明显加强, 由于 Ca(OH)_2 和石膏的存在, 粉煤灰和硅灰潜

在水硬性被激发, 矿渣玻璃体结构被解离, 水泥中富含 CaO , 在 SO_4^{2-} 的环境中容易生成 AFt, 钙矾石具有膨胀填充孔隙的作用, 是后期固化土强度提高的主要原因。图 4 (b) ($2\theta=51^\circ$) 7、28 d 中存在 Al_2O_3 晶体相, 粉煤灰中 Al_2O_3 量高, 达到 37.92%, 大掺量粉煤灰早期活性低、水化反应慢, 故未反应的 Al_2O_3 量多, 是固化盐渍土早期强度低的主要原因。

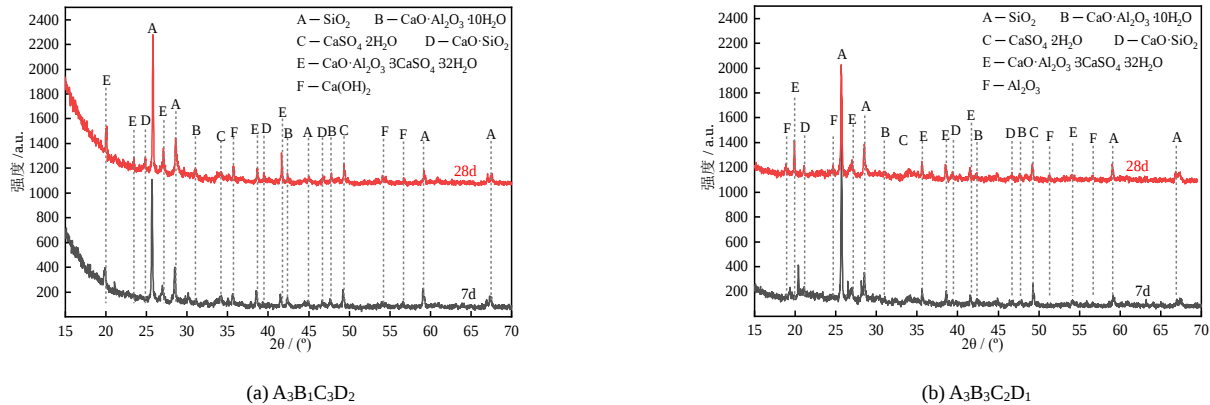


图 4 固化盐渍土 XRD

Fig.4 XRD of solidified saline soil

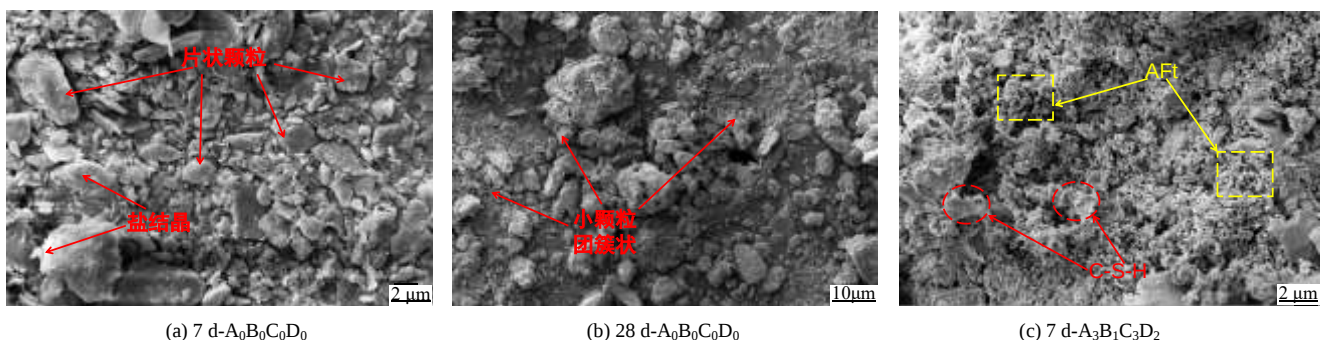
4 固化盐渍土微观结构及反应机理分析

4.1 固化盐渍土微观结构分析

试验选取 7、28 d 抗压强度较高、强度增长明显的 2 组配合比进行微观结构分析, 图 5 (a)、图 5 (b) 分别为不同龄期放大倍数为 2.0 kX、400 X 的盐渍土微观形貌图, 图 5 (c)、图 5 (f) 分别为固化盐渍土养护龄期为 7、28 d 的微观形貌图。

从图 5 (a)、图 5 (b) 可以看出, 未固化盐渍土属于分散结构, 盐渍土结构疏松、孔径大, 土样主要以大颗粒片状、细小颗粒团簇状、盐结晶 3 部分组成, 颗粒间以点-点、面-面接触。大量片状体、细枝状晶体包裹小颗粒形成凝胶体, 附着在大颗粒表面和颗粒间隙中, 使颗粒表面难以辨认, 这些片状体、细枝状是 NaSO_4 、 CaSO_4 与土中其他物质结晶形成的。掺加固化剂后, 混合土变成絮凝结构, 颗粒间以面-边、面-角接触为主^[13], 固化剂与土中相应成分发生物理及化学反应, 土体中硫酸盐量减少, 盐分减小使

其结构特征凸显出来 (如图 5 (c) — 图 5 (f)), 土颗粒表面生成的蜂窝状 C-S-H、C-A-H 乱序堆积形成架空结构, 将单个土颗粒联合成整体, 土中还存在柱状 CaSO_4 晶体。观察 SEM 图可以看出, 图 5 (c)、图 5 (f) 较图 5 (e) 孔隙率小, 颗粒结合凝胶物质排列更致密, 这主要是因为 $\text{A}_3\text{B}_3\text{C}_2\text{D}_1$ 较 $\text{A}_3\text{B}_1\text{C}_3\text{D}_2$ 粉煤灰掺比高, 固化盐渍土早期强度主要来自水泥水化产生的胶凝物质, 而粉煤灰掺量大, 潜在活性很难激发出来, 固化土中存在未反应的球形粉煤灰、硅灰颗粒, 导致 $\text{A}_3\text{B}_1\text{C}_3\text{D}_2$ 早期水化的胶凝物质少, 这与其宏观强度表现出的规律一致。方案 $\text{A}_3\text{B}_1\text{C}_3\text{D}_2$ 、 $\text{A}_3\text{B}_3\text{C}_2\text{D}_1$ 固化盐渍土 28 d 抗压强度较 7 d 分别增长 24.6%、64.1%, 粉煤灰中的硅铝铁氧化物参与土中化学反应, 这种化学反应对强度的增长有积极作用。从 28 d SEM 图中能明显看出, 土粒表面生成大量六棱柱状 AFt, 其填充于孔隙间, 与 C-A-H、C-S-H 吸附堆叠成整体结构, 增强了颗粒体系间的黏结力。



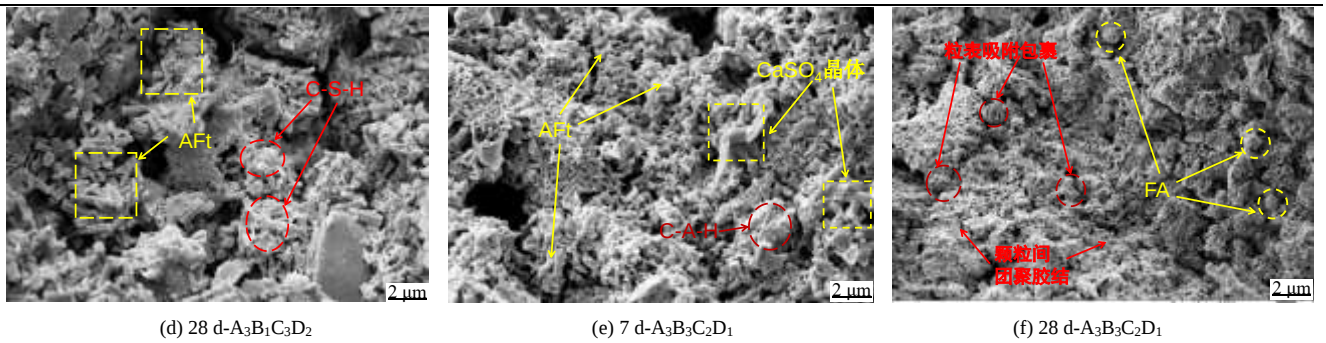
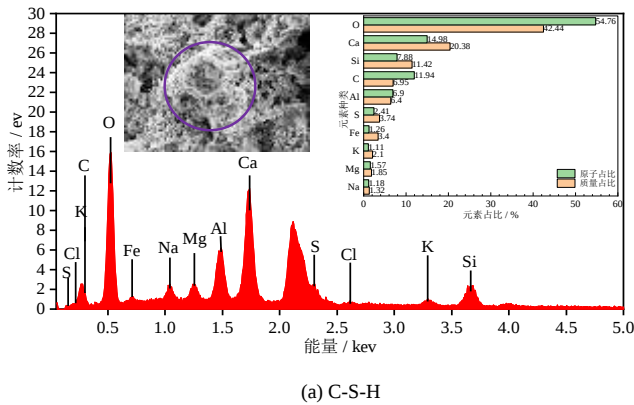


图 5 微观结构图

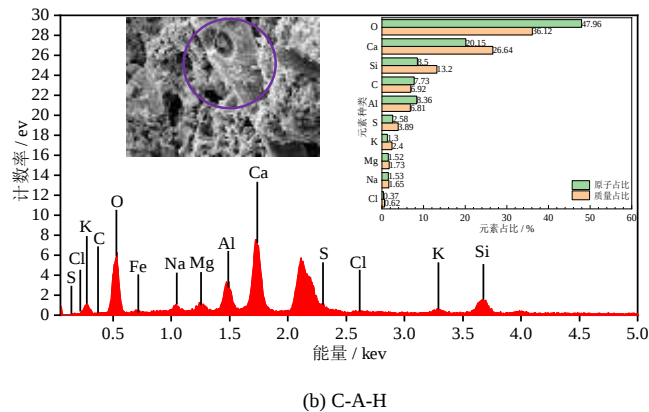
Fig.5 The micro morphology of the mixture

4.2 X 射线能谱分析

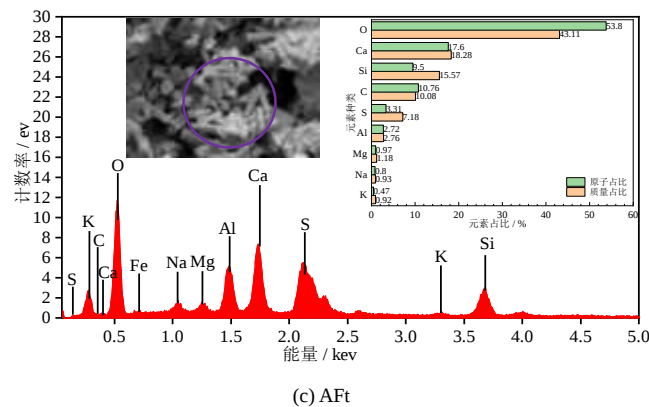
结合电镜扫描图，利用 X 射线能谱分析 (EDS) 对固化盐渍土中不同形貌特征的生成物进行元素分析，进一步确定其化学组成成分。



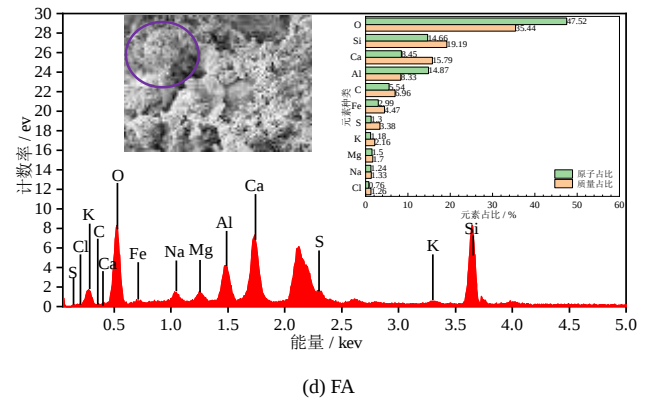
(a) C-S-H



(b) C-A-H



(c) AFt



(d) FA

图 6 EDS 能谱分析

Fig.6 Energy spectrum analysis

对配比 $A_3B_1C_3D_2$ (图 6 (a)) 中的网状物质进行元素分析，网状结构中 Ca 和 Si 原子质量占比分别为 14.98% 和 7.88%， $n(\text{Ca})/n(\text{Si})=1.90$ ，而与 Yu 等^[14] 研究结果 C-S-H 中钙硅比介于 2.3~2.9 之间有偏差，这主要是水泥较固化盐渍土水化速度快，生成的 C-S-H 量多，而固化盐渍土中掺杂粉煤灰、脱硫石膏、硅灰等固化剂，延缓了水化进程，EDS 分析会受到未水化的粉煤灰、硅灰颗粒的影响。对图 6 (b) 中的条状物进行元素分析，Ca 原子质量为 20.15%，Si 原子占 8.5%，Al 原子占 8.36%， $n(\text{Ca})/n(\text{Si})/n(\text{Al})\approx 2:1:1$ ，说明此类水化产物为 C-A-H 或 (C-(A)-S-H)，可以看出，水化硅酸钙和水化铝酸钙是粉煤灰、硅灰、脱硫石膏协同水泥固化盐渍土的早期强度支撑。元素分析结果显示盐渍土中含有少量钾盐， K_2SO_4 可通过中和酸性的 Si-OH 基团进入 C-S-H 层间位置，即 K^+ 占据 Si-OH 中的 H 的位置^[15]，可能对 C-S-H 凝胶产生一定影响。

理论研究表明^[16]，含有 S、Ca、Al 的化合物混合在一起，满足化学计量比时，就有可能生成钙矾石，同时钙矾石的形貌、晶体尺寸与环境及矿物掺合料等多重组分的供给平衡有关，对配比 $A_3B_3C_2D_1$ 龄期 28 d 中生成的棱柱状晶体分析 (图 6 (c))，S 原子占 2.31%，Al 原子占 3.72%， $n(\text{S})/n(\text{Al})=1.61$ ，结合 XRD 化合物检测结果，存在 $C_3A(3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3)$ ，

土中含有较多 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 及硫酸盐,能够促进生成更多 AFt 生成,延缓其向 AFm 转化,综合分析可判定该晶体为 AFt。7 d 龄期、粉煤灰 (FA) 掺量 30% 的固化盐渍土存在大量表面被侵蚀球形颗粒,由图 6 (d)可知, Si、Al、Fe 元素量分别为 14.66%、14.87%、2.99%,含量相对较高,可判定该球形颗粒为未水化的粉煤灰颗粒,进一步表明过量粉煤灰不利于固化盐渍土早期强度的提高。

4.3 固化盐渍土反应机理探讨

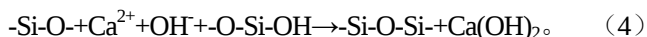
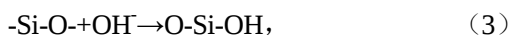
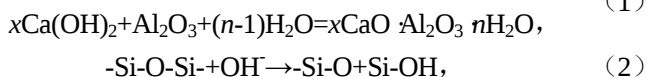
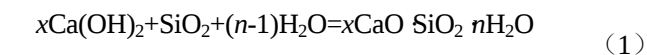
在盐渍土中加入水泥、粉煤灰、硅灰及脱硫石膏会产生一系列物理化学反应,主要包括水泥水化物与黏土颗粒产生凝硬反应、离子交换和团粒化作用、火山灰作用等。

1) 水泥水化及凝硬反应

盐渍土具有吸收阴阳离子并使他们具有可交换的状态,黏土颗粒表面负电荷比正电荷占优势,所以阳离子比阴离子更容易吸收。水泥及少量粉煤灰水化产生 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 会把盐渍土中的 K^+ 、 Na^+ 置换出来,这种在碱性介质中的离子交换反应,减小了土粒表面吸附 Ca^{2+} 扩散层,促进土团粒进一步联结和凝聚,形成蜂窝状结构。随水泥水化深入,盐渍土中大部分的硅铝矿物与 Ca^{2+} 发生化学反应生成结晶化合物水化硅酸钙 (C-S-H)、水化铝酸钙 (C-A-H) 凝胶体,这两种凝胶呈纤维网状和团簇状,交织包裹在土颗粒表面,提高了盐渍土强度。28 d XRD 中 C-S-H、C-A-H 峰值升高, SiO_2 峰值降低,证明了固化盐渍土中 SiO_2 参与了水化反应。

2) 火山灰作用

水泥水化析出的氢氧化钙 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 吸附到硅灰、粉煤灰颗粒表面与其活性成分产生火山灰反应,生成水化硅酸钙和水化铝酸钙等胶凝物质,提高了固化盐渍土强度,反应式如 (1)。硅灰和粉煤灰主要活性成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 ,表面具有 Si-O-Al 双层保护膜,其潜在活性很难激发出来,当存在 Ca^{2+} 和 $\text{pH}>13.15$ 时活性矿物易析出^[1],反应式如式 (2) — 式 (4);在 Ca^{2+} 和 Na^+ 作用下促进了 -Si-O-Si- 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的生成。



3) $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、AFt 及其衍生结晶体生成

反应物中的 CaSO_4 一部分来自脱硫石膏,另一部分来自盐渍土中 SO_4^{2-} 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成物, CaSO_4 同 $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ (水化铝酸钙) 反应生成 AFt;

离子检测结果表明盐渍土中存在一定量的 CO_3^{2-} , CO_3^{2-} 能与 CaO 、 Al_2O_3 、和 H_2O 组合成三盐型或高盐型的四元水化物,其化学式为 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaCO}_3 \cdot 30\text{H}_2\text{O}$,其在结构上与钙矾石大致相同^[17]。除了 Al_2O_3 ,盐渍土中同样存在 Fe_2O_3 ,由 Fe_2O_3 替代 Al_2O_3 形成部分铁钙石,化学式为 $\text{Ca}_6\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}$ 。

5 讨论

水泥作为传统固化剂,能较好提高固化盐渍土强度^[18-19],但水泥生产成本低、能耗大,不利于“双碳”目标的实现,国内诸多研究学者也另辟蹊径,利用添加纤维、稻壳灰、硅微粉^[20-23]等多种改性固化方法研究改良盐渍土的理化性质,取得了丰硕的成果,纤维加筋盐渍土作为一种传统物理固化方法,能提高其抗变形能力,但纤维难以保证加筋均匀性^[24];粉煤灰和石灰也是理想的固化盐渍土材料,随着研究不断深入,二灰中添加适宜掺量有机高分子材料其抗冻性能改善明显^[25];工业废渣是一种理想的土壤固化剂,但使用时要充分考虑是否含有对环境产生污染的成分。随着盐渍土改良技术向纵深发展,国内外研究趋向于运用多源数据融合与水盐运移过程多尺度模拟揭示盐渍化驱动机制^[26],进而优化改良技术,这为未来盐渍土治理指明了发展方向。使用盐渍土固化剂要因地制宜,变废为宝,宁夏银川市每年产生大量粉煤灰、硅灰和脱硫石膏,资源再生利用问题亟待解决;研究多种复合固化剂固化渠道盐渍土,为提高渠道灌溉水资源利用率、实现变废为宝奠定基础。

本文利用 3 种工业废渣协同水泥固化盐渍土,6% 水泥+10%粉煤灰+5%硅灰+6%脱硫石膏固化盐渍土,强度较未固化土提高了 20 倍,微观结构结合化学反应机理分析表明,固化盐渍土强度主要来自于 C-S-H、C-A-H 及 AFt 等胶凝物质,这些胶凝物质与土颗粒间粘结、共同构成空间骨架结构、提高了土的抗压强度;脱硫石膏的加入还能有效抑制离子迁移,从而减小离子迁移对渠道板的腐蚀破坏;固化盐渍土的抗剪、抗冻、抗渗性能是评价实际服役能力的重要指标,是后续研究的重点。

6 结论

1) 各因素对抗压强度影响的主次顺序为水泥>硅灰>粉煤灰>脱硫石膏,大掺量粉煤灰不利于固化盐渍土 7 d 强度提升,但 28 d 强度增长明显;硅灰、脱硫石膏掺量适中协同 6%水泥固化盐渍土 7、28 d 强度均达到正交配比最大值,盐渍土固化最优掺比为水泥掺量 6%、粉煤灰掺量 10%、硅灰掺量 5%、脱硫

石膏掺量 6%。

2) XRD 试验结果表明, 固化盐渍土 7 d 强度主要来自 C-S-H、C-A-H、AFt, 各因素间的交互作用促进大掺量粉煤灰盐渍土 28 d 龄期生成的 AFt 较 7 d 龄期有明显提升, 与其无侧限抗压强度变化规律一致。

3) SEM 图片表明, 随龄期增长, 固化盐渍土较固化前孔隙率降低, 土颗粒表面和孔隙间生成了大量胶凝物质, 这些产物相互胶结, 土粒间的排布关系由单颗粒和细小颗粒团簇状变成空间网状结构, 加强了土粒、盐分、胶凝物质间的相互黏接力。

参考文献:

- [1] 张莎莎, 谢山杰, 杨晓华, 等. 火山灰改良粗粒硫酸盐渍土路基填料及其作用机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(3): 588-594.
ZHANG Shasha, XIE Shanjie, YANG Xiaohua, et al. Action mechanism of coarse particle sulfate soil subgrade modified by volcanic ash[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(3): 588-594.
- [2] 李宏波, 田军仓, 南红兵, 等. 几种固化剂对渠道盐渍土地基力学性能影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(12): 94-99.
LI Hongbo, TIAN Juncang, NAN Hongbing, et al. Efficacy of four consolidation agents in improving mechanical properties of salinized foundation soil of channels[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(12): 94-99.
- [3] 李宏波, 田军仓, 何芳, 等. 水泥粉煤灰固化超盐渍土的力学性能试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2014, 39(4): 809-816.
LI Hongbo, TIAN Juncang, HE Fang, et al. Mechanical property tests of solidified hypersaline soil with cement and fly ash[J]. Journal of Guangxi University (Nat Sci Ed), 2014, 39(4): 809-816.
- [4] 李宏波, 田军仓, 边兴. 掺加硅灰和石灰条件下的超盐渍土抗剪特征研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(4): 1 145-1 152.
LI Hongbo, TIAN Juncang, BIAN Xing. Investigation on shear characteristics of hypersaline soil improved by lime and silica fume[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2016, 41(4): 1 145-1 152.
- [5] 张立力, 华苏东, 诸华军, 等. 高镁镍渣-磷石膏基胶凝材料固化和改良盐渍土的性能[J]. 材料导报, 2020, 34(9): 9 034-9 040.
ZHANG Lili, HUA Sudong, ZHU Huajun, et al. Properties of solidified and modified saline soil by high magnesium nickel slag-phosphogypsum based cementitious materials[J]. Materials Reports, 2020, 34(9): 9 034-9 040.
- [6] 王一名, 常立君, 李滢. 废弃混凝土再生微粉固化盐渍土的强度特性及微观机理研究[J]. 材料导报, 2021, 35(S2): 268-274.
WANG Yiming, CHANG Lijun, LI Ying. Study on strength characteristics and micro mechanism of saline soil solidified by recycled fine powder of waste concrete[J]. Materials Reports, 2021, 35(S2): 268-274.
- [7] 吕擎峰, 申贝, 王生新, 等. 水玻璃固化硫酸盐渍土强度特性及固化机制研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 687-693, 727.
LYU Qingfeng, SHEN Bei, WANG Shengxin, et al. Strength characteristics and solidification mechanism of sulphate salty soil solidified with sodium silicate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 687-693, 727.
- [8] 吕擎峰, 常承睿, 马博, 等. 固化硫酸盐渍土水盐迁移的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S2): 4 290-4 296.
LYU Qingfeng, CHANG Chengrui, MA Bo, et al. Experimental study on water and salt migration of solidified sulphate saline soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S2): 4 290-4 296.
- [9] 张洋, 李素艳, 孙向阳, 等. 不同改良剂对滨海盐渍土的改良效果[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(5): 67-73.
ZHANG Yang, LI Suyan, Sun Xiangyang, et al. Improvement effects of different amendments on the coastal saline-alkali soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(5): 67-73.
- [10] ABBASI N, MAHDIEH M, DAVOUDI M H, Application of lime and pozzolan for stabilization of silty sand soils in irrigation and drainage networks[J]. JWSS-Isfahan University of Technology 2013, 16(62): 245-257.
- [11] CRISTELO N, GLENDINNING S, TEIXEIRA PINTO A. Deep soft soil improvement by alkaline activation[J]. Proceedings of the Ice Ground Improvement, 2011, 164(2): 73-82.
- [12] 盐渍土地区建筑技术规范. GB/T 50942—2014[S].
- [13] 车雯方. 水环境对钠基土和钙基土工程性能的影响及机理分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [14] YU C, SONG W, SCRIVENER K. Application of Image Analysis Based on SEM and Chemical Mapping on PC Mortars under Sulfate Attack[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2014, 29(3): 534-539.
- [15] 杨振天. 地质聚合物与碱活性骨料界面反应机理研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
YANG Zhentian. The research on reaction mechanism of geopolymer and alkali activity of aggregate in the interface transition zone[D]. Changsha: Changsha University of science & Technology, 2019.
- [16] 钱觉时, 余金城, 孙化强, 等. 钙矾石的形成与作用[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(11): 1 569-1 581.
QIAN Jueshi, YU Jincheng, SUN Huaqiang, et al. Formation and Function of Ettringite in Cement Hydrates[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(11): 1 569-1 581.
- [17] BARNETT S J, ADAM C D, and JACKSON A R W. Solid solutions between ettringite, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$, and thaumasite, $\text{Ca}_3\text{SiSO}_4\text{CO}_3(\text{OH})_6\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ [J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(16): 4 109-4 114.
- [18] 曲振鹏. 水泥改良盐渍土直剪试验及路基边坡稳定性影响研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
QU Zhenpeng. Direct Shear Test of cement-improved saline soil and the influence of roadbed slope stability[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.
- [19] 张傲宁. 水泥固化硫酸盐渍土盐胀机理和性能调控研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
ZHANG Aoning. Study on salt expansion mechanism and performance Control of cement solidified sulfate salty soil[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [20] 朱燕, 余湘娟, 高磊. 海泡石纤维固化盐渍土的强度试验研究[J]. 公路工程, 2021, 46(1): 88-91, 153.
ZHU Yan, YU Xiangjuan, GAO Lei. Test research on strength of saline soil solidified with sepiolite fiber[J]. Highway Engineering, 2021, 46(1): 88-91, 153.
- [21] 韩航天. 冻融作用下盐渍土及稻壳灰固化盐渍土的工程力学性质[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
HAN Hangtian. Engineering mechanical properties of saline soil and rice husk ash solidified saline soil under freeze-thaw cycles[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.
- [22] 杨秀武, 瞿瑜, 周浩然. 水泥硅微粉固化黄土的三轴试验[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(4): 624-628.
YANG Xiuyu, QU Yu, ZHOU Haoran. Triaxial test about loess solidified by cement silicon powder[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2017, 37(4): 624-628.
- [23] 闫宁霞, 宋春香, 杜向琴. 渠道衬砌纤维固化土工程特性的试验研

- 究[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(3): 60-62.
- YAN Ningxia, SONG Chunxiang, DU Xiangqin. Study on engineering properties of the mixed polypropylene fiber solidified soil for canal liner[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(3): 60-62.
- [24] 魏丽. 纤维与石灰加固滨海盐渍土的冻融损伤及力学性能退化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- WEI Li. Fabric damage and mechanical degradation of coastal saline soil reinforced with fiber and lime under freeze-thaw cyclings[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [25] 李敏, 于禾苗, 杜红普, 等. 冻融循环对二灰和改性聚乙烯醇固化盐渍土力学性能的影响[J]. 岩土力学, 2022, 43(2): 489-498.
- LI Min, YU Hemiao, DU Hongpu, et al. Mechanical properties of saline soil solidified with the mixture of lime, fly ash and modified polyvinyl alcohol under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(2): 489-498.
- [26] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 10-27.
- YANG Jingsong, YAO Rongjiang, WANG Xiangping, et al. Research on Salt-affected Soils in China: History, Status Quo and Prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 10-27.

Using Mixture of Industrial Waste Residues and Cement to Reinforce Channel Foundation in Salinized Soils

DING Yongfa¹, LI Hongbo^{1,2,3*}, ZHANG Xuanshuo¹, LI Sheng¹

(1. College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Ningxia Research Center of Technology on Water-saving Irrigation and Water Resources Regulation,

Yinchuan 750021, China; 3. Engineering Research Center for Efficient Utilization of

Water Resources in Modern Agriculture in Arid Regions, Yinchuan 750021, China)

Abstract: 【Objective】Concrete channel slabs used in the Yellow River diversion irrigation channels in Yinbei Plain in Ningxia province are susceptible to frost swelling, corrosion and dissolution induced by soil salinity. Different mitigation techniques have been proposed and the purpose of this paper is to investigate the efficacy of reinforcing the channel foundation by mixture of cement and industrial residuals. 【Method】The salinized soil in the foundation was reinforced by cement mixed with various industrial residuals at different ratios. Overall, there were three cement ratios (weight/weight): 2%, 4% and 6%, each being mixed with fly ash at ratio of 10%, 20% or 30%; silica fume at ratio of 1%, 3% or 5%, and desulfurization gypsum at ratio of 3%, 6% or 9%. For each reinforced specimen, we measured its strength using unconfined compressive test, and then analyzed its XRD, SEM and EDS images.

【Result】The agents that affected the strength of the reinforced specimens most is ranked in the order of cement>silica ash>fly ash>desulfurization gypsum. The unconfined compressive strength of the reinforced soil was significantly higher than that of untreated soil specimens. Mixing 6% cement with 10% of fly ash, 6% of desulfurization gypsum and 5% of silica fume was optimal. Synergistic interaction between them promoted dissolution of silica and aluminum oxygen micro-lattice. In combination with Ca^{2+} in the soil, they generated C-S-H, C-A-H gels. These gels stacked with each other forming a spatial skeleton structure, increasing compressive strength of the specimen as a result. EDS energy spectrum analysis of morphology of the SEM images proved the composition of the mixture. 【Conclusion】Reinforcing the salinized soil in channel foundation by mixing it with 10% of fly ash, 5% of silica fume, 6% of desulfurized gypsum and 6% of cement was optimal to solidify the soil.

Key words: soil reinforcement; compressive strength; microstructure; salinized; channel foundation

责任编辑: 赵宇龙