DOI：10. 16285/j.rsm.2017.03.018

功能组分对固化土早期强度的影响研究

刘晋铭，欧忠文，肖寒冰，莫金川，杨康辉

（中国人民解放军后勤工程学院 化学与材料工程系，重庆 401331）

摘 要：根据红黏土的特点，为解决其固化土早期强度低、水稳定性差等问题，提出了使用膨胀组分、早强组分、减薄双电层结构组分、防水组分等功能组分来提高硫铝酸盐水泥固化土的早期强度。通过单掺试验，优选出了硬脂酸铝、三乙醇胺、$Fe(NO_3)_3$和石膏作为土壤固化材料的功能组分，并通过正交试验，确定了功能组分的最优配方。在该配方下，固化土的 7 d 无侧限抗压强度达到了 8.60 MPa。利用 XRD、SEM 等微观表征，对比分析了掺入功能组分前、后固化土的矿物组成以及微观形貌结构变化，结果表明：适量的功能组分掺入有利于高强、难溶具有膨胀性的矿物晶体生成，从而提高固化土早期强度，但功能组分掺量过高，由于矿物晶体过多膨胀作用以及憎水膜的阻碍作用，改变了固化土的联结方式，使其早期强度降低。

关 键 词：功能组分；固化土；无侧限抗压强度；X 射线衍射；扫描电镜

中图分类号：TU 472.5 **文献识别码：**A **文章编号：**1000－7598 (2017) 03－0755－07

Early strength of stabilized soil affected by functional components

LIU Jin-ming, OU Zhong-wen, XIAO Han-bing, MO Jin-chuan, YANG Kang-hui

(Department of Chemistry and Material Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 401331, China)

Abstract: To solve the problems of low early strength and poor water stability of stabilized red clay, the functional components including expansion component, early strength component, thin electrical double layer structure component, waterproof component are used to improve the early strength of stabilized soil by sulphoaluminate cement. Through the single doping tests, aluminum stearate, triethanolamine, $Fe(NO_3)_3$ and gypsum are selected as the functional components of soil stabilizer., The optimal formula of functional components is further determined by orthogonal test. The unconfined compressive strength of stabilized soil can reach 8.60 MPa after curing 7 days using the optimal formula. By using XRD and SEM, the variations of mineral composition and microstructure of the stabilized soil are analyzed before and after adding functional components. The test results show that functional components used in moderation can contribute to the formation of insoluble mineral crystals with high strength and expansibility, so as to improve the early strength of stabilized soil. However, if the amount of functional components is too high, the early strength of stabilized soil decreases due to the altered connection way of stabilized soil induced by the excessive expansion of mineral crystal and the hindrance of hydrophobic membrane.

Keywords: functional components; stabilized soil; unconfined compressive strength; X-ray diffraction; scanning electron microscope (SEM)

1 引 言

土壤固化技术以其就地取材、施工工艺简单、工程造价低等特点，已广泛地应用于地基基础、公路工程、水利工程等许多领域[1−2]。但目前市面上生产的土壤固化材料多有早期强度低、水稳定性差等特点，仅能起到改良土壤工程性质的作用[3]，无法满足应急条件下工程抢修、抢建的要求。针对现有土壤固化材料的不足，国内外学者尝试通过使用各种外加剂以改善固化土的性能。Basha 等[4]对谷壳灰和水泥原位固化土进行了报道；韩鹏举等[5−6]研究了硫酸钠、氯化镁对水泥土早期强度与微观孔隙的影响规律；邓晓轩等[7]利用可以提高 CH 饱和度的化学试剂来改善固化土的强度；Abood 等[8]探讨了不

收稿日期：2015-04-22
基金项目：军队后勤科研计划重点项目（No.BY211C016）。
This work was supported by the Military Logistics Research Program Major Project (BY211C016).
第一作者简介：刘晋铭，男，1991 年生，博士研究生，主要从事工程抢修抢建材料的研究工作。E-mail: xiaoxiong1025@yeah.net
通讯作者：欧忠文，男，1965 年生，教授，博士生导师，主要从事工程抢修抢建材料的研究工作。E-mail: ouzhongwen@sina.com

同氯化物对砂质黏土工程性能的影响；William 等[9]使用聚合物纤维和水泥对高含水率细粒土进行固化，固化土力学性能得到了一定提高。但以上这些研究都是以普通硅酸盐水泥为基础胶凝材料，探讨的是普通硅酸盐水泥、外加剂、土样 3 者之间的相适性，而对于使用硫铝酸盐水泥固化的土样，外加剂的添加对其产生的影响，尚未进行系统研究。

为研制快硬高强土壤固化材料，本研究选定具有快硬早强性能的硫铝酸盐水泥作为基础胶凝材料，利用功能组分的设计和添加，优选出几种外加剂作为土壤固化材料的功能组分，通过试验探讨了功能组分对固化土强度的影响规律，得出了功能组分的最优配方，同时结合固化土的 XRD 物相分析和微观形态变化，研究了功能组分对固化土强度的影响机制。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验土样的原材料为重庆市沙坪坝区大学城某处深度范围在 20～150 cm 的土壤，经 50 ℃恒温鼓风干燥箱烘干至恒重，过 4.75 mm 筛后得到试验备用土样。其基本性质见表 1。该土样属于低液限红黏土。在干燥条件下强度较高，遇水后易发生吸水膨胀、软化，固化难度相对较大，并且在实际工程中，由于其不良的物理性质与胀缩性，容易导致道路发生不均匀变形、开裂等问题，耐久性较差。

表 1 土样的基本性质

Table 1 Basic properties of soil

土壤类型	液限 /%	塑限 /%	塑性指数 /%	最佳含水率 /%	最大干密度 /(g/cm^3)
黏土	33.6	21.2	12.4	17.2	1.92

试验用水泥为峨眉山强华特种水泥有限责任公司生产的山牌快硬硫铝酸盐 42.5 水泥（SAC）；重庆小南海水泥厂生产的 42.5 R 普通硅酸盐水泥(P·O)。硅灰(SF)产自甘肃三远硅材料有限公司，SiO_2 含量在 90 %以上，比表面积为 21 m^2/g；熟石灰(lime)来源于河北省鑫阳钙业有限公司，$Ca(OH)_2$ 含量大于 90%，细度为 400 目。硝酸铁（$Fe(NO_3)_3$）、硫酸镁（$MgSO_4$）、硫酸铝（$Al_2(SO_4)_3$）、硫酸钙（$CaSO_4·2H_2O$）、硬脂酸铝均为成都市科龙化工试剂厂生产的分析纯。三乙醇胺由天津恒兴化学试剂制造有限公司生产，无色黏稠状液体。甲基硅醇钠为无色透明水溶液，产自济南鑫硕化工有限公司。劳亚尔砂浆防水剂为重庆久圣成防水材料有限公司生产的复合型防水剂，乳白色液体。

2.2 试验方法

根据《土壤固化剂》[10]，《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》[11]等相关标准规范，将固化土混合料在 200 kN 压力下成型直径×高度为 50 mm×50 mm 圆柱体试件；4 h 后脱模，在标准养护箱中养护 6 d；取出试件，浸水 24 h，擦去表面可见自由水，进行无侧限抗压强度试验。

试件经养护后，分别将其破碎取芯，烘干研磨后，采用日本岛津 X 衍射分析仪（XRD−6100）对其进行成分分析，测试采用连续扫描测量法，扫描范围为 5°～80°，扫描速度为 4°/min。运用 JADE 6.5 软件对固化土物相进行分析，采用尝试法和初步估计的方法找到可能物相，再结合固化土的实际成分做出推断。

利用 JSM−6490 LV 型扫描电子显微镜从固化土试样表面得到图像，观察固化土的微观形态特征，并定性分析有无水化产物生成以及水化产物的形态、排列方式。

3 功能组分的设计

3.1 膨胀组分

硫铝酸盐水泥主要包括以下水化反应过程：

$$3Ca(OH)_2·3Al_2O_3·CaSO_4+2(CaSO_4·2H_2O)+34H_2O=3CaO·Al_2O_3·3CaSO_4·32H_2O+2(Al_2O_3·3H_2O) \quad (1)$$

$$2(2CaO·SiO_2)+4H_2O=3CaO·2SiO_2·3H_2O+Ca(OH)_2 \quad (2)$$

$$3Ca(OH)_2+3CaSO_4·2H_2O+Al_2O_3·3H_2O+20H_2O=3CaO·Al_2O_3·3CaSO_4·32H_2O \quad (3)$$

膨胀组分二水石膏（$CaSO_4·2H_2O$）的掺加，不仅能够促进硫铝酸盐水泥中的无水硫铝酸钙（$3Ca(OH)_2·3Al_2O_3·CaSO_4$）水化生成具有膨胀性水化产物钙矾石（$CaO·Al_2O_3·3CaSO_4·32H_2O$），还能促进硅酸二钙（β-$C_2S$）的水化。因为在硫铝酸盐水泥熟料中，$3Ca(OH)_2·3Al_2O_3·CaSO_4$ 晶体将细小的 C_2S 颗粒包围起来，由于 $3Ca(OH)_2·3Al_2O_3·CaSO_4$ 的水化，使 C_2S 表面暴露出来，便于发生水化反应，因而 C_2S 水化反应加快。另一方面，石膏能够与水化氧化铝凝胶、C_2S 水化生成的 $Ca(OH)_2$ 反应生成钙矾石晶体，也能加速 C_2S 的水化[12]。而在整个过程中，生成的水化产物钙矾石具有极大的体积膨胀性，能够填充和挤压土壤颗粒间的孔隙，从而提高固化土的强度。

3.2 早强组分

三乙醇胺作为常用的早强剂，能改善和促进水

泥水化及凝结硬化，促进钙矾石的快速生成，从而提高固化土早期强度。三乙醇胺的作用机制：分子中的 N 原子存在一对未共用的电子，由于其不稳定性，很容易与金属离子发生络合反应，形成稳定的络合物。这些稳定的络合物能为溶液提供更多的可溶区，有利于水泥水化产物的快速扩散，进而促进水泥水化反应的进程，提高固化土早期强度。

但三乙醇胺对固化土的早强作用与土质有密切关系，并不是对所有的土都具有早强和增强作用，并且用量也需要严格控制，使用过量反而会出现缓凝效果，因此，必须进行室内试验，以确定其有效性和用量范围[13]。

3.3　减薄双电层结构组分

通过加入带高价阳离子（Fe^{3+}、Al^{3+}、Ca^{2+}、Mg^{2+}）的盐类，与黏土颗粒表面的低价离子（K^+、Na^+）发生离子交换，减薄双电层结构，释放结合水，降低了动电电位，促进土壤颗粒自身凝聚，从而达到提高固化土强度的目的。土壤中常见阳离子的交换能力大小为[14]

$$Fe^{3+}>Al^{3+}>Ca^{2+}>Mg^{2+}>K^{+}>Na^{+} \quad (4)$$

3.4　防水组分

固化土遇水后易软化，水稳性较差，其强度也受到很大的影响。为改善固化土的抗渗性，提高固化土的强度和耐久性，需向固化土中添加防水组分或实施防渗涂膜工艺[15]。现有的防水剂种类很多，主要应用于混凝土工程中，但在土壤固化方面使用较少。通过对现有防水剂作用机制研究，挑选出硬脂酸铝、甲基硅醇钠以及市面上常用的劳亚尔砂浆防水剂作为防水组分，分别进行试验。硬脂酸铝属于金属皂类防水剂，能在水泥颗粒形成很薄的憎水吸附性膜，并且能与水化产物中的 $Ca(OH)_2$ 反应生成不溶性的钙皂络合物，从而提高密实性和抗渗性[16]。甲基硅醇钠是一种水溶性聚合物，除了在混凝土的颗粒周围易形成具有憎水性能的甲基硅醚防水膜，还能与水泥混凝土表面产生化学结合形成稳定的憎水表面层，并且自身还具有良好的耐腐蚀性和耐候性。劳亚尔砂浆防水剂为水性乳液，属于复合型防水剂，由 20 多种材料加工合成，常用于建筑物的永久防水层，具有很好的防水效果。

4　功能组分的固化效果

4.1　膨胀组分对固化土强度的影响

由图 1 可以看出，随着石膏掺量的增加，固化土强度呈先增大后减小的趋势。在石膏掺量为 0.5% 时，固化土强度达到最大，比基准强度提高了约 24%。说明石膏的掺入对固化土早期强度的提高有促进作用，但石膏的掺量不能过大。否则，会使钙矾石的形成过于集中而过度膨胀，导致固化土内部结构破坏，从而使固化土强度降低[17]。

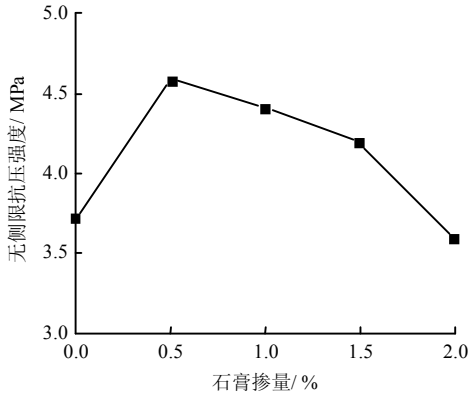


图 1　石膏掺量与无侧限抗压强度的关系

Fig.1　Relationship between dosage of gypsum and unconfined compressive strength

4.2　早强组分对固化土强度的影响

由图 2 可知，随着三乙醇胺掺量的增加，固化土强度先增加后减小。在曲线上升阶段，存在一个拐点，其对应的掺量为 0.04%。在掺量小于 0.04% 时，固化土强度增长缓慢，三乙醇胺掺量从 0%增加到 0.04%，固化土强度比基准强度提高了约 12%。当三乙醇胺掺量大于 0.04%，固化土强度增长迅速，并在掺量为 0.06%时达到峰值，峰值点固化土强度比基准强度提高了约 42%。

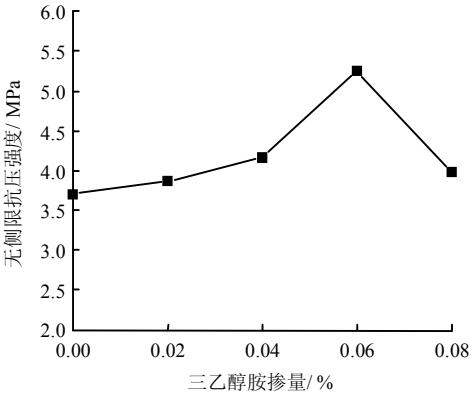


图 2　三乙醇胺掺量与无侧限抗压强度的关系

Fig.2　Relationship between dosage of triethanolamine and unconfined compressive strength

4.3　减薄双电层结构组分对固化土强度的影响

高价阳离子盐对固化土 7 d 无侧限抗压强度的影响规律如图 3 所示。由图可知，在所掺入的 3 种高价阳离子盐早期固化效果依次为：$Fe(NO_3)_3$>

$Al_2(SO_4)_3$>$MgSO_4$。其中 $Fe(NO_3)_3$ 固化效果最好，在掺量较低时，固化土强度就很高，且在掺量为0.2%时，固化土强度达到最高的 4.37 MPa，比基准强度提高了约 18%。$Al_2(SO_4)_3$ 固化效果其次，对固化土强度影响不大。$MgSO_4$ 固化效果最差，随着 $MgSO_4$ 掺量的增加，固化土强度先降低后提高，当 $MgSO_4$ 掺量达到 0.7 %时，固化土强度才与基准强度差不多。出现上述现象的原因可能是由于 3 种高价阳离子的离子交换能力不同造成。综合固化效果、成本等因素考虑，选定 $Fe(NO_3)_3$ 作为土壤固化材料的减薄双电层结构组分。

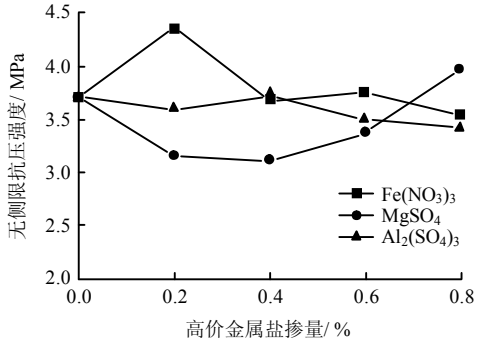


图 3 高价阳离子盐掺量与无侧限抗压强度的关系

Fig.3 Relationship between dosage of salt with high valence cation and unconfined compressive strength

4.4 防水组分对固化土强度的影响

掺加不同防水剂的 7 d 固化土浸水 24 h 后无侧限抗压强度见图 4，其软化系数 η 及质量变化 Δm 见表 2。其中软化系数为 η = 浸水养护 24 h 无侧限抗压强度/未浸水养护无侧限抗压强度之比，质量变化 Δm = 浸水养护后的质量 m_2−浸水养护前的质量 m_1。由图可知，在 3 种防水剂中，固化效果最差的是劳亚尔复合防水剂，随着劳亚尔防水剂掺量的增加，固化土强度基本保持不变，但掺量过高后，固化土强度反而有所降低。甲基硅醇钠和硬脂酸铝对固化土强度的影响规律相似，都是随着防水剂掺量的增加，固化土强度先提高后降低，并且都在掺量为1.0%时达到峰值点。甲基硅醇钠的峰值点对应的固化土强度为 4.51 MPa，比基准强度提高了约 22%；硬脂酸铝的峰值点对应的固化土强度为 4.64 MPa，比基准强度提高了约 25%。

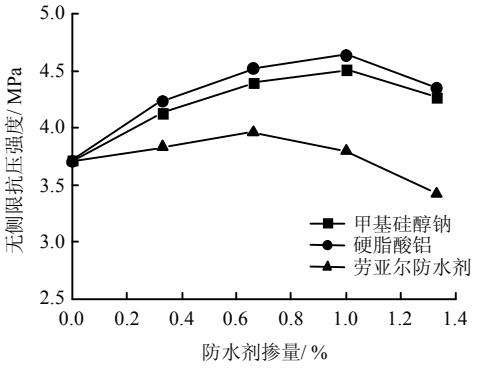


图 4 防水剂掺量与无侧限抗压强度的关系

Fig.4 Relationship between dosage of waterproof agent and unconfined compressive strength

从表 2 可以看出，在一定掺量范围内，掺有甲基硅醇钠或硬脂酸铝的固化土，其软化系数都在70%以上，且随着掺量的增加，其固化土的软化系数越高，表明掺有甲基硅醇钠或硬脂酸铝的固化土浸水后强度损失不大。而掺有劳亚尔防水剂的固化土软化系数基本都在 70%左右，与一般的水泥土、石灰土的软化系数差别不大，并且 24 h 吸水量也远高于前两种防水剂，其水稳性明显不如前两种防水剂。对比 3 种防水剂的固化效果及防水性能，选定硬脂酸铝作为土壤固化材料的防水组分。

表 2 掺加不同防水剂的固化土水稳定性能

Table 2 Water stability of stabilized soils with different water-repellent admixtures

防水剂掺量/ %	软化系数 η / %			质量变化 Δm / g		
	甲基硅醇钠	硬脂酸铝	劳亚尔防水剂	甲基硅醇钠	硬脂酸铝	劳亚尔防水剂
0.33	91.2	92.4	72.7	2.3	2.1	4.4
0.67	92.5	93.7	75.1	2.4	2.0	4.2
1.00	93.6	94.5	67.5	2.5	1.8	4.8
1.33	84.6	81.0	63.6	2.7	1.9	5.0

5 功能组分的正交试验

为探讨各功能组分之间的相互作用效果，本节利用正交试验对功能组分的配方进行研究。考虑到硫铝酸盐水泥后期强度低，甚至出现强度倒退的问题，经前期试验确定了普通硅酸盐水泥、熟石灰、硅灰作为辅助胶凝材料，并通过混料设计试验确定了各胶凝材料的掺入量：硫铝酸盐水泥掺量为 12%，P·O 掺量为 0.4%，熟石灰掺量为 2.4%，硅灰掺量为 1.2%，该配方即为土壤固化材料主固剂的组成配方。

5.1 正交试验方案

本次正交试验是在土壤固化材料主固剂组成配方的基础上，进行功能组分配方的优化研究。在整个试验中，掺水量为 15%。为了对功能组分中的硬脂酸铝（AS）、三乙醇胺（TL）、$Fe(NO_3)_3$（FN）和石膏（GP）的掺量水平进行优选，本正交试验采用的是 4 因素 3 水平的试验，适用的正交表是 $L_9(3^4)$。所进行正交试验的影响因素及水平值见表 3。

表 3　正交试验方案的因素水平表
Table 3　Factors and levels of orthogonal test

水平	硬脂酸铝掺量 /%	三乙醇胺掺量 /%	$Fe(NO_3)_3$ 掺量 /%	石膏掺量 /%
1	0.8	0.04	0.1	0.2
2	1.0	0.06	0.2	0.4
3	1.2	0.08	0.3	0.6

5.2　试验结果与分析

本次正交试验以 7 d 固化土的无侧限抗压强度为评价标准，以探讨各因素对固化土无侧限抗压强度的影响规律。表 4 为正交试验中硬脂酸铝掺量、三乙醇胺掺量、$Fe(NO_3)_3$ 掺量和石膏掺量对固化土 7 d 无侧限抗压强度影响的试验结果。

表 4　7 d 龄期试验方案与结果极差分析
Table 4　Experimental program and analysis of results after curing 7 days

编号	硬脂酸铝掺量 A/%	三乙醇胺掺量 B/%	$Fe(NO_3)_3$ 掺量 C/%	石膏掺量 D/%	7 d 无侧限抗压强度/MPa
1	1(0.8%)	1(0.04%)	1(0.1%)	1(0.2%)	8.18
2	1(0.8%)	2(0.06%)	2(0.2%)	2(0.4%)	8.57
3	1(0.8%)	3(0.08%)	3(0.3%)	3(0.6%)	6.63
4	2(1.0%)	1(0.04%)	2(0.2%)	3(0.6%)	6.12
5	2(1.0%)	2(0.06%)	3(0.3%)	1(0.2%)	7.39
6	2(1.0%)	3(0.08%)	1(0.1%)	2(0.4%)	7.80
7	3(1.2%)	1(0.04%)	3(0.3%)	2(0.4%)	5.65
8	3(1.2%)	2(0.06%)	1(0.1%)	3(0.6%)	7.00
9	3(1.2%)	3(0.08%)	2(0.2%)	1(0.2%)	5.80
K_1	23.38	19.95	22.98	21.37	
K_2	21.31	22.96	20.49	22.02	
K_3	18.45	20.23	19.67	19.75	
$\overline{K_1}$	7.79	6.65	7.66	7.12	
$\overline{K_2}$	7.10	7.65	6.83	7.34	
$\overline{K_3}$	6.15	6.74	6.56	6.58	
R	1.64	1.00	1.10	0.76	

由表 4 可知，本次试验中影响固化土 7 d 无侧限抗压强度因素的主次关系为：硬脂酸铝掺量>$Fe(NO_3)_3$ 掺量>三乙醇胺掺量>石膏掺量。在该龄期下，4 个因素的优水平分别为 A_1、B_2、C_1、D_2，而 4 个因素的优水平组合为 A_1 B_2 C_1 D_2，即为本试验的最优水平组合，此组合对应的配比为：硬脂酸铝掺量 0.8%、三乙醇胺掺量 0.06%、$Fe(NO_3)_3$ 掺量 0.1%、石膏掺量 0.4%。在该配方下，固化土的 7 d 无侧限抗压强度达到了 8.60 MPa，比仅掺主固剂时固化土无侧限抗压强度提高了 24.7%。水稳定性试验结果表明，掺入主固剂和功能组分的固化土试件浸水 1 d 后的软化系数为 93.7%，而仅掺主固剂的固化土试件浸水 1 d 后的软化系数为 81.3%，由此可知，功能组分的掺入有利于固化土水稳定性能的提高。

5.3　XRD 物相分析

为探讨功能组分的掺入对固化土中化学产物生成以及物相特征变化的影响，对掺入主固剂的固化土样和正交试验中各组固化土试样分别进行 X 射线衍射分析（XRD），并从正交试验组中挑选出了 3 组具有代表性的固化土样（第 2、4、9 组），其对应的固化土无侧限抗压强度分别为最高、中等、最低。图 5 中的 X 射线衍射图 1～4 分别为掺入主固剂的固化土样、正交试验中第 2、4、9 组的固化土样的 X 射线衍射图。

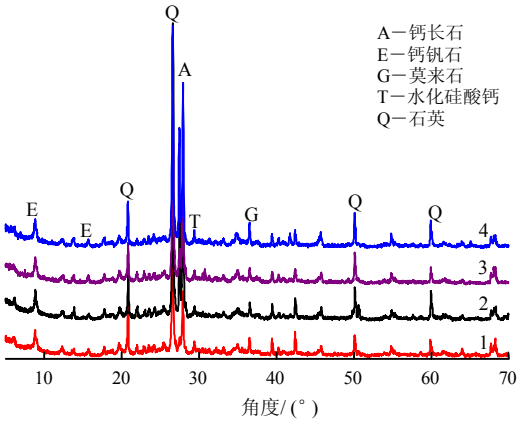


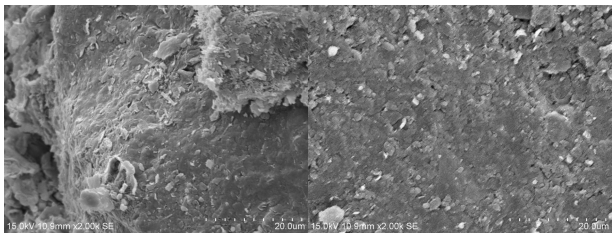
图 5　不同配合比固化土 X 射线衍射图
Fig.5　X-ray diffraction of stabilized soils with different ratios

由图 5 可以看出，掺入功能组分的固化土样衍射图谱与仅掺入主固剂的固化土样衍射图谱基本一致，矿物成分并未发生变化，都有石英（Quarz）、钙长石（Anorthite）、钠长石（Albite）、钙矾石（Ettringite）晶体、水化硅酸钙（Tobermorite）等物质存在，但不同固化土样对应的部分物质的衍射峰强度存在一定的差别。掺入功能组分的固化土中钙长石、钙矾石、$Al(OH)_3$ 的峰值比仅掺入主固剂的固化土试样的衍射峰强度有所增强。由于硬脂酸铝的掺入，能与固化土中的 $Ca(OH)_2$ 反应生成钙皂络合物和 $Al(OH)_3$，并且随着硬脂酸铝掺量的增加，固化土中 $Al(OH)_3$ 的衍射峰强度不断增强。同时有大量石膏的存在，促进反应生成钙矾石晶体，固化土中钙矾石晶体的衍射峰强度随着石膏掺量的增加而不断增强。

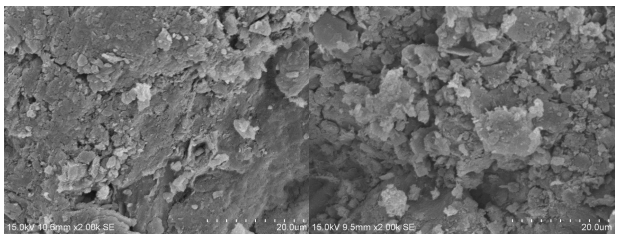
5.4　固化土微观形态分析

固化土的微观结构是固化土物理力学性质的微观基础，在很大程度上决定了固化土的宏观强度，以下将在两种放大倍数（2 000 倍和 10 000 倍）下，对具有代表性的固化土样进行 SEM 的图片（如图 6、7 所示），并结合物相成分变化分析固化土宏观强度

差异的原因。在较低倍数下，可以较为全面地观察固化土的结构；在较高倍数下，可以更清楚地观察固化土局部的微观形态。

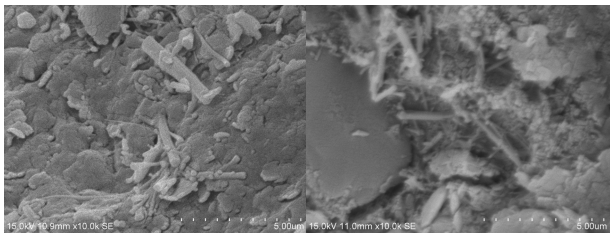


(a) 仅掺主固剂 (b) 正交试验第 2 组

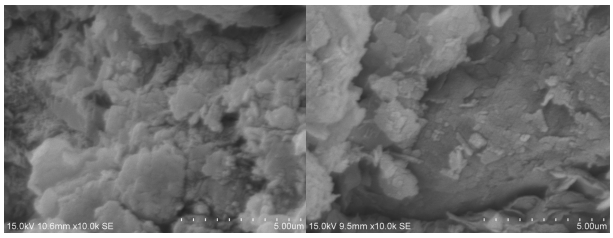


(c) 正交试验第 4 组 (d) 正交试验第 9 组

图 6 不同配合比固化土 SEM 照片(×2 000)
Fig.6 SEM images of stabilized soils with different ratios (×2 000)



(a) 仅掺主固剂 (b) 正交试验第 2 组



(c) 正交试验第 4 组 (d) 正交试验第 9 组

图 7 不同配合比固化土 SEM 照片(×10 000)
Fig.7 SEM images of stabilized soils with different ratios (×10 000)

仅掺入主固剂的固化土的微观结构由大体积的团聚结构和絮凝结构组成，并且各结构之间以面-面和边-面的形式接触，排列比较紧密，孔隙较少，同时还有部分呈针状、棒状的结晶体分布于土体中。

与仅掺入主固剂的固化土样相比，正交试验各组土样中只有第 2 组的密实性优于仅掺入主固剂的固化土样，这与固化土的宏观强度相符合。出现上述现象的原因可能是：适量的硬脂酸铝能与水化产物中的 $Ca(OH)_2$ 反应生成不溶性的钙皂络合物，从而提高固化土的密实性，再加上适量的石膏掺入，有大量的棒状、针状的钙矾石晶体和水化硅酸钙凝胶生成，它们将原本比较分散独立的土壤颗粒和叠聚体紧紧地粘结在一起，形成大体积的团聚体和网状联结结构，并具有很高的强度，这与第 2 组 SEM 照片所显示的一致。但当石膏掺量过高时，具有膨胀性的钙矾石晶体大量生成，造成固化土体积过度膨胀，当膨胀力大于土壤颗粒间的联结力时，固化土中的联结形式发生改变，孔隙也随之增多、变大，如第 4 组 SEM 照片所示。同样，硬脂酸铝使用过量，也会造成固化土强度降低。因为硬脂酸铝能在水泥颗粒周围形成很薄的憎水吸附性膜，虽然可以降低固化土的吸水性，提高固化土的水稳性，但掺量过高后，该憎水膜阻碍了水泥水化产物与土壤颗粒之间的粘结作用，固化土的联结方式受到影响，各结构单元体排列较疏松，在外力作用下极易发生错位和变形，如图 6、7 第 9 组 SEM 照片所示。

6 结 论

（1）根据红黏土的特点，为解决其固化土早期强度低、水稳性差等问题，提出利用膨胀组分、早强组分、减薄双电层结构组分、防水组分等功能组分提高固化土的早期强度。

（2）经单掺试验，优选出了硬脂酸铝、三乙醇胺、$Fe(NO_3)_3$ 和石膏作为土壤固化材料的功能组分，并初步确定了各种功能组分对土壤固化效果的影响规律及掺量范围。

（3）利用正交试验，确定了功能组分的最优配方：硬脂酸铝掺量 0.8%、三乙醇胺掺量 0.06%、$Fe(NO_3)_3$ 掺量 0.1%、石膏掺量 0.4%。在该配方下，固化土的 7 d 无侧限抗压强度达到了 8.60 MPa，比仅掺主固剂时固化土无侧限抗压强度提高了 24.7%。

（4）XRD 物相分析结果显示：掺入功能组分的固化土中钙长石、钙矾石、$Al(OH)_3$ 的峰值比仅掺入主固剂的固化土试样的衍射峰强度有所增强，这些物相变化证明了功能组分对固化土早期强度的促进作用。

（5）SEM 试验结果表明：掺入适量的功能组分有利于高强、难溶具有膨胀性的矿物晶体的生成，这是功能组分提高固化土早期强度的主要原因，但当功能组分掺入量过多，生成的矿物晶体过度膨胀，同时大量的憎水膜形成，会阻碍水泥水化产物与土壤颗粒之间的粘结作用，固化土的联结方式受到影

响，各结构单元体排列较疏松，在外力作用下极易发生错位和变形，从而引起固化土强度降低。

参 考 文 献

[1] LEKHA B M, GOUTHAMO S, SHANKAR A U R. Evaluation of lateritic soil stabilized with Arecanut coir for low volume pavements[J]. **Transportation Geotechnics**, 2015, 2: 20－29.

[2] MACKEVICIUS R. Possibility for stabilization of grounds and foundations of two valuable ancient cathedrals on weak soils in Baltic Sea Region with grouting[J]. **Procedia Engineering**, 2013, 57: 730－738.

[3] CONG M, LONGZHU C, BING C. Analysis of strength development in soft clay stabilized with cement-based stabilizer[J]. **Construction and Building Materials**, 2014, 71: 354－362.

[4] BASHA E A, HASHIM R, MAHMUD H B, et al. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement[J]. **Construction and Building Materials**, 2005, 19(6): 448－453.

[5] 韩鹏举, 刘新, 白晓红. 硫酸钠对水泥土的强度及微观孔隙影响研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2555－2561.
HAN Peng-ju, LIU Xin, BAI Xiao-hong. Effect of sodium sulfate on strength and micropores of cemented soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(9): 2555－2561.

[6] 韩鹏举, 张文博, 刘新, 等. 氯化镁对水泥土早期强度的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1173－1178.
HAN Peng-ju, ZHANG Wen-bo, LIU Xin, et al. Early strength of cemented soils polluted by magnesium chloride[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(6): 1173－1178.

[7] 邓晓轩, 黄新, 宁建国. 外掺剂对水泥固化土强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1628－1633.
DENG Xiao-xuan, HUANG Xin, NING Jian-guo. Influence of admixture on strength of stabilized soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(10): 1628－1633.

[8] ABOOD T T, KASA A B, CHIK Z B. Stabilisation of silty clay soil using chloride compounds[J]. **Journal of Engineering Science and Technology**, 2007, 2(1): 102－110.

[9] WILLIAM D, ISAAC L. Use of Portland cement and polymer fibers to stabilize very high moisture content fine-grained soils[J]. **Advances in Civil Engineering Materials**, 2013, 2(1): 1－24.

[10] 中华人民共和国建设部. CJ/T 3073-1998 土壤固化剂[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. CJ/T 3073-1998 Soil stabilizer[S]. Beijing: China Standards Press, 1998.

[11] 中华人民共和国交通运输部. JTG E51-2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
Ministry of Transport of the People's Republic of China . JTG E51-2009 Test Methods of Materials Stabilized with Inorganic Binders for Highway Engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2009.

[12] 施惠生, 吴凯, 郭晓潞, 等. 垃圾焚烧飞灰研制硫铝酸盐水泥及其水化特性[J]. 建筑材料学报, 2012, 14(6): 730－735.
SHI Hui-sheng, WU Kai, GUO Xiao-lu, et al. Preparation of sulphoaluminate cement from municipal solid waste incineration fly ash and its hydration properties[J]. **Journal of Building Materials**, 2012, 14(6): 730－735.

[13] 肖寒冰, 欧忠文, 刘晋铭, 等. 钾盐和磷酸盐对固化土早期强度的影响研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1643－1648.
XIAO Han-bing, OU Zhong-wen, LIU Jin-ming, et al. Effects of potassium salt and phosphate on the early strength of stabilized soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(6): 1643－1648.

[14] 郭印, 徐日庆, 邵允铖. 淤泥质土的固化机制研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(6): 1071－1075.
GUO Yin, XU Ri-qing, SHAO Yun-cheng. Study on mechanism of muddy soil stabilization[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2008, 42(6): 1071－1075.

[15] 高俊. 土壤固化剂及防渗涂膜性能试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(2): 109－111.
GAO Jun. Test research for the properties of soil stabilizer and film to prevent seepage[J]. **Journal of Water Resources & Water Engineering**, 2008, 19(2): 109－111.

[16] 杨康辉, 欧忠文, 肖寒冰, 等. 水泥基渗透结晶型防水材料对硫铝酸盐水泥固化土性能影响及机制分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 477－486.
YANG Kang-hui, OU Zhong-wen, XIAO Han-bing, et al. Mechanism analysis and effect of cementitious capillary crystalline waterproofing materials on sulfur aluminate cement solidified soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 477－486.

[17] 黄雨, 周子舟, 柏炯, 等. 石膏添加剂对水泥土搅拌法加固软土地基效果影响的微观试验分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1179-1183.
HUANG Yu, ZHOU Zi-zhou, BAI Jiong, et al. Micro-experiments on a soft ground improved by cement-mixed soils with gypsum additive[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(8): 1179－1183.