

文章编号:1671-8879(2008)04-0021-06

## 黄河中下游冲积平原细粒氯盐渍土的加固机理

平树江<sup>1,2</sup>, 李炜光<sup>1,3</sup>, 申爱琴<sup>1</sup>, 耿恩朋<sup>1</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 滨州市公路管理局, 山东 滨州 256614; 3. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘 要:**借助 X 衍射揭示了不同加固土生成物质的差异, 采用半定量分析法解释了不同加固混合料强度差异, 从热分析角度解释了二灰土、三灰土方案的优越性, 通过扫描电镜观测了加固土在不同龄期的生成物。结果表明: 盐分的存在使得细粒氯盐渍土获得了新的更加稳定的矿物性能; 随龄期的增长,  $\text{CaCO}_3$  质量分数逐渐降低, 新生矿物与其共同作用, 提高了加固土的强度, 而石灰的碳酸化作用对加固土强度的贡献越来越小。

**关键词:**道路工程; 路基; 盐渍土; 加固机理; X 衍射; 热重分析; 差热分析

**中图分类号:** U416.212

**文献标志码:** A

### Reinforcement mechanism of fine chlorine saline soil on middle and lower alluvial plains of Yellow River

PING Shu-jiang<sup>1,2</sup>, LI Wei-guang<sup>1,3</sup>, SHEN Ai-qin<sup>1</sup>, GENG En-peng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Binzhou Administration of Highway, Binzhou 256614, Shandong, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** The strengthening effects of different stabilized soils are studied by the X-ray diffraction method, and their differences are analyzed with semi-quantitative method. The advantages of the stabilized soils strengthened by lime-fly-ash and cement-lime-fly-ash are explained by differential-thermal-analysis and thermo-gravimetric-analysis, the micro-structures of different stabilized soils are presented by SEM. The results show that: the contents of salt make fine chlorine saline soil form a new stable structure; with the growth of the age, the mass ratio of  $\text{CaCO}_3$  will decrease gradually, the new minerals have a greater contribution to the strength of the stabilized soils, but the carbonate has a little one. 6 tabs, 11 figs, 10 refs.

**Key words:** road engineering; subgrade; saline soil; reinforcement mechanism; X-ray diffraction; thermo-gravimetric-analysis; differential-thermal-analysis

收稿日期: 2007-08-15

基金项目: 山东省交通科技项目(200418Y09)

作者简介: 平树江(1966-), 男, 山东滨州人, 滨州市公路管理局研究员, 长安大学工学博士研究生, E-mail: psj0706@163.com.

0 引言

黄河中下游冲积平原滨海地区占地约  $34 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 其中仅山东境内就有 3 000 km 海岸线, 主要为黄河冲积平原<sup>[1]</sup>。该区以细粒土居多, 且土体松散, 加上滨海地区易受海水侵渍和海潮入侵影响, 土壤积盐较为明显, 盐分以 NaCl、KCl 为主<sup>[1-2]</sup>, 土质以粉性氯盐渍土为主。因此, 公路工程常采用的石灰加固、石灰粉煤灰加固、水泥石灰粉煤灰加固下的混合料使用性能波动显著<sup>[2]</sup>。为此, 本文通过微观观测技术, 对上述加固条件下的混合料生成物质进行了分析, 为在不同加固条件下, 寻找经济合理、使用效果良好的加固措施, 以解决此类地区道路工程的瓶颈问题<sup>[3-10]</sup>。

1 研究方案与生成物测定

1.1 研究方案

选取山东某地 4 种(1 类~4 类)代表性土体进行研究和测试, 结果见文献[2]。根据土体的液塑限、塑性, 结合颗粒组成以及砂粒质量分数, 确定土样均为低液限粉土。土中盐分的质量浓度测试结果如表 1 所示。

表 1 测试结果 mg/L

项目	易溶盐	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup> 和 Na <sup>+</sup>
1 类	1.165	0.004	0.036	0.611	0.082	0.012	0.017	0.404
2 类	1.050	0.006	0.047	0.586	0.061	0.010	0.018	0.323
3 类	1.134	0.001	0.022	0.586	0.175	0.016	0.013	0.327
4 类	0.999	0.001	0.021	0.558	0.135	0.013	0.021	0.251
均值	1.089	0.003	0.031	0.585	0.113	0.012	0.017	0.326

由表 1 可见, 4 类土的含盐质量浓度、盐种类偏差较小, 按现有盐渍土分类方法, 4 种土都属弱氯盐

渍土。通过界限含水质量分数和颗粒分析试验, 确定其为低液限粉性土。综合对比现有的多种加固土方案, 最终选用表 2 所示配比(质量配比), 对无机结合料加固盐渍土的路用性能进行系统测试。

表 2 无机结合料加固氯盐渍土技术方案汇总

加固方式	配比编号	加固种类	配比(质量配比)
石灰土	S <sup>#</sup>	石灰: 土	10: 90
	X <sup>#</sup>	石灰: 土	14: 86
二灰土	2 <sup>#</sup>	石灰: 粉煤灰: 土	12: 22: 66
	4 <sup>#</sup>	石灰: 粉煤灰: 土	16: 24: 60
三灰土	6 <sup>#</sup>	水泥: 石灰: 粉煤灰: 土	3: 13: 19: 65
	8 <sup>#</sup>	水泥: 石灰: 粉煤灰: 土	3: 11: 21: 65

1.2 测定生成物

采用 X 衍射试验测定生成物种类, 然后通过差热及热重分析推算各生成物含量, 再用扫描电镜观测验证理论分析结果。

考虑到滨海地区土体主要为细粒土, 石英接近惰性物质, 可认为其不参与无机结合料的强度形成反应。钙长石、方解石、氢氧化钙、坡缕缟石、水钙沸石等均为石灰土、二灰土、三灰土的常规产物。由于试验土样选用盐渍土, 所以土样中盐分也参与了加固土的反应及强度增长, 如生成物钙长蛭石、硅铝酸钠、霞石、钠长方解石、钠长石, 说明盐渍土中的 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup> 也参与了反应。

2 X 衍射

X 衍射可用于分析生成物的晶体结构, 在所有测定生成物中, 选择可信度大于 100 的物质进行统计。在数据处理中, 假定样品中只含有可信度大于 100 的物质, 则样品所含物质可以半定量测出, 表 3、表 4 为各试样不同龄期的半定量分析测试结果。

表 3 加固土 28 d 龄期 X 衍射矿物成分质量分数

矿物名称	石灰土				二灰土				三灰土			
	S <sup>#</sup>		X <sup>#</sup>		2 <sup>#</sup>		4 <sup>#</sup>		6 <sup>#</sup>		8 <sup>#</sup>	
	质量分数/%	可信度	质量分数/%	可信度	质量分数/%	可信度	质量分数/%	可信度	质量分数/%	可信度	质量分数/%	可信度
石英	69.37	856	65.90	906	75.12	109	79.02	746	43.79	727	44.61	604
钙长石			17.08	201			14.64	251				
方解石	6.02	686	8.38	754	5.28	79	6.34	746	10.59	756	7.37	118
氢氧化钙			4.94	299								
坡缕缟石	9.16	235							12.28	749	9.14	72
钙长蛭石					19.60	607					18.58	222
硅铝酸钠			3.71	178								
水钙沸石									24.46	416	20.30	347
霞石									8.88	185		
硫酸氢铝	2.37	257										
方钠石	13.08	163										

表 4 加固土 180 d 龄期 X 衍射矿物成分质量分数

矿物名称	石灰土				二灰土				三灰土			
	S <sup>#</sup>		X <sup>#</sup>		2 <sup>#</sup>		4 <sup>#</sup>		6 <sup>#</sup>		8 <sup>#</sup>	
	质量分 数/%	可信度	质量分 数/%	可信度	质量分 数/%	可信度	质量分 数/%	可信度	质量分 数/%	可信度	质量分 数/%	可信度
石英	68.68	462	60.17	753	70.20	896	62.58	672	74.46	858	64.09	434
钙长石			21.80	127	20.33	621	14.82	682				
方解石	8.24	719	7.17	741	9.47	735	8.62	706	8.00	774	8.64	789
氢氧化钙	3.47	780	3.90	875			4.80	785				
坡缕沸石	6.49	852	6.96	119			9.14	227			6.02	792
钙长蛭石	5.57	128							13.13	80	19.37	647
硅酸钙											1.88	147
钠长石	7.55	128							4.41	406		

由表 3、表 4 可见,不同龄期加固土生成物质种类差异显著,28 d、180 d 龄期样品分别有 11 种和 8 种物质,表明加固土短龄期生成物成分复杂且不稳定,随着龄期的增加,生成物种类减少,趋于稳定状态。

石灰土方案 S<sup>#</sup> 配比(质量配比)石灰用量较少,(OH)<sup>-</sup> 质量浓度较少,28 d 龄期存在硫酸氢铝、方钠石,硫酸氢铝是(OH)<sup>-</sup> 质量浓度不足的产物,方钠石是由于该配比石灰剂量较少,盐渍土中 Na<sup>+</sup> 参与了反应,随着龄期的增加,由于石灰的后期作用,这两种生成物逐渐减少,直至消失,180 d 龄期 X 衍射结果正好验证此结论。X<sup>#</sup> 配比中石灰剂量较大,28 d 龄期未生成硫酸氢铝、方钠石,化合物中出现钙长石、氢氧化钙,这也是该配比石灰剂量高的表现。二灰土方案中,28 d 龄期生成物以钙长石、方解石、钙长蛭石为主,这几种物质使加固土强度逐渐增大。三灰土方案中,28 d 龄期时由于水泥的掺入使得生成物中生成了水钙沸石,该物质随着龄期的延长而减少,在 180 d 龄期测试时未发现该物质,说明该物质为三灰土强度形成的中间生成物,其产生的原因是由水泥引起的。

分析假定石英不参与加固土强度形成反应,将石英质量分数作为基准“1”,将反应总质量分数生成物与石英质量分数做比值,换算结果见图 1。用总生成物的比值大小和总比值增长率,分析加固土强度高低以及强度增长快慢的原因。

可以看出,对于石灰土、二灰土方案,180 d 龄期的总生成物比率明显大于 28 d 龄期,说明材料强度随龄期的增长而增加。对于三灰土,早期 28 d 龄期由于生成的中间产物较多,生成物总比率较大,但强度仍低于 180 d 龄期。因此,用反应物总比率分析三灰土不合适。由图 1 可见,随着龄期的延长,生成物总比率变大,材料强度增大。S<sup>#</sup> 配比直线斜率

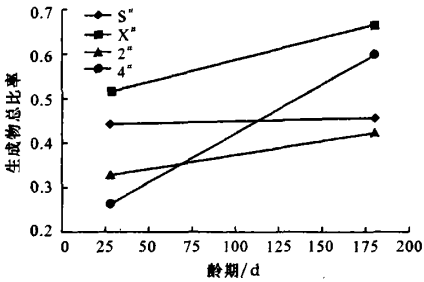


图 1 石灰土、二灰土生成物总比率的变化曲线

最小,X<sup>#</sup> 配比石灰剂量高,直线斜率大,说明石灰剂量越多,材料的强度增长越快。同理,二灰土 2<sup>#</sup> 配比结合料剂量较 4<sup>#</sup> 配比少,所以直线斜率小,强度增长率不及 4<sup>#</sup> 配比。

3 差热与热重测试分析

鉴于 X 衍射试验只能对不同龄期加固土材料生成物定性分析,故选用差热与热重试验深入分析加固盐渍土生成物质量分数。无机结合料加固细粒氯盐渍土 28 d 龄期差热和热重测试结果见图 2、图 3。

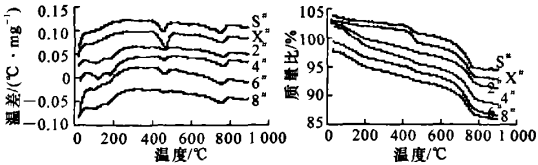


图 2 28 d 龄期差热测试 图 3 28 d 龄期热重测试

由图 2、图 3 可看出,在 CaCO<sub>3</sub> 分解温度在 770 °C 附近有明显的吸热和失重,与二灰土、三灰土方案相比,石灰土方案 S<sup>#</sup>、X<sup>#</sup> 配比在 450 °C 附近具有较为明显的吸热和失重,原因是该温度为 Ca(OH)<sub>2</sub> 分解温度,其吸热分解释放水分造成失重。石灰加固土配比由于含有较多的石灰,在短龄期 28 d 时,未反应的石灰较多,因此该温度具有明显的峰值。

分析二灰、三灰加固土试样(2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>),发现在短龄期时粉煤灰的掺入使得较多的石灰参与反应,因此二灰、三灰加固土的早期强度明显高于石灰加固土。从图 2、图 3 可以看出,二灰土、三灰土方案在100 ℃~200 ℃存在一定的吸热和失重,其原因可能为钙长石、钙长蛭石、水钙沸石等加固土生成矿物失去结晶水及结合水所致,而石灰土配比在此温度范围内不存在峰值。因此,石灰土不含有此种物质,所以早期强度较低。

图 4、图 5 分别为加固土材料 180 d 龄期差热及热重测试结果,对比图 2、图 3 可见,其 180 d 与 28 d 测试具有相似规律,主要差别为 180 d 龄期在 450 ℃附近时 Ca(OH)<sub>2</sub> 分解吸热及失重峰值减小,说明随着龄期的增加,无机结合料加固细粒氯盐渍土中石灰越来越少,石灰已经参与了其他矿物的生成反应。

为了分析各加固方案配比的差异,对 450 ℃和 770 ℃附近峰值作定量分析。100 ℃~200 ℃内峰

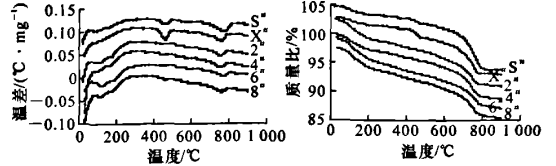


图 4 180 d 龄期差热测试

图 5 180 d 龄期热重测试

值多为加固土生成物中结晶水及结合水散失、分解形成,而此范围加固土生成物成分复杂,只能从总体上说明二灰、三灰土与石灰加固土的差异,不能作定量分析。表 5 为不同龄期各配比在 450 ℃和 770 ℃附近热重及差热峰值测试数据。根据表 5 数据,分别对 450 ℃、770 ℃的分解过程质量损失和吸收热量关系进行回归,回归方程见图 6、图 7( $x$  为质量损失,  $y$  为吸收热量)。由图 6、图 7 可以看出,两种温度下的物质分解,回归关系成线性增长关系,相关系数  $R^2$  均大于 0.95,从而验证了这两种温度下的分解物质为同一物质。

表 5 差热及热重测试结果

配比 编号	28 d 龄期				180 d 龄期			
	450 ℃		770 ℃		450 ℃		770 ℃	
	质量损失/ %	吸收热量/ (℃·min·mg <sup>-1</sup> )	质量损失/ %	吸收热量/ (℃·min·mg <sup>-1</sup> )	质量损失/ %	吸收热量/ (℃·min·mg <sup>-1</sup> )	质量损失/ %	吸收热量/ (℃·min·mg <sup>-1</sup> )
S <sup>#</sup>	1.489 0	0.042 760	4.468	0.043 10	0.978 5	0.018 870 0	5.836	0.055 51
X <sup>#</sup>	2.457 0	0.071 600	4.147	0.038 89	1.523 0	0.046 320 0	4.600	0.045 19
2 <sup>#</sup>	0.827 0	0.010 810	3.352	0.023 30	0.289 4	0.000 376 8	3.034	0.023 21
4 <sup>#</sup>	0.949 6	0.013 600	3.850	0.029 54	0.551 1	0.004 423 0	3.175	0.019 38
6 <sup>#</sup>	0.962 2	0.017 200	3.520	0.024 34	0.505 7	0.001 816 0	2.754	0.019 00
8 <sup>#</sup>	0.689 9	0.007 992	3.561	0.028 04	0.463 3	0.002 265 0	2.626	0.014 50

注:吸收热量为差热曲线吸热峰值的面积积分;质量损失为差热峰值温度范围对应热重曲线的质量损失率。

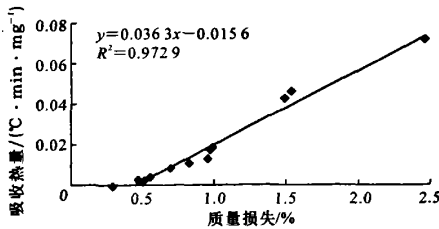


图 6 450 ℃物质分解的质量损失与吸收热量回归曲线

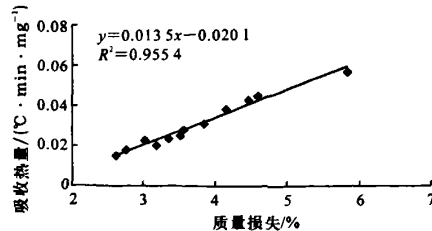


图 7 770 ℃物质分解的质量损失与吸收热量回归曲线

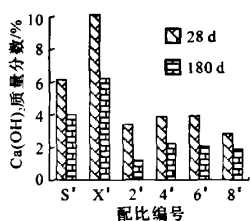
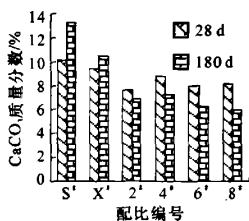
由于质量损失与吸收热量之间具有较强相关性,所以可采用质量损失说明加固土不同龄期不同生成物的质量分数。通过 Ca(OH)<sub>2</sub> 和 CaCO<sub>3</sub> 的分解化学方程式,质量损失可以换算为 Ca(OH)<sub>2</sub> 和 CaCO<sub>3</sub> 的质量分数,如表 6 所示。将表 6 与表 3、表 4 对比可见, Ca(OH)<sub>2</sub>、CaCO<sub>3</sub> 质量分数具有一定差别。本文认为热分析结果可信度较高,X 衍射半定量分析只能从整体上解释加固土材料的微观性能。

表 6 Ca(OH)<sub>2</sub>、CaCO<sub>3</sub> 质量分数换算表

配比 编号	CaCO <sub>3</sub> 质量分数/%		Ca(OH) <sub>2</sub> 质量分数/%	
	28 d 龄期	180 d 龄期	28 d 龄期	180 d 龄期
S <sup>#</sup>	10.15	13.26	6.12	4.02
X <sup>#</sup>	9.43	10.45	10.10	6.26
2 <sup>#</sup>	7.62	6.90	3.40	1.19
4 <sup>#</sup>	8.75	7.22	3.90	2.27
6 <sup>#</sup>	8.00	6.26	3.96	2.08
8 <sup>#</sup>	8.09	5.97	2.84	1.90



图8、图9为不同配比不同龄期  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和  $\text{CaCO}_3$  质量分数的对比图。由图8可见,不同配比混合料中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  质量分数随龄期增长而降低,与二灰、三灰加固土相比,石灰土中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  质量分数较高,其原因为缺少粉煤灰使得石灰不能有效的参与反应,因此石灰土的强度明显较低。石灰加固土方案中,  $\text{S}^*$  配比各龄期  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  质量分数低于  $\text{X}^*$  配比,其原因为  $\text{X}^*$  配比的石灰剂量较高。由图9可见,对于石灰土,  $\text{CaCO}_3$  质量分数随着龄期的增加而增加,而  $\text{CaCO}_3$  是加固土材料形成强度的主要因素之一,这就解释了加固土强度随龄期的增长而增加的原因。对二灰土、三灰土配比,  $\text{CaCO}_3$  质量分数随着龄期的增加而减小,其原因为随着龄期的增长,加固土材料中的  $\text{CaCO}_3$  转变为其他矿物。由于本次热分析试验温度低于  $900^\circ\text{C}$ ,因此该生成物质可能未被测出,结合 X 衍射试验,推测该物质可能为坡缕缟石等化学性质较为稳定的矿物。因此,二灰、三灰加固土细粒氯盐渍土的性能明显优于石灰加固土。

图8  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  质量分数对比图9  $\text{CaCO}_3$  质量分数对比

#### 4 扫描电镜观测

通过扫描电镜观测生成物形貌,验证 X 衍射试验及热分析试验测试结果。图10、图11分别为28 d和180 d龄期加固细粒氯盐渍土的 SEM(电子扫描镜)照片。

由图10、图11可见,3种加固土方案中,28 d龄期除石灰、粉煤灰、水泥稳定土(三灰土)有部分针状物质及絮凝物质出现,石灰土、二灰土方案的粒径大部分范围为  $0.01\sim 0.05\text{ mm}$ ,且多呈聚粒状,其空隙被  $1\sim 5\text{ }\mu\text{m}$  的粘土胶粒填充,骨架颗粒分散在这些微粒构成的胶结物基底上,同时发现含有片状物质,推测该物质为  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。结合 X 衍射试验结果,可以推测出三灰土28 d龄期的生成物可能为水钙沸石、霞石等物质。对比照片可明显看出,加固土从28 d到180 d龄期的微观结构发生了较大变化,初期由原来的松散粒状结构变成颗粒的团聚结构,

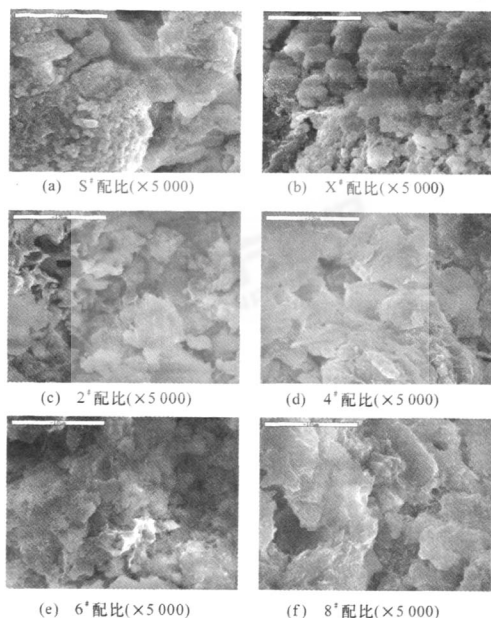


图10 28 d龄期加固土 SEM 照片

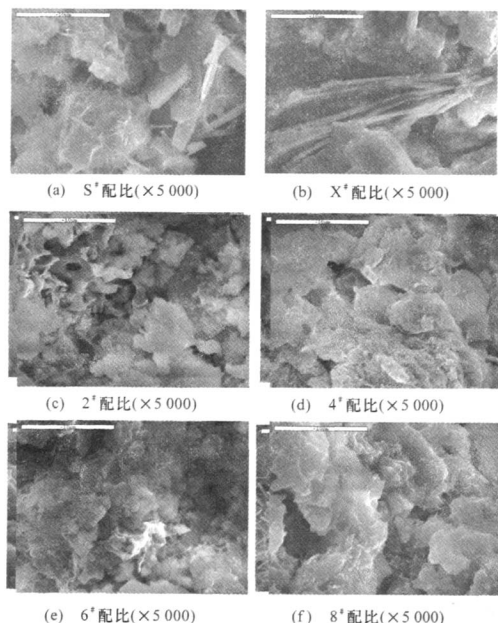


图11 180 d龄期加固土 SEM 照片

在粒状之间及表层生成了许多凝胶结构物质。随着龄期的增长,内部生长出许多棒状与纤维状结晶体,结合热分析结果,推测该物质为坡缕缟石。这些矿物遍布于土粒之间,将土粒连接成整体,形成凝胶及纤维晶体结构。到180 d时,棒状与纤维状晶体不断增多、增长,结晶体由原来的悬臂状变成部分与土颗粒连接,形成了结晶体的网架结构。

## 5 结 语

(1) X 射线衍射试验表明:石灰加固方案中, S<sup>\*</sup> 配比石灰剂量较少, 早期存在硫酸氢铝、方钠石等物质, 随着龄期的增加, 这两种物质逐渐减少, 直至消失, 而 X<sup>\*</sup> 配比石灰剂量较大, 早期不含有硫酸氢铝、方钠石, 而生成钙长石、氢氧化钙; 二灰土加固方案中, 早期形成强度的物质主要以钙长石、方解石、钙长蛭石等为主, 到了后期反应生成物增加, 宏观反映出材料的强度明显增加; 对于三灰土加固方案, 由于水泥的掺入使得早期生成物中含有水钙沸石, 该物质为三灰土强度形成的中间生成物。

(2) 在假定石英不参与加固土化学反应基础上, 采用半定量方法分析 X 衍射试验结果, 确定出半刚性材料强度高低和生成物之间的关系, 即生成物总比率越大, 强度越高, 由此解释了 3 种加固方案强度差异及增长规律的原因。

(3) 通过差热及热重分析, 定量研究了不同配比不同龄期  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{CaCO}_3$  的质量分数; 热分析结果表明, 对于石灰土材料, 长龄期  $\text{CaCO}_3$  对强度贡献大, 对于二灰土、三灰土, 随着龄期的增长,  $\text{CaCO}_3$  质量分数减小, 形成了新的矿物,  $\text{CaCO}_3$  与新生矿物共同形成强度。

(4) 通过扫描电镜, 观测了加固土材料不同龄期的生成物, 如水钙沸石、霞石及坡缕缟石等物质, 验证了 X 衍射、差热及热重的分析结果。

(5) 机理研究表明, 石灰加固细粒氯盐渍土早期强度主要由离子交换作用形成, 火山灰反应较少, 后期强度主要由石灰的碳酸化形成; 二灰、三灰加固土细粒氯盐渍土形成强度物质种类较多, 反应较为复杂, 盐份的存在使得加固土材料产生了新的更为稳定的矿物性能, 石灰的碳酸化作用随着龄期的延长对加固土强度的贡献越来越小。

### 参考文献:

### References:

- [1] 滨州市公路管理局. 滨海地区盐渍土路面基层加固技术及机理研究[R]. 滨州: 滨州市公路管理局, 2006.
- [2] 耿恩朋. 无机结合料加固细粒氯盐渍土路用性能及机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- [3] 张嘎吱, 沙爱民, 周宗科. 水泥粉煤灰稳定碎石路面的水泥与粉煤灰比例[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(5): 17-20.  
ZHANG Ga-zhi, SHA Ai-min, ZHOU Zong-ke. Proportion of cement to fly-ash in cement-fly-ash stabilized crushed-stones pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(5): 17-20.
- [4] 杨果林, 丁加明. 膨胀土路基的胀缩变形模型试验[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 23-29.  
YANG Guo-lin, DING Jia-ming. Model test on expansion and shrinkage deformation in expansive soil roadbed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 23-29.
- [5] 汪双杰, 黄晓明, 倪一鸿. 改性膨胀土路基受水特性[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(1): 15-20.  
WANG Shuang-jie, HUANG Xiao-ming, NI Yi-hong. Infiltrating properties of modified swelling soil subgrade[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(1): 15-20.
- [6] 杨红辉, 郝培文, 戴经梁. 掺膨胀剂水泥稳定碎石路用性能[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 48-51.  
YANG Hong-hui, HAO Pei-wen, DAI Jing-liang. Road performance of cement-stabilized aggregate mixture with expansion agent[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 48-51.
- [7] 周琦, 韩文峰, 邓安, 等. 滨海盐渍土作公路路基填料试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1177-1180.  
ZHOU Qi, HAN Wen-feng, DENG An, et al. Influences on unconfined compressive strength of stabilized coastal saline soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1177-1180.
- [8] 惠会清, 胡同康, 王新东. 石灰、粉煤灰改良膨胀土性质机理[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(2): 34-37.  
HUI Hui-qing, HU Tong-kang, WANG Xin-dong. Improved mechanism of expansive soils by lime and fly-ash[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(2): 34-37.
- [9] 季节, 张志新. 加固土路用性能评价[J]. 北京建筑工程学院学报, 2001, 17(2): 44-46.  
JI Jie, ZHANG Zhi-xin. Evaluation on the performance of solidified soil[J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2001, 17(2): 44-46.
- [10] 刘付华, 郭英, 曹权, 等. 滨海盐渍土改良与利用新途径试验研究[J]. 天津城市建设学院学报, 2005, 11(4): 254-257.  
LIU Fu-hua, GUO Ying, CAO Quan, et al. Experimental research on new method of improving and using inshore saline[J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2005, 11(4): 254-257.