

某机场航站楼灰土地基鼓胀病害机理初步研究

骆 军¹, 马岷成¹, 米海珍², 左心伟³

(1.甘肃第七建设集团股份有限公司, 甘肃 兰州 730030; 2.兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050;

3.甘肃建投建设有限公司, 甘肃 兰州 730050)

【摘要】 为了探明某机场航站楼地坪鼓胀的原因及其发生机理, 通过对场地内采取的素土和灰土土样进行试验、分析, 在掌握大量试验数据的基础上, 揭示了灰土地基鼓胀的原因是地基土中存在一定量的硫酸盐, 并在外界一定条件的诱发下生成了钙矾石和碳硫硅钙石, 造成灰土地基鼓胀的机理, 得出了应加强对灰土配合原料中硫酸盐含量的检测的结论, 对类似工程具有一定的借鉴意义。

【关键词】 灰土地基; 鼓胀; 病害; 钙矾石; 碳硫硅钙石

【中图分类号】 P642

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-3702(2017)09-0055-06

Pilot Study on Disease Mechanism of the Gray Soil Foundation of one Airport Terminal

LUO Jun¹, MA Mincheng¹, MI Haizhen², ZUO Xinwei³

(1.Gansu NO.7 Construction Group Co., Ltd., Lanzhou Gansu 730030, China; 2.Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China; 3. Gansu Construction Investment Construction Co., Ltd., Lanzhou Gansu 730050, China)

Abstract: In order to find out the reason and mechanism of the expansion of the airport terminal floor, through the experiment and analysis of the soil and the soil samples taken in the site, and on the basis of mastering a large amount of test data, found that the reason of the expansion of the land base was that there was a certain amount of sulfate in the base soil, and the ettringite and the carbon and sulfurite were formed under the condition of certain conditions, which caused the mechanism of the bulging of the gray soil. It was concluded that the determination of sulfate content in the combination of lime and soil should be strengthened, which had a certain reference significance for similar projects.

Keywords: gray soil foundation; bulging; disease; ettringite; thaumasite

0 引言

灰土地基是建筑工程中常用的地基形式。灰土作为建筑材料, 在中国历史悠久。清雍正十一年(1733年)颁布的《工部工程做法则例》中, 对灰土的用料配合比和施工方法都作了详细的规定。灰土地基的优点是造价较低, 可就地取材, 施工简便, 而且具有较高的抗压强度和良好抗渗防漏性能, 北京故宫后门外的护城河石护岸后面, 用灰土造的衬里, 顶面厚1m, 底面厚1.7m, 表面坚硬似花岗岩。它不但能抵抗后面的土压力, 同时也能起到防止渗漏的作用。

近年来, 有一些灰土工程, 在施工后不同程度地出现了一些反常现象, 具体表现为: 灰土层不固结, 以及灰

土发生膨胀, 造成上部地坪鼓胀隆起或上部的基础被抬起, 严重影响建(构)筑物使用功能。本文以某机场航站楼灰土地基鼓胀病害为背景, 较为详细地介绍了灰土发生鼓胀病害的机理。

1 工程概况

某机场航站楼, 包括主楼和中间指廊, 建筑面积约6万m², 地上2层(局部有夹层), 主楼局部最高点42.8m, 南北向长493m, 东西向长159m。屋面采用主桁架+曲面空间网格体系, 办票大厅主要柱网尺寸为24(30)m×36m, 前部最大悬挑约24m, 下弦中心标高范围为14.22~41.686m。混凝土主体结构为二层现浇钢筋混凝土框架, 大厅前部局部设一层地下室。一层局部夹层层高4.0m, 夹层楼板不连续, 大厅处局部一层

作者简介: 骆军, 男, 高级工程师, 研究方向为土木工程。

通高 7.8 m, 二层层高 3.8 m, 局部地下一层层高 8.0 m。

地面施工工艺为三七灰土垫层, 厚度不等, 基槽部位 1~2 m, 地下室周边 8 m, 房心部位 0.3~0.5 m; 上层为 10 cm 素混凝土。

2 工程病害的发生

自 2013 年 7 月完成地坪施工后, 至 2013 年底, 相继发现行李分拣大厅、D 区远机位候机厅、B 区行李提取大厅、1 号变电室等区域均发生了地面鼓胀现象, 最大鼓胀高度约 80 mm。影响了各功能区域的正常使用和运营。

3 工程病害的机理研究

经调查和长期观察发现, 发生鼓胀的区域都是发生在跑过水的区域, 而且鼓胀现象在秋冬交界、冬春交界, 温度变化较大的时间段表现得较为剧烈, 在这期间, 鼓胀量相应增大, 变化较为明显。随着气温的相对稳定, 鼓胀量也发生减弱或稳定现象。而且, 这种鼓胀是持续的, 并未随着胀量的增加而停止或回缩。

为了查明工程病害的原因及其发生机理, 对该机场航站楼地基进行了检测试验和分析, 通过现场开挖探井取样检测, 对现场地基土的工程性质指标(物理参数指标和易溶盐含量)进行分析, 对现场地基土的膨胀性(三七灰土和原地素土)进行试验分析以求探明地面鼓胀的原因和趋势。

3.1 素土物理指标

对航站楼南侧场地开挖探井, 采取 11 m 内的土样进行常规土工试验, 揭示该场地地层主要有 4 层: 0~3.6 m 为粉土层, 呈黄褐色、中密; 3.6~6.1 m 为砂质粉土层, 含有少量细砂透镜层, 呈褐色、稍密; 6.1~8.4 m 为粉细砂层, 呈灰褐色、稍密; 8.4 m 以下为细砂层, 呈深灰褐色, 稍密。各土层的物理参数指标如表 1 所示。

3.2 素土易溶盐含量分析

通过对航站楼西南侧正在

表1 土层物理参数指标表

取样深度 /m	天然重度 / (kN/m ³)	天然含水量/%	界限含水量/%		轻型击实试验		
			塑限	液限	W _{opt} /%	ρ _{dmax} / (g/cm ³)	
1号探井	1.0	15.4	6.91	17.8	26.9	16.13	1.71
	3.0	15.3	8.73	18.3	25.8	16.72	1.72
	5.0	15.7	19.41	16.1	24.4	15.28	1.75
	7.0	14.9	13.81	15.5	22.7	15.43	1.70
	9.0	15.2	17.42	14.9	21.3	14.19	1.74
2号探井	1.0	14.8	16.38	15.4	25.5	16.66	1.73
	3.0	14.6	11.02	17.3	26.8	17.01	1.69
	5.0	15.4	17.70	16.2	25.2	15.44	1.73
	7.0	15.8	12.96	14.1	20.4	15.63	1.76
	9.0	16.1	15.31	15.8	22.6	14.57	1.74
3号探井	1.0	14.9	9.55	17.7	26.1	15.82	1.74
	3.0	15.3	8.50	16.8	27.4	15.98	1.76
	5.0	15.2	19.37	16.5	24.2	16.34	1.73
	7.0	14.8	19.59	18.8	25.7	15.81	1.77
	9.0	15.5	14.96	16.6	23.8	13.96	1.75

施工的已经开剖的地铁站地下通道基坑侧壁上, 航站楼西北角的探槽中, 航站楼南侧场地的取样探井中等不同位置和埋深采取土样, 进行试验和分析, 得出了该场地范围内易溶盐的检测结果如表 2 所示。

从易溶盐检测结果看, 该航站楼区域地层的总易溶盐含量在 0.164%~0.531% 之间, 虽然大部分没有

表2 场地内素土易溶盐分析报告表

试样编号	采样深度	含水率 /%	PH 值	阴离子含量/(mg/kg)				阳离子含量/(mg/kg)			易溶盐总量/%
				CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺ +Na ⁺	
地铁 I-1	1.9	6.93	7.22	64	130	1356	405	62	133	138	0.229
地铁 I-1'	1.9	6.14	7.27	0	259	1694	491	73	183	60	0.276
地铁 I-2	2.8	6.25	7.11	64	65	1060	265	55	92	37	0.164
地铁 I-2'	2.8	7.06	7.17	64	130	1190	343	74	92	77	0.197
地铁 I-3	4.0	17.87	7.18	71	287	1310	419	129	102	75	0.239
地铁 I-3'	4.0	17.14	7.21	70	357	1419	444	169	93	85	0.264
探槽 2#	1.9	9.81	7.22	0	201	1611	681	209	83	15	0.280
探槽 4#	1.9	9.89	7.27	0	268	1283	303	247	27	15	0.214
南侧 1# 井	1	7.18	7.20	0	261	1023	229	86	37	57	0.169
南侧 1# 井	2	7.87	7.23	0	263	1060	269	93	45	29	0.176
南侧 1# 井	3	7.90	7.18	0	265	1024	271	100	53	94	0.181
南侧 1# 井	4	8.12	7.21	0	263	1140	308	112	63	71	0.196
南侧 1# 井	5	8.33	7.31	0	264	1173	385	131	67	154	0.216
南侧 1# 井	7	8.45	7.54	0	330	1282	579	151	79	28	0.243
南侧 1# 井	9	8.97	7.68	0	398	1567	775	109	120	137	0.315
南侧 2# 井	1	7.18	7.33	0	257	916	263	162	44	257	0.185
南侧 2# 井	2	7.87	7.25	0	264	1067	232	162	43	162	0.192
南侧 2# 井	3	7.90	7.27	0	263	1154	230	180	34	147	0.201

续表 2

南侧2#井	4	8.12	7.31	0	269	1273	118	190	34	656	0.255
南侧2#井	5	8.33	7.42	0	265	2988	116	1239	180	527	0.531
南侧2#井	7	8.45	7.17	0	199	1508	155	239	64	519	0.268
南侧2#井	9	8.97	7.21	0	203	1838	119	269	54	354	0.284
南侧3#井	1	7.84	7.14	0	198	1145	155	150	64	154	0.198
南侧3#井	2	7.64	7.20	0	197	1211	153	167	59	28	0.217
南侧3#井	3	7.96	7.32	0	267	1264	117	189	57	135	0.224
南侧3#井	4	7.87	7.59	0	329	1245	115	186	52	257	0.221
南侧3#井	5	8.00	7.71	0	398	1274	116	213	53	162	0.231
南侧3#井	7	8.21	7.69	0	396	1295	77	218	52	147	0.232
南侧3#井	9	8.33	7.83	0	543	1414	79	231	62	656	0.254

超过现行 GB 50021—2009《岩土工程勘察规范》规定的易溶盐含量大于 0.3% 的界限值,但易溶盐含量整体偏高,易溶盐总量平均达到了 0.236% 左右,个别点的易溶盐含量达到 0.531%。易溶盐含量沿深度的分布不均匀,局部有盐渍土地层。地层中主要的易溶盐为硫酸盐,SO₄²⁻ 含量均达到 1000 mg/kg 以上,最高达到了 2988 mg/kg。证明该场地存在盐渍土。

3.3 素土膨胀性分析

3.3.1 试验条件和试验方法

为了分析土体的膨胀性,分别对 2# 探井埋深 1、2、3.5、5 m 地层土进行了膨胀性试验,并考虑到地层土具有不同初始含水量及受水浸湿的情况,设计了 2.0%、6.0%、11.0% 3 个初始含水量,而膨胀性试验含水量均为 11.0%,模拟温度变化的条件,研究试样随温度及时间变化的膨胀特性。具体试验条件如表 3 所示。

表 3 土层膨胀性实验条件表

取样深度/m	初始含水量/%	干密度/(g/cm ³)	试验含水量/%
1.0	2	1.53	11
1.0	6	1.50	11
1.0	11	1.51	11
2.0	1.9	1.54	11
2.0	6	1.51	11
2.0	11	1.51	11
3.5	2.9	1.53	11
3.5	6	1.50	11
3.5	11	1.53	11
5.0	6	1.52	11
5.0	11	1.50	11

3.3.2 温度、膨胀量随时间的变化试验结果

- ①温度随时间变化情况,如图 1 所示。
- ②埋深 1.0m 的土样膨胀量随时间、温度变化情况,

如图 2 所示。

③埋深 2.0 m 的土样膨胀量随时间、温度变化情况,如图 3 所示。

④埋深 3.5 m 的土样膨胀量随时间、温度变化情况,如图 4 所示。

⑤埋深 5.0 m 的土样膨胀量随时间、温度变化情况,如图 5 所示。

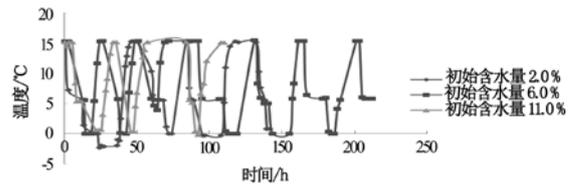


图 1 温度随时间变化图

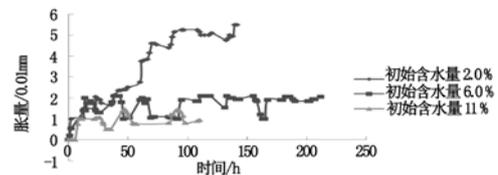


图 2 埋深 1.0m 膨胀量随时间、温度变化图

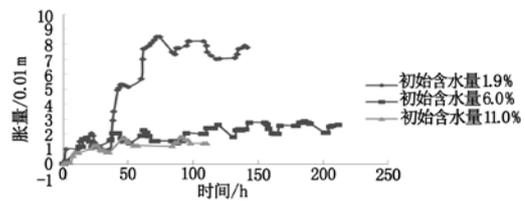


图 3 埋深 2.0m 膨胀量随时间、温度变化图

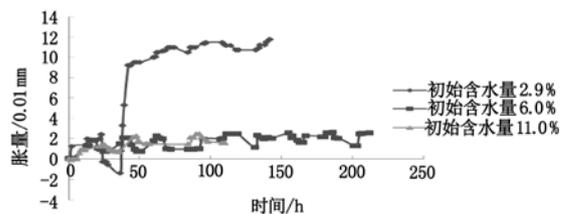


图 4 埋深 3.5m 膨胀量随时间、温度变化图

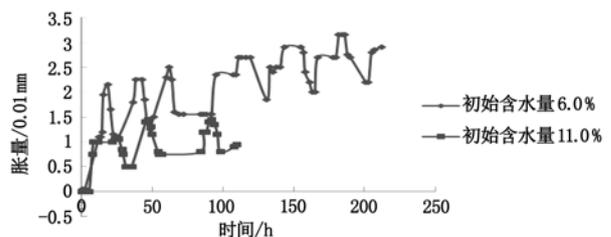


图 5 埋深 5.0m 膨胀量随时间、温度变化图

3.3.3 试验结论

1) 航站楼南侧2#探井的各埋深土层(不论是否盐渍土)均具有一定膨胀量,但膨胀量较小。

2) 初始含水量对2#探井各埋深土层的膨胀性产生一定影响,具体表现为初始含水量越低,其膨胀性越强。

3.4 灰土的物理参数指标

在航站楼1#变电站区域内开挖探槽,采取土样,在深度范围内,揭示该区域的地基从地表往下依次为:10cm素混凝土、140cm的三七灰土、10cm左右的钢筋混凝土板、再向下为素土。在该区域0.3~0.5m和1.0~1.2m处取了三七灰土样,其物理参数指标如表4所示。

表4 灰土物理参数指标表

三七灰土 取样 深度/m	天然 重度/ (kN/ m ³)	天然含 水量 /%	界限含水量 /%		轻型击实试验		
			塑限	液限	W _{opt} /%	ρ _{dmax} /(g/cm ³)	
1#变 电站	0.3~0.5	14.6	8.9	20.8	31.3	16.13	1.71
	1.0~1.2	15.1	12.1	19.2	29.6	16.72	1.72

3.5 灰土易溶盐含量分析

通过对航站楼1#变电室区域内开挖探孔,采取土样,进行试验和分析,得出了该场地范围内易溶盐的检测结果如表5所示。

从易溶盐检测结果看,1#变电站两个埋深三七灰土土样的易溶盐总量分别为0.729%和0.825%,为中硫酸盐渍土和中亚硫酸盐渍土。

3.6 灰土膨胀性试验

3.6.1 试验条件和试验方法

考虑到1#变电室三七灰土中的易溶盐(硫酸钠或硫酸镁)含量较高,在潮湿环境下硫酸钠能结合10个水分子变为十水硫酸钠Na₂SO₄·10H₂O,而硫酸镁也能结合一定量的水分子形成MgSO₄·xH₂O(x根据含水量发生变压进行确定),从而引起地基土的膨胀,而土中的初始含水量越低,则以无水硫酸钠和无水硫酸镁状态存在的量就越大,在含水量增加后,无水状态盐吸水

结晶产生的膨胀量就大,土体的膨胀性也就越大。因此设定试验含水率为22.0%,模拟温度变化的条件,研究试样随温度及时间变化的膨胀特性。试验条件如表6所示。

表6 灰土膨胀性试验条件

取样深度 /m	初始含水量 /%	干密度 /(g/cm ³)	试验含水量 /%
0.3~0.5	6	1.37	22.0
0.3~0.5	11.7	1.34	22.0
1.0~1.2	6.5	1.34	22.0
1.0~1.2	13.6	1.34	22.0
1.0~1.2	18.5	1.32	22.0

3.6.2 温度、膨胀量随时间变化试验结果

① 0.3~0.5m三七灰土、膨胀量随时间、温度的变化曲线,如图6、图7所示。

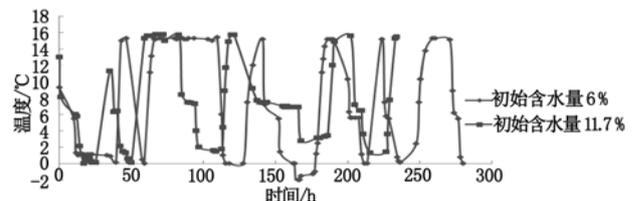


图6 温度随时间变化图

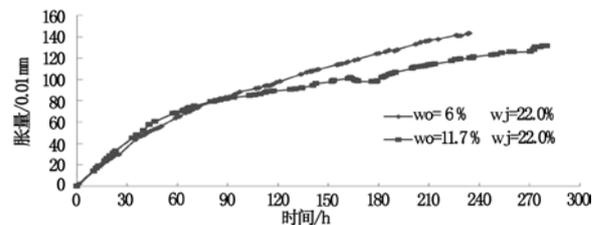


图7 埋深0.3~0.5m灰土膨胀量随时间、温度变化图

② 1.0~1.2m三七灰土温度、膨胀量随时间、温度的变化曲线如图8、图9所示

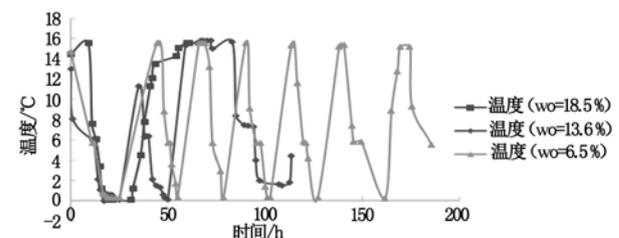


图8 温度随时间变化图

表5 灰土易溶盐分析报告表

试样编号	采样 深度	含水 率/%	PH值	阴离子含量/(mg/kg)				阳离子含量/(mg/kg)			易溶盐总量/%
				CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺ +Na ⁺	
1#变电站	0.3~0.5	8.88	7.74	652	0	2249	431	113	842	3007	0.729
1#变电站	1.0~1.2	7.10	9.36	3337	0	2533	964	136	1154	124	0.825

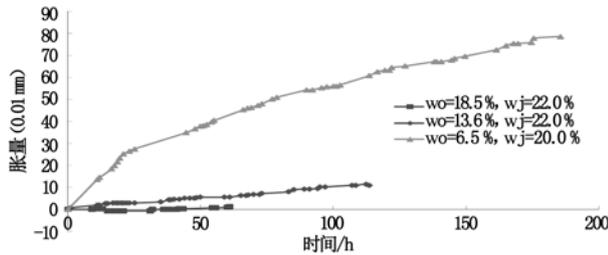


图9 埋深1.0~1.2m灰土膨胀量随时间、温度变化图

3.6.3 试验结论

1) 两个深度的试样均具有较明显的膨胀性,其中0.3~0.5 m试样的膨胀系数 $\delta=0.019$ (在11 d内的膨胀量达到了1.54 mm);而1.0~1.2 m试样的膨胀系数 $\delta=0.0104$ (8 d内的最大膨胀量达到了0.83 mm)。随着温度的冻融循环,膨胀量持续增加,这和现场的实际情况基本一致。

2) 初始含水量对0.3~0.5 m和1.0~1.2 m三七灰土的膨胀性均有影响,都表现为初始含水量越低,其膨胀性越强。但初始含水量对1.0~1.2 m三七灰土的影响远大于0.3~0.5 m三七灰土的影响,原因是1.0~1.2 m三七灰土易溶盐以硫酸镁为主,而0.3~0.5 m三七灰土易溶盐以硫酸钠为主。

3) 不同初始含水量下0.3~0.5 m三七灰土的膨胀量均要明显大于1.0~1.2 m三七灰土的膨胀性,而0.3~0.5 m三七灰土的总易溶盐含量0.729%小于1.0~1.2 m三七灰土的总易溶盐含量0.825%。这说明硫酸钠对三七灰土膨胀性的促进作用要显著强于硫酸镁。

4 灰土地基膨胀原因初步分析

对于灰土地基产生病害的原因,初步分析认为有以下几种可能性:

1) 生石灰未完全熟化,吸水后发生膨胀。这种情况比较好判断,可对灰土层进行剖开,如果在剖面上发现较大的、疏松的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 团,应该可以证实属于该种情况。同时,随着 CaO 吸水反应,不断被消耗,至 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的生成而停止。根据过火石灰陈伏期的规律,一般3个月左右,反应即可完成,且不受温度的影响,只受水分的影响。在本工程灰土中,未发现 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 团粒,且持续鼓胀时间超过3年,因此,生石灰吸水膨胀并不是主要原因。

2) 冻胀。由于在秋冬交界和冬春交界的时间段反

应较为明显,因此认为有可能是水、土受冻后的反膨胀和消融后的体积膨胀。

3) 盐胀。由于在膨胀后的土体中检测出较高的含盐量,而含盐量一定时,含水量的改变会引起土中易溶盐物理化学状态相对含量的变化,如硫酸钠吸收水分子可形成十水硫酸钠(芒硝),硫酸镁也可由无水硫酸镁吸收水分子,形成 $\text{MgSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (x 根据含水量发生变化进行确定),从而影响其膨胀性。从本工程实际情况分析,盐胀是造成地坪膨胀的主要原因之一。

4) 生成了膨胀性更大的钙矾石和碳硫硅钙石。在该工程病害中,地面鼓胀量特别大,经测量,后期鼓胀量竟达到150 mm,鼓胀率达4.5%~10%。虽然在地基土(包括灰土与素土)的检测中发现了盐渍土,而且灰土全部盐渍化了。但这么剧烈的鼓胀,在数量上明显偏大,经进一步查阅文献,发现当地基土中含有钙矾石和碳硫硅钙石时可引起较大的鼓胀。

5 X射线衍射仪和扫描电子显微镜试验

为了进一步验证初步分析的结论,对地基中采取的土样分别进行X衍射、电镜下的微观结构照片和电镜下的元素含量分析。

在9#空调机房地基开挖中采取了4个土样(土质为灰土),对此4个土样分别做了X衍射、电镜下的微观结构照片和电镜下的元素含量的检测分析。结果如下:

1) X衍射测到在1#样和4#样中有钙矾石,其含量分别约为15.9%和16.7%。X衍射仪只能测到含量大于5%的矿物质成分。

2) 将这4个土样放到电镜下观测其微观结构的几何形状,在1#样中照到了典型的钙矾石物质,其形状为针管状;在2#、3#及4#样中也发现了其身影(见图10~13)。

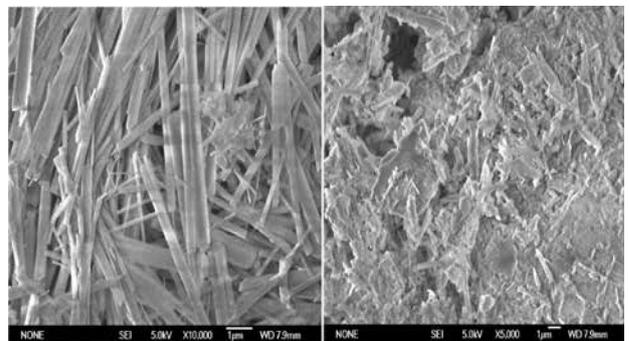


图10 1#土样显微照片图 图11 2#土样显微照片

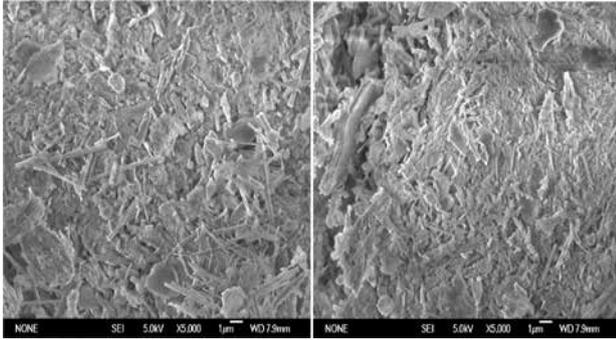


图 12 3# 土样显微照片 图 13 4# 土样显微照片

通过 X 射线衍射仪和扫描电子显微镜试验, 已明确在地基土中生成了钙矾石及碳硫硅钙石。由此证明, 灰土地基鼓胀的主要原因是由于生成了膨胀性极大的钙矾石及碳硫硅钙石引起的。

6 结 语

本文初步探索了灰土地基发生鼓胀破坏的原因和机理, 随着科学技术的发展, 标准规范、施工技术的进

一步完善, 必将得到全面的揭示。灰土地基的膨胀破坏病害, 目前还很少见报道, 但其破坏性较大, 持续时间长, 膨胀机理复杂多样。工程实践表明, 灰土地基中由于硫酸盐的存在, 引起盐胀, 并进一步产生大量的钙矾石及碳硫硅钙石, 是造成灰土地基鼓胀破坏的主要原因, 应当引起足够重视。①

参考文献

- [1]大连白灰厂.JC/T 481—1992 建筑消石灰粉[S].北京: 中国建材工业出版社, 1992.
- [2]苏州中石钙化物工程技术有限公司, 常熟大众钙化物有限公司, 中国石灰协会.JC/T 481—2013 建筑消石灰[S].北京: 中国建材工业出版社, 2013.
- [3]彭家惠, 楼宗汉. 钙矾石形成机理的研究[J]. 硅酸盐学报, 2000, 28(6): 511—515.
- [4]石云兴, 王泽云. 钙矾石的形成条件与稳定性[J]. 混凝土, 2000, 22(8): 52—54.
- [5]薛君环. 论形成钙矾石相的膨胀[J]. 硅酸盐学报, 1984, 12(2): 123—129.

(上接第 45 页)

近; 概率密度分布线型特征随着给定量值的增加而由陡峭演变为平缓。此外, 这些量值的最优概型也不是固定或唯一的。基于构建的概率密度分布特性, 结构物承载能力的可靠性分析方法变得简便易行。①

参考文献

- [1]Tandjiria V, The CI, Low BK. Reliability analysis of laterally loaded piles using response surface methods[J]. Structural Safety, 2000, 22(4): 335—355.
- [2]Phoon KK, Kulhawy FH. Serviceability limit state reliability—based design[C]//In: Reliability—based design in geotechnical engineering: Computations and applications, Taylor and Francis, London, 2008, 344—383.
- [3]Li DQ, Tang XS, Phoon KK, et al. Bivariate simulation using copula and its application to probabilistic pile settlement analysis[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013, 37(6): 597—617.
- [4]唐小松, 李典庆, 周创兵, 等. 基于 Copula 函数的基桩荷载一位移双曲线概率分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 171—178.
- [5]辛军霞, 吴兴征, 高伟, 等. 基于 Copula 函数的 CFG 桩复合地基载

- 荷-变形曲线的概率分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1): 424—434.
- [6]中国建筑科学研究院. JGJ 106—2014 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [7]R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing[R]. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN: 3—900051—07—0. <http://www.R-project.org>. 2013.
- [8]Delignette—Muller ML, Pouillot R, Denis JB, et al. fitdistrplus: Help to fit of a parametric distribution to non—censored or censored data[R]. R package version 0.3—4.2011.
- [9]Akaike H. A new look at the statistical model identification[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, AC—19(6): 716—723.
- [10]中国建筑科学研究院. JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [11]吴世伟. 结构可靠性分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
- [12]Wu XZ. Implementing statistical fitting and reliability analysis for geotechnical engineering problems in R[J]. Georisk, 2017, 11(2): 173—188.
- [13]Dong P, Wu XZ. Application of a stochastic differential equation to the prediction of shoreline evolution[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013, 27(8): 1799—1814.