

水泥改良粗颗粒盐渍土溶陷特性试验研究

许 健¹, 任建威¹, 程东幸², 刘志伟²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 对新疆昌吉地区粗颗粒盐渍土水泥改良后进行室内溶陷试验, 研究水泥掺量和养护龄期对改良粗颗粒盐渍土溶陷特性的影响规律。结果表明: 掺加水泥掺合料并养护一段时间后, 粗颗粒盐渍土试样的压缩溶陷变形显著减小。不养护条件下, 溶陷系数随水泥配合比增加无显著变化规律; 养护条件下, 溶陷系数随水泥配合比增加呈指数衰减特征; 2%~4% 水泥配合比溶陷性改良效果相对最优。不含水泥试样溶陷系数随养护时间增加呈波动形变化特征; 含水泥试样养护 7 d 后, 溶陷系数有一定程度降低, 而后趋于稳定数值; 养护时间 7 d 溶陷性改良效果相对最优; 相比养护时间, 提高水泥配合比对溶陷性改良效果相对更优。不含水泥条件下, 室内压实重塑粗颗粒盐渍土的溶陷系数亦小于 0.01, 为非溶陷性盐渍土, 与现场浸水溶陷试验结果差异较大; 一定条件下可把粗颗粒盐渍土作为回填料进行碾压, 进而通过提高粗颗粒盐渍土压实系数可显著改良地基土的溶陷性。

关键词: 水泥改良; 粗颗粒盐渍土; 溶陷

中图分类号: TU411.91

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)06-0794-08

Test study on collapsibility characteristics of cement-improved coarse-grained saline soil

XU Jian¹, REN Jianwei¹, CHENG Dongxing², LIU Zhiwei²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Northwest Electric Power Design Institute of Co. Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China)

Abstract: The influence of cement mixture ratio and curing age on the collapsibility of improved coarse-grained saline soil was studied by indoor collapsibility test on cement-improved coarse-grained saline soil taken from Changji area of Xinjiang. The results show that the added cement can make the collapsible deformation of soil specimen significantly decreased over a period of curing time. Under no curing condition, the coefficient of collapsibility has no obvious change law with cement mixture ratio increasing. However, the coefficient of collapsibility exponentially decreases with cement mixture ratio increasing after a period of curing time. The effect of the 2%-4% mixture ratio on the collapsibility treatment is best. The coefficient of collapsibility of soil samples with no cement shows a fluctuating variation with the curing time increasing. The coefficient of collapsibility of soil samples containing cement decreases after curing time of 7 days and then reaches a stable value. The effect of the curing age of 7 days on the collapsibility treatment is best. The improved effect on collapsibility by cement mixture ratio is better than that by curing age. The coefficient of collapsibility of compacted remolding coarse-grained saline soil with no cement is still lower than 0.01 and the soil samples are of no collapsibility, which has a big difference with the field immersion test results. Therefore, the collapsibility can be eliminated by using the coarse-grained saline soil as backfill and increasing the compaction factor.

Key words: cement-improved; coarse-grained saline soil; collapsibility

粗颗粒盐渍土在我国分布比较广泛, 而在干旱的西北地区尤为集中。近些年来, 随着国家经济结构的调整, 尤其是西北地区大发展的实施, 使得绝大多数工程都面临棘手的粗颗粒盐渍土问题。由于粗颗粒盐渍土地基具有溶陷等特性^[1], 因

此常给工程建筑物带来安全隐患和危害, 以致引发巨大的经济损失。这种现象不管在石油、铁路还是电力行业均屡见不鲜。

目前, 研究学者针对粗颗粒盐渍土的溶陷特性开展了部分研究工作, 取得了一定成果。程东

幸等^[2-3]以新疆东北部和甘肃河西走廊地区典型粗颗粒盐渍土试验场地为研究对象, 研究了易溶盐含量、渗透系数及骨架含量等因素对粗颗粒盐渍土溶陷特性的影响规律; 高学军等^[4]通过双线法室内模拟试验, 对不同干密度及含盐量粗颗粒盐渍土试样的溶陷变形特性进行了测试分析; 刘亚峰等^[5-6]通过一系列室内模拟试验, 实测了各影响因素单独作用下的溶陷变形时长, 探讨了含盐量、荷载、孔隙比和干密度等因素对粗颗粒硫酸盐渍土沉降变形速率的影响规律; 杨鹏等^[7]以河西走廊典型粗颗粒硫酸盐渍土地基为对象, 通过室内重塑土样的溶陷特性试验, 揭示了粗颗粒盐渍土渗透系数及溶滤变形系数两个指标的影响因素及影响规律; 李耀杰等^[8]基于新疆准东地区某电厂厂区内粗颗粒盐渍土的溶陷试验结果, 对粗颗粒盐渍土溶陷系数指标室内外测定结果进行了对比分析; 刘志伟等^[9]开展了粗颗粒盐渍土地基现场回填碾压溶陷试验和相关专题研究. 上述研究多以重塑(压实)或原状粗颗粒盐渍土地基为对象开展室内外溶陷试验, 研究结果对揭示粗颗粒盐渍土溶陷特性及机理有积极作用.

大量工程实践表明, 普通建筑材料水泥、粉煤灰、消石灰与盐渍土混合后, 通过离子交换与土中水分、空气中二氧化碳发生一系列的物理化学反应, 从而降低易溶盐的离子含量, 同时增加盐渍土颗粒间的凝聚胶结作用^[10-11]. 因而, 可通过对盐渍土进行化学改良从而达到消除盐渍土地

基溶陷等不良工程特性的目的. 目前研究学者针对细粒盐渍土化学改良开展了大量试验研究工作^[12-14], 但针对粗颗粒盐渍土化学改良的研究尚处在起步阶段, 研究资料非常少^[15], 尚不能很好的对化学改良粗颗粒盐渍土的溶陷等工程特性进行量化评价和预测. 基于此, 本文对新疆昌吉地区粗颗粒盐渍土进行水泥化学改良, 并进行室内溶陷试验, 研究水泥掺量和养护龄期对改良粗颗粒盐渍土溶陷特性影响规律, 以期对粗颗粒盐渍土地基处理设计提供依据和参考.

1 试验材料与试样制备

1.1 试验材料

水泥化学改良试验所用土样取自新疆准东煤电煤化工产业带五彩湾煤电化工园区, 位于新疆维吾尔自治区昌吉回族自治州的吉木萨尔县境内, 距离吉木萨尔县城正北约 140 km 处, 隶属五彩湾, 属于典型粗颗粒盐渍土地. 试验用土基本物理特性参数见下表 1. 此外, 对所取粗颗粒盐渍土进行了天然(含盐)和淋滤后(不含盐)两种状态下的试验, 其颗粒级配曲线如图 1 所示. 从图中可以看出, 大于 2 mm 样总质量约为 50% 左右, 说明地层为典型粗颗粒盐渍土层. 淋滤后, 较小粒径土颗粒尤其是粒径小于 1 mm 土颗粒所占比重明显增加, 说明地基土颗粒表面包裹的易溶盐晶体进行了充分溶解, 使得洗盐前后的土颗粒级配特征发生了显著变化.

表 1 试验用土基本物理特性参数
Tab. 1 Physical characteristic parameters of test soil

比重 G_s	天然密度 $\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	天然含水量 $w/\%$	渗透系数 $k/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	最优含水量 $w_{opt}/\%$	最大干密度 $\rho_{dmax}/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
2.68	2.0	1.2	2.4×10^{-3}	6.9	1.96

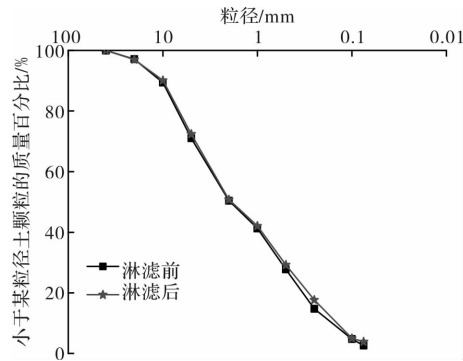


图 1 试验土样淋滤前后颗粒级配曲线
Fig. 1 Particle gradation curve before and after leaching of soil samples

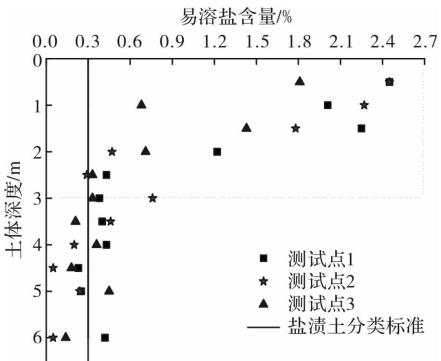


图 2 场地易溶盐含量随深度分布规律
Fig. 2 The variation regularity of soluble salt content along the depth

由所取试样的化学分析试验结果可知,地基土的易溶盐含量较高,在所测 33 件样品中,有 23 件易溶盐含量大于 0.3%,最大可达 2.45%。同时,易溶盐含量大于 0.3%的试样主要集中在地层 3 m 以上,且地层 2 m 以上为易溶盐的主要富集区域,是典型的粗颗粒盐渍土地,具体见图 2。

1.2 试样制备

现场所取试样为粗颗粒盐渍土扰动样,需通过室内击实获得重塑土样,进而进行室内化学改良溶陷试验。研究分析粗颗粒盐渍土在不同水泥配合比改良及不同养护时间情况下对应的溶陷特性,并通过试验研究改良方案,确定掺合料最优配合比。

重塑粗颗粒盐渍土试样制备具体过程如下:

(1) 将所取粗颗粒盐渍土试样过 20 mm 筛,然后将 52.5 普通硅酸盐水泥掺合料分别按照 0%、2%、4%、6%及 8%配合比与粗颗粒盐渍土试样混合均匀,测定混合料初始含水量并放置备用。

(2) 考虑到现场回填粗颗粒盐渍土易于压实的要求,本次试验试样含水量统一按照最优含水量 6.9%配制,具体试验操作过程:按照最优含水量计算固定质量试样喷水量,保持制样温度在 20℃以上,用喷壶分层将散装土样均匀喷湿,密封静置 24 h。测定试样 3 个不同部位含水量,误差不大于 1%时,认为土样湿润均匀,取 3 个不同部位含水量平均值作为本批次土样含水量。

(3) 按照一定的干密度(压实系数 0.95)计算所需湿土质量并导入试样筒内,开动压力机将土样分层压制成直径为 152 mm、高度为 150 mm 的标准试样。

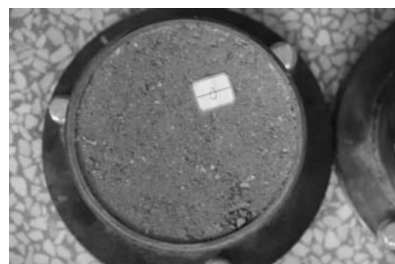
(4) 将制备好的试样密封,在 20℃条件下进行养护,养护周期分别为 0 d、7 d、14 d 及 28 d (图 3),然后进行相应试验操作。

2 试验方案

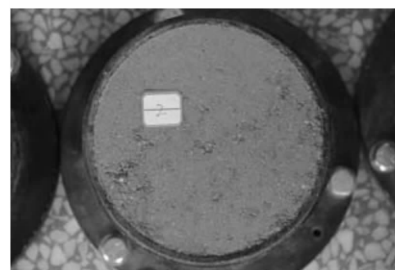
室内溶陷试验标准参照《盐渍土地区建筑技术规范》(GB/T 50942-2014)的有关条款内容执行,具体试验过程如下:

(1) 将试样安装好,预加 1.0 kPa 荷载,使试样和仪器各部紧密接触,记录室温并采集百分表初始读数;

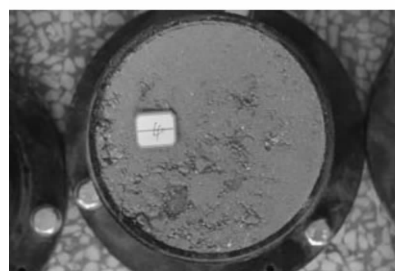
(2) 逐级施加 25 kPa、50 kPa、100 kPa、200 kPa 荷载,试验过程中每 30 min 自动采集百分表读数,每一级变形量小于 0.01 mm/h 时认为试样变形稳定,然后施加下一级荷载;



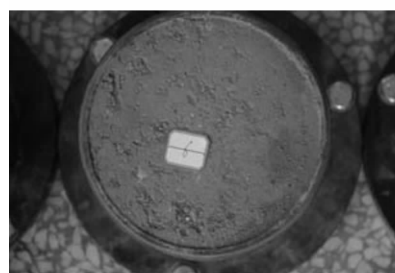
(a) 0%



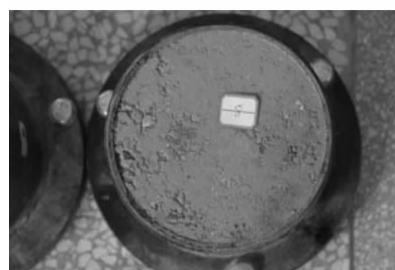
(b) 2%



(c) 4%



(d) 6%



(e) 8%

图 3 养护 28 d 后改良土试样

Fig. 3 The chemical improved soil samples with curing age of 28 days

(3) 待 200 kPa 荷载下百分表读数稳定后,加入淡水使试样浸水溶滤,读取浸水后试样稳定变形量,然后逐级施加 300 kPa、400 kPa 荷载并采集各级荷载下稳定变形量。

(4) 终止压力下, 百分表稳定后, 记录百分表最终读数, 依次卸载并卸下加载框架、承压板、百分表并取出试样描述试样状态, 拍照记录。

室内化学改良试验共完成 20 个粗颗粒盐渍土水泥改良试样的溶陷试验, 具体试样种类如下表 2 所示。

表 2 试样分组
Tab. 2 Sample groups

试样编号	含水量/%	湿密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	试样配合比(水泥 : 盐渍土)	养护龄期/d
RX-0-0	6.9	1.99	1.86	0 : 100	0
RX-0-2	6.9	1.99	1.86	2 : 98	0
RX-0-4	6.9	1.99	1.86	4 : 96	0
RX-0-6	6.9	1.99	1.86	6 : 94	0
RX-0-8	6.9	1.99	1.86	8 : 92	0
RX-7-0	6.9	1.99	1.86	0 : 100	7
RX-7-2	6.9	1.99	1.86	2 : 98	7
RX-7-4	6.9	1.99	1.86	4 : 96	7
RX-7-6	6.9	1.99	1.86	6 : 94	7
RX-7-8	6.9	1.99	1.86	8 : 92	7
RX-14-0	6.9	1.99	1.86	0 : 100	14
RX-14-2	6.9	1.99	1.86	2 : 98	14
RX-14-4	6.9	1.99	1.86	4 : 96	14
RX-14-6	6.9	1.99	1.86	6 : 94	14
RX-14-8	6.9	1.99	1.86	8 : 92	14
RX-28-0	6.9	1.99	1.86	0 : 100	28
RX-28-2	6.9	1.99	1.86	2 : 98	28
RX-28-4	6.9	1.99	1.86	4 : 96	28
RX-28-6	6.9	1.99	1.86	6 : 94	28
RX-28-8	6.9	1.99	1.86	8 : 92	28

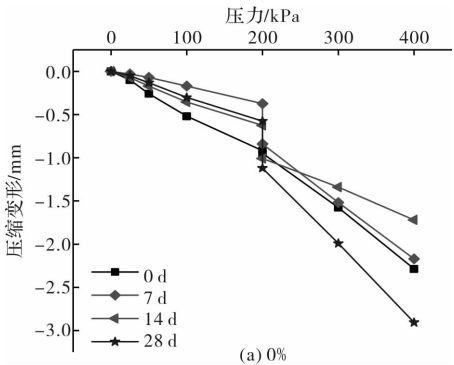
3 试验结果与分析

3.1 压缩溶陷曲线

图 4~图 5 所示分别为不同水泥配合比及养护时间条件下粗颗粒盐渍土试样压缩溶陷曲线。从图中可以看出, 掺加水泥掺合料并养护一段时间后, 粗颗粒盐渍土试样的压缩溶陷变形显著减小, 这表明水泥掺合料一定程度上可对盐渍土溶陷性进行改良消除。从图中还可以看出, 相同水泥配合比条件下, 随着养护时间增加, 盐渍土压缩溶陷变形无显著变化规律; 相同养护时间情况下, 随着水泥配合比增加, 盐渍土压缩溶陷变形亦无显著变化规律。

值得注意的是, 部分水泥改良粗颗粒盐渍土试样浸水溶陷过程中反而出现了体积膨胀现象, 导致压缩过程中试样位移量表现出一定的“回弹”

特征。分析其原因, 主要是水泥土在养护过程中水泥和土中水分发生水解及水化反应, 生成钙矾石以及与土颗粒凝聚成团粒的水化硅酸钙等产物, 增强了土体结构强度和稳定性。上述作用过程降低了土样的渗透特性, 使浸水时的溶陷沉降量显著减小。此外, 试样中未水化完成的水泥在浸水加载过程中进一步水化放热, 从而引起试样体积膨胀。



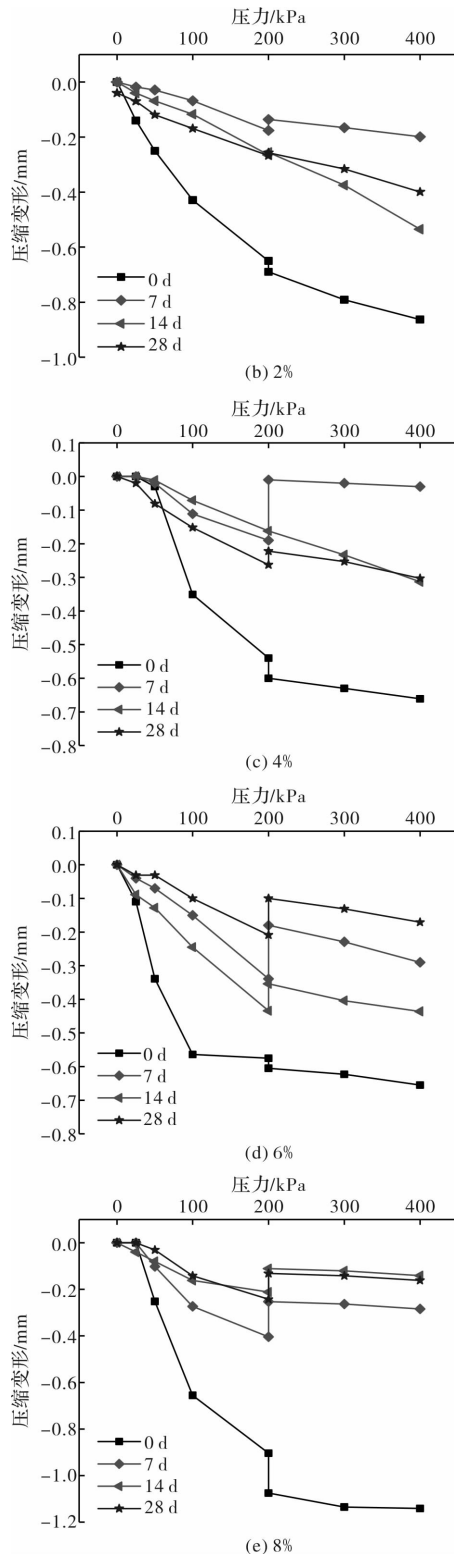


图4 不同水泥配合比条件下的压缩溶陷曲线

Fig. 4 Compression curve with different cement content

3.2 溶陷系数

图6所示为改良粗颗粒盐渍土溶陷系数随水泥配合比变化规律曲线,图中溶陷系数为负值表明浸水过程中试样体积膨胀(下同)。

从图中可以看出,不养护(养护时间0 d)条件下,随水泥配合比增加,盐渍土溶陷系数无显著

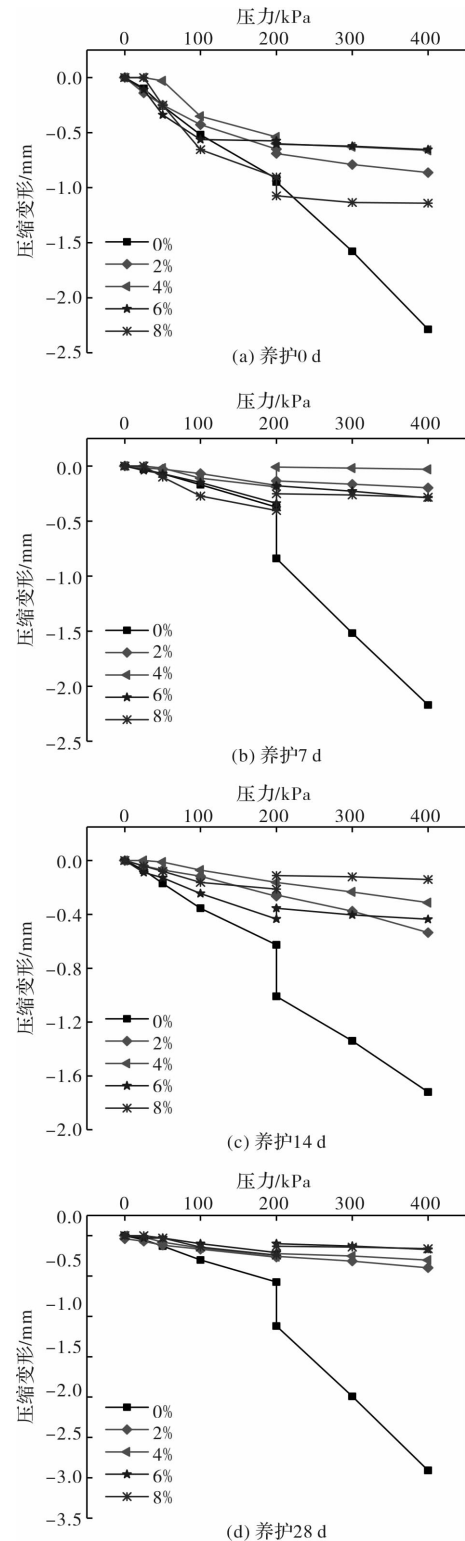


图5 不同养护时间条件下的压缩溶陷曲线

Fig. 5 Compression curve with different curing age

变化规律且变化幅度较小,这反映出不养护条件下水泥掺量对盐渍土溶陷系数无明显影响。分析其原因,主要是由于不养护条件下,水泥无法充分发生水解及水化反应,进而无法形成具有较高结构强度和水稳定性的复合土体。养护条件下,水泥配合比2%~4%时,盐渍土的溶陷系数显著减小,溶陷性改良效果明显;但随着水泥配合比

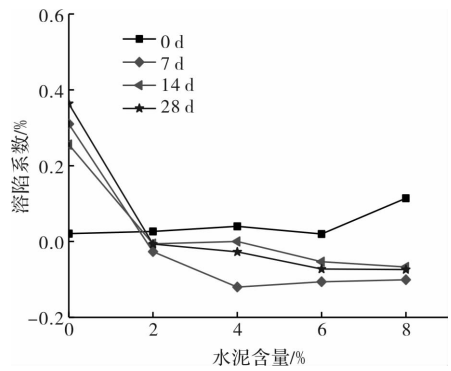


图 6 溶陷系数随水泥配合比变化规律

Fig. 6 The law of coefficient of collapsibility varying with cement content

进一步增加, 溶陷系数整体变化幅度逐渐减小, 最终趋于稳定的数值, 表现出指数衰减特征. 基于上述分析, 可以得到 2%~4% 水泥配合比对粗颗粒盐渍土溶陷性改良效果相对最优.

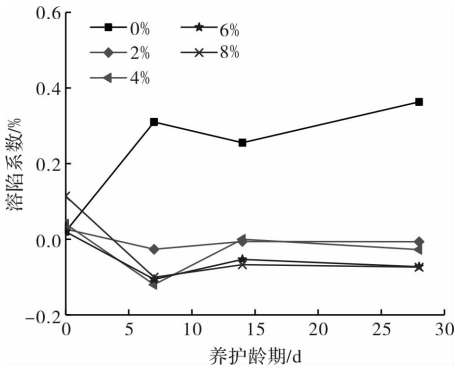


图 7 溶陷系数随养护时间变化规律

Fig. 7 The law of coefficient of collapsibility varying with curing age

图 7 所示为粗颗粒盐渍土溶陷系数随养护时间变化规律曲线. 从图中可以看出, 不含水泥(水泥

配合比 0%) 条件下, 试样溶陷系数随养护时间增加无显著变化规律, 表现出波动形变化特征, 这表明不含水泥条件下养护时间对盐渍土溶陷系数无影响. 含水泥试样养护 7 d 后, 溶陷系数有一定程度的降低, 溶陷性得到一定的抑制; 但随着养护时间进一步增加, 溶陷系数变化速率逐渐减小, 最终趋于稳定的数值. 基于上述分析, 养护时间 7 d 对粗颗粒盐渍土溶陷性改良效果相对最优.

对比图 6 和图 7, 不难发现, 相比养护时间, 一定程度上提高水泥配合比对粗颗粒盐渍土地基溶陷性改良效果相对更优.

3.3 溶陷性评价

表 3 所示为不同水泥配合比及养护时间条件下改良粗颗粒盐渍土试样溶陷性统计与评价结果. 从表 3 可以看出, 所有试样的溶陷系数均小于规范界限值 0.01, 均为非溶陷性盐渍土. 此外, 即使不含水泥(水泥配合比 0%) 条件下, 室内压实重塑粗颗粒盐渍土试样的溶陷系数亦小于 0.01, 为非溶陷性盐渍土, 这与该场地现场浸水溶陷试验结果差异较大. 现场浸水溶陷试验结果表明该场地粗颗粒盐渍土层平均溶陷系数为 0.017 (表 4 和图 8), 高于规范界限值 0.01, 为溶陷性地基土层. 分析其原因, 主要是由于室内扰动样重塑压实的过程中, 粗颗粒盐渍土体结构发生改变, 易溶盐的分布形态和天然状态有了较大的差别. 这反映出一定条件下粗颗粒盐渍土地基处理过程中, 可把粗颗粒盐渍土作为回填料进行碾压, 进而通过提高粗颗粒盐渍土压实系数可显著改良地基土的溶陷性并提高地基承载力, 具有明显的工程经济效益.

表 3 溶陷性统计表(表中溶陷系数为负, 表示试样体积膨胀)

Tab. 3 Statistics and evaluation of collapsibility

水泥含量/%	养护时间/d	浸水压力/kPa	最大沉降量/mm	溶陷量/mm	试样高度/mm	溶陷系数/%	溶陷性评价
0	0	200	-2.287	-0.031	150	0.02	非溶陷性
	7	200	-2.17	-0.465	150	0.31	非溶陷性
	14	200	-1.72	-0.383	150	0.26	非溶陷性
	28	200	-2.907	-0.545	150	0.36	非溶陷性
2	0	200	-0.863	-0.04	150	0.03	非溶陷性
	7	200	-0.199	0.04	150	-0.03	非溶陷性
	14	200	-0.535	0.009	150	-0.01	非溶陷性
	28	200	-0.399	0.01	150	-0.01	非溶陷性

续表 3

水泥含量/%	养护时间/d	浸水压力/kPa	最大沉降量/mm	溶陷量/mm	试样高度/mm	溶陷系数/%	溶陷性评价
4	0	200	-0.661	-0.06	150	0.04	非溶陷性
	7	200	-0.030	0.18	150	-0.12	非溶陷性
	14	200	-0.313	0	150	0.00	非溶陷性
	28	200	-0.303	0.041	150	-0.03	非溶陷性
6	0	200	-0.655	-0.03	150	0.02	非溶陷性
	7	200	-0.29	0.159	150	-0.11	非溶陷性
	14	200	-0.436	0.08	150	-0.05	非溶陷性
	28	200	-0.171	0.109	150	-0.07	非溶陷性
8	0	200	-1.141	-0.171	150	0.11	非溶陷性
	7	200	-0.284	0.151	150	-0.10	非溶陷性
	14	200	-0.141	0.101	150	-0.07	非溶陷性
	28	200	-0.162	0.111	150	-0.07	非溶陷性

表 4 现场浸水试验溶陷系数

Tab. 4 Coefficient of collapsibility based on field immersion test

试验点	T② ₁ -1	T② ₁ -2
浸水沉浸量 $\Delta S/\text{mm}$	16.7	23.69
浸水深度 h_s/mm	1 300	1 100
溶陷系数 $\delta = \Delta S/h_s$	0.012 8	0.021 5
平均溶陷系数	0.017	

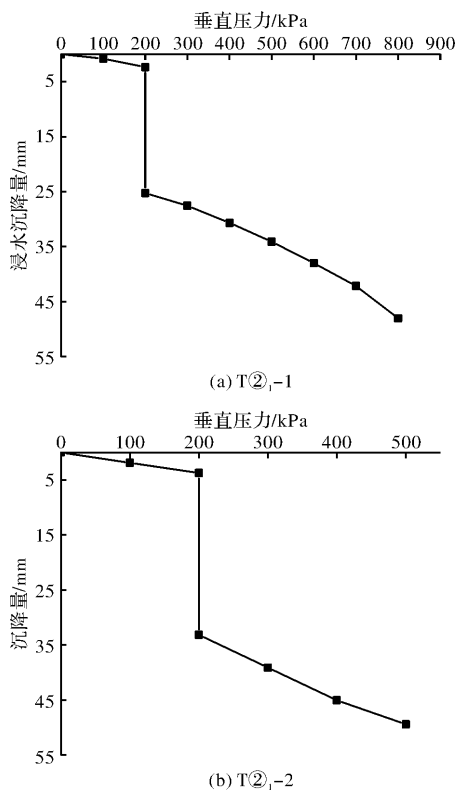


图 8 现场浸水压缩溶陷曲线

Fig. 8 Compression curve for field immersion test

4 结论

(1) 掺加水泥掺合料并养护一段时间后,粗颗粒盐渍土试样的压缩溶陷变形显著减小;部分水泥改良试样浸水过程中体积出现膨胀现象,导致试样位移量表现出一定的“回弹”特征。

(2) 不养护条件下,溶陷系数随水泥配合比增加无显著变化规律且变化幅度较小;养护条件下,盐渍土溶陷系数随水泥配合比增加逐渐减小,但降低幅度逐渐减小,呈指数衰减特征;2%~4%水泥配合比对粗颗粒盐渍土溶陷性改良效果相对最优。

(3) 不含水泥试样溶陷系数随养护时间增加无显著变化规律,呈波动形变化特征;含水泥试样养护 7 d 后,溶陷系数有一定程度的降低;随着养护时间进一步增加,溶陷系数变化速率逐渐减小,最终趋于稳定数值;养护时间 7 d 对粗颗粒盐渍土溶陷性改良效果相对最优。

(4) 相比养护时间,一定程度上提高水泥配合比对粗颗粒盐渍土地基溶陷性改良效果相对更优。

(5) 不含水泥条件下,室内压实重塑粗颗粒盐渍土的溶陷系数亦小于 0.01,为非溶陷性盐渍土,

与现场浸水溶陷试验结果差异较大;一定条件下可把粗颗粒盐渍土作为回填料进行碾压,进而通过提高压实系数可显著改良粗颗粒盐渍地基土的溶陷性。

参考文献 References

- [1] 华遵孟,沈求武.西北内陆盆地粗颗粒盐渍土研究[J].工程勘察,2001(1):28-31.
HUA Zunmeng, SHEN Qiuwu. Study on coarse saline soil of north-western inland basin[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2001(1):28-31.
- [2] 程东辛,刘志伟,柯学.粗颗粒盐渍土溶陷性影响因素研究[J].工程地质学报,2013,21(1):109-114.
CHENG Dongxing, LIU Zhiwei, KE Xue. Field and laboratory tests for influential factors on salt resolving slump of coarse particle saline soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2013,21(1):109-114.
- [3] 程东辛,刘志伟,张希宏.粗颗粒盐渍土溶陷特性试验研究[J].工程勘察,2010(12):27-31.
CHENG Dongxing, LIU Zhiwei, ZHANG Xihong. Experimental study on salt resolving slump of coarse-grained salty soil [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010(12):27-31.
- [4] 高学军.西北地区盐渍土溶陷特性研究与分析[J].工业建筑,2015,45(S1):924-927.
GAO Xuejun. Study and analysis on sedimentation characteristics of saline soil in Northwest China [J]. Industrial Construction, 2015,45(S1):924-927.
- [5] 刘亚峰,杨鹏,米海珍,等.粗颗粒硫酸盐渍土溶陷变形影响因素的显著性分析[J].甘肃科学学报,2016,28(1):105-109.
LIU Yafeng, YANG Peng, MI Haizhen, et al. Significance analysis on influence factors of coarse particle sulphate salty soil's dissolve settlement and deformation [J]. Journal of Gansu Sciences, 2016, 28(1): 105-109.
- [6] 刘亚峰,杨鹏,米海珍,等.粗颗粒硫酸盐渍土溶—滤(陷)—变形稳定时长的影响因素分析[J].甘肃科学学报,2015,27(4):64-68.
LIU Yafeng, YANG Peng, MI Haizhen, et al. The influence factors of analysis of coarse particle saline soil leaching deformation stability timing [J]. Journal of Gansu Sciences, 2015,27(4):64-68.
- [7] 杨鹏,朱彦鹏,文桃,等.基于神经网络法对粗颗粒硫酸盐渍土地基渗透特性的试验研究[J].工程勘察,2017(3):22-28.
YANG Peng, ZHU Yanpeng, WEN Tao, et al. Experimental study on permeability characteristics of coarse grain sulfate saline soil based on neural network method [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2017(3): 22-28.
- [8] 李耀杰,元振中,杨志刚,等.粗颗粒盐渍土溶陷性室内外试验研究[J].工程勘察,2016(10):22-27.
LI Yaojie, QI Zhenzhong, YANG Zhigang, et al. Experimental study on thaw collapsibility of coarse particle saline soils in laboratory and field tests [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2016(10): 22-27.
- [9] 刘志伟,程东辛,张希宏.粗颗粒盐渍土回填碾压试验研究[J].工程勘察,2012(6):18-21.
LIU Zhiwei, CHENG Dongxing, ZHANG Xihong. Experimental study on back filling and rolling compaction of coarse-grained salty soil [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012(6):18-21.
- [10] 张登武,赖天文,方建生.改良盐渍土的工程特性试验研究[J].铁道建筑,2012(9):81-83.
ZHANG Dengwu, LAI Tianwen, FANG Jiansheng. Test study on engineering characteristic of improved saline soil [J]. Railway Engineering, 2012(9):81-83.
- [11] 李作恒.石灰改良盐渍土路基工程特性试验研究[J].石家庄铁道学院学报,2007,20(2):45-48.
LI Zuoheng. Test study on engineering characteristic of lime-improved saline soil for highway subgrade [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2007, 20(2): 45-48.
- [12] 吕肇峰,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.
LÜ 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.
- [13] 杨晓松.粉煤灰改良氯盐渍土工程特性的试验研究[D].西安:西北农林科技大学,2009.
YANG Xiaosong. Test study on engineering characteristic of flyash-improved chlorine saline soil [D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2009.
- [14] 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 Fuhua, 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.
- [15] 田汉儒,元振中,秦明亮,等.粗颗粒盐渍土化学改良试验研究[J].勘察科学技术,2016,(6):5-7.
TIAN Hanru, QI Zhenzhong, QIN Mingliang, et al. Study on chemical improved experiment of coarse particle saline soil [J]. Site Investigation Science and Technology, 2016,(6):5-7.

(编辑 吴海西)