不同类型盐渍土固化体的干缩与湿胀特性

周永祥，阎培渝
（清华大学土木工程系，北京 100084）

摘 要：采用三种固化剂对高含盐量的氯盐盐渍土和硫酸盐盐渍土进行固化，研究了它们的干缩和湿胀特性。结果表明，用矿渣和粉煤灰取代部分水泥，随后又增加粉煤灰的比例，可以连续降低固化土的干缩应变和干缩系数。矿渣和粉煤灰取代水泥后，水化活性减弱，产物减少，同时，体系内 Ca^{2+}的浓度降低，盐渍土中所含 NaCl 和 Na_2SO_4对化学反应的促进作用减弱，化学反应程度以及由此引起的自由水到结合水的转化、孔隙特征的变化的差别缩小，因此，盐分引起的固化土的干缩应变和干缩系数的差别缩小。Na_2SO_4对固化土干缩应变和干缩系数的提高作用比 NaCl 明显。在低钙体系中，NaCl 的物理作用比化学作用更突出。含 NaCl 的固化土试件在吸湿阶段具有明显的吸潮特性，但并不引起较大的膨胀。残存在土体中的 Na_2SO_4在吸湿阶段可能发生剧烈膨胀而导致土体发生严重开裂。

关键词：固化盐渍土；干燥收缩；干缩系数；吸湿膨胀；盐分
中图分类号：TU472.5；TU448；U419.5 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2007)11－1653－06
作者简介：周永祥(1979－)，男，云南呈贡人，博士研究生，主要从事土壤固化及固化土的耐久性研究。E-mail: xiangzizhou@gmail.com。

Investigation on dry shrinkage and wet expansion of solidified saline soil containing different salts

ZHOU Yong-xiang, YAN Pei-yu
（Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China）

Abstract: Dry shrinkage and wet expansion characteristics of saline soils containing rich chlorine and sulfate, solidified by three sorts of soil stabilizers were investigated. It was shown that dry shrinkage and shrinkage coefficient of specimens decreased if partial cement was replaced by fly ash and slag, and then further by more fly ash. Compared with cement, the chemical activity of fly ash-slag stabilizer was lower and thereby less reaction products were produced. Furthermore, less calcium ions were provided so that the promoting effect of chlorine and sulfate on chemical reaction in soil was weakened, resulting in the differences of chemical reaction degree and therefore the transform from free water to bound water and also the pore characteristics between the specimens with salt and those without salt were reduced. So the difference caused by salts in dry shrinkage and shrinkage coefficient of specimens was also reduced. The positive effect of sodium sulfate on the increase of dry shrinkage and shrinkage coefficient was stronger than that of sodium chloride. In low calcium system, physical effect of chlorine was more obvious than its chemical effect. In moist environment, moisture absorption of the specimens with chlorine was obvious but without huge expansion. However, much rudimental sodium sulfate in soil might cause serious cracks in specimens by huge expansion.

Key words: solidified saline soil; dry shrinkage; dry shrinkage coefficient; wet expansion; salt

0 引 言

无机结合料固化（稳定）土的一个明显缺点是抗拉强度低、抗变形能力差。收缩因可能引起开裂而成为土壤固化中一个普遍关心的问题。固化土体发生的收缩，在养生期内主要是固化过程中化学反应引起的自生收缩，在后期主要来自干燥收缩（简称干缩）和温度收缩（简称温缩）。干缩之所以作为收缩问题中的一个重要内容来研究，是由于它具有如下特点：①干缩几乎不可避免。固化土结构物/构筑物一旦养生结束暴露在大气中，都面临着水分散失而发生收缩的可能。②干缩在总收缩中所占比例较大。干缩通常要比温缩严重得多，半刚性材料的干缩系数是其温缩系数的10多倍[1-2]。干缩往往是引起开裂最常见的原因。③干缩

基金项目：国家863项目（2003AA33X100）
收稿日期：2006－10－24

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在道路工程中引起的开裂危害严重。道路工程中大部分的横向裂缝是由半刚性基层的收缩引起，例如水泥固化土干缩会产生间距 3～10 m 的横向裂缝，裂缝宽度 0.5～3 mm[3]。路面开裂将大大缩短道路的使用寿命。④干缩的可控制性强。相对于温缩受到自然环境温度变化的影响而难以控制而言，干缩则可以通过养生、覆盖等措施加以改善，因此，控制干缩是控制收缩的主要着眼点。

普通固化土的干缩问题向来为研究者所关注。对于盐渍土这类特殊土壤，特别是在我国西北地区广泛分布的具有较高的易溶盐含量的盐渍土，由于某些盐分具有很大的吸湿性，还可能与固化材料发生化学反应，其固化体的干缩与湿胀性能与普通固化土明显不同，而固化盐渍土的干缩与湿胀问题迄今缺少系统的研究。本文针对两类典型的盐渍土——氯盐盐渍土和硫酸盐盐渍土，采用三种固化剂体系，研究了在高含盐量情况下，固化土体的干缩和湿胀特性。

1 原料与试验方法

1.1 土样

试验采用北京郊外粉土（非盐渍土），其物理性质和化学成分分析见表 1 和表 2。根据试验需要，在土样中加入干土质量的 0～4%的 NaCl 或 Na_2SO_4，混合得到不同种类的盐渍土。

表 1 土样的物理性质

Table 1 Physical property of soil

塑限/%	液限/%	塑性指数	最优含水率/%	易溶物含量%
19.0	24.2	5.2	18	0.22

表 2 原材料的化学组成

Table 2 Chemical composition of materials

材料	化学成分含量/%								
	SiO_2	$A1_2O_3$	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O_{eq}	SO_3	P_2O_5	IL
土	60.42	12.43	4.35	7.26	2.77	3.19	0.15	0.30	7.14
水泥	22.80	4.55	2.82	65.34	2.74	0.55	2.92	—	3.90
矿渣	34.63	13.92	0.29	38.28	10.52	—	0.25	—	0.25
粉煤灰	57.60	21.90	7.70	3.87	1.68	0.41	4.05	—	0.43

1.2 土壤固化剂

分别采用三组固化剂：①普通硅酸盐水泥；②质量比为水泥：粉煤灰：矿渣=1：1：3，简记为（1：1：3）；③质量比为水泥：粉煤灰：矿渣=1：3：1，简记为（1：3：1）。表 2 给出了这些原材料的化学成分。固化剂的掺量均为干土质量的 15%。

1.3 试验方法

试验序列与试件的密度见表 3。在相同含水率 16.6%（各组混和料的最优含水率的平均值）条件下，将土壤混和料在钢模中压制成 40 mm×40 mm×160 mm 的试件每组各三条，并在试件两端各埋入一个圆头铜制测头，采用 MNK1031 型水泥砂浆膨胀收缩测量仪（精度 0.001 mm）测量其长度。试件在(20±2)℃环境中带模密封养生 7 d，脱模后，进入干缩试验的第一阶段（Ⅰ）：置于(20±2)℃、相对湿度(60±5)%的恒温恒湿室内。定期测量试件的质量与长度，直至长度稳定。

第二阶段（Ⅱ），将试件在不同的温度（30，50，70，90，105℃）下烘干 48 h，每次烘干后，冷却至(20±2)℃，然后测量试件的质量与长度。

第三阶段（Ⅲ），将干燥试件放置在(20±2)℃的环境中，逐渐增加相对湿度直至达到 95%～100%，在此期间，定期测量试件的质量与长度。

表 3 试验序列与试件密度

Table 3 Test scheme and density of specimens

序号	盐分	固化剂	脱模时湿密度/(g·cm^{-3})	脱模104 d后干密度/(g·cm^{-3})	湿干密度差/(g·cm^{-3})
1		水泥	1.90	1.72	0.18
2	0%	(1：1：3)	1.89	1.67	0.22
3		(1：3：1)	1.85	1.63	0.22
4		水泥	1.92	1.73	0.18
5	2%NaCl	(1：1：3)	1.93	1.72	0.21
6		(1：3：1)	1.94	1.71	0.23
7		水泥	1.95	1.75	0.20
8	4%NaCl	(1：1：3)	1.94	1.72	0.22
9		(1：3：1)	1.96	1.72	0.24
10		水泥	1.91	1.71	0.20
11	2%Na_2SO_4	(1：1：3)	1.91	1.70	0.21
12		(1：3：1)	1.92	1.70	0.22
13		水泥	1.94	1.74	0.20
14	4%Na_2SO_4	(1：1：3)	1.96	1.74	0.22
15		(1：3：1)	1.97	1.73	0.24

2 结果与分析

2.1 干缩应变

在试验的第一阶段，干缩主要发生在试件脱模后的前 20 d 内，随后趋缓。对于同一种土壤，掺用不同固化剂的固化土试件具有不同的干缩值。三种固化剂中，水泥固化土的干缩应变在试验的三个阶段都最大，（1：1：3）体系次之，（1：3：1）体系最小（图 1）。固化盐渍土试件随时间的干缩应变规律与图 1 一致；而且这个规律不随含盐的种类（NaCl 或 Na_2SO_4）及其掺量（2%或 4%）的改变而改变。

对于同一种固化剂，不同种类的固化盐渍土的干缩变化规律有所不同。在水泥固化土中，含 NaCl 盐渍土试件的干缩应变比不含盐的试件有所增加，但幅度不大，4%与 2%的含盐量引起的差别不大；而 Na_2SO_4 盐渍土固化后的干缩应变则比不含盐的试件大大增加，增加幅度达到 50%以上（图 2）。在（1：

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1∶3）系固化土中，含 NaCl 试件的干缩应变降低，且含盐量越大，干缩应变越小；Na_2SO_4 盐渍土固化体的干缩应变增大，且含盐量越大，干缩应变越大（图 3）。在（1∶3∶1）系固化土中，干缩应变的变化规律与（1∶1∶3）系类似，只是各组曲线之间的差别不大（图 4）。

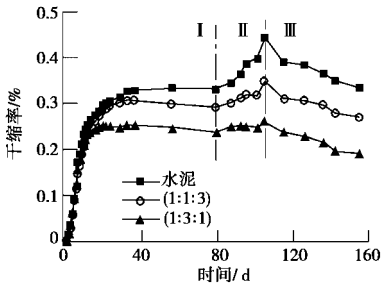


图 1 固化剂体系对不含盐固化土干缩应变的影响

Fig. 1 Dry shrinkage strains of the soil specimens without salt solidified by different soil stabilizers

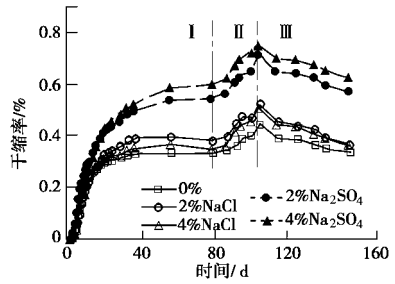


图 2 水泥固化盐渍土的干缩应变

Fig. 2 Dry shrinkage strains of different saline soil specimens solidified by cement

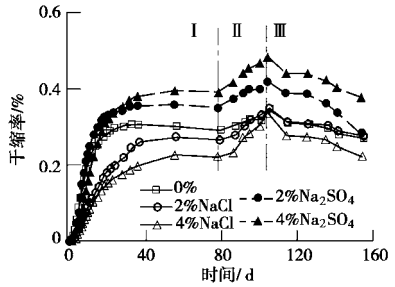


图 3 （1∶1∶3）固化盐渍土的干缩应变

Fig. 3 Dry shrinkage strains of different saline soil specimens solidified by stabilizer (1∶1∶3)

值得注意的是，在图 3 和图 4 中，含 Na_2SO_4 的试件在第三阶段吸湿膨胀的速度加快，特别是用（1∶3∶1）固化的试件，出现了较大膨胀。

综合以上诸图，含 4%Na_2SO_4 的盐渍土经水泥固化后干缩应变最大，第一阶段的最大值达到约 0.6%，第二阶段的最大值达到约 0.75%；而含 4%NaCl 的盐渍土经（1∶3∶1）固化后干缩应变最小，第一阶段的最大值约为 0.17%，第二阶段的最大值约为 0.25%。其余各组的干缩应变值均在此范围内变化。

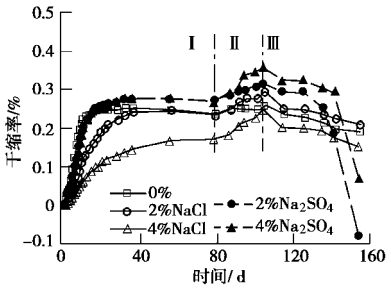


图 4 （1∶3∶1）固化盐渍土的干缩应变

Fig. 4 Dry shrinkage strains of different saline soil specimens solidified by stabilizer (1∶3∶1)

2.2 干缩系数

除了干缩应变外，干缩系数也是评价固化土干缩特性的一个重要技术指标。干缩系数 α_d 的定义为：单位含水率 w（%）变化所引起的材料的干缩应变，即 $\alpha_d=\varepsilon_d/w$，其中，ε_d 为干缩应变。

盐分的种类和含量相同的固化土，其干缩系数随失水率变化而变化的速率因固化剂而异。当失水率超过 2%～3%后，水泥固化土的干缩系数最先进入快速发展阶段；（1∶1∶3）体系的试件，当失水率超过约 5%时，干缩系数开始快速发展，但发展速度较水泥固化土的慢；而（1∶3∶1）体系的试件，当失水率超过 6%～8%后，干缩系数才出现发展加快的情况，但速度则比（1∶1∶3）体系的试件慢。这种发展规律，导致后期的干缩系数以水泥固化土最大，（1∶1∶3）体系次之，（1∶3∶1）体系最小（图 5）。与干缩应变的情况相同，上述规律在不同种类的固化盐渍土中一致。

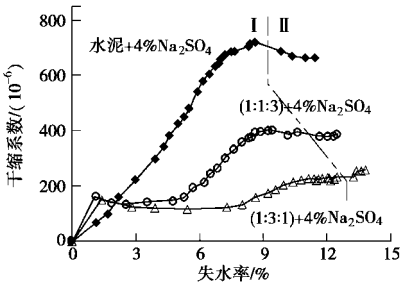


图 5 固化剂对含 4%Na_2SO_4 盐渍土固化体干缩系数的影响

Fig. 5 Dry shrinkage coefficients of the saline soil specimens with 4% Na_2SO_4 solidified by different stabilizers

对于水泥固化土，与不含盐的试件相比，盐分的存在提高了相同失水率下的干缩系数，且 Na_2SO_4 的提高效果比 NaCl 明显（图 6）。

在（1∶1∶3）体系和（1∶3∶1）体系中（图 7，图 8），盐分对固化盐渍土的干缩系数的影响已不似水泥体系那样明显，其中含 4%NaCl 的固化土试件的

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

干缩系数在同体系固化剂中最小。在（1∶1∶3）体系中，除 Na_2SO_4 对后期干缩系数有所提高外，其余差别不大；在（1∶3∶1）体系中，这种差别更加缩小。

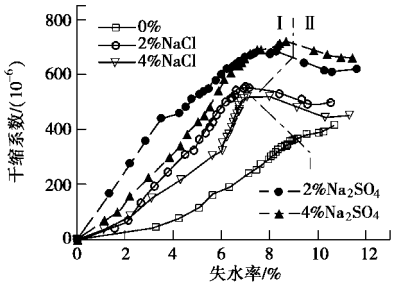


图 6 水泥固化盐渍土的干缩系数

Fig. 6 Dry shrinkage coefficients of different saline soil specimens solidified by cement

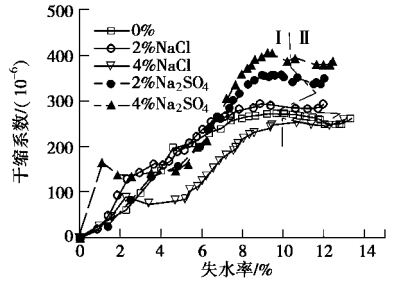


图 7 （1∶1∶3）固化盐渍土的干缩系数

Fig. 7 Dry shrinkage coefficients of different saline soil specimens solidified by stabilizer (1∶1∶3)

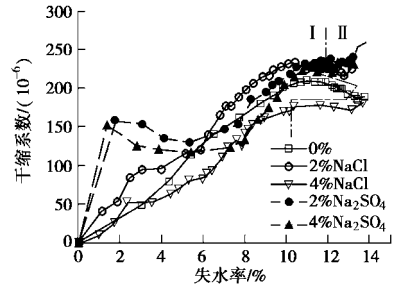


图 8 （1∶3∶1）固化盐渍土的干缩系数

Fig. 8 Dry shrinkage coefficients of different saline soil specimens solidified by stabilizer (1∶3∶1)

2.2 湿胀系数

对于试验的第三阶段，按照类似干缩系数的定义，以第二阶段的最大干缩值以及相应的含水率为初始零值，计算出吸湿过程中的湿胀系数（图 9）。

试件在干燥状态吸收水分，起始时（吸水率约 1%）具有较高的湿胀系数，随后逐渐下降。NaCl 的吸湿特性在干缩阶段不明显，而在吸湿阶段却十分明显。从图 9（a）可以看到，在相同条件下，固化 NaCl 型盐渍土试件的吸水率快速增加，但湿胀系数并不比不含盐分的固化土试件大。在湿胀系数－吸水率关系曲线中，NaCl 含量从 2%增加到 4%没有引起大的差别，含 Na_2SO_4 的固化土试件与不含盐的固化土试件类似。值得注意的是，在（1∶3∶1）体系中，当吸水率超过 3%后，固化 Na_2SO_4 型盐渍土试件的湿胀系数迅速陡升，并因剧烈的膨胀而导致严重开裂（图 10）。

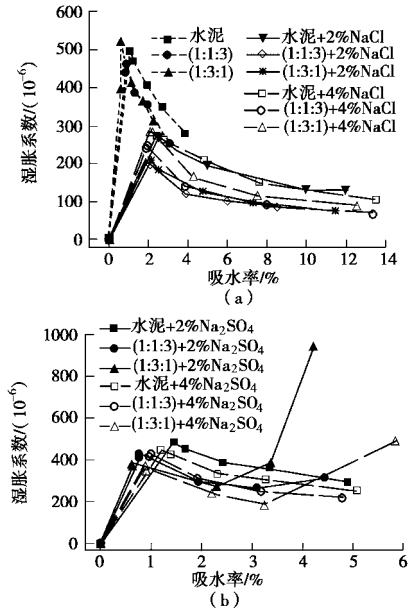


图 9 固化盐渍土的湿胀系数

Fig. 9 Wet expansion coefficients of different solidified saline soil specimens



图 10 （1∶3∶1）固化的 Na_2SO_4 盐渍土试件在吸湿后期严重开裂

Fig. 10 Serious cracks in specimens containing Na_2SO_4 solidified by stabilizer (1∶3∶1) at the end of wet expansion stage

3 讨 论

3.1 干缩机理

对于多孔材料干缩机理的解释，曾提出过“毛细孔张力理论”、“表面张力理论”、“拆开应力理论”以及“层间水理论”[4-5]。这些理论从不同的角度描述了干缩发生的机理，但至今未取得一致的看法，可见干缩是一个十分复杂的物理化学过程。然而，归根结底，干缩的发生是由于材料内部的水分向外逸出，同时引

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

起材料内部的水分发生迁移，以致材料内部固体粒子的受力平衡被打破，在不平衡力（内外压力差）作用下固体粒子发生了相对位移。因此，只要水分迁移能引起内外压力差，都可能导致收缩的发生。从这个意义上说，上述理论并不矛盾，它们从不同的层次描述了可能产生不平衡力的机制。

开始时，大孔中的自由水（仅受重力作用）蒸发，一般不会引起作用力的失衡，所以也不会引起收缩；随后，毛细孔中的水出现水－气界面，在水气界面的表面张力作用下，弯液面形成，导致毛细孔内的压力低于外界大气压，这种内外压力差是这一阶段促使材料发生收缩的主要原因。而且，随着蒸发的进一步发展，这种压力差越来越大。同时，在水对毛细管壁能够完全润湿的情况下，毛细管半径等于弯液面的曲率半径，因此毛细管越细，即弯液面的曲率半径越小，毛细管内水分的饱和蒸汽压越低。这说明毛细管越细，管内的水分越难蒸发。而且，毛细管越细，引起的压力差也越大。这就是干缩系数在第Ⅰ阶段随着失水率增加而增加的一个原因。随后，胶粒表面的吸附水膜减薄，凝胶之间的层间水和凝胶孔水也会蒸发，这些在原状态下受力的水分子一旦失去，必然引起作用力失衡而发生收缩。

散碎性土壤经化学反应固化后，就干缩而言，在两个方面发生了变化：一方面是化学反应消耗水分产生胶结性产物的过程改变了原来水分的赋存状态，具体而言，就是一部分自由水将转化为结合水（包括不能蒸发的结晶水、存在于胶体中的凝胶孔水、存在于凝胶之间的层间水以及吸附于凝胶粒表面的吸附水），还有一部分进入了更加细小的孔隙中形成毛细孔水；另一方面，固化后土体的强度增加，抵抗变形的能力也在增强。前一方面有利于增加干缩，即化学反应越充分，生成的产物越多，孔径越细化，转化为可蒸发的结合水以及进入更加细小孔隙中的水分越多，越有利于干缩；后一方面则有利于抑制干缩。干缩究竟是增大还是减小，要看两方面的力量对比。例如，对于多数土壤，经水泥固化后，其干缩开始随着水泥用量的增加而减小，并达到某个最小值，然后又随着水泥用量的增加而增加[6]，其道理就在于此。而在黏土中加入粗粒料可以减小干缩[7]，其一是减小了小孔在材料孔隙中的比例，其二是粗粒料的支撑作用能够抵抗更大的变形。

3.2　盐分的影响

如果暂不考虑盐分的影响，固化剂从水泥到（1∶1∶3）系，再到（1∶3∶1）系，胶凝材料的水化活性逐渐减弱。在固化过程中，特别是对于养生期仅有 7 d 的固化土试件，水化程度减弱和水化产物减少是干缩率和干缩系数变化的一个重要原因。而盐分的掺入，在某种程度上改变了化学反应程度，加剧了三类固化土在干缩性能上的差别。以下讨论盐分对固化土干缩性能的影响。

盐分除了对土壤的物理性能产生影响外，对固化过程的化学反应也有不同程度的影响。

为了研究盐分对固化过程中化学反应的影响，我们测量了土壤混和料的反应放热量。方法是在干土中掺入 20%的粉煤灰和矿渣（质量比为 1∶1），混合磨细后，利用 Toni Technik-7335 型等温差分量热仪，在液固比 0.35、25℃条件下测试试样的放热量（图 11）（$Ca(OH)_2$ 与 NaOH 的掺量均为胶凝材料的 15%，NaCl 与 Na_2SO_4 的掺量则按干土质量的百分比计）。

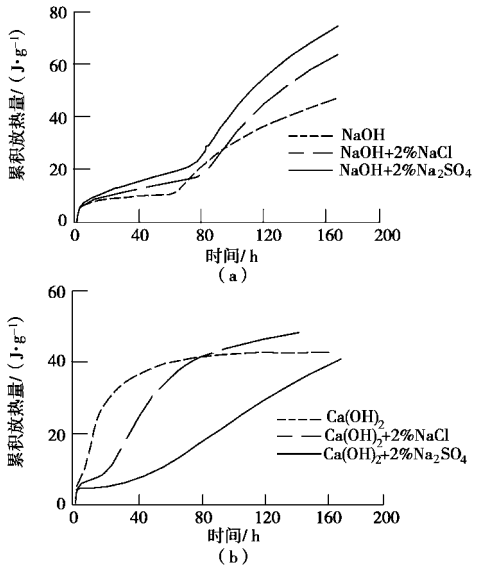


图 11　盐分与 Ca^{2+}、Na^+离子对固化土放热量的影响

Fig. 11 Effect of salt, Ca^{2+} and Na^+ on evolution of heat in solidified soil

试验结果表明，单纯用 NaOH 激发的固化土试样具有明显的放热量，而加入 NaCl 与 Na_2SO_4 不但没有提高放热量，也没有将反应的加速期提前，反而在一定程度上抑制了化学反应。而以 $Ca(OH)_2$ 为激发剂的固化土试样，NaCl 与 Na_2SO_4 的加入，在早期就有较高的放热量产生，具有明显的加速化学反应的作用。由此可见，在 Ca^{2+}不足时，氯盐与硫酸盐并未促进固化土体系的化学反应，反而有抑制的作用；而当 Ca^{2+}大量存在时，氯盐和硫酸盐对固化土体系的化学反应的促进作用得以发挥。这就是氯盐和 Na_2SO_4 可以作为水泥早强剂的原因。正因为 NaCl、Na_2SO_4 对早期水泥水化的促进作用，所以在水泥固化土体系中，无论干缩应变还是干缩系数，盐渍土试件都高于不含盐的试件。

对于（1∶1∶3）体系，以粉煤灰和矿渣取代水泥，除了粉煤灰和矿渣的活性低于水泥外，还有一个重要

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

原因是低钙胶凝体系对高钙体系的取代，必然导致化学反应过程中 Ca^{2+}减少，以致 NaCl 与 Na_2SO_4 的化学激发作用不能有效发挥，所以盐分对干缩应变和干缩系数的影响已不如水泥固化土那样明显。含 4%NaCl 量的试件，干缩应变和干缩系数均低于不含盐的试件，原因是此时 NaCl 在土壤混和料中发挥的物理作用比化学作用突出。高含量的 NaCl 会影响土壤的物理性质，如降低土壤的塑限值和液限值[8]。

在（1∶3∶1）系固化土中，Ca^{2+}进一步减少，盐分对化学反应的促进作用更加被削弱，加之，胶凝材料的反应活性进一步降低，所以，干缩应变、特别是干缩系数的差别更加缩小。从水泥到（1∶1∶3）系再到（1∶3∶1）系，化学反应程度逐渐减弱，这从表 3 中湿密度与干密度的差值也可见一斑。该值越大，说明逸出的水分越多，即参与化学反应的水分越少，反应程度越低。虽然逸出的水分多，但引起的收缩变形却小，可见化学反应对水分存在形式的转化，同时也是整个孔系特征的改变，明显影响了固化盐渍土的干燥收缩特性。NaCl 和 Na_2SO_4 在(1∶1∶3)系和(1∶3∶1）系固化土中促进化学反应的作用越来越弱，以致剩余的盐分越来越多。NaCl 在吸湿膨胀阶段表现出明显的吸湿特征，但不引起较大的膨胀率。而剩余的 Na_2SO_4 一旦过量（如在（1∶3∶1）系固化土中），就会使固化盐渍土在吸湿阶段后期发生较大膨胀，甚至导致试件开裂。

4 结 论

（1）对于盐分种类与含量相同的固化土，干缩应变和干缩系数因固化剂体系的不同而不同：水泥固化土的干缩应变和干缩系数最大，(1∶1∶3)体系次之，（1∶3∶1）体系最小。

（2）从水泥到（1∶1∶3）体系再到（1∶3∶1）体系，胶凝材料的水化活性减弱，水化产物减少。同时，由于体系内 Ca^{2+}数量的减少，盐渍土中所含的 NaCl 和 Na_2SO_4 对化学反应的促进作用逐渐减弱，化学反应程度以及由此引起的自由水到结合水的转化、孔系特征的变化的差别逐渐缩小。所以，盐分在三个体系中对固化土干缩应变和干缩系数的提高作用依次减弱，同体系内固化盐渍土的干缩应变和干缩系数的差别逐渐减小。

（3）在各个体系中，Na_2SO_4 对固化土干缩应变和干缩系数的提高作用比 NaCl 明显；在低钙体系中，NaCl 的物理作用比化学作用更突出；在吸湿阶段，NaCl 的吸潮特性充分体现，但并不引起较大的膨胀；而 Na_2SO_4 如果不能被化学反应大量消耗而残存在土体中，它可能使固化盐渍土在吸湿阶段后期发生较大膨胀，甚至导致试件开裂。

参考文献：

[1] 沈金安, 李福普, 陈 景. 高速公路沥青路面早期损坏分析与防治对策[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 241. (SHEN Jin-an, LI Fu-pu, CHEN Jing. Analysis and preventive techniques of premature damage of asphalt pavement in expressway[M]. Beijing: China Communications Press, 2004: 241. (in Chinese))

[2] 沙庆林. 高速公路沥青路面早期破坏现象及预防[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 383. (SHA Qing-lin. Premature damage and prevention of asphalt pavement in expressway[M]. Beijing: China Communication Press, 2001: 383. (in Chinese))

[3] 沙庆林. 水泥稳定土基层和底基层[M]. 北京: 人民交通出版社, 1981: 97. (SHA Qing-lin. Base and sub-base of soil cement[M]. Beijing: China Communications Press, 1981: 97. (in Chinese))

[4] NEVILLE A M. Properties of concrete[M]. London: Pitman Publishing Limited, 1981: 374－395.

[5] BARNES P, 等. 水泥的结构和性能[M]. 吴兆琦, 汪瑞芬, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991: 325－330. (BARNES P, et al. Structure and performance of cements[M]. WU Zhao-qi, WANG Rui-fen, et al, trans. Beijing: China Architecture & Building Press, 1991: 325－330. (in Chinese))

[6] 沙庆林. 论高等级公路路面基层材料的技术要求(续)[J]. 公路交通科技, 1990, **7**(3): 6－16. (SHA Qing-lin. Technical requirements of road-base building materials for high-class roads (continued)[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 1990, **7**(3): 6－16. (in Chinese))

[7] 张登良, 郑南翔. 半刚性基层材料收缩抗裂性能研究[J]. 中国公路学报, 1991, **4**(1): 16－22. (ZHANG Deng-liang, ZHENG Nan-xiang. On the anti-shrinkage cracking performance of semi-rigid base course materials[J]. China Journal of Highway and Transport, 1991, **4**(1): 16－22. (in Chinese))

[8] 江炼波. 盐渍土路基工程特性及施工技术研究[J]. 国防交通工程与技术, 2005(1): 35－37. (JIANG Lian-bo. A study of the engineering characteristics and construction technology of saline soil sub-grade[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2005(1): 35－37. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net