



# 水泥改性强膨胀土理化试验研究

赵春吉<sup>1</sup>, 赵红华<sup>\*1</sup>, 常艳<sup>1</sup>, 龚壁卫<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 运载工程与力学学部 工程力学系, 辽宁 大连 116024;

2. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 膨胀土是一种特殊的黏性土,具有遇水膨胀、崩解、软化,失水收缩、干裂、硬化等工程特性,膨胀土掺入水泥后其工程特性会发生改良.选取南水北调工程中河北邯郸地区的强膨胀土,在较长的养护龄期内,进行了水泥改性的试验研究.主要进行了基本物理性质试验、自由膨胀率试验、矿物分析试验、XRD和SEM显微结构试验和阳离子交换量试验,从不同角度说明了不同龄期下水泥改性强膨胀土的物理化学特性、矿物组成和微观结构的变化,分析了水泥改性膨胀土的机理.发现阳离子交换量不能作为判断水泥改性后膨胀土膨胀性能的有效指标,为膨胀土现场水泥改性的设计施工提供了科学的、有价值的依据.

**关键词:** 强膨胀土;水泥改性;自由膨胀率;一维无荷膨胀率;XRD;SEM;阳离子交换量

**中图分类号:** TU443

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7511/dllgxb201406002

## 0 引言

膨胀土是一种含有较多黏土矿物的特殊土,其中的黏土矿物主要由亲水性矿物蒙脱石组成,具有吸水量大、塑性强、快速崩解,以及剧烈的膨胀与收缩等特性,同时又具备固结状态较好、压缩性较小的特点.膨胀土的这种工程特性,对在膨胀土地区建设的路基、地基、边坡、轻型房屋等工程结构造成的危害往往具有长期潜在性、突发性、反复出现性的特点<sup>[1]</sup>,造成巨大的经济损失.膨胀土在世界各地分布十分广泛,在我国的一些省区也都普遍发现了膨胀土的存在.因此,膨胀土是岩土工程师比较关心的一个工程问题.

针对膨胀土的上述工程特性,目前主要采用通过在膨胀土中掺入水泥、石灰和化学试剂等不同的改性材料,使其与原膨胀土发生物理化学反应进而从根本上改变原来土的性质,成为合格的改良土,以满足工程设计中降低膨胀土膨胀潜势,消除膨胀土对工程建筑物危害的要求<sup>[2-3]</sup>.许多研

究<sup>[4-6]</sup>表明,随着水泥掺量增加,固化膨胀土强度有一定增加,但当水泥掺量超过一定值时,稳定土的裂缝将显著增加,收缩性能变差.一般认为水泥改性土体性能的提高主要是由于土-水泥之间的反应<sup>[7]</sup>.主要包括4个不同的过程:离子交换、絮凝和团聚、胶结水化、硬凝反应<sup>[8]</sup>.Peethamparan等通过XRD、TGA和SEM等试验手段对水泥窑粉尘加固的钠基蒙脱土进行了一系列试验工作,试验结果表明成块黏土的微观结构经历了较大的变化<sup>[9]</sup>.Horpibulsuk等对水泥加固粉质黏土在7d养护期内的微观结构进行了定性和定量的分析研究<sup>[10]</sup>,发现水泥加固主要通过增加土颗粒团体之间的粘结和减少孔隙进而改善了土的结构而实现.Lemaire等研究了石灰和水泥改良塑性粉土微观结构的效果,在添加水泥处理28d后可以观察到有一层凝胶物质覆盖在成团的土体上面<sup>[11]</sup>.目前关于水泥改性膨胀土改性机理的研究工作比较局限,仍需要开展相关的研究工作.本文主要通过掺入膨胀土干质量12%的水泥对河北邯

收稿日期: 2014-03-19; 修回日期: 2014-09-21.

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAB10B05);国家自然科学基金资助项目(51308091);归国留学人员科研启动基金资助项目.

作者简介: 赵春吉(1987-),男,硕士生,E-mail:zhchji@mail.dlut.cn;赵红华\*(1977-),女,博士,讲师,E-mail:zhaoh@dlut.edu.cn.

邯地区的强膨胀土进行改良,研究强膨胀土改性前后膨胀率、矿物成分、微观结构、阳离子交换量的变化,探讨水泥改性强膨胀土的机理,为强膨胀土地区水泥改性的设计施工提供科学而有价值的依据。

## 1 强膨胀土的基本物理性质

强膨胀土选取自南水北调工程经过的河北邯郸地区,采用大连市泡崖四区水泥厂的普通硅酸盐水泥对强膨胀土进行改性。强膨胀土从现场运

到实验室后,经过风干、碾碎处理,过 0.5 mm 筛,按照土工试验标准,进行了基本物理性质试验。强膨胀土的基本物理性质如表 1 所示。

与常见黏土相比,邯郸强膨胀土具有最优含水量较高、最大干密度较低的特点。养护 28 d 后,水泥改性邯郸强膨胀土的液限为 62.6%,塑性指数为 39.2%,可以看到改性土的塑性指数明显小于素土,改性土膨胀性降低<sup>[7]</sup>;同时,改性土自由膨胀率降为 38%,其值也明显小于素土。

表 1 邯郸强膨胀土的基本物理性质

Tab. 1 The basic physical properties of Handan highly expansive soil

土粒组成/%			残余含水量 $w/\%$	相对密度 $D_s$	最大干密度 $\rho_{dmax}/$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	最优含水量 $w_{op}/\%$	无荷膨胀率 $\delta_e/\%$	自由膨胀率 $\delta_{ef}/\%$	液限 $W_l/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑性指数 $I_p/\%$
砂粒 ( $0.075 mm < R \leq 5 mm$ )	粉粒 ( $0.005 mm < R \leq 0.075 mm$ )	黏粒 ( $R \leq 0.005 mm$ )									
15.23	30.96	30.66	10.77	2.25	1.28	35.7	5.35	118	93	36	57

## 2 水泥改性邯郸强膨胀土的膨胀率试验

为了研究掺加水泥对控制强膨胀土胀缩性改性的有效性,对邯郸强膨胀土的水泥改性土进行了自由膨胀率试验和一维无荷膨胀率试验。其中自由膨胀率试验所用的水泥改性膨胀土料(下文所提水泥改性土均采用此定义)为风干并过 0.5 mm 筛的天然土在 35.7% 的最优含水量下拌膨胀土干质量 12% 的水泥,经环刀击实制成环刀样,控制试样的密度为击实试验得到的最大干密度  $1.28 g/cm^3$ ,然后用塑料膜包裹好,并在温度为  $24^\circ C$  和湿度为 90% 条件下进行养护;一定龄期的养护后将环刀样取出快速风干,人工碾碎并过 0.5 mm 筛后进行试验。一维无荷膨胀率试验所用试样为经一定龄期养护的上述环刀样。

### 2.1 水泥改性邯郸强膨胀土的自由膨胀率试验

本试验依据土工试验规程(SL 237-024—1999)关于自由膨胀率试验的规定进行,每个养护龄期的试样分别进行 2 次平行测定,在允许误差范围内,取其算术平均值。强膨胀土及其水泥改性土不同龄期的自由膨胀率见表 2。由表 2 可知:邯郸强膨胀土在刚掺水泥后自由膨胀率为 98%,低

于素土的自由膨胀率 118%,并且随着养护龄期的变化,自由膨胀率逐渐降低,在 7 d 养护龄期后降为 46%,属于弱膨胀土的范畴,不再具有明显的膨胀性;在 28 d 养护龄期后降为 38%,之后趋于稳定。

表 2 不同养护龄期下水泥改性邯郸强膨胀土的自由膨胀率

Tab. 2 Free swelling ratio of cement-treated Handan highly expansive soil at different curing time

龄期	自由膨胀率/%	
	素土	水泥改性土
0 h	118	98
1 h		90
4 h		76
1 d		75
7 d		46
28 d		38
90 d		36
180 d		37

### 2.2 水泥改性邯郸强膨胀土的一维无荷膨胀率试验

依据土工试验规程(SL 237-024—1999),计算不同养护龄期试样的体膨胀率,并对每个养护龄期的试样分别进行 2 次平行测定,在允许误差

范围内,取其算术平均值.试验强膨胀土和掺加水泥后的改性土在不同龄期的无荷膨胀率试验数据如表3所示.从表3中可以看出,强膨胀土素土的无荷膨胀率达到5.345%,经过水泥改性后,在很短时间内下降为2.470%,在24 h的养护龄期后,降为0.100%,已经不再表现出明显的膨胀性.在养护7 d后,无荷膨胀率为0.055%,之后随龄期变化很小,已基本不再具备膨胀性.

表3 不同养护龄期下水泥改性邯郸强膨胀土的无荷膨胀率

Tab.3 Non-load swelling ratio of cement-treated Handan highly expansive soil at different curing time

龄期	无荷膨胀率/%	
	素土	水泥改性土
0 h	5.345	2.470
1 h		1.351
4 h		0.195
24 h		0.100
7 d		0.055
28 d		0.055
90 d		0.003
180 d		0.001

### 3 邯郸强膨胀土水泥改性前后矿物成分分析

为研究膨胀土水泥改性前后矿物成分的变化,进行了XRD分析,图1给出了强膨胀土素土和掺加水泥后的改性土在不同龄期的XRD图谱.

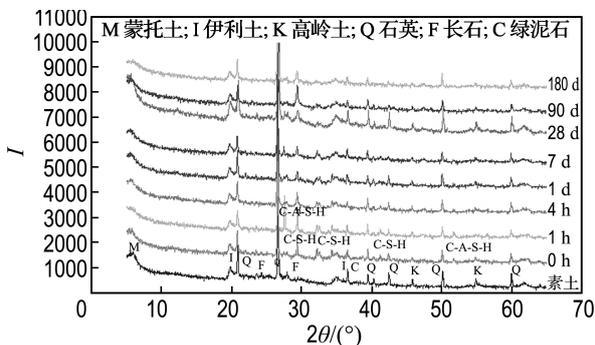


图1 强膨胀土素土及其水泥改性土的XRD图谱

Fig.1 XRD diagram of highly expansive soil and cement-treated soil

由图1可知,强膨胀土原样的XRD分析结果表明主要的黏土矿物是蒙脱土、高岭土、伊利土、石英、长石和绿泥石;次要的黏土矿物是辉石和钙铁榴石<sup>[12]</sup>.掺加水泥处理以后,在不同的养护时间取样,参考相关文献中的分析方法<sup>[13-16]</sup>进行XRD分析.在混合水泥马上击实后,有新的硅酸钙水化物(C-S-H)峰出现,峰值出现的 $2\theta$ 角分别为 $29.36^\circ$ 、 $32.18^\circ$ 、 $32.52^\circ$ 、 $41.23^\circ$ 、 $47.60^\circ$ 、 $56.52^\circ$ ,以及新的铝酸钙水化物(C-A-S-H)峰出现,峰值出现的 $2\theta$ 角分别为 $50.70^\circ$ 、 $51.72^\circ$ .随着养护时间的增加,水化反应的进行,C-A-S-H和C-S-H在黏土中的含量逐渐增加,X射线衍射强度增强,黏土矿物的衍射强度降低.

### 4 强膨胀土和水泥改性土的SEM分析

膨胀土基本物理力学性质的改变本质上是其内部微观结构变化的反映,是由各种复杂的物理化学作用所致.本文采用扫描电镜对膨胀土水泥改性前后的微观形貌进行了试验研究,分析了其内部微观结构的变化.由于水泥改性膨胀土是一个长期作用的过程,本文选择一个较长的养护时间周期(180 d),并对同一个试样在不同养护龄期取样,进行了相关的试验工作,试验结果较好地反映了水泥改性土的微观结构随龄期的变化情况.强膨胀土素土和水泥改性土在不同养护龄期的SEM图如图2~5所示.

图2是邯郸强膨胀土水泥改性前的SEM图像.从图中可以看出邯郸强膨胀土具有较薄的片状的内部结构,具有较大的表面积,颗粒非常分散.这与典型的膨胀性黏土矿物蒙托土的内部微观结构是一致的,也说明了邯郸强膨胀土中含有大量的蒙脱土矿物.图3是掺加水泥后立刻击实的SEM图像(从掺加水泥到取样少于30 min).可以看出,在混合水泥击实之后黏土的微观结构形貌已经有了很大的变化.那些薄的片状的结构受到破坏,几乎已经消失了,可以看到相对比较厚的黏土颗粒,水泥水化后生成了一些团簇状的颗粒,一些细小颗粒附着在黏土颗粒表面(可能是未水化的水泥),这表明水泥对黏土颗粒具有非常大的侵蚀作用.这个侵蚀作用是由于水泥水化,

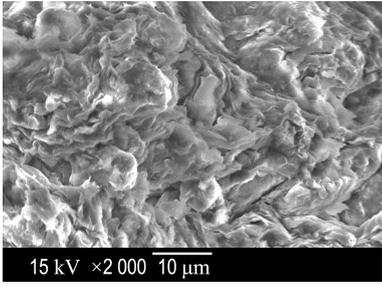


图 2 在最优含水量下击实的邯郸强膨胀土的 SEM 图像

Fig. 2 SEM image of Handan highly expansive soil compacted at the optimal water content

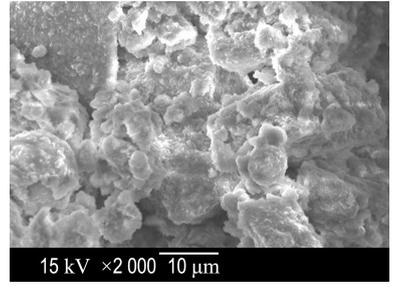
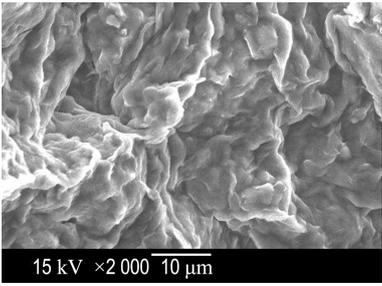
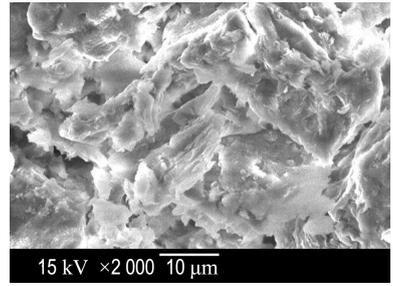


图 3 邯郸强膨胀土掺加水泥击实后立即采样的 SEM 图像

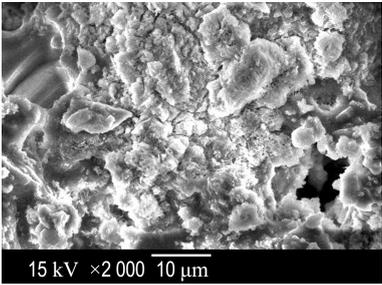
Fig. 3 SEM image of compacted Handan highly expansive soil immediately adding cement



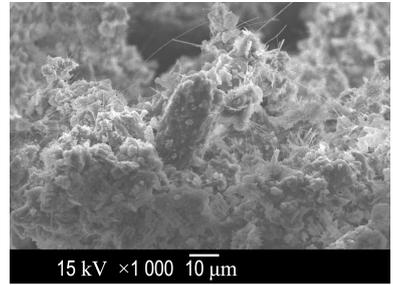
(a) 养护 7 d



(b) 养护 28 d



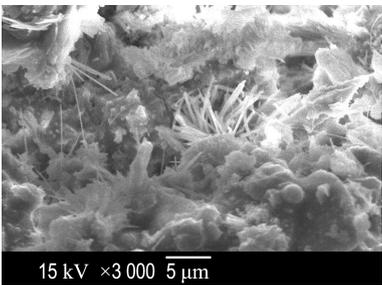
(c) 养护 90 d



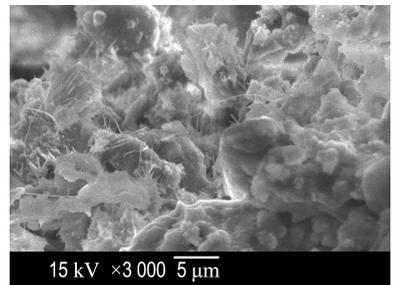
(d) 养护 180 d

图 4 水泥改性邯郸强膨胀土的 SEM 图像

Fig. 4 SEM images of cement-treated Handan highly expansive soil



(a)



(b)

图 5 养护 180 d 后水泥改性邯郸强膨胀土的局部放大 SEM 图像

Fig. 5 Magnified local SEM images of cement-treated Handan highly expansive soil after 180 d curing time

产生大量的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{OH}^-$ , 提供了一个具有较高 pH 的环境, 从而破坏了黏土中的硅酸盐类矿物, 继而破坏了黏土的微观形貌. 水泥水化产生的  $\text{SiO}_3^{2-}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  相结合生成了 C-S-H 产物, 另外水泥水化产生的  $\text{Ca}^{2+}$  和黏土中硅酸盐类矿物溶解产生的  $\text{SiO}_3^{2-}$  相结合也生成了 C-S-H 产物. 这类产物就是在图 3 中所观察到的团簇状的颗粒. 较高的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度和 pH 环境也导致黏土颗粒凝聚、成团、结块. 在养护 7 d 之后, 如图 4(a) 所示, 形成了凝胶性的物质包覆在黏土矿物的表面, 并把分散的黏土矿物粘结起来, 形成一种像固态胶体的结构形式, 原来的黏土矿物结构已经不可见. 这种水化膜状产物在有关研究者对水泥水化过程的研究中也被观察到<sup>[17-18]</sup>. 在养护 28 d 后, 如图 4(b) 所示, 可以看到仍然有受到水泥初步侵蚀作用的黏土矿物存在, 颗粒相互粘结在一起, 尺寸较大, 出现凝聚现象. 在养护 90 d 后, 如图 4(c) 所示, 可以看到在片状结构周围有较密集的针状结构产生, 这是硅酸钙水化凝胶的一种晶体形式. 水泥水化产物的形貌与熟料的活性, 水化时溶液中离子的过饱和度对晶体成核和水化龄期的影响很大, 所以其形貌也较复杂, 有纤维状、粗短的针棒状、不规则团簇颗粒状、网络状、薄片状及放射状等<sup>[19]</sup>. 在水泥掺加到强膨胀土的养护后期观察到了这些产物的形貌. 在养护 180 d 后, 从图 4(d) 中, 很明显地能够观察到细长纤维状、不规则颗粒状及放射状的 C-S-H 凝胶晶体, 说明在养护龄期 180 d 后已有大量的 C-S-H 生成, 并且具有一定的结晶形式. 图 5 是水泥改性邯郸膨胀土在养护龄期 180 d 时局部放大的 SEM 图像. 从图中可以看出, 有清晰纤维状和薄片状的水化 C-S-H 凝胶晶体, 也有片状结构的 C-A-S-H 晶体. 也可以看到有凝胶状的无定形物质, 说明水泥水化是一个长时期进行的过程.

以上说明强膨胀土在掺加水泥后, 随着龄期的变化, 其黏土外层原来的结构被逐渐摧毁了. 水泥水化反应产生的 C-S-H 和 C-A-S-H 凝胶初期先附着在颗粒表面, 具有较强的胶结力, 随着反应产物增多, 凝胶固态化, 包覆黏土颗粒并且把黏土颗粒粘结在一起, 这样提高了水泥改性强膨胀土

的初期强度并抑制了膨胀; 接着在经过水泥水化的加速期和衰减期后, 有较多的晶体形式的水泥水化产物生成. 这一阶段, 晶体长大, 填充了黏土中的孔隙, 使土体变得更加致密, 水泥改性强膨胀土的强度进一步提高. 而且本研究表明水泥掺加到膨胀土中后, 水泥水化是一个长期的过程. 水泥自身的水化是一个较快的过程, 但是水泥水化后生成的  $\text{Ca}^{2+}$  和黏土中溶解的硅酸盐所进行的水化反应是一个长期的过程, 因为黏土颗粒被初始反应产物包裹, 游离的  $\text{Ca}^{2+}$  只有通过扩散等作用才能和黏土中溶解的硅酸盐进行结合. 早期的研究文献中也已经提及到这一点<sup>[20]</sup>.

## 5 强膨胀土水泥改性前后的阳离子交换量测定试验

由于膨胀土含有较多的强亲水性黏土矿物, 其改性的关键在于改变土中黏土矿物的亲水性, 即通过离子交换作用, 打破作用于膨胀土颗粒表面的吸附水静电力, 吸附水变成自由水, 膨胀土颗粒与水分子结合力减弱, 从而容易被排出, 这样就从根本上改变了膨胀土湿胀干缩的特性. 离子交换的主要来源在于存在大量的同构置换作用, 即阳离子取代了黏土矿物结构中的 Si 和 Al, 黏土颗粒表面具有负电性, 为了平衡负电性, 吸附有大量的阳离子. 对于具有恒定表面电荷的情况, 电解液浓度的增加减小了黏土颗粒表面势能和表面势能的衰减, 这也是黏土膨胀势降低的一个原因. 孔隙溶液中能够抑制双电子层或者减少颗粒表面离子吸附水能力的任何变化都能减少膨胀和膨胀压力<sup>[12]</sup>.

另外, 黏土的膨胀性能与阳离子交换能力 (CEC) 密切相关. 膨胀量随 CEC 的增加而增加<sup>[21]</sup>. Al-Rawas 等也报道了阳离子是控制土的膨胀特性的主要因素<sup>[22]</sup>. 不同黏土矿物间一个最基本的区别是在黏土矿物表面存在的可交换阳离子和这些阳离子所中和的黏土矿物晶格中多余的负电荷. 离子交换性能是研究黏土性质的一个重要方面. 在给定温度、压力、土壤溶液成分和土壤溶液质量比的条件下, 阳离子交换能力指在单位质量土壤中释放阳离子化合价的总物质的量<sup>[23]</sup>.

土壤中随时可交换的阳离子仅是单价或二价的阳离子,然而  $\text{Na}^+$  也可以被三价阳离子置换出来. 阳离子的交换或替换取决于许多因素,其中化合价是最重要的影响因素. 带有较高价电荷的阳离子能容易地取代带有低价电荷的阳离子. 化合价相近的阳离子的置换能力为  $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{H}^+ < \text{K}^+ < \text{NH}_4^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Al}^{3+}$ .

对于强膨胀土,为了研究掺加水泥改性前后阳离子交换量的变化,以邯郸强膨胀土为例进行了一系列的化学分析,依据土工试验规程(SL 237-068—1999),对邯郸强膨胀土水泥改性前后的试样进行了不同阳离子交换量的测定分析. 当试样达到一定的养护龄期时,从养护的试样中取代表性的土样,风干、碾碎,并过 0.15 mm 筛,然后取 2 g 左右土样放入离心管中,加入 80 mL 氯化钡缓冲液,摇晃后放置过夜,对试样进行离心萃取,并弃去上部清液,加纯水 80 mL,再次进行离心萃取,弃去离心液,然后加入 40 mL 0.025 mol/L 硫酸镁溶液离心,滴定测定阳离子交换量. 图 6 总结了邯郸强膨胀土原样和水泥改性邯郸强膨胀土在不同龄期阳离子交换总量的变化.

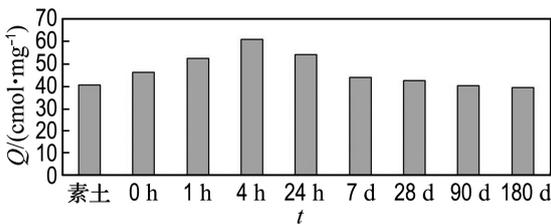


图 6 水泥改性邯郸强膨胀土阳离子交换总量随龄期的变化

Fig. 6 Cation exchange capacity of cement-treated Handan highly expansive soil at different curing time

由图 6 可知,邯郸强膨胀土素土阳离子交换总量为 40.5 cmol/mg,在刚掺加水泥时为 46.3 cmol/mg,4 h 后增加到 61.2 cmol/mg,之后到 1 d 龄期时下降至 54.3 cmol/mg,说明水泥水解主要发生在 4 h 内,释放出大量的  $\text{Ca}^{2+}$ ,阳离子含量增加,之后到 1 d 期间水化速率慢慢降低. 初期的阳离子交换量的增加主要是由水泥的水解造成的,这个增加并不意味着膨胀势的增加;后期阳

离子交换量的减少主要是由硅酸钙和铝酸钙凝胶的生成以及水泥水化产物的硬化等导致土中可交换阳离子和游离状态的  $\text{Ca}^{2+}$  含量减少造成的. 因此采用阳离子交换量来评价水泥改性膨胀土膨胀性能的变化从本文的试验结果来看是不可行的.

## 6 结 论

(1)强膨胀土掺加水泥后,自由膨胀率降低,随着养护龄期的增加,自由膨胀率逐渐降低最后趋于稳定,膨胀性明显减弱;强膨胀土掺水泥后,一维无荷膨胀率在 24 h 后降至 0.1%,之后随龄期变化很小,已基本不再具备膨胀性.

(2)强膨胀土掺加水泥击实后立即测定的 XRD 图谱中有代表 C-A-S-H 和 C-S-H 矿物的新的峰出现;随着龄期的增加,C-A-S-H 和 C-S-H 的 X-射线衍射强度增强,在黏土中的含量逐渐增加,而黏土矿物的衍射强度则降低,水泥改性强膨胀土的膨胀性降低.

(3)邯郸强膨胀土在掺加水泥改性处理后,微观结构形貌的变化最为显著. 初始黏土颗粒表层结构被破坏,然后水泥水化形成的凝胶物质(C-S-H 和 C-A-S-H 凝胶)包裹住黏土颗粒,并将分散的黏土颗粒连接起来,形成了水泥改性强膨胀土的初期强度. 随着龄期的增加,水泥的水化反应进一步深化,生成多种结晶形式的硬凝产物. 水泥水化产物形成的晶体填充了原来土体之间的孔隙,土体变得更加致密,强度进一步提高,这形成了强膨胀土掺加水泥改性的后期强度. 两种粘结在提高膨胀土的强度方面起着重要的作用:一种是水泥自身水化之间的较强的粘结作用,另一种则是水泥水化和黏土颗粒之间的粘结.

(4)强膨胀土掺加水泥后,阳离子交换总量在 4 h 时达到最大,之后开始随龄期增加而减少,说明水泥的水解反应在 4 h 进行得最快,大部分完成. 随龄期增加会形成固态的水化硅酸钙、铝酸钙凝胶,因而导致阳离子交换总量的减少. 阳离子交换总量不能用来评价水泥改性后膨胀土的膨胀性能.

## 参 考 文 献:

[1] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京:中

- 国建筑工业出版社, 1997.
- LIU Te-hong. **Expansive Soil Problem in Engineering Practice** [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese)
- [2] Petry T M, Little D N. Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures—history, practice, and future [J]. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2002, **14**(6):447-460.
- [3] 边加敏, 蒋玲, 王保田. 石灰改良膨胀土强度试验 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, **33**(2):38-43.  
BIAN Jia-min, JIANG Ling, WANG Bao-tian. Experimental study on the strength of lime modified expansive soil [J]. **Journal of Chang'an University: Natural Science Edition**, 2013, **33**(2):38-43. (in Chinese)
- [4] 黄斌, 聂琼, 徐言勇, 等. 膨胀土水泥改性试验研究 [J]. 长江科学院院报, 2009, **26**(11):27-30.  
HUANG Bin, NIE Qiong, XU Yan-yong, *et al.* Experimental study on cement modified expansive soil [J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2009, **26**(11):27-30. (in Chinese)
- [5] 畅军. 水泥改性膨胀土干密度与自由膨胀率试验研究 [J]. 交通标准化, 2011(1):62-65.  
CHANG Jun. Experimental study on dry density and free swelling ratio of cement modified expansive soil [J]. **Communications Standardization**, 2011(1):62-65. (in Chinese)
- [6] 张巨松, 李宗阳, 张娜, 等. 水泥基灌浆料工作性的实验 [J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2013, **29**(6):1072-1077.  
ZHANG Ju-song, LI Zong-yang, ZHANG Na, *et al.* The evaluation of capability of highway subgrade along rivers against water damage based on experimental study on workability of cement-based grouting material [J]. **Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science**, 2013, **29**(6):1072-1077. (in Chinese)
- [7] Mitchell J K. Soil improvement — State of the art report [C] // **Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 4**. The Netherlands: Balkema, 1981:509-565.
- [8] Prusinski J, Bhattacharja S. Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils [J]. **Transportation Research Record**, 1999, **1652**:215-227.
- [9] Peethamparan S, Olek J, Diamond S. Mechanism of stabilization of Na-montmorillonite clay with cement kiln dust [J]. **Cement and Concrete Research**, 2009, **39**:580-589.
- [10] Horpibulsuk S, Rachan R, Suddeepong A. Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay [J]. **Construction and Building Materials**, 2011, **25**(4):1521-1531.
- [11] Lemaire K, Deneele D, Bonnet S, *et al.* Effects of lime and cement treatment on the physiochemical, microstructural and mechanical characteristics of a plastic silt [J]. **Engineering Geology**, 2013, **166**:255-261.
- [12] Mitchell J K, Soga K. **Fundamentals of Soil Behavior** [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [13] International Centre for Diffraction Data. ICDD overview [EB/OL]. [2013-08-14]. <http://www.icdd.com>.
- [14] 曲永新, 张永双, 冯玉勇, 等. 中国膨胀土黏土矿物组成的定量研究 [J]. 工程地质学报, 2002, **10**(增刊):417-422.  
QU Yong-xin, ZHANG Yong-shuang, FENG Yu-yong, *et al.* Quantitative study on the clay mineral composition of expansive soils in China [J]. **Journal of Engineering Geology**, 2002, **10**(Suppl.):417-422. (in Chinese)
- [15] 戴绍斌, 黄俊, 夏林. 鄂北膨胀土的矿物组成和化学成分分析 [J]. 岩土力学, 2005, **26**(S1):296-299.  
DAI Shao-bin, HUANG Jun, XIA Lin. Analysis of mineral composition and chemical components of expansive soil in North Hubei [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, **26**(S1):296-299. (in Chinese)
- [16] 石油勘探开发科学研究院实验中心. SY/T 5163—1995 沉积岩黏土矿物相对含量 X 射线衍射分析方法 [S]. 北京: 中国石油天然气总公司, 1995.  
Experiment Center of Petroleum Exploration and Development Research Institute. SY/T 5163-1995 X Ray Diffraction Analysis Method on the Relative Content of Clay Minerals in Sedimentary Rock [S]. Beijing: China National Petroleum Corporation,

1995. (in Chinese)
- [17] Sujata K, Jennings H M. Formation of a protective layer during the hydration of cement [J]. **Journal of the American Ceramic Society**, 1992, **75**(6):1669-1673.
- [18] Meredith P, Donald A M, Luke K. Pre-induction and induction hydration of tricalcium silicate: an environmental scanning electron microscopy study [J]. **Journal of Materials Science**, 1995, **30**(8):1921-1930.
- [19] 沈 威, 黄文熙, 闵盘荣. 水泥工艺学[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1991.  
SHEN Qi, HUANG Wen-xi, MIN Pan-rong. **Cement Technology** [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 1991. (in Chinese)
- [20] Stocker P T. Diffusion and diffuse cementation in lime and cement stabilized clayey soils-chemical aspects [J]. **Australian Road Research**, 1975, **5**(9):6-47.
- [21] Christidis G E. Physical and chemical properties of some bentonite deposits of Kimolos Island, Greece [J]. **Applied Clay Science**, 1998, **13**(2):79-98.
- [22] Al-Rawas A A, Guba I, McGown A. Geological and engineering characteristics of expansive soils and rocks in northern Oman [J]. **Engineering Geology**, 1998, **50**(3):267-281.
- [23] Sposito G. **The Chemistry of Soils** [M]. Oxford: Oxford University Press, 2008.

## Physical-chemical experimental investigation on cement-treated highly expansive soil

ZHAO Chun-ji<sup>1</sup>, ZHAO Hong-hua<sup>\*1</sup>, CHANG Yan<sup>1</sup>, GONG Bi-Wei<sup>2</sup>

( 1. Department of Engineering Mechanics, Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics & Engineering of MWR, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China )

**Abstract:** The expansive soil is a special type of clay with the engineering properties of swelling, disintegrating and softening when absorbing water and shrinkaging, desiccating and hardening when losing water. The engineering properties of expansive soil can be improved when treated with cement. The highly expansive soil in South-to-North Water Diversion Project was selected from Handan region, Hebei Province. A series of tests on the cement-treated Handan clay were carried out, mainly including the basic physical-chemical properties test, free swelling ratio test, mineralogy analysis and microstructure test by XRD, SEM test and cation exchange capacity test at different curing time over a long curing time. From different aspects, the variations of physical-chemical properties, mineralogy composite and microstructure were analyzed, and the mechanisms of cement treatment on highly expansive soil were discussed. Experimental results show that it is not reasonable to use cation exchange capacity to evaluate the swelling potential of cement-treated expansive soil. These results provide a scientific and valuable basis for design and construction of cement treatment on highly expansive soil.

**Key words:** highly expansive soil; cement treatment; free swelling ratio; one-dimensional non-load swelling ratio; XRD; SEM; cation exchange capacity