

文章编号: 1000-7598(2009)08-2286-05

离子土壤固化剂改性膨胀土的试验研究

刘清秉¹, 项伟¹, 张伟锋^{1,2}, 崔德山¹

(1. 中国地质大学 工程学院, 武汉 430074; 2. 河南省水利科学研究院, 郑州 450003)

摘要: 利用离子土壤固化剂(ionic soil stabilizer, 简称 ISS)对河南安阳地区膨胀土进行化学改性试验研究, 通过不同配比的自由膨胀率试验结果, 结合施工成本, 得出 ISS 溶液改良膨胀土的最优配合比为 1:350。对 ISS 溶液最优配合比改性后土体进行收缩试验、膨胀性试验、固结快剪、高压固结及水浸泡试验。试验结果表明, 改性土线缩率减小, 膨胀性指标降低, 抗剪强度增大, 土体由亲水性变成憎水性, 且能达到较好的水稳定性, 即膨胀土经化学改性为非膨胀土。ISS 改性膨胀土的机制可解释为, 通过 ISS 溶液与土粒离子进行强烈的交换作用, 打开土粒与水分子之间的“电化键”, 降低土颗粒表面吸附水膜厚度, 包裹在黏粒颗粒表面的疏水基团覆盖膜使土对水的敏感性减弱, 从根本上减少了土体吸水性和膨胀性。

关键词: 离子土壤固化剂; 膨胀土; 试验研究; 改性机制

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Experimental study of ionic soil stabilizer-improves expansive soil

LIU Qing-bing¹, XIANG Wei¹, ZHANG Wei-feng^{1,2}, CUI De-shan¹

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Henan Hydraulic Research Institute, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The chemical improving expansive soil of Anyang in Henan province by experiment with ionic soil stabilizer is studied. Through free swelling ratio test results combined with construction cost, the optimal ratio of ISS solution is identified as 1:350. The soil test was carried out after the soil is chemical treated in optimal ratio of ISS solution. The soil tests include the shrinkage test, swelling index tests, consolidated quick shear test, high-pressure consolidation test and water immersion test. The soil test results show that the linear shrinkage ratio and swelling index decrease, shear strength increase; and the improved soil has been changed from hydrophilicity to hydrophobicity and has good water stability; videlicet, the expansive soil become non-expansive after chemical treatment. It appears that the mechanism of action of ionic soil stabilizer on expansive clay can be explained through cation exchange with the surface and interlayer cations. This reduces the density of the electrical charge around the clay particles which leads to them being attracted closer to each other to form flocs; it is an irreversible process which leads to reduction of expansion and modification of the engineering properties of the expansive soil.

Key words: ISS (ionic soil stabilizer); expansive soil; mechanism of improvement; experimental study

1 引言

我国属膨胀土分布较广的国家之一。膨胀土主要分布在四川、湖北、陕西、云南, 以残积或残坡积成因为主。膨胀土含有较多黏土矿物, 亲水性较强的黏土矿物对水的敏感性, 使膨胀土具有吸水膨胀、失水收缩-再吸水-再膨胀这种反复胀缩的特性, 并且在吸水膨胀后强度下降幅度较大, 对工程构成很大的危害^[1]。

膨胀土的化学改良是膨胀土工程地基处理研究领域中的重要课题之一, 它涉及到化学、岩土力学

及工程力学等多种专业和学科。开展这方面的研究, 对于治理膨胀土基础工程, 从根本上解决膨胀土危害具有重要的理论价值和较好的工程应用前景^[2]。

ISS 是美国研发的一种电离子土壤固化剂。它与土混合压实后, 通过电化原理改变黏土颗粒双电层结构, 能永久地将土壤的亲水性变为疏水性, 同时使土易于压实, 形成强度较高、结构稳定的整体板块^[3]。膨胀土是一种特殊的黏性土, 根据 ISS 对黏性土的作用机制, 笔者尝试使用 ISS 对膨胀土进行化学改良, 并对改良后的土进行了有关物理力学性质试验。通过试验发现, ISS 可显著降低膨胀土

收稿日期: 2008-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 406721188); 河南省水利厅科技攻关项目 (No. GG0721)。

第一作者简介: 刘清秉, 男, 1984 年生, 博士研究生, 主要从事岩土体的工程性质方面的研究工作。E-mail: liuqingbing_1357@163.com

胀缩能力，提高土体的压缩性能和强度。

2 试验材料

2.1 试验用土

试验采用的膨胀土为弱膨胀土。取自南水北调

工程河南安阳段 3 标段，桩号为 K12+000~K15+000 区间，土样呈灰白色，硬塑，含较多结核物，裂隙发育，有滑感。原状土取样深度为 2~3 m，粒度成分见表 1，基本物理力学指标见表 2，膨胀性试验指标见表 3。

表 1 膨胀土的基本性质

Table 1 Basic property of expansive soil

天然含水率 /%	风干含水率 /%	密度 (g/cm ³)	相对 密度	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	液性 指数	击实试验		固结快剪(最优含水率)		收缩(最优含水率)		
								最大干密度 (g/cm ³)	最优含水率 /%	黏聚力 /kPa	内摩擦角 (°)	体缩 /%	缩限 /%	收缩 系数
11.6	4.29	2.02	2.76	42.92	14.12	28.80	-0.09	1.84	15.04	25.88	25.42	7.9	9.82	0.59

表 2 膨土的粒度成分

Table 2 Gradation of expansive soil

粒径/mm	<10	<5	<2	<1	<0.5	<0.25	<0.075	<0.05	<0.01	<0.005	<0.002
粒度组成/%	100.00	99.98	96.30	93.02	89.72	88.02	85.31	79.91	71.42	52.36	19.35

表 3 膨胀土膨胀性指标

Table 3 Expansive ratio of soil

自由膨胀率 /%	无荷膨胀率 /%	有荷膨胀率/%			膨胀力 /kPa
		12.5 kPa	25 kPa	50 kPa	
56	1.1	-0.27	-0.87	-1.27	16.19

2.2 固化材料

固路宝 ISS-2 500 具黏滞性，呈棕色黑色液体。分子量为 $(5\sim 20)\times 10^4$ ，阳离子交换容量为 $(5\sim 6)$ mg/(100g)，碳当量差为 $(50\sim 56)$ mg/(100g)。根据需要稀释成不同浓度的水溶液，最小稀释比为 1:500。根据土类不同而不同，一般掺加 ISS 量为 $1.00\sim 3.00$ L/m³。

3 ISS 改性膨胀土的试验研究

3.1 ISS 改性土的配合比设计

在路基工程中，ISS 加固土的配合比设计是以无侧限抗压强度为评价指标来进行的。笔者认为，对于膨胀土而言，最本质特性是其胀缩变形突出。因此，改变膨胀土中黏粒成分的亲水性，削弱其膨胀潜势，消除其胀缩能力，从而最大限度地克服由于胀缩变形给工程建设带来的破坏，才是有重要意义的，自由膨胀率是反映土的膨胀特性的最直接量度指标之一。另外，考虑到施工成本，这里使用自由膨胀率指标，结合固化剂成本综合选定 ISS 溶液的最优配比。将取回的土样风干碾细过 0.5 mm 的筛，将筛下土样拌和均匀后，按照每 30 g 土掺加 3 mL 的 ISS 稀释水溶液，稀释溶液配比浓度分别为 1:50~1:500，让土样与 ISS 溶液充分作用，放置 24 h 后将土在 105 ℃温度下烘干，分别取每种配比

作用后的 10 mL 土样进行自由膨胀率试验，计算自由膨胀率大小，试验结果见表 4。由试验结果可知，在高配比（1:50）和低配比（1:450、1:500）下，土体改性效果都不太理想，而其他配比段的膨胀土自由膨胀率都有显著降低，最低控制在 18 % 左右，即土体由弱膨胀性土改变为非膨胀土。ISS 溶于水后离解出带正电荷的 $[X]^{n+}$ 阳离子和带负电荷的阴离子 $[Y]^{n-}$ ，阳离子与土壤胶体表面的阳离子 $[M]^{n+}$ 产生交换作用，将这些原本吸附在土壤颗粒表面、亲水性极高的阳离子赶走，同时随着 ISS 水溶液不断扩散渗透，逐步置换黏土矿物晶格外边缘和晶层间水化交换阳离子，降低吸附水膜厚度，改变土体的亲水性和膨胀性。当 ISS 溶液配比过高时，迅速离解出的大量阳离子中的一小部分在与土壤颗粒表面亲水性阳离子进行的交换作用后，尚有大部分覆盖包裹着黏土颗粒表面，使晶层间水化阳离子的交换反应难以进行；而当 ISS 浓度过低时，离解的 $[X]^{n+}$ 阳离子量不足，使得与土体中活性阳离子化学交换反应不够彻底；ISS 溶液处于中间配比段时，离解的 $[X]^{n+}$ 阳离子量浓度适中，能较彻底地与颗粒表面及矿物层间水合阳离进行交换，从而出现了表 4 所示高、低配比时自由膨胀率变化不大的情况；其他配比段的自由膨胀率变化明显，数据较接近。因此，控制好加入 ISS 的剂量和配比度，是膨胀土成功改性的重要因素之一。图 1 为固化剂的成本价格与土体的改性效果随 ISS 的配比变化的综合曲线图，在改性效果优和施工成本低的原则下，即取图 1 中两条曲线间纵轴方向间距最大处所对应的配比浓度，综合选定 ISS 改性土的最优配合比为 1:350。

表 4 不同配比下膨胀土的自由膨胀率
Table 4 Free swelling ratios of expansive soil in different matches

配比 (ISS:水)	改性土自由膨胀率 /%	自由膨胀率降低值 /%
0	56	0
1:50	30	26
1:100	19	37
1:150	21	35
1:200	22	34
1:250	20	36
1:300	21	35
1:350	18	38
1:400	23	33
1:450	28	28
1:500	44	22

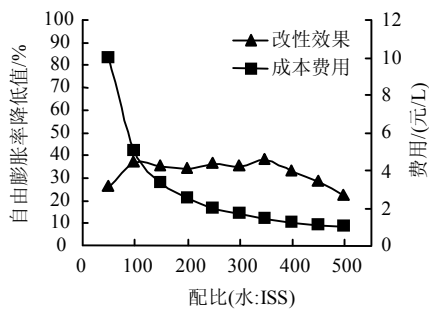


图 1 成本与改性效果随配比变化关系综合曲线
Fig.1 The integrated curves of the cost and improvement result

3.2 加入 ISS 对土的胀缩性指标的影响

3.2.1 加入 ISS 前后收缩试验

按照表 3 确定的最优配合比,取 ISS 兑水稀释之 1:350,并根据击实试验确定的最优含水率(15.04%),均匀洒入土中,充分搅拌,密闭 24 h 后取出,将含水率调至液限状态制成环刀样进行收缩试验,并计算试样的线缩率、体缩、收缩指数和缩限。试验结果见表 5。由表可以看出,加入 ISS 后土的线缩率明显减小,缩限变化并不明显。土的线缩率明显减小,说明了吸附在土颗粒表面的部分弱结合水已经被置换掉,土颗粒之间的联接力加强,土体收缩变形能力变小。

表 5 膨胀土的收缩试验
Table 5 Shrinkage test of expansive soil

配比 (ISS:水)	收缩	
	线缩率 /%	缩限 /%
0	2.32	9.82
1:350	1.19	8.16

3.2.2 加入 ISS 前后膨胀性试验

按照收缩试验备样过程,使膨胀土与 ISS 充分作用,密闭 24 h 后取出,保持最优含水率状态下按

照轻型实击标准制件,在固结仪上分别以 12.5、25、50 kPa 的上覆压力进行有荷膨胀率测试及无荷膨胀率测试。膨胀力试验采用加荷平衡法在单向固结仪上测定试样,在吸水膨胀但体积不变时,由于膨胀产生最大内应力。为了准确地反映 ISS 对土体膨胀性指标的影响作用,制样和试验过程中要严格控制其他能够导致对试验结果产生重要影响的因素,如应使试样的含水率、干密度保持一致。本次试验中,都控制在最优含水率和最大干密度状态。加入 ISS 前后膨胀性试验结果见表 6。

表 6 膨胀土的膨胀性试验
Table 6 Expansive test of expansive soil

配比 (ISS:水)	无荷膨胀率/%	有荷膨胀率/%			膨胀力 /kPa
		12.5 kPa	25 kPa	50 kPa	
0	4.42	0.43	0.26	0.15	37.85
1:350	1.58	0.12	0	0	17.5

由结果可见,与 ISS 作用后的膨胀土各项膨胀性指标均显著降低。当上覆压力为 25 kPa 和 50 kPa 时,土体吸水已经不再发生膨胀变形。这里需要指出的是,比较表 6 和表 3 的结果,发现在同样未加入 ISS 条件下,重塑压实土的膨胀势比原状土要大得多。分析原因,可以解释为:原状土体坚硬,含致密胶结、类岩石的块体,各向异性明显,很大程度上影响土体吸水膨胀。在有荷膨胀率试验中,水分更是透过裂隙,使试样崩解塌陷,导致膨胀率指标为负,而经过扰动重塑压实后的土样,成分均匀,克服了原状土中致密胶结物导致的吸水通道被阻,较充分地发挥了土中亲水性矿物的吸水膨胀能力。所以,直接用膨胀土填筑路基时,应对其较大的膨胀潜势给予特别注意。

3.3 加入 ISS 对膨胀土的剪切强度的影响

膨胀土强度变化要比一般黏土复杂,不仅取决于结构、吸力等因素的变化,还依赖于膨胀土所处的状态。作为一类典型的非饱和土,其强度特性与含水率密切相关^[4-8]。为着重了解 ISS 对膨胀土的抗剪强度的影响,试验采用的试样均控制在最优含水率和最大干密度状态的重塑土样,这样便消除了由于压实度,含水状态等给抗剪强度值带来的影响。本试验采用固结快剪法,即土样均在最优含水率状态下装入剪切盒,在垂直压力作用下试样完全排水固结稳定后,快速施加水平剪力。共进行 2 组试验,即 1 组未加 ISS 土和 1 组 ISS 作用土,每组 4 个重塑土样,分别在 100、200、300、400 kPa 的垂直压力下进行剪切,剪切试验成果见表 7,试验强度曲线如图 2 所示。

表 7 膨胀土剪切试验成果
Table 7 Shear test of the expansive soil

土样名称	黏聚力 /kPa	内摩擦角/(°)
未改性土	25.88	25.42
改性土 (1:350)	45.28	27.38

由表 7 可知, ISS 加固作用后的膨胀土黏聚力明显增大, 内摩擦角也有所增加。加入 ISS 后, 吸附在土颗粒表面的结合水已经被置换掉, 从而使土颗粒的扩散层的厚度减小, 使得土颗粒距离拉近, 并使其密度增大, 加强了土体颗粒之间的胶结物质的胶结作用, 从而增大了土体的黏聚力。对于膨胀土来说, 土颗粒之间的相互移动和咬合作用, 颗粒接触点处, 由于物理化学作用而产生的吸引力, 对土的摩擦强度和摩擦角取值起主要作用。这里, 经过 ISS 加固的土体内因结合水层变薄, 一定程度上增强了颗粒表面物理化学作用而产生的吸引力, 并未显著提高颗粒之间咬合作用力, 故其摩擦角值增大并不明显。

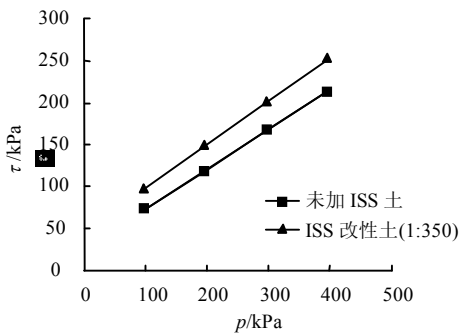


图 2 ISS 对抗剪强度影响试验曲线
Fig.2 Shear strength test curve with ISS influence

表 9 试验前后土体水理特性变化情况
Table 9 Changes on the hydrated properties of the soil

未改性土		改性土	
初始情况	最终状况	初始情况	最终状况
试块浸水后出现大量气泡上浮, 30 min 出现裂缝并逐渐扩大, 1 h 后开始慢慢向下掉土屑	12 h 后掉土屑量约为 60 %, 24 h 塌落量近 90 %	试块浸水后 1 h 内无任何变化, 随后出现极微量气泡	在 72 h 无崩解的情况下继续观察, 7 d 无崩解, 无溶裂, 无变形, 整体形状保持完好

4 ISS 改性土的机制分析

膨胀土吸水膨胀、失水收缩的基本原因在于土粒与水的相互作用, 土粒中的黏土矿物晶格扩张和土中结合水膜厚度的变化而引起土粒间距离的扩张和缩小, 从而引起土体积的增大或缩小。双电层理论认为, 在土颗粒的接触面上, 特别当土与水相互作用时在胶体颗粒表面上, 由于晶格置换可形成双电层。在双电层中的粒子对水分子具有吸附能力, 在黏土矿物颗粒周围, 形成表面水化膜。由于结合水膜加厚将固体颗粒“楔”开, 使固体颗粒之间的距

3.4 加入 ISS 对土压缩能力的影响

分别取未加固剂土样和固化土进行高压固结对比试验, 试验时施加 1 kPa 预压力使试样与仪器上下各部件之间接触。第 1 级压力的大小应视土的软硬程度而定, 由于试验土样含水率在最优含水率状态下, 土质较硬, 故第 1 级压力施加 50 kPa, 最后一级压力为 3 200 kPa, 每级荷载后施加 24 h 测定试样高度, 并作为稳定标准。试验过程中, 用湿棉纱围住加压板周围, 避免水分蒸发。

试验完成后, 计算每组试验的初始孔隙比 e_0 , 各级压力下变形稳定后的孔隙比 e_i 、压缩系数 a_v 、压缩模量 E_s 。根据《建筑地基基础设计规范》中规定^[9], 以 $P_1=0.1$ MPa、 $P_2=0.2$ MPa 时对应的压缩系数 a_{1-2} 作为判断土的压缩性的标准, 试验结果见表 8。由表可知, 经过 ISS 作用后, 膨胀土压缩系数变小, 压缩模量增大, 土体压缩性能显著提高, 进一步证明, ISS 处理后黏粒表面结合水膜厚度减小, 颗粒相互靠拢, 土体更加密实。

表 8 膨胀土的固结试验
Table 8 Consolidation tests of the expansive soil

试样名称	压缩系数/MPa ⁻¹	压缩模量/MPa
未改性土	0.165	8.98
改性土 (1:350)	0.126	11.73

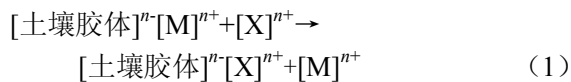
3.5 加入 ISS 对土水稳定性影响

分别取改性前后重塑土样浸水观察土体的变化, 表 9 为试验前后土体水理特性变化情况对比表。试验结果说明, 改性膨胀土能达到长期浸泡而无崩解的效果, 水稳性较好。

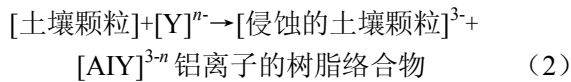
离增大, 从而导致土体积产生膨胀。当介质条件发生改变, 使土中结合水膜厚度变薄或消失时, 则颗粒间距离缩小, 从而使土体积收缩^[2]。另外, 蒙脱石类黏土矿物的晶格扩张也是导致土体膨胀重要原因。

ISS-电离子土强化剂是一种复合的化学配方, 其中含有活性成分的碘化油, 无毒、无腐蚀性、无污染。它是一种碘化油交换树脂, 也是一种电解质, 能溶于水, 在水中离解出带正电荷的阳离子 $[X]^{n+}$ 和带负电荷的阴离子 $[Y]^{n-}$, 阳离子与土壤胶体表面的阳离子 $[M]^{n+}$ 产生交换作用, 将这些原本吸附在土壤颗粒表面、亲水性极高的阳离子赶走, 代之以亲水

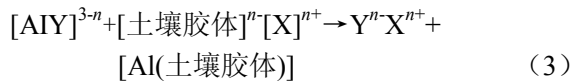
性较低、黏结力较强的铝离子及其水合物^[3, 10], 即



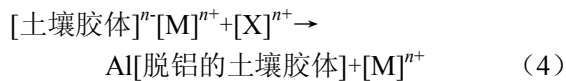
而离解出来的阴离子则与土壤中铝产生络合作用:



$[\text{AIY}]^{3-n}$ 再与 $[\text{土壤胶体}]^n[\text{X}]^{n+}$ 作用, 使树脂得以再生:



总反应式为



ISS 作用的结果是将吸附在土壤胶体表面的非常容易水合的阳离子赶走, 代之以水合度较低、黏结力较强的铝离子及其水合物, 即通过 ISS 溶液与土粒表面离子进行了强烈的交换作用后, 改善了土粒表面电荷性质, 打开了土粒与水分子之间的“电化键”, 从而释放出束缚在吸附层和扩散层的结合水, 降低了土壤颗粒表面的吸附水膜厚度, 从而导致 ζ 电势下降, 使土壤颗粒进一步靠近, 封闭各土团之间的孔隙, 土的塑性降低^[11]。交换后, 包裹在黏粒颗粒表面的疏水基团覆盖膜使土对水的敏感性减弱, 水分子很难再与膨胀土颗粒结合, 从根本上减少了吸水性和膨胀性。

ISS 是在水中电解出离子与土壤颗粒离子进行交换作用, 从而达到将土壤改性的目的, 它与其他胶合材料不同, 自身与土粒并不结合, 而且具有再生功能, 它与土壤作用时其总量并没有减少, 其功效并不会随着时间的推移而逐渐减弱; 相反, 只要土壤中有水分, 它的功效就会延续下去, 这种作用是永久的、不可逆的。

5 结 论

采用离子土固化剂进行膨胀土改良试验研究, 取得了较好的效果, 且得出以下结论:

(1) ISS 是一种离子交换剂, 通过离子交换将膨胀土由原来的亲水性改变成憎水性, 能使膨胀土改变属性。

(2) 加入 ISS 后, 能显著降低土体膨胀潜势。应控制加入 ISS 的剂量和配比度, 过高和过低的配比下改性效果都不理想, 根据自由膨胀率变化指标结合成本费用选定最优配合比为 1:350。

(3) 加入 ISS 后土的膨胀率和膨胀力明显减小, 说明土体水敏性降低, 吸水膨胀能力减弱; 线

缩率明显减小, 说明了吸附在土颗粒表面的结合水减少, 土颗粒扩散层厚度变薄, 土颗粒之间的联接力加强, 缩限变化不明显。

(4) ISS 改性土抗剪强度和抗压缩能力大幅度提高, 其工程性质得到很大程度改善。

(5) 改性膨胀土能达到较好的水稳性效果, 改性土能够长期浸泡, 不会出现崩解现象。

参 考 文 献

- [1] 郭爱国, 刘观仕, 孔令伟, 等. 高速公路建设中中膨胀土特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 397—403.
GUO Ai-guo, LIU Guan-shi, KONG Ling-wei, et al. Testing study on properties of mid-expansive soil for expressway construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(3): 397—403.
- [2] 惠会清, 雷胜友. 膨胀土膨胀机理及其改良(抑制)方法的研究综述[J]. 公路交通科技, 2005, 22(9): 90—102.
HUI Hui-qing, LEI Sheng-you. Summarizing on the swelling mechanism of expansive soil and the method of restraining the swelling of expansive soil[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2005, 22(9): 90—102.
- [3] 陈彦生, 董建军. 离子土壤强化剂(ISS)丛书之一: 离子土壤强化剂(ISS)施工指南[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1999.
- [4] 谭罗荣, 孔令伟. 膨胀土的强度特性研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1009—1013.
TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Study on strength behavior of expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(7): 1009—1013.
- [5] 缪林昌, 仲晓晨, 殷宗泽. 膨胀土的强度与含水量的关系[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 71—75.
MIAO Lin-chang, ZHONG Xiao-chen, YIN Zong-ze. The relationship between strength and water content of expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(2): 71—75.
- [6] KONG L W, TAN L R. Study on shear strength and swelling-shrinkage characteristic of compacted expansive soil [C]//Proceedings of First Asian Conference on Unsaturated Soils. Rotterdam: Balkema A A, 2000: 515—519.
- [7] 卢肇钧, 张惠明, 陈建华, 等. 非饱和土的抗剪强度与膨胀压力[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 1—8.
LU Zhao-jun, ZHANG Hui-ming, CHEN Jian-hua, et al. Shear strength and swelling pressure of unsaturated soils [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1992, 14(3): 1—8.
- [8] 卢肇钧, 吴有敬, 孙玉珍, 等. 膨胀力在非饱和土强度理论中的作用[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(5): 20—27.
LU Zhao-jun, WU Xiao-jing, SUN Yu-zhen, et al. The role of swelling pressure in the shear strength theory of unsaturated soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(5): 20—27.
- [9] 中国建筑科学研究院. GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [10] 吴志广, 张政权, 童克强, 等. 离子土壤强化剂(ISS)在防洪堤坝工程中应用(上、下册)[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 2000.
- [11] 江龙. 胶体化学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2002.