DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0098
徐海波,宋新江,王佩,等.水泥改性膨胀土强度与变形特性试验研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(4):172-177. XU H B,SONG X J,WANG P,et al. Experimental study on strength and deformation characteristics of cement-modified expansive soil [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2019,17(4):172-177. (in Chinese)

水泥改性膨胀土强度与变形特性试验研究

徐海波[1,2],宋新江[1],王 佩[2],徐 良[1]

(1.安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院,合肥 230000;2.安徽省建筑工程质量监督检测站,合肥 230000)

摘要:以驷马山中-弱膨胀土为研究对象,以水泥作为改性材料,通过室内常规三轴试验,研究水泥改性膨胀土的强度与变形特性。试验结果表明:掺入水泥后,能提高膨胀土的塑限,降低塑限指数和自由膨胀率;水泥改性膨胀土三轴应力-应变曲线存在弹性、非线性强化、应力软化等三个阶段,并随围压的增大,由软化型逐渐向硬化型发展;峰值强度、残余强度均随围压的增大而增大,试样为剪切破坏形态,剪切破坏角符合摩尔-库伦理论计算值。

关键词:膨胀土;水泥改性;强度;变形;力学特性

中图分类号:TU432 **文献标志码:**A **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

Experimental study on strength and deformation characteristics of cement-modified expansive soil

XU Haibo[1,2],SONG Xinjiang[1],WANG Pei[2],XU Liang[1]

(1. *Anhui & Huaihe River Institute of Hydraulic Research*, *Hefei* 230000, *China*;
2. *Anhui Supervision and Inspection Station of Construction Engineering Quality*, *Hefei* 230000, *China*)

Abstract: The conventional laboratory triaxial tests are carried out to study strength and deformation characteristics of cement-modified expansive soil by taking medium/weak expansive soil in Simashan as object of the study and cement as modified material. The results show that the plastic limit of expansive soil can be increased and the plastic limit index and free expansion rate can be reduced by cement modification. The triaxial stress-strain curve of cement-modified expansive soil presents three segments of elasticity, non-linear strengthening and stress softening. With the increase in confining pressure, the softening type gradually develops to hardening type. Both peak strength and residual strength increase with the increase in confining pressure. The specimens are in shear failure mode, and the shear failure angle conforms to the calculated value of Mohr-Coulomb theory.

Key words: expansive soil; cement modification; strength; deformation; mechanical properties

南水北调与水利科技(中英文)

膨胀土是一种特殊的黏性土,具有胀缩性、崩解性、多裂隙性、超固结性和强度衰减等特性,这些特性会造成膨胀土地区发生边坡坍塌或滑坡等危害[1-3]。膨胀土在我国分布广泛,对铁路、公路、建筑、基坑等工程的安全产生了较大影响,尤其对于渠道工程,由于雨水、河水长期的频繁作用,膨胀土边坡的治理更加困难。为此,工程中多采用掺入外加剂的方法对膨胀土进行改良,常用的改性剂主要有石灰、粉煤灰、水泥、矿渣、水玻璃等[4-5]。刘磊[6]、边加敏[7]、韩晶[8]等通过室内试验证实了石灰对膨胀土的自由膨胀率、抗剪强度、水稳定性以及裂缝的抑制等方面具有较好的效果,由于不同土质的差别,给

收稿日期:2019-01-17 **修回日期:**2019-04-12 **网络出版时间:**2019-04-22
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190419.1556.006.html
作者简介:徐海波(1981—),男,河南开封人,工程师,主要从事岩土工程地基处理及质量检测试验方面研究。E-mail:hbxu2006@163.com
通信作者:宋新江(1970—),男,安徽滁州人,教授级高级工程师,博士,主要从事岩土工程和水泥土工程特性试验方面研究。E-mail:sxj06@163.com

出的石灰掺入量存在差别。惠会清[9]、林友军[10]、冯美果[11]等学者对粉煤灰对膨胀土的作用机理、胀缩性以及力学性质等方面做了深入探讨。考虑到改性剂对水质和环境的影响，水利工程中常选用稳定性较好的水泥对土体进行改良；在水泥改性粉土力学性质方面，宋新江、徐海波进行了系统研究[12-17]；对于水泥改性膨胀土，相关学者也取得一定的研究成果，并在南水北调中线工程进行应用。黄斌[18]、韩晶[8]、唐云伟[19]、赵红华[20]等以水泥作为外掺剂，针对南阳膨胀土、淅川段膨胀土、邯郸膨胀、宜昌膨胀土对进行了无侧限抗压强度、抗剪强度、微观结构等试验测试，认为水泥的改性效果优于石灰，分别提出了不同的最佳水泥掺入比。

本文以驷马山中-弱膨胀土为土料，采用水泥作为外掺剂，通过界限含水率、击实、自由膨胀率、三轴不固结不排水剪(UU)、三轴固结不排水剪(CU)、三轴固结排水剪(CD)等试验，揭示水泥对膨胀土的改良效果和变形特性、强度特性、破坏特性，阐释水泥在改良膨胀土强度方面的机理，研究成果对水泥改性土膨胀土工程的设计、施工提供技术支持。

1　试验材料与试验方案

1.1　试验材料

试验土料取自驷马山分洪道切岭段。土体以棕黄色、黄色为主，为过压密裂隙黏土，一般坚一极坚，厚层，无层理，裂隙，面多有白色油腻状次生黏土充填。富含铁锰结核和铁锰氧化物，有时成层分布，间断夹杂有小砂砾。土体的基本物理性质见表1。

表1　膨胀土的基本物理性质

Tab. 1　Physical properties of expansive soil

液限/%	塑限/%	塑性指数	自由膨胀率/%	土粒组成(粒径以mm计) 砂粒 0.075～2/%	粉粒 0.005～0.075/%	黏粒 ≤0.005/%
47.6	20.0	27.6	52.5	15.0	50.5	34.5

水泥是海螺水泥有限责任公司生产的P.O 32.5普通硅酸盐水泥，该水泥主要由硅酸盐水泥熟料、5%～20%混合材料以及适量石膏磨细制成，主要化学成分为CaO、SiO_2、Fe_2O_3、Al_2O_3等。

1.2　试验方案

根据换填工程需求和相关规范，本次主要针对水泥掺入比分别为3%、5%和8%的水泥改性膨胀土进行试验研究，水泥掺入比采用水泥质量与干土质量之比进行计算，试验方案和试样制备如下：

素土：按《土工试验规程》SL 237的要求，制备界限含水率、击实、自由膨胀率等试验的土样。

水泥改性膨胀土：界限含水率试验和自由含水率试验采用将素土配到最优含水率后，再掺入一定量的水泥，拌匀后装入到塑料袋中；当龄期达到28 d后，将水泥改性膨胀土碾碎烘干，测定改性后土体的液塑限和自由膨胀率。击实试验采用干法制备，即掺入水泥前已将一定质量的水加入土中，掺入后立即进行击实试验。三轴试验试样采用压样法制备，试样直径39.1 mm，高80 mm，试样干密度为水泥改性膨胀土最大干密度的0.96，含水率为最优含水率，成型后置于标准养护间进行养护，养护龄期28 d。界限含水率试验、自由含水率试验、击实试验的试样水泥掺入比为3%、5%和8%三种；三轴试验的试样水泥掺入比为5%。

2　试验结果分析

2.1　水泥改性膨胀土的基本物理性质

图1为素土和水泥掺入量3%、5%、8%的水泥改性膨胀土的界限含水率和自由膨胀率试验成果。

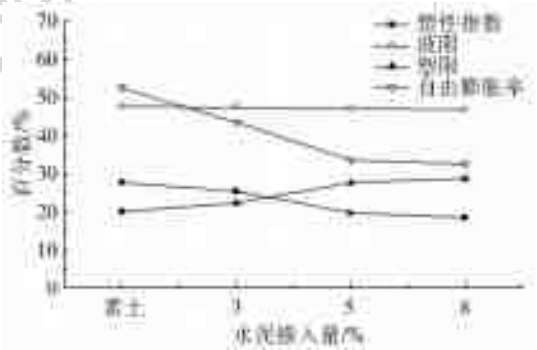

图1　水泥改性膨胀土的基本物理性质

Fig. 1　Basic physical properties of cement-modified expansive soil

由图1可知，素土、3%、5%、8%水泥改性膨胀土塑性指数依次下降且下降显著，对应的自由膨胀率随水泥掺入比的增大而减小。膨胀土掺入水泥后，水泥与水发生水化反应，生成$Ca(OH)_2$和C-S-H等水化产物，将分散的土颗粒胶结在一起，使水泥和土从最初的离散颗粒状态变成一种胶结的、均匀结构，使土颗粒由较小形态形成较大的土团粒，土颗粒紧密胶结在一起，减少了颗粒团之间的孔隙，土体密实度增大，同时增加了胶结键。通过水化反应改变了膨胀土的基本物理力学性质，降低了土体的自由膨胀率和塑性指数。

图1中，掺入比3%的水泥改性膨胀土的自由膨胀率为45%左右，以自由膨胀率作为膨胀土的评价指标，该土仍属于弱膨胀土；掺入比5%和8%水泥改性膨胀土的自由膨胀率均在35%以下，土体膨胀性

南水北调与水利科技(中英文)

降低明显，已不属于膨胀土的范畴。由此可见，水泥对膨胀土的物理力学性质具有良好的改性效果。

2.2　击实试验

利用轻型击实试验方法，揭示水泥掺入比对最大干密度和最优含水率的影响程度。试验结果见表 2。

表 2　击实试验结果

Tab. 2　The result of compaction tests

水泥掺入比/%	0	3	5	8
最大干密度/(g·cm^{-3})	1.63	1.64	1.66	1.67
最优含水率/%	21.5	22.0	22.5	24.5

膨胀土掺入水泥后，水泥与水发生水化反应，吸收大量水分并释放热量，使水泥改性膨胀土实测含水率随水泥掺入比的增大逐渐减小。水泥中的 CaO 与水发生水化反应，使的土中 Ca^{2+} 质量浓度迅速增加，溶液变成饱和的 $Ca(OH)_2$ 溶液。随着 Ca^{2+} 的释放，土体得到加固。12 h 之后，伴随水泥的凝结和 Ca^{2+} 质量浓度降低，大量的 Ca^{2+} 和水被消耗形成$Ca(OH)_2$和 C-S-H。形成的 $Ca(OH)_2$ 晶体高度分散在水泥-土的系统中，保持着很细和高度活化的纯水化石灰的形式，晶体和孔隙液体中的 Ca^{2+} 继续支持土体颗粒的加固，因此水泥改性膨胀土的最大干密度和最优含水率随水泥掺入比的提高逐渐增大。

2.3　三轴试验

根据界限含水率和自由膨胀率试验结果，水泥掺入比 5%就能有效改善膨胀土的胀缩性质。为此，选取水泥掺入比 5%的水泥改性膨胀土进行三轴不固结不排水剪(UU)、三轴固结不排水剪(CU)和三轴固结排水剪(CD)等试验；试验围压分别为 100、200、300、400、600 kPa，CU 和 CD 试验的固结压力同围压。图 2 为三轴(UU、CU、CD)试验的应力-应变关系曲线。

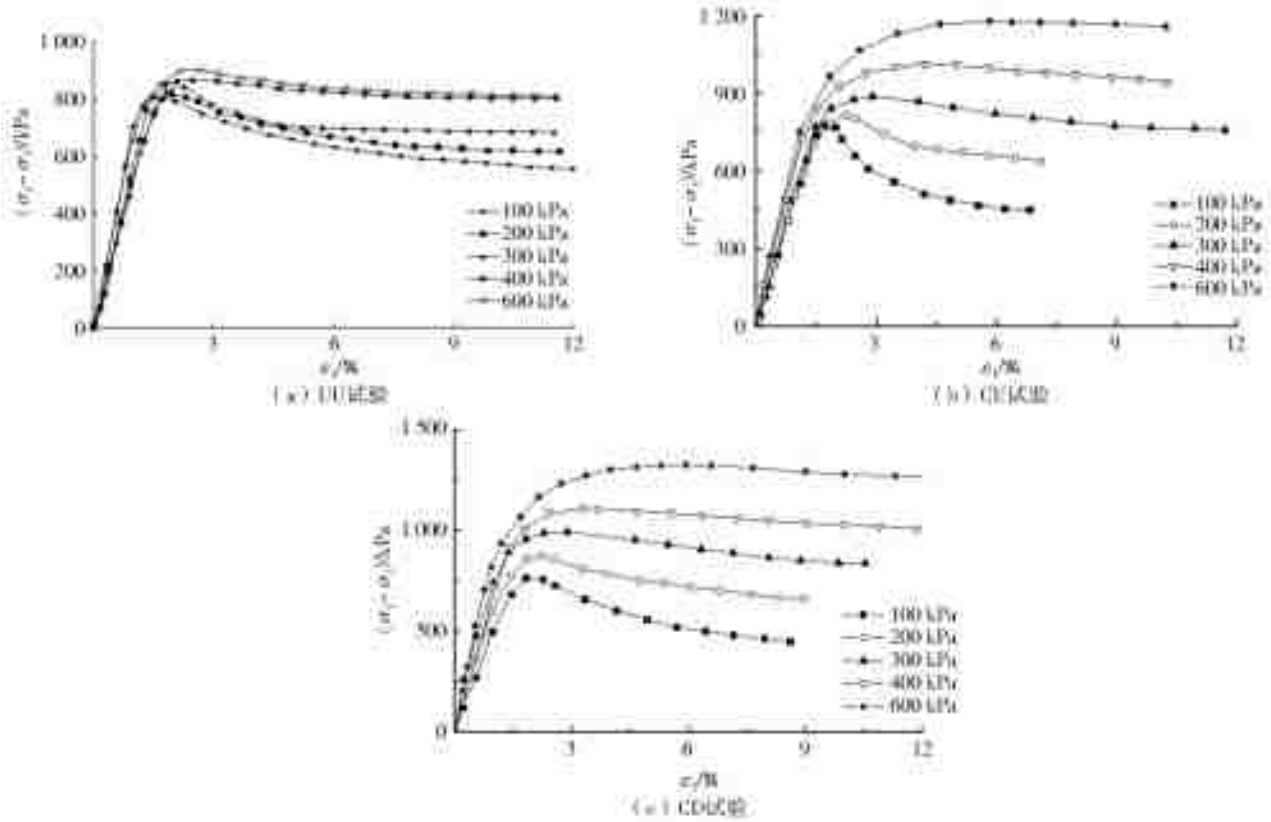

图 2　三轴试验应力-应变关系曲线

Fig. 2　Stress-strain curves of the triaxial tests

由图 2 可知，UU 试验，水泥改性膨胀土的强度增长速率较快，峰值强度对应的轴向应变为 1.5%～3%；不同围压下，水泥改性膨胀土的峰值强度均在 880 kPa 左右，之后强度衰减，衰减幅度随围压的增大而减小，破坏后试样强度位于 580～820 kPa。CU 试验，水泥改性膨胀土峰值强度、破坏时的轴向应变均随围压的增大而增大，峰值强度对应的轴向应变为 1.5%～5%；随着围压的增大，水泥土强度增长速率随之增大，峰值强度提高较为明显，峰值强度在围压 600 kPa 时比 100 kPa 提高了 40%，破坏后试样强度位于 420～1 150 kPa。CD 试验，水泥改性膨胀土的峰值强度增长随围压的增大逐渐增大；峰值强度对应的轴向应变位于 2%～6%，其值随围压增大不断增大，峰值强度在围压 600 kPa 较

100 kPa 提高了 77%，破坏后试样强度位于 420～1 250 kPa。

2.4　力学特性分析

2.4.1　变形特性

水泥改性膨胀土的三轴剪切试验应力-应变关系曲线可以分成三个阶段，即线弹性阶段、非线性强化阶段、应变软化阶段。随着围压的增大，应力-应变曲线由软化型逐渐向硬化型发展，破坏时的轴向应变逐渐增大。

2.4.2　强度特性

表 3 为 CU 和 CD 试验的强度统计，图 3 为 $(\sigma_1-\sigma_3)_r/(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 与 σ_3 关系曲线，图 4 为根据峰值强度绘制的强度包线。

由图 3 可知，水泥改性膨胀土在低应力状态下，软化明显；在高应力状态下，软化特性减弱，甚至呈现出硬化特征。

从图 4 中看出，UU 试验强度包线为一水平直线，CU、CD 试验强度包线为一直线，符合摩尔-库伦强度准则。UU 试验水泥改性膨胀土的凝聚力 $c=432$ kPa；CU 试验水泥改性膨胀土凝聚力 $c=274$ kPa、$\varphi=14.7°$，有效凝聚力 $c'=235$ kPa、$\varphi'=19.5°$；CD 试验水泥改性膨胀土凝聚力 $c=231$ kPa、$\varphi=20.8°$。CD 试验与 CU 试验的 c'、φ' 比较接近，即 CU 试验的有效强度包线与 CD 试验强度包线基本一致，但由于 CD 试验过程中体积发生变化，CD 试验的 c、φ 比 CU 试验的 c'、φ' 略大。

表 3　CU 和 CD 试验强度统计

Tab. 3　Strength of cement－modified expansive soil under different test conditions

试验类型		围压 σ_3/kPa				
		100	200	300	400	600
CD	$(\sigma_1-\sigma_3)_r$	450	670	848	1 018	1 267
	$(\sigma_1-\sigma_3)_f$	767	876	994	1 110	1 327
	比值	0.59	0.76	0.85	0.92	0.96
CU	$(\sigma_1-\sigma_3)_r$	450	616	737	910	1 095
	$(\sigma_1-\sigma_3)_f$	778	813	887	1 011	1 177
	比值	0.58	0.75	0.83	0.90	0.93

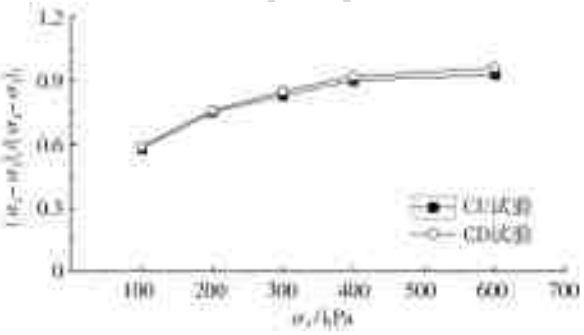

图 3　$(\sigma_1-\sigma_3)_r/(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 与 σ_3 关系曲线

Fig. 3　Relationship between $(\sigma_1-\sigma_3)r/(\sigma_1-\sigma_3)_f$ and σ_3

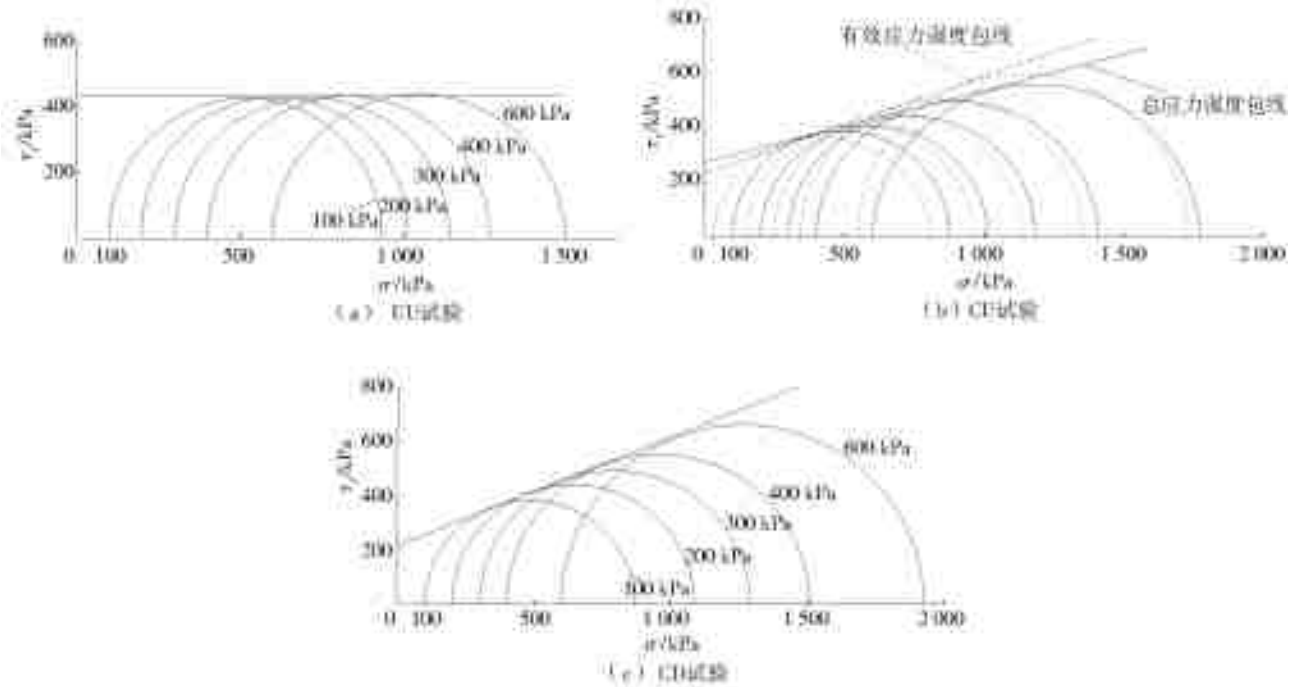

图 4　三轴试验强度包线

Fig. 4　Strength envelope of the triaxial tests

2.4.3　破坏特性

表 4 为 CU 和 CD 试验试样实际剪切破坏的剪切破坏角，图 5 为试样的破坏形态。

根据莫尔-库伦强度理论剪切破坏角为 $\alpha_\varphi=45°+\varphi/2$，即最大主应力作用面与破坏面夹角为 $45°+\varphi/2$。CU 试验剪切破坏角为 52.4°，有效剪切破

表 4　CU、CD 试验剪切破坏角实测值

Tab. 4　The measured inclination angle of shear band under the condition of CD and CU

围压/ kPa	100	200	300	400	600
CU 试验/°	54.5	54.6	54.5	54.3	54.0
CD 试验/°	57.2	56.8	56.9	56.5	56.3

CD试验（200 kPa）　CU试验（400 kPa）

图 5　三轴试验试样破坏形态

Fig. 5　Failure simples of the triaxial tests

坏角为 54.8°；CD 试验剪切破坏角为 55.8 °，试样的实际剪切破坏角基本符合摩尔库伦理论计算值，与文献[21]基本相符。

3　结　论

(1)膨胀土中掺入水泥后，能提高膨胀土的塑限，降低塑限指数和自由膨胀率，水泥对膨胀土具有良好的改性效果；土体的最大干密度和最优含水率随水泥掺入比的增大而增大。

(2)水泥改性膨胀土三轴试验应力-应变关系曲线，呈现弹性阶段、非线性强化阶段和应力软化阶段；随着围压的增大应力应变曲线由软化型逐渐向硬化型发展。

(3)峰值强度、残余强度均随围压的增大而增大，强度包线为一条直线，试样为剪切破坏，剪切破坏角符合莫尔-库伦理论计算值。

参考文献(References)：

[1]　骆大春. 膨胀土工程性质及边坡稳定性研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2008.（LUO D C. Study on engineering properties and slope stability of expansive soil [D]. Chongqing：Chongqing Jiaotong University，2008.（in Chinese））DOI：10.7666/d.y1249896.

[2]　罗文柯，杨果林. 我国部分省(区)膨胀土分布与工程特性对比研究[J]. 山西建筑，2005. 31(23)：68-69.（LUO W K，YANG G L. Study on the distribution and engineering characteristics of expansive soil in some provinces of China[J]. Shanxi Architecture，2005. 31(23)：68-69.（in Chinese））DOI：10.3969/j.issn.1009-6825.2005.23.042.

[3]　贾东亮，丁述理，杜海金，等. 膨胀土工程性质的研究现状与展望[J]. 河北科技建筑学院学报，2003. 20(1)：33-39.（JIA D L，DING S L，DU H J，et al. Research status and prospect of engineering properties of expansive soil[J]. Journal of Hebei University of Science，Technology and Architecture，2003. 20(1)：33-39.（in Chinese））DOI：10.3969/j.issn.1673-9469.2003.01.010.

[4]　胡晓军，吴延枝. 膨胀土改良技术研究综述[J]. 合肥学院学报(自然科学版)，2014，24(4)：80-86.（HU X J，WU Y Z. Summarizing on improvement technology research of expansive soil[J]. Journal of Hefei University (Natural Sciences)，2014，24(4)：80-86.（in Chinese））DOI：10.3969/j.issn.1673-162X.2014.04.017.

[5]　吴新明，巫锡勇，周明波. 水泥改良膨胀土试验研究[J]. 路基工程，2007(2)：94-95.（WU X M，WU X Y，ZHOU M B. Study on cement improved expansive soil [J]. Subgrade Engineering，2007(2)：94-95.（in Chinese））DOI：10.3969/j.issn.1003-8825.2007.02.040.

[6]　刘磊，张文慧，卢子威，等. 消石灰改良膨胀土室内试验研究[J]. 信阳师范学院自然科学版，2013，29(1)：139-142.（LIU L，ZHANG W H，LU Z W，et al. Studies on lime treated expansive soil[J]. Journal of Xinyang Teachers College(Natural Science Edition)，2013，29(1)：139-142.（in Chinese））DOI：10.3969/j.issn.1003-0972.2016.01.033.

[7]　边加敏. 石灰改良膨胀土的水稳定性研究[J]. 长江科学院学报，2016，33(1)：77-82.（BIAN J M. Water stability of lime-treated expansive soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute，2016，33(1)：77-82.（in Chinese））DOI：10.11988/ckyyb.20140013.

[8]　韩晶，王乐华，马莉，等. 水泥及石灰掺量对改良膨胀土抗剪强度的影响[J]. 人民黄河，2015(4)：137-139，144.（HAN J，WANG L H，MA L，et al. Effect on shear strength of Improved expansive soil with addition amounts of cement and lime[J]. Yellow River，2015，4：137-139，144.（in Chinese））DOI：10.3969/j.issn.1000-1379.2015.04.035.

[9]　惠会清，胡同康，王新东. 石灰、粉煤灰改良膨胀土性质机理[J]. 长安大学学报，2006，26(2)：34-37.（HUI H Q，HU T K，WANG X D. Improved mechanism of expansive soils by lime and fly-ash[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)，2006，26(2)：34-37.（in Chinese））DOI：10.3321/j.issn：1671-8879.2006.02.009.

[10]　林友军，薛丽娇，陈丽红. 石灰-粉煤灰改良汉中膨胀

南水北调与水利科技（中英文）

土试验研究[J]. 陕西理工学院院报(自然科学版)，2010，26(1)：36-38. (LIN Y J，XUE L J，CHEN L H. Experimental research on amelioration of Hanzhong expansive soil with mixing in lime-flyash[J]. Journal of Shanxi University of Technology(Natural Science Edition)，2010，26(1)：36-38. (in Chinese)) DOI：10. 3969/j. issn. 1673-2944. 2010. 01. 009.

[11] 冯美果，陈善雄，余颂，等. 粉煤灰改性膨胀土水稳定性试验研究[J]. 岩土力学，2007，28(9)：1889-1893. (FENG M G，CHEN S X，YU S，et al. Laboratory study on water stability of flyash-treated expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics，2007，28(9)：1889-1893. (in Chinese)) DOI：10. 3969/j. issn. 1000-7598. 2007. 09. 022.

[12] 宋新江，徐海波. 平面应变条件下水泥土强度特性试验研究[J]. 岩土力学，2011，32(8)：2325-2330. (SONG X J，XU H B. Experimental study on strength characteristics of cement-soil under plane strain condition[J]. Rock and Soil Mechanics，2011，32(8)：2325-2330. (in Chinese)) DOI：10. 3969/j. issn. 1000-7598. 2011. 08. 013.

[13] 宋新江，徐海波，王永雷. 水泥土各向异性变形特性研究[J]. 岩土力学，2012，33(6)：1619-1624. (SONG X J，XU H B，WANG Y L. Study on the characteristic of cement-soil anisotropic deformation[J]. Rock and Soil Mechanics，2012，33(6)：1619-1624. (in Chinese)) DOI：10. 3969/j. issn. 1000-7598. 2012. 06. 004.

[14] 宋新江，徐海波，周文渊，等. 水泥土应力-应变特性真三轴试验研究[J]. 岩土力学，2016，37(9)：2489-2495. (SONG X J，XU H B，ZHOU W Y，et al. True triaxial test study on stress-strain characteristics of cement-soil[J]. Rock and Soil Mechanics，2016，37(9)：2489-2495(in Chinese)) DOI：10. 16285/j. rsm. 2016. 09. 008.

[15] SONG X J，LI J，QIAN C F. Experimental study on strength characteristics of cement-soil under CD/CU condition[J]. Applied Mechanics and Materials，2012，124(4)：2748-2753. DOI：10. 4028/www. scientific. net/AMM. 121-126. 2748.

[16] SONG X J，WANG W，XU H B. Experimental study on strength characteristics of cement-soil under fixed spherical pressure condition[J]. Advanced Materials Research，2011，1359(604)：338-341. DOI：10. 4028/www. scientific. net/AMR. 301-303. 338.

[17] 徐海波，席文勇. 水泥土渗透特性与强度特性研究综述[J]. 水利水电技术，2011，42(8)：13-16. (XU H B，XI W Y. Research status of seepage behavior and strength property of cement-soil[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2011，42(8)：13-16. (in Chinese)) DOI：10. 3969/j. issn. 1000-0860. 2011. 08. 005.

[18] 黄斌，聂琼，徐言勇，等. 膨胀土水泥改性试验研究[J]. 长江科学院学报，2009，26(11)：27-30. (HUANG B，NIE Q，XU Y Y，et al. Experimental research on cement-modification of expansive soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute，2009，26(11)：27-30. (in Chinese)) DOI：10. 3969/j. issn. 1001-5485. 2009. 11. 007.

[19] 唐云伟，童磊，张国栋，等. 水泥改良膨胀土无侧限抗压强度试验研究[J]. 淮阴工学院学报，2013，22(3)：26-30. (TANG Y W，TONG L，ZHANG G D，et al. Test of the unconfined compressive strength of improved cement expansive soil[J]. Journal of Huaiyin Institute of Technology，2013，22(3)：26-30. (in Chinese)) DOI：10. 3969/j. issn. 1009-7961. 2013. 03. 006.

[20] 赵红华，郭靖，赵春吉，等. 水泥改性邯郸强膨胀土微观结构变化的长期试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版)，2014，36(5)：46-50. (ZHAO H H，GUO J，ZHAO C J，et al. Experimental investigation on microstructure of cement treated highly expansive Handan clay over a long curing time[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences)，2014，36(5)：46-50. (in Chinese)) DOI：10. 13393/j. cnki. issn. 1672-948X. 2014. 05. 011.

[21] 钱财富，宋新江，徐海波，等. 水泥土剪切破坏特性与剪破角试验研究[J]. 水电能源科学，2017(3)：130-133. (QIAN C F，SONG X J，XU H B，et al. Study on characteristic of shear fracture and inclination angle of shear band of cement-soil[J]. Water resources and power，2017(3)：130-133. (in Chinese))

南水北调与水利科技(中英文)