

文章编号: 1673-9469(2019)03-0079-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.03.015

## 镁渣改良膨胀土的物理力学特性试验研究

张磊<sup>1</sup>, 孙树林<sup>2</sup>, 张岩<sup>3</sup>, 储浩<sup>4</sup>, 丁伟<sup>5</sup>, 周立国<sup>6</sup>

(1. 安徽省华电工程咨询设计有限公司, 安徽 合肥 230009; 2. 河海大学 地球科学与工程学院, 南京 210098; 3. 河海大学 土木与交通学院, 南京 210098; 4. 安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230088; 5. 中土集团福州勘察设计院有限公司, 福建 福州 350011; 6. 安徽省电力设计院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 针对膨胀土路基带来的问题, 结合固体废弃物改性土壤的相关研究, 提出了利用镁渣对膨胀土进行改良的研究思路。通过室内试验, 研究了镁渣对膨胀土相对密度、液塑限、自由膨胀率以及无侧限抗压强度和抗剪强度的影响。试验结果表明, 随着镁渣掺量的增加, 改性土的液限、塑性指数、自由膨胀率均呈减小趋势, 这表明镁渣对于膨胀土膨胀性的改良具有显著的效果; 此外, 随着镁渣含量的增加, 镁渣改性土的无侧限抗压强度和抗剪强度都呈现先增加后减小的趋势, 在镁渣掺量为 15% 时达到峰值。

**关键词:** 膨胀土; 镁渣; 改良; 固体废弃物

**中图分类号:** TU443

**文献标识码:** A

## Experimental Study on Physical and Mechanical Properties of Modified Expansive Soil with Magnesium Slag

ZHANG Lei<sup>1</sup>, SUN Shulin<sup>2</sup>, ZHANG Yan<sup>3</sup>, CHU Hao<sup>4</sup>, DING Wei<sup>5</sup>, ZHOU Ligu<sup>6</sup>

(1. Anhui Huadian Engineering Consulting&Design Co.Ltd, 230009, China; 2. College of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Anhui Transport Consulting&Design Institute Co.Ltd, Hefei 230088, China; 5. CCECC Fuzhou Survey&Design Institute Co.Ltd, Fuzhou 350011, China; 6. Anhui Electric Power Design Institute, Hefei 230601, China)

**Abstract:** In view of the problems caused by expansive soil roadbed, this paper, combined with the related research of solid waste modified soil, put forward the research idea of using magnesium slag to improve expansive soil. The effects of magnesium slag on relative density, liquid plastic limit, free expansion rate, unconfined compressive strength and shear strength of expansive soil were studied by laboratory tests. The results show that the liquid limit, plasticity index and free expansion rate of the modified soil decrease with the increase of the content of magnesium slag. In addition, with the increase of mg slag content, the unconfined compressive strength and shear strength of mg slag modified soil showed a trend of first increasing and then decreasing, and reached the peak when the content of mg slag was 15%.

**Key words:** expansive soil; magnesium slag; improved; solid waste

近年来, 随着中国经济建设的迅猛发展, 中国各类公路和铁路线路快速延伸, 大量线路通过膨胀土地区。膨胀土作为一种具有超固结、多裂隙和显著膨胀性的不良土体, 广泛分布于中国的 20 多个省市, 给国内工程建设带来了严重的灾害<sup>[1-2]</sup>, 并造成了巨大的经济损失<sup>[3]</sup>。对于膨胀土的改良方法<sup>[4-6]</sup>

很多, 将工程地质和环境地质相结合, 采用固体废弃物<sup>[7-11]</sup>对膨胀土进行改良已成为了热门研究课题, 但是采用镁渣这种固体废弃物改良膨胀土的研究成果和相关报道还较少。

中国作为原镁出口量世界第一的国家, 每年产生的镁渣数量达到了近千万吨。镁渣处理多采用堆

收稿日期: 2019-09-02

基金项目: 中央高校科研业务费专项资金资助项目 (2109B42214)

作者简介: 张磊 (1993-), 男, 重庆人, 硕士, 工程师, 研究方向为特殊土处理和地质灾害防治。

积存放,但是这种方式占用了大量的土地的同时,还会对环境造成极大的影响。从化学成分来看,镁渣运用于改良膨胀土特性是具有可行性的。此外,现已有将镁渣运用在路基填料方面的成功案例。因此,本文考虑利用镁渣对膨胀土的基本物理力学性质、膨胀性等进行改良研究,探讨镁渣改良膨胀土的可行性,为今后的工程应用提供参考。

### 1 试验材料和试验方法

镁渣取自安徽合肥某炼镁厂,颜色为灰白色,无气味,主要矿物成分为CaO、SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等,其化学成分见表1。

土样采集于中国江苏省南京市高淳区,取土深度为2~4m,颜色为黄灰色或者黄褐色,呈可塑性状态,其基本物理性质见表2。矿物成分全化学分析结果见表3。

从表2可以看出,素土的液限为60.8%,自由膨胀率为61%,按照《膨胀土地区建筑技术规范》(GB 50112-2013)<sup>[12]</sup>中的规定,可将其分类为高液限弱膨胀土。

本次试验方案中的镁渣掺量定为0%、5%、10%、15%、20%,试验方法和步骤依照《公路土工试验规程》<sup>[13]</sup>中相关试验步骤进行,主要通过镁渣掺入后土体物理指标、抗压强度以及抗剪强度的变化探讨材料的改良效果。文中的掺渣率为镁渣质量与土体总干质量的占比。试验中,先按照试验设计的比例称取一定量的镁渣(碾磨后过1mm筛)和风干碾磨过筛后的膨胀土土样,混合均匀后,按照膨胀土的最优含水率将水掺入改性土中,使土体达到膨胀土的最佳含水率状态。均匀搅拌后放置于密封的塑料袋中闷料24h,然后再进行制样和试验,力学试验采用经过1、7、14、28d养护龄期的土样。

### 2 试验结果分析

#### 2.1 掺镁渣对膨胀土物理性质指标的影响

为了探究镁渣对膨胀土物理指标的影响,本文进行了比重试验、自由膨胀率试验和液塑限试验,试验结果如图1—图3所示。

从图1可以看出,镁渣的掺入能改变膨胀土的

表3 膨胀土的化学成分分析结果

Tab.3 Results of chemical composition analysis of expansive soil

化合物名称	化合物所占质量百分比/%
SiO <sub>2</sub>	61.912 2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.327 7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.286 5
CaO	3.883 4
MgO	1.664 9
Na <sub>2</sub> O	1.239 8
TiO <sub>2</sub>	0.921 5
K <sub>2</sub> O	1.634 4
MnO	0.090 4
NiO	0.063 3
烧失量	6.975 9

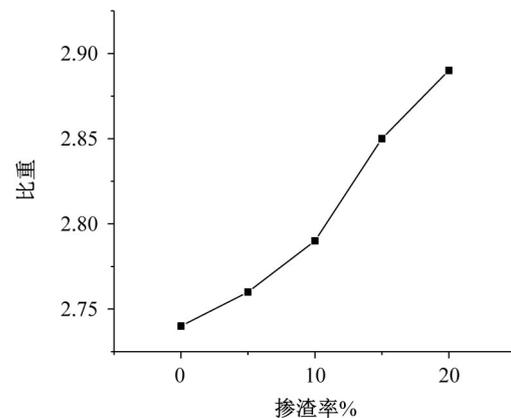


图1 不同掺渣率下改性土的比重

Fig.1 Specific gravity of modified soil at different slag mixing rates

表1 镁渣的化学成分

Tab.1 Chemical composition of magnesium slag

成分	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>
含量/%	56.03	27.14	5.12	8.11	1.61	0.91	0.7

表2 膨胀土的基本物理性质指标

Tab.2 Basic physical properties of expansive soil

天然含水率/%	液限 ω <sub>L</sub> /%	塑限 ω <sub>p</sub> /%	塑性指数 I <sub>p</sub> /%	最优含水率/%	最大干密度 ρ <sup>dmax</sup> (g·cm <sup>-3</sup> )	比重 G <sub>s</sub>	自由膨胀率/%
24.5	60.8	25.3	36	20.1	1.891	2.74	61

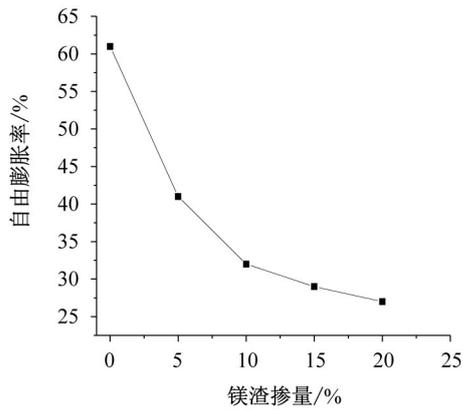


图2 不同镁渣掺量下改性土的自由膨胀率  
Fig.2 Free expansion rate of modified soil with different magnesium slag content

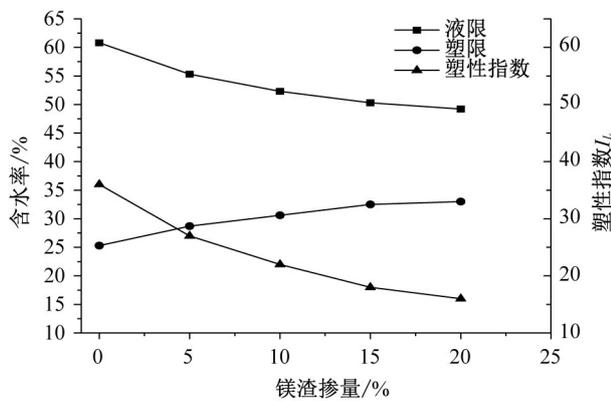


图3 镁渣掺量与改性土界限含水率、塑性指数的关系  
Fig.3 Relationship between magnesium slag content and boundary water content of modified soil

相对密度。随着镁渣掺量的增加，镁渣改性土的相对密度也随之增加。其主要原因是镁渣的相对密度大于膨胀土的相对密度，镁渣颗粒代替了膨胀土颗粒，导致整体颗粒的相对密度增加。

从图2可以看出，随着镁渣掺量的增加，改性土的自由膨胀率显著降低。在镁渣掺量为10%时，自由膨胀率即降至40%以下，此时可认为该掺量改性土为非膨胀土。

从图3中可以看出，镁渣的掺入对膨胀土的液塑限具有显著的影响。随着镁渣掺量的增加，镁渣改性土的液限减小，塑性指数降低。从试验结果可以看出，不掺镁渣时，膨胀土的液限和塑性指数分别为60.8%和36，随着镁渣掺量的增加，液限和塑性指数逐渐降低。塑性指数作为一个反映土体的矿物成分和颗粒大小的重要指标，对于判别膨胀土是重要的参数，在本试验中，塑性指数随镁渣掺量增长而降低，表明改性土土体中的黏粒含量降低，亲

水性下降，印证了掺镁渣改良膨胀土的有效性。

## 2.2 掺镁渣对膨胀土力学性质的影响

### 2.2.1 无侧限抗压强度

从图4、图5可以看出，改性土的无侧限抗压强度随着镁渣掺量的增加先增大后减小，并随着养护时间的增长而提高：养护1d时，素土无侧限抗压强度为178.22 kPa，5%、10%、15%、20%镁渣掺量下无侧限抗压强度变为230.47、269.37、305.39、284.92 kPa，较素土其增长率为29.3%、51.1%、71.4%、59.9%。15%镁渣掺量改性土养护龄期为1d时，无侧限抗压强度为305.39 kPa，当养护龄期为14、28d时，改性土强度分别为445.55、501.89 kPa，较1d时分别增长了45.9%、64.34%。

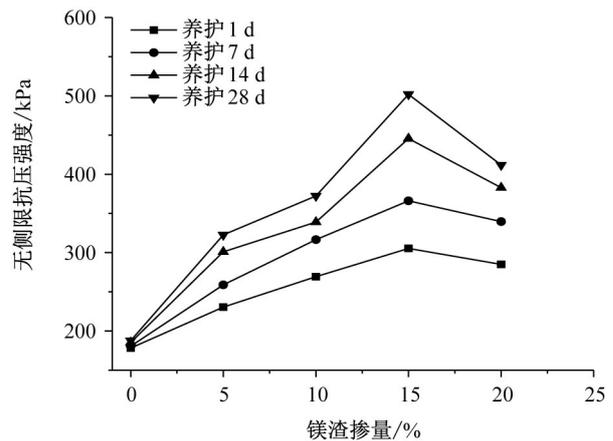


图4 不同镁渣掺量下无侧限抗压强度的变化情况  
Fig.4 Changes of unconfined compressive strength under different magnesium slag content

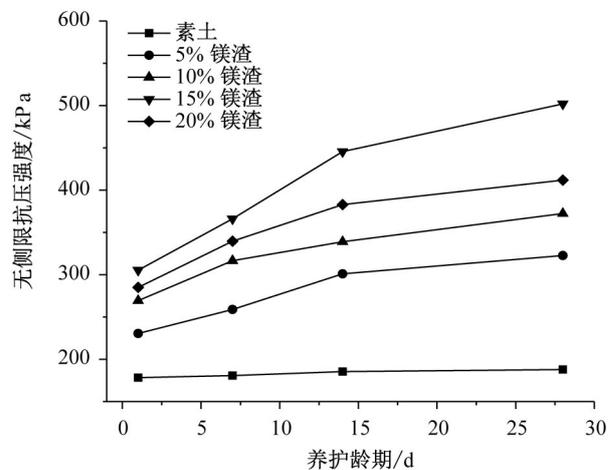


图5 不同养护龄期下无侧限抗压强度的变化情况  
Fig.5 Changes of unconfined compressive strength at different curing ages

对比图4中的数据可知：在相同养护时间条件下，镁渣掺量为15%时改性土的无侧限抗压强度最高，且镁渣掺量超过15%后呈现降低的趋势。随着时间的增长，15%镁渣掺量的改性土的无侧限抗压强度依然最大。在相同镁渣掺量时，28d养护龄期的改性土的无侧限抗压强度最大，但是14~28d较1~14d无侧限抗压强度的增长趋势减弱，增长趋势趋于平缓。据上分析可得出：15%镁渣掺量为改性土体无侧限抗压强度的最佳掺量；镁渣掺入在前期就能快速地发挥改良材料的作用，提高膨胀土的早期强度。

### 2.2.2 抗剪强度

不同掺量和养护龄期的改性土的抗剪强度均可采用库伦强度理论进行分析。通过试验，得到的抗剪强度指标随镁渣掺量和养护龄期变化情况如图6—图9所示。

从图6—图9可知，镁渣的掺入明显地改变了土样的抗剪强度，粘聚力和内摩擦角均有较大的提升。

镁渣改性土的粘聚力和内摩擦角都随着镁渣的掺量增加先增大后减小，在镁渣掺量为15%时出现峰值。这表明提升镁渣改性土的抗剪强度时，镁渣的掺量不能无限制地增加。这也再次印证了15%掺量应为镁渣改性土的最佳掺量。

粘聚力和内摩擦角随着养护龄期的增加而提升。将养护14d和养护1d的试样抗剪强度参数进行对比，发现14d的试样抗剪强度参数有明显提升，这论证了养护的重要性。在对比14d和28d的强度参数后，可知在这段时间内，抗剪强度的提升非常有限，表明14d左右改性土内部的反应已基本完成，达到

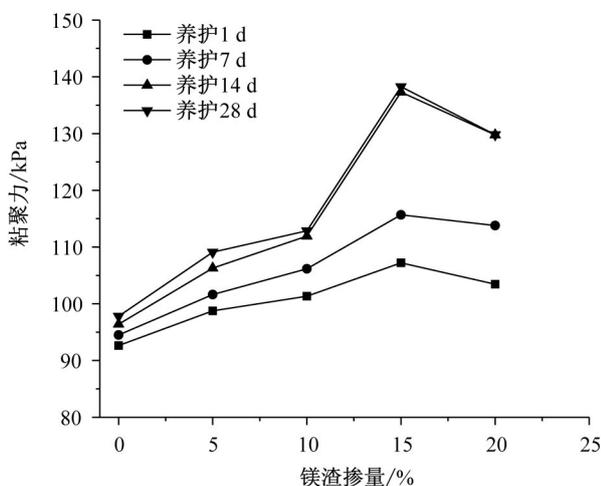


图6 不同镁渣掺量下粘聚力的变化情况  
Fig.6 Changes of cohesion under different magnesium slag dosage

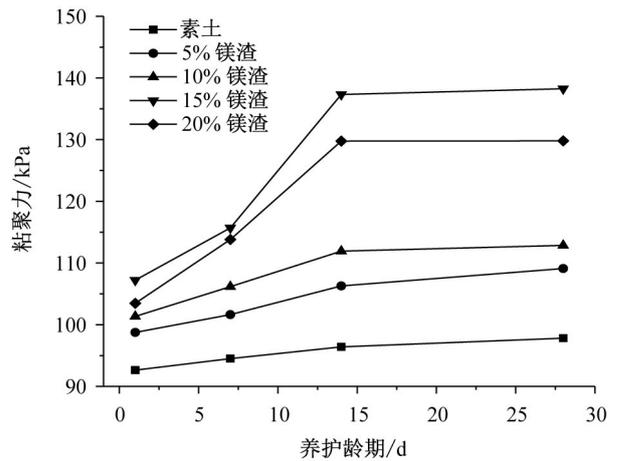


图7 不同养护龄期下粘聚力的变化情况  
Fig.7 Changes of cohesion at different curing ages

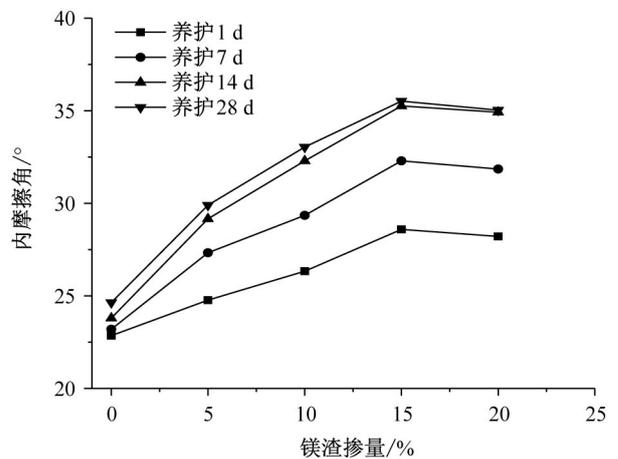


图8 不同镁渣掺量下内摩擦角的变化情况  
Fig.8 Changes of internal friction Angle with different magnesium slag content

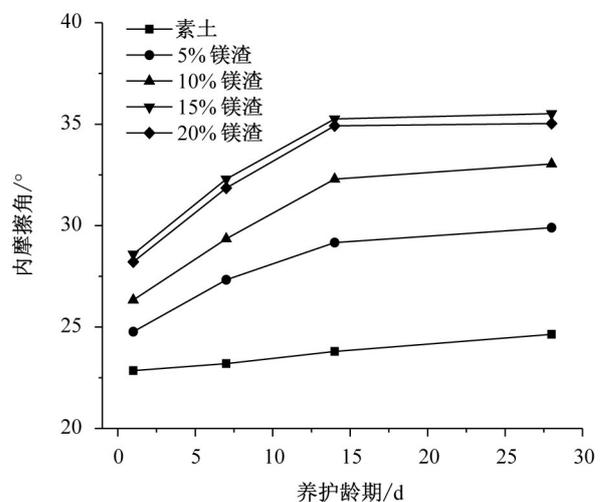


图9 不同养护龄期下内摩擦角的变化情况  
Fig.9 Changes of internal friction Angle at different curing ages

稳定状态。

### 3 镁渣改性土膨胀土的原理探讨

镁渣作为一种低膨胀性的固体材料, 掺入膨胀土中后, 替代了膨胀土土体颗粒, 减小了膨胀土中具有膨胀特性的粘粒含量, 从而降低了土体膨胀特性。镁渣颗粒小于土体颗粒, 混合后镁渣颗粒能填充在土体颗粒的孔隙中, 降低了土体的孔隙率, 使土体结构更加完整, 增强土体强度。

分析镁渣的化学成分表可以得知, 镁渣的主要成分为  $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等, 其中  $\text{CaO}$  的含量达到 56.03%,  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的含量也分别达到了 27.14% 和 8.11%。镁渣与水混合后, 将电离出大量的高价阳离子 ( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ ), 它们通过离子交换置换出黏土颗粒中的低价阳离子 ( $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ ), 改性土的颗粒间距变小, 使得改性土的液限和塑性指数降低, 进而改善土体的膨胀特性。

将镁渣与硅酸盐水泥熟料的化学成分进行对比, 可见二者成分具有极大的相似性, 因此我们可以认为镁渣的特性是与硅酸盐水泥相似的, 在性质上具有较好的胶结性。冶炼金属镁产生镁渣的生成温度较高, 内部矿物是介稳的高温型结构, 理论上是具有良好的水化活性, 遇水反应后可生成水化硅酸钙凝胶 ( $x\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ )。凝胶物质产生会将土颗粒充分包裹, 成网状的紧密连接在一起。它改变了土颗粒杂乱无章的分布状态, 并使单独的颗粒形成一个整体, 从而增加了土体的强度, 它是膨胀土体强度提高的主要原因。但是此过程和絮凝作用相似, 也需要一定的反应时间, 因此镁渣改性土在养护一段时间后, 其强度增加效果最好。

### 4 结论

1) 镁渣的掺入能提高改性土的比重, 并能降低土体的自由膨胀率, 有效地抑制土体膨胀性。

2) 镁渣的掺入能降低膨胀土中的黏粒含量, 进而降低土体的液限和塑性指数。

3) 改良后土体的无侧限抗压强度和抗剪强度较素土都有很大提升, 均随着镁渣掺量的增加先增大

后减小, 并随着养护龄期的增加而提高。在镁渣掺量为 15% 时强度提升达到峰值; 养护时长为 14 d 时可认为改性土中的反应已基本完成。

4) 利用镁渣改良膨胀土可以有效提高膨胀土的工程特性, 并使得固体废物再次利用。

#### 参考文献:

- [1] 牛恩宽, 郑炎, 艾志雄, 等. 三峡库区膨胀土滑坡灾害治理分析 [J]. 灾害与防治工程, 2005(2): 34-38.
- [2] 龚文惠. 公路膨胀土路基的沉降和边坡稳定性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [3] 郑健龙, 杨和平. 公路膨胀土工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [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): 80-85.
- [5] MALEKZADEH M, BILSEL H. Hydro-mechanical behavior of polypropylene fiber reinforced expansive soils [J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2014, 18(7): 2028-2033.
- [6] 曾娟娟. 生物酶改良膨胀土物理力学特性试验研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
- [7] 孙树林, 魏永耀, 张鑫. 废弃轮胎胶粉改良膨胀土的抗剪强度研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 3070.
- [8] 崔素丽, 王安国, 田明锦, 等. 水泥窑灰 (CKD) 改性膨胀土的击实性质试验研究 [J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2016, 46(2): 256-260.
- [9] 许长辉, 孙树林. 贝壳改良膨胀土的抗剪强度试验研究 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2017, 34(3): 38-40.
- [10] 张德恒, 孙树林, 徐奋强. 秸秆灰渣改良膨胀土三维膨胀特性试验研究 [J]. 长江科学院院报, 2014, 31(10): 128-133.
- [11] SUN S L, CHEN J, ZHENG Z. Use of CFB fly ash for soft subgrade stabilization of highway construction in China [C] // Proceedings of the 12nd International Symposium on Water and Rock Interaction. [S.l.]: [s.n.], 2007: 1407-1410.
- [12] GB 50112-2013, 膨胀土地区建筑技术规范 (S).
- [13] JTG E40-2007, 公路土工试验规程 [S].

(责任编辑 王利君)