

# 水泥稳定土干缩性能及其尺寸效应

陈杰<sup>1</sup>,朱学英<sup>2</sup>,付梁<sup>2</sup>,王珩<sup>3</sup>

(1.蒙城县水利局,安徽蒙城 233500; 2.中水北方勘测设计研究有限责任公司,天津 300222;  
3.南京水利科学研究院材料结构研究所,江苏南京 210024)

**摘要:**为了研究水泥稳定土的干缩性能及其尺寸效应,结合蒙城某水利枢纽工程,采用工程现场的两种黏土进行了水泥稳定土室内干缩性能试验,测试了不同水泥用量、不同养护期水泥稳定土试件的干缩率,并对比了试件尺寸对测试结果的影响。试验结果表明:水泥稳定土的干缩率随龄期延长而增大,14 d后趋于稳定;随着水泥用量的增加,试件干缩率降低;养护期延长对于降低水泥稳定土干缩有利,但效果有限;各龄期试件干缩率与质量损失率正相关;试件大小对干缩率影响很小,尺寸效应不显著。

**关键词:**水泥稳定土;干缩性能;无侧限抗压强度;质量损失;尺寸效应

**中图分类号:**TU411.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)02-0114-05

**Dry shrinkage performance and size effect of cement stabilized soil**//CHEN Jie<sup>1</sup>, ZHU Xueying<sup>2</sup>, FU Liang<sup>2</sup>, WANG Heng<sup>3</sup>(1. Water Resources Bureau of Mengcheng County, Mengcheng 233500, China; 2. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 3. Materials & Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** To study the dry shrinkage of cement stabilized soil (CSS) and its size effect, two types of clay from the engineering field of a key water-control project in Mengcheng were tested for indoor dry shrinkage performance. The shrinkage of CSS of different cement content and under various curing time was measured and the size effect on shrinkage was compared. The results show that, the shrinkage of CSS increases with extension of drying time, and tends to be stable after 14 days. As the content of cement increases, dry shrinkage decreases. The extension of curing time is beneficial to dry shrinkage performance with limited effects. There is a positive correlation between dry shrinkage and mass loss rate. The size of specimen has little effect on dry shrinkage with non-significant size effect.

**Key words:** cement stabilized soil; dry shrinkage performance; unconfined compressive strength; mass loss; size effect

使用水泥进行稳定处理的土称为水泥稳定土(以下简称“水泥土”),水泥土研究源自20世纪的美、日和日本<sup>[1]</sup>。相比传统的石灰,对高水分的土壤<sup>[2]</sup>,使用水泥作为稳定组分具有更好的稳定性。水泥还可以和固废掺合料联用进一步改善土壤的强度和耐久性<sup>[3]</sup>。工程上对水泥土的强度和耐久性问题比较重视,但对收缩重视不足,实际上,收缩问题与耐久性问题同等重要。水泥土收缩主要可分为水泥水化产生的自收缩、失水产生的干缩和温度变化产生的热收缩三部分<sup>[4]</sup>,其中干缩占比在70%以上<sup>[5]</sup>。土料品种也对收缩有影响,一般水泥土收缩量在0.1%~1%,粗粒土料接近下限,细粒土料接近上限<sup>[6]</sup>。

在工程运行早期,水泥土的收缩会受到上下层摩擦约束,产生收缩应力,当收缩应力超过水泥土的最大容许拉应力时,会产生裂缝,裂缝的产生还将加速水的渗透,从而降低其耐久性<sup>[7]</sup>。一般来说,黏土水泥土的裂缝宽度较小但间距很近(0.6~3.0 mm)<sup>[8]</sup>。

George<sup>[9]</sup>研究发现高强度的水泥稳定材料收缩更大;Bahar等<sup>[10]</sup>研究了阿尔及利亚的水泥稳定细颗粒土的收缩,发现在早期收缩值也很大。水泥土的收缩还与其初始含水率有关,如果初始含水率降低到70%,由于孔隙水的不连续性,收缩裂缝会减少<sup>[11]</sup>。

我国于20世纪70年代开始对水泥土的工程性质和理论开展研究,近年来随着我国基础建设的推进,水泥土以经济实用、施工方便的特点成为地下防

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y420012, Y421009)

作者简介:陈杰(1971—),男,高级工程师,主要从事水利水电建设管理工作。E-mail:1183367025@qq.com

通信作者:王珩(1979—),男,正高级工程师,硕士,主要从事水工材料等研究。E-mail:wangheng@nhri.cn

渗<sup>[12]</sup>、地基处理、护坡的主要材料<sup>[13]</sup>。国内对于水泥土的收缩研究较少,嵇晓雷等<sup>[14]</sup>针对水泥搅拌桩研究了不同养护方式对水泥土试件收缩的影响,但不包含干燥环境;陈魁等<sup>[15]</sup>对水泥土强度问题进行了尺寸效应研究。目前相关研究存在以下不足:①试件成型基本为挤压方式,与实际碾压工艺有偏差;②缺乏前期不同养护方式对干缩影响的研究;③没有研究室内干缩试验的尺寸效应。

本文结合安徽蒙城某水利枢纽工程,对水泥土的干缩和尺寸效应进行室内试验研究,以期工程制定防裂控制方案提供参考。

## 1 原材料

试验原材料取自安徽蒙城的某水利枢纽工程,该工程由节制闸、分洪闸、船闸3座建筑物组成,是一座集防洪、排涝、蓄水灌溉、交通运输于一体的枢纽工程。根据设计,节制闸和船闸基础处理采用水泥土换填。试验用土包括轻粉质壤土(船闸部位选用,以下简称“轻土”)和重粉质壤土(节制闸选用,以下简称“重土”)两种(该分类名称来自SL265—2001《水闸设计规范》)。水泥选用散装32.5级粉煤灰硅酸盐水泥。

依据GB/T50123—2019《土工试验方法标准》对两种土分别进行了物理性质、颗粒组成等测试,结果见表1和表2,可见它们属于低液限黏土。两种土的性质区别不大,重土的细颗粒略多。

表1 土的物理性质

土样	土粒比重	液限/%	塑限/%	塑性指数	制样干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	无侧限抗压强度/kPa	渗透系数/(10 <sup>-6</sup> cm·s <sup>-1</sup> )
重土	2.69	42.5	20.3	22.2	1.65	42.5	20.3
轻土	2.68	40.3	18.2	22.1	1.65	40.3	18.2

## 2 试验方法

### 2.1 水泥土配合比计算

在进行水泥土试验前,对水泥用量为10%左右

的水泥土进行了击实试验(筒容积2103.9cm<sup>3</sup>,击锤质量4.5kg,每层击数56,落距457mm),得到最大干密度和最佳含水率。其中,轻土水泥土的最大干密度为1.72g/cm<sup>3</sup>,对应最佳含水率为19.8%;重土水泥土最大干密度为1.73g/cm<sup>3</sup>,对应最佳含水率为18.2%。水泥土配合比以此为基础进行计算,水泥用量以干土为基准共选用7%、10%和13%等3种。

拌和前将原土晾干为风干土,再碾碎并过5mm圆孔筛,以便去除其中的大颗粒,然后装袋密封保存用于后续试验。由于配合比中土的用量以干土计,而实际拌和制样时使用风干土,故需测量风干土的含水率,便于配合比计算。试验前对风干土的含水率可再次测量以保证实际用水量的稳定。以风干土为基准的配合比见表3。

### 2.2 成型及测试方法

水泥土采用强制式砂浆搅拌机拌制。为了模拟工程现场的碾压施工工艺,试件制作未采用通常的压实或击实,而是采用振动台结合压重块的方式进行,振动台振动频率为50Hz,空载振幅为0.5mm;参考SL352—2018《水工混凝土试验规程》对碾压混凝土试验的要求,压重块采用高度为61mm的不锈钢块,截面尺寸同试件尺寸。将试模放在振动台上,分层加入拌制好的水泥土,每层均放上压重块,开启振动台30s,水泥土即可振动压实。

强度试件为边长50mm的立方体,干缩试件为40mm×40mm×160mm棱柱体。干缩试模顶部留有小孔便于装入测头,每个试件分3层压实,最后一层压实后,用刮刀小心去除多余材料,并使表面平整。参照SL352—2018《水工混凝土试验规程》中的水泥砂浆干缩试验,采用电子千分尺测量长度。

同一个配合比进行不同养护期的干缩对比,即试件拆模后,分别在标准养护室养护3d、7d和14d,养护期满后放入干缩室(温度(20±2)℃,相对湿度60%),测量其干燥后各龄期(1d、3d、7d、14d、28d、56d)的试件长度,并计算其干缩率,基准值测

表2 土的颗粒组成

土样	颗粒组成/%					界限粒径/mm				界限系数	
	>0.5mm	0.25~0.5mm	0.075~0.25mm	0.005~0.075mm	<0.005mm	有效粒径	中间粒径	平均粒径	限制粒径	不均匀系数	曲率系数
重土	0.8	0.5	11.4	68.4	18.9	0.003	0.009	0.017	0.023	7.7	1.2
轻土	1.4	0.5	10.2	70.8	17.1	0.003	0.010	0.020	0.026	8.7	1.3

表3 水泥土的配合比

土样	试件编号	水泥用量/%	配合比/(kg·L <sup>-1</sup> )			土样	试件编号	水泥用量/%	配合比/(kg·L <sup>-1</sup> )		
			风干土	水	水泥				风干土	水	水泥
重土	MZ1	7	1.623	0.240	0.110	轻土	MQ1	7	1.602	0.274	0.110
	MZ2	10	1.623	0.240	0.157		MQ2	10	1.602	0.274	0.157
	MZ3	13	1.623	0.240	0.205		MQ3	13	1.602	0.274	0.203

量在拆模后即开始;测长时同步称重,以记录试件的质量变化。

尺寸效应对比试验采用 100 mm×100 mm×315 mm 的大试件,同样在试件制作过程中埋入不锈钢测头,采用混凝土测长仪测量试件长度的变化。重土和轻土各对比一个水泥用量下不同尺寸试件的干缩率。

### 3 试验结果与分析

试件成型后压实度均在 94% 以上,可避免压实度不合格对于试验结果的影响。

#### 3.1 无侧限抗压强度

水泥土试件在标准养护条件(温度(20±2)℃,相对湿度大于 95%)下的 7 d、28 d、56 d 的无侧限抗压强度见图 1。加入水泥后,水泥土的强度是原土样的几十倍。随龄期延长,强度增长,28 d 后基本稳定,增速变缓;随着水泥用量的增加,水泥土强度增加明显。因为水泥水化在 28 d 前较快,生成的水化产物填充了土壤颗粒的空隙,大大增加了整体强度,而 28 d 后水化产物增加减缓,故强度增加较少。

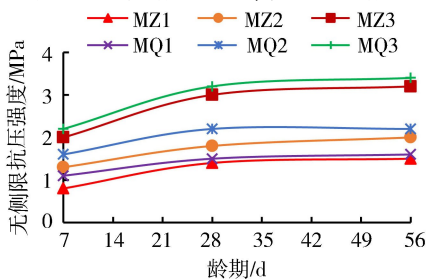


图 1 试件的无侧限抗压强度

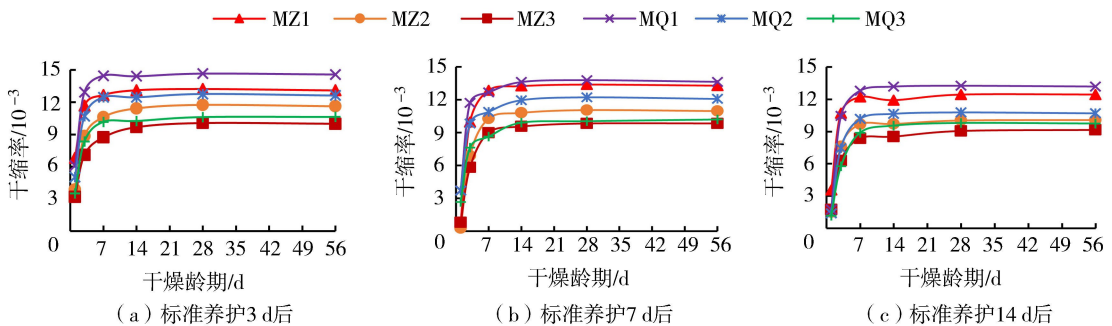


图 2 试件的干缩率

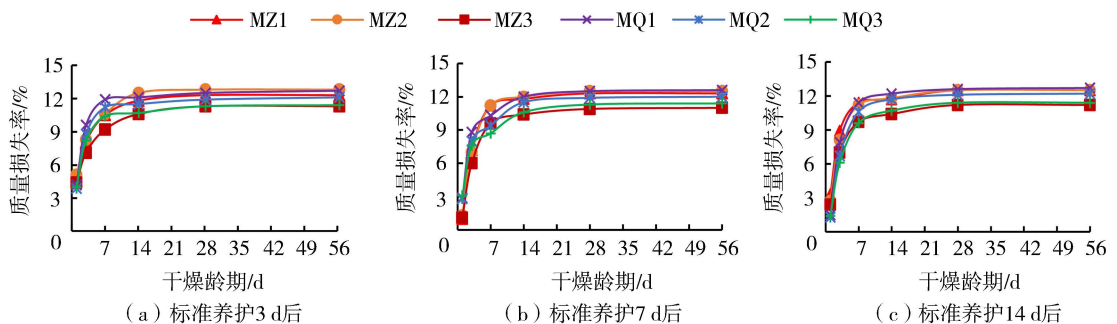


图 3 试件的质量损失率

#### 3.2 不同养护期下的干缩率和质量损失率

两种水泥土试件在不同养护期后的干缩率和质量损失率见图 2 和图 3。

由图 2 和图 3 可见,总体来看,水泥土的干缩率和质量损失率均随干燥龄期延长而增大,7 d 前迅速增大,7 d 后减缓,14 d 后趋于稳定,56 d 基本稳定,其最终干缩率在(9~15)×10<sup>-3</sup>间,最终的质量损失率为 10%~12%。

在不同的养护期下,水泥土的干缩会随养护时间略有降低。图 4 为养护期对各组试件最终干缩率的影响;养护期从 3 d 增加到 14 d 时,降低率为 5%~14%,说明养护期延长对降低水泥土的干缩有利,但延长养护期对于降低干缩率的效果没有增加水泥用量明显。

从图 4 还可以看出,水泥用量对最终干缩率的影响大于养护时间,轻土干缩率较重土大。在不同的养护时间下,各组试件最终干缩率由大到小顺序为 MQ1、MZ1、MQ2、MZ2、MQ3、MZ3,综合来看,水泥用量增加,干缩率降低,且轻土的干缩率大于重土,可能是由于拌和用水相对较多,形成的孔洞较多导致。

崔宏环等<sup>[16]</sup>通过研究和计算,认为水泥土的干缩主要发生在前 15 d,因此如果在前 15 d 加强养护,就可以减小干缩变形,但是从本次试验结果看,早期的养护对于水泥土的干缩有一定缓解,但进入干燥期后,之前长时间的养护对于水泥土干缩降低效果有限,因此实际工程可酌情进行养护。

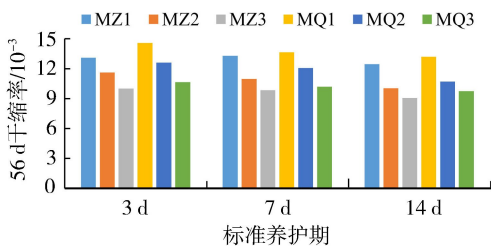


图4 标准养护期对混凝土试件 56 d 干缩率的影响

### 3.3 水泥用量对干缩率的影响

由图2和图3、4可以看出,随着水泥用量的增加,各龄期的混凝土干缩率均降低,其原因有两方面,一是水泥颗粒水化后,堵塞了土壤颗粒的大孔,改善了孔结构<sup>[17]</sup>,使得水分散失减少;二是水泥水化形成的水泥石弹性模量较高,收缩率远小于土。图5为各组试件 56 d 干缩率与水泥用量的关系,水泥用量每提

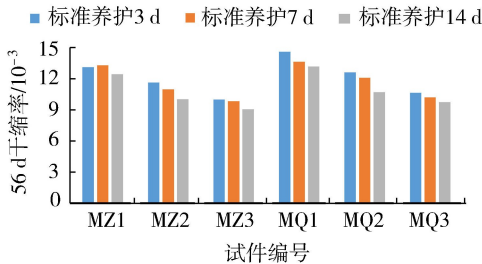


图5 水泥用量对混凝土试件 56 d 干缩率的影响

高 3 个百分点,最终干缩率可降低 10% ~ 20%。

### 3.4 干缩率与质量损失率的关系

不同水泥用量的混凝土干缩率均与其干燥的质量损失率正相关,质量损失是由于干燥环境下的失水导致。由图6可见,干缩率与质量损失率基本呈线性关系,质量损失率超过 9% 后,干缩率变化略缓;不同标准养护时间下,早期干缩率差异不大,养护时间长的试件,后期在相同质量损失率下,其最终干缩率略小,其原因是在较长的养护时间下,水泥水化较为充分,形成的水泥石较多,抑制了混凝土的后期收缩。

### 3.5 混凝土试件的尺寸效应

选择 MZ2 和 MQ2 两组试件配合比,进行养护期为 3 d 的大试件 (100 mm × 100 mm × 315 mm) 和小试件 (40 mm × 40 mm × 160 mm) 干缩变形对比试验,结果见图7和图8。由图7、图8可见,大小试件的干缩率曲线基本重合,小试件的早期干缩率较大,这是由于其早期失水较快所致,而大试件体积较大,失水较慢,因此在干燥早期质量损失率和干缩均较小,但 14 d 后,随着失水的加剧,大试件的干缩率与小试件已无差别,甚至略大。MZ2 组大小试件的最终干缩率分别为  $12.307 \times 10^{-3}$  和  $11.616 \times 10^{-3}$ ,相对偏差约 5%; MQ2 组大小试件干缩率分别为  $13.971 \times$

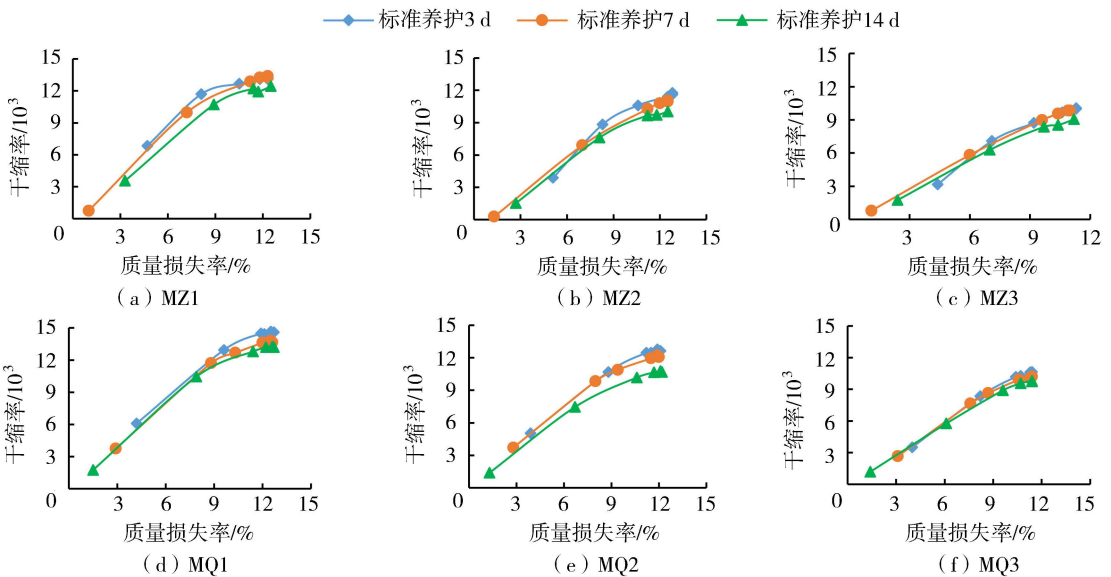


图6 干缩率与质量损失率的关系

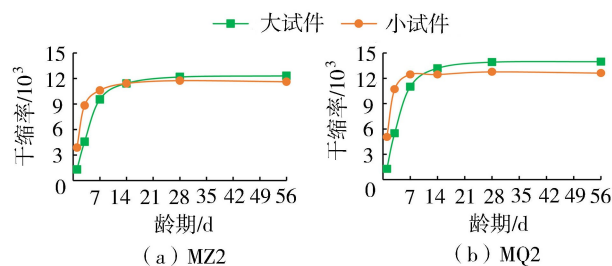


图7 试件尺寸对干缩率的影响

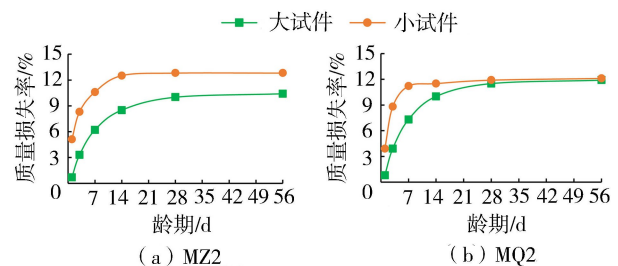


图8 试件尺寸对质量损失率的影响

$10^{-3}$  和  $12.616 \times 10^{-3}$ , 相对偏差约 10%。对于水泥土干缩率测试来说, 10% 以内的偏差是可以接受的, 且对于室内试验来说, 干缩率测试仅作为相互对比, 因此可以认为干缩率的测量与试件尺寸没有太大关系, 采用小试件具有相当好的代表性。

## 4 结论

a. 在相对湿度 60%、温度  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  条件下, 水泥土的干缩率随干燥龄期延长而增大, 7 d 前干缩率迅速增大, 14 d 后趋于稳定, 56 d 基本稳定, 最终干缩率在  $(9 \sim 15) \times 10^{-3}$  之间, 水泥用量每提高 3 个百分点, 最终干缩率可降低 10% ~ 20%。

b. 与重土相比, 轻土干缩较大, 可能是由于拌和用水较多, 形成的孔洞较多所致; 水泥土的干缩率与其干燥的质量损失率正相关。

c. 由于水泥水化产物对于土体收缩的抑制, 随着水泥用量的增加, 试件各龄期的干缩率均降低。干燥前的养护期延长会降低水泥土后期的干缩率, 如干燥前养护时间从 3 d 增加到 14 d 时, 干缩的降低率为 5% ~ 14%, 说明延长养护时间对降低水泥土的收缩有利, 但降低效果没有水泥用量增加的影响大, 实际工程可根据需要确定合理的养护期。

d. 与小试件相比, 大试件由于体积较大, 在干燥环境下早期失水较慢, 干缩率较小, 但 14 d 后, 随着失水的加剧, 大试件的干缩率与小试件非常接近, 最终干缩率相对偏差在 10% 以内。对于水泥土来说, 采用小试件测量干缩率具有良好的代表性。

## 参考文献:

[1] 李彦智. 水泥土工程性能实验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.

[2] AL-AMOUDI O S B. Characterization and chemical stabilization of Al-Qurayyah sabkha soil[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(6): 478-484

[3] ZUMRAWI M M E. Stabilization of pavement subgrade by using fly ash activated by cement[J]. American Journal of Civil Engineering and Architecture, 2015, 3(6): 218-224.

[4] LI X. Shrinkage cracking of soils and cementitiously-stabilized soils: mechanisms and modeling [D]. Washington D. C.: Washington State University, 2014.

[5] KODIKARA J, CHAKRABARTI S. Shrinkage behaviour of cemented materials as applicable to in situ pavement stabilisation [C]//Proceedings of the 20th Australian Road Research Board Conference. Melbourne: ARRB Ltd., 2001: 1-23.

[6] 陶景行. 国外应用水泥土护坡防渗的概况[J]. 农田水利与小水电, 1987(11): 25-26. (TAO Jingxing. General situation abroad of application of cement stabilized soil on

slope seepage prevention [J]. Irrigation and Small Hydropower, 1987(11): 25-26. (in Chinese))

[7] KODIKARA J, CHAKRABARTI S. Modeling of moisture loss in cementitiously stabilized pavement materials[J]. International Journal of Geomechanics, 2005, 5(4): 295-303.

[8] 许贤敏, 路凡. 水泥土的性能及其在国外的应用[J]. 公路, 2005(5): 117-124. (XU Xianmin, LU Fan. Performance and application abroad of cement stabilized soil[J]. Highway, 2005(5): 117-124. (in Chinese))

[9] GEORGE K P. Minimizing cracking in cement-treated materials for improved performance (No. R&D Bulletin RD123) [R]. Skokie, IL: Portland Cement Association, 2002.

[10] BAHAR R, BENAZZOUG M, KENAI S. Performance of compacted cement stabilised soil [J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(7): 811-820.

[11] BISWAL D R, SAHOO U C, DASH S R. Durability and shrinkage studies of cement stabilised granular lateritic soils[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019, 20(12): 1451-1462.

[12] 方明. 水泥土围护桩墙裂缝稳定分析[J]. 江苏建筑, 1998(2): 39-40. (FANG Ming. Crack stability analysis of cement-soil retaining pile wall [J]. Jiangsu Construction, 1998(2): 39-40. (in Chinese))

[13] 王寅泽, 章丽莎, 张金红. 水泥土工程性能研究综述[J]. 低温建筑技术, 2020(8): 14-18. (WANG Yinze, ZHANG Lisha, ZHANG Jinhong. The summary of research on engineering properties of cement soil[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2020(8): 14-18. (in Chinese))

[14] 嵇晓雷, 杨平, 刘红梅. 水泥土收缩性能室内试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2017, 43(2): 81-84. (JI Xiaolei, YANG Ping, LIU Hongmei. A laboratory experimental study on contractibility of cement-soil [J]. Sichuan Building Science, 2017, 43(2): 81-84. (in Chinese))

[15] 陈甦, 彭建忠, 韩静云, 等. 水泥土强度的试件形状和尺寸效应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 580-583. (CHEN Su, PENG Jianzhong, HAN Jingyun, et al. Experimental research on the shape and size effect of cement-stabilized soil specimen strength [J]. China Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 580-583. (in Chinese))

[16] 崔宏环, 刘卫涛, 张立群. 土凝岩新型固化剂稳定路基粉质黏土的干缩性能[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(14): 320-328. (CUI Honghuan, LIU Weitao, ZHANG Liqun. Dry shrinkage properties of silty clay stabilized by new solidifying agent of soil tuff[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(14): 320-328. (in Chinese))

[17] 王佩, 宋新江, 徐海波, 等. 水泥改性膨胀土基本特性试验[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 56-60. (WANG Pei, SONG Xinjiang, XU Haibo, et al. Experiments on basic characteristics of cement-modified expansive soil[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 56-60. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-01-14 编辑: 熊水斌)