

文章编号:2095-7386(2016)01-0070-05

DOI:10.3969/j.issn.2095-7386.2016.01.016

原状膨胀土脱湿微观结构变化试验研究

汪为巍, 易 远, 张传成, 张正亚

(武汉轻工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430023)

摘 要: 膨胀土普遍发育有微孔隙与微裂隙, 形成其特殊的微结构, 在膨胀土脱湿过程中其内部微观结构也会发生剧烈变化, 大量的研究表明, 膨胀土的裂隙发育、强度衰减、胀缩变形等工程特性在很大程度上取决于其微结构特征。针对这一情况, 采用扫描电镜法和压汞法相结合的方法对膨胀土原状样经抽气饱和后土体内部孔隙变化及在恒温恒湿条件下脱湿后土体内部孔隙变化进行研究, 结果表明: 原状膨胀土样抽气饱和后膨胀土发生膨胀, 内部孔隙变小, 孔隙变化主要集中在大于 $1\ \mu\text{m}$ 和小于 $0.1\ \mu\text{m}$ 的区域, 饱和后总孔隙体积减小, 但饱和前后孔隙孔径分布曲线形态基本相似; 原状膨胀土样恒温恒湿环境下脱湿后, 微观结构变化剧烈, 总孔隙体积急剧减小, 但大孔隙所占相对比例急剧增加; 膨胀土脱湿干燥时孔隙收缩, 土中的大孔隙变为小孔隙, 导致小孔隙和超微孔隙增多, 土样中的总孔隙体积减小。

关键词: 膨胀土; 脱湿; 微观结构; 原状样

中图分类号: TU 411.92

文献标识码: A

The study on the microstructure changes of undisturbed expansive soil after dehydration

WANG Wei-wei, YI Yuan, ZHANG Chuan-cheng, ZHANG Zheng-ya

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: Micro pores and micro fractures are common development of expansive soils, and their special microstructure is formed, the internal microstructure of the expansive soil will be changed dramatically in the process of soil moisture, a large number of studies show that: the engineering properties of expansive soil, such as crack development, strength attenuation and expansion and contraction deformation, largely depend on the microstructure of the soil. In view of this situation, SEM and MIP are used to study undisturbed expansive soil. The main conclusion is as follows: The undisturbed expansive soils are expanded, and the internal pores become smaller, the pore changes mainly concentrated in the area of more than $1\ \mu\text{m}$ and less than $0.1\ \mu\text{m}$. The total pore volume decreases, but the shape of the pore size distribution curve is similar to that of the saturated soil; Undisturbed expansive soils are dewetted under constant temperature and humidity environment, micro structural severe changed, the total pore volume decreased dramatically, but the relative ratio of large pore has increased dramatically; When the expansive soil dehydration, the pores is shrinking, and the large pores become smaller, which leads to the increase of small pores and micro pores, and the total pore volume decreases.

Key words: expansive-soil; dehydration; microstructure; undisturbed-example

收稿日期: 2015-09-21. 修回日期: 2015-11-18.

作者简介: 汪为巍(1981-), 男, 博士, 讲师, E-mail: 1464427693@qq.com.

1 引言

土的微观结构是指土在一定的地质环境和条件下,土粒和粒团的排列方式,微孔隙与微裂隙的大小、形状、数量及其空间分布与充填情况,接触与连接方式等所构成的微结构特征^[1-4]。

膨胀土普遍发育有微孔隙与微裂隙,形成了其特殊的微结构,在膨胀土脱湿的过程中其内部的微观结构也会发生剧烈变化,大量的研究表明,膨胀土的裂隙发育、强度衰减、胀缩变形等工程特性在很大程度上取决于其微结构特征。微观结构一方面反映膨胀土的形成条件,另一方面也是决定膨胀土物理力学以及其他性质的重要因素^[5-11]。

在膨胀土中普遍存在着蒙脱石、伊利石、高岭石等粘土矿物成分,这些矿物的颗粒大多为鳞片状成扁平状,彼此相互集聚形成叠聚体,构成膨胀土中活动性的基本结构单元,所以研究膨胀土的微结构特征,即包括组成膨胀土骨架的基本单元——颗粒,以

及颗粒与颗粒之间的相互排列方式,颗粒与颗粒之间彼此的联结性质,裂隙、孔隙及其充填等特征^[12-13]。

本研究采用扫描电镜法和压汞法相结合的方法对膨胀土原状样脱湿前后微结构展开研究,两者为平行试样,主要研究原状样经抽气饱和及脱湿后土体内部孔隙变化。从微观角度去认识原状膨胀土吸湿-脱湿前后的微观结构变化,探讨这些变化对于膨胀土裂隙性的影响。

2 土样基本物理性质

试验用土样取自南阳高速公路现场,土样呈黄褐色,含铁锰结核,可塑,粘性较强,裂隙面呈蜡状光泽,粒径小于 0.075 mm 的土颗粒占总质量的约 97.3%,黏粒含量(粒径 < 0.005 mm)约为 61.1%,基本物理性质见表 1,根据《公路路基设计规范》(JTGD030-2004)表 2 该膨胀土属于中膨胀土。

表 1 试验用土样基本物性参数

天然含水率/%	比重	自由膨胀率/%	收缩系数	缩限 /%	天然重度 / (kN · m ⁻³)	干密度 / (g · cm ⁻³)	液限 /%	塑性指数	体缩率/%	标准吸湿含水率/%	渗透系数 / (cm · s ⁻¹)
25.4-26.8	2.81	61	0.38	11.0	19.8	1.57	55.4	29.2	20.3	6.725	1.06E-6

表 2 膨胀土膨胀潜势等级判别标准

指标	弱膨胀土	中膨胀土	强膨胀土
塑性指数	15—28	28—40	> 40
自由膨胀率/%	40—60	60—90	> 90
标准吸湿含水率/%	2.5—4.8	4.8—6.8	> 6.8

表 3 Poremaster33 技术参数

名称	技术参数	技术指标
低压站	压力范围	0.23—50 psi
	传感器精度	± 0.11%
	孔直径范围	950—4.26 μm
高压站	压力范围	20—33,000 psi
	传感器精度	± 0.05%
	孔直径范围	10.66—0.006 4 μm

3 压汞实验

3.1 实验仪器

压汞实验采用图 1 所示的 Poremaster33 高压孔隙结构仪,该结构仪技术参数如表 3 所示。实验测试分析系统利用汞对材料不浸润的特性,采用人工加压的方式使汞进入材料内部孔隙,结合结构分析模型计算样品的孔径结构、孔隙度及真密度等参数。



图 1 Poremaster33 高压孔隙结构仪

3.2 实验原理

压汞仪法的理论依据是:湿润液体(如汞)在没有外部压力的作用下并不进入孔隙介质的空隙中。1921 年,Washburn 假定介质孔隙为圆柱状的毛细管,并通过实验得出了孔隙等效半径 r 和外部压力 P 之间的关系:

$$P = 2\sigma \cos\theta / r.$$

式中: P 为外部施加的压力, σ 为注入液体的表面张力, θ 为接触角。对汞来说, $\sigma = 0.484 \text{ N/m}$, $\theta = 141^\circ$ 。

压汞试验是对已制作出来的土样,用不同的压力向其孔隙中压入水银,然后得到不同压力和其所对应的进汞量,根据这两个数据来绘制关系曲线,然

后通过上述公式计算出不同大小孔隙所占孔隙总体积的比例关系,从而得出累积压入汞体积随着孔径的变化曲线。通过采用 $dV/d(\log r)$ 的方法来描述土中孔隙分布情况从而进一步对压汞试验数据进行分析。其中 dV 表示在给定的压力增量下汞体积变化值, $d(\log r)$ 表示在这一压力增量施加前后汞所能进入的最小孔隙孔径的变化。为了解决孔径分布范围难以在坐标上表示的问题,采用了对数坐标。

3.3 样品制备

原状土样制备,用渗透环刀取样,随后进行抽气饱和,使用透水石来把饱和后的土样从环刀内轻轻推出,之后用钢丝锯(涂了凡士林)从土样中间部位切出 $10\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的毛坯,再用双面刀片,对毛坯四周进行环切,环切大概 1.5 mm 左右,然后用手掰出一个断面,从而得到一块比较平整的天然结构面,再用刀片把这块毛坯切成 $5\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 左右的土样,并小心放入到铝盒之中(在铝盒表面上贴上标签并编号,其中 401、402 为抽气饱和的原状样,403 为未经抽气饱和的原状样)^[14],按表 4 方案进行处理。

表 4 原状样微观实验方案

原状土编号	脱湿环境		实验类型	
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	湿度/%	压汞	电镜
401	冻干		✓	✓
402	45	35	✓	✓
403	冻干		✓	

涉及到以下几种脱湿方式。

(1)冻干法:将制好的压汞土样(制样方法与风干法相同)谨慎装入到内径为 18 mm 、高为 180 mm 的有机玻璃试管之中,并向试管中加入异戊烷,然后用液氮将其迅速冷却至 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (时间需要控制在大概 3 min 左右),使土样中的水变成冰,之后迅速把冷却后的土样放入到冷冻干燥机中,进行连续抽空 24 h 以上,使非晶态的冰升华排出^[15]。采用冷冻真空升华干燥法制备土样反映土样天然结构形貌,从而将土样因失水而发生体积收缩的可能性降至最低^[16-17]。而其他方式脱水会破坏土样原有结构,从而对破坏后和没破坏的结构进行对比。

(2)烘干法:在烘箱中放入已经制作好的压汞土样,温度设定为 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$,在此条件下进行连续 12 h 的烘干。

(3)恒温恒湿箱脱湿法:将制好的压汞土样放进恒温恒湿箱,设定好温湿度,脱湿到样品质量不再

发生变化为止。

(4)风干法:将样品放置于阴凉、通风、干燥处,持续 2 个月时间,以保证土样在自然状态下完全风干。

无论是采用哪一种土样干燥方法,制备试样过程中都应注意尽量减小对土样的扰动。实验中采用相同含水率试样,并保证试样的完全干燥,从而保证各实验之间脱水率一致。冻干法由于温度降低的原因会产生明显的裂隙,这对压汞实验会产生一定的影响,但是压汞实验的实际情况无法把裂隙单独取出分析,故在此算作大孔隙处理。最后将以上制备好的土样送到微观实验室进行微观实验。

3.4 原状样压汞试验结果与分析

图 2 中 401、402 为抽气饱和的原状样分别经由冻干和恒温恒湿箱脱湿、403 为未经抽气饱和的原状样经由冻干后做压汞试验取得的曲线。

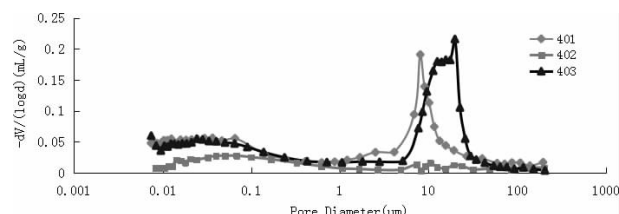


图 2 不同孔隙孔径分布

从图 2 中可以看出原状土冻干后的孔径分布曲线为单峰曲线,脱湿以后的原状样曲线上单峰消失,曲线整体下沉;抽气饱和前后的原状样内部孔隙孔径的分布发生较大的变化,饱和前单峰出现在孔径 $6\text{—}30\text{ }\mu\text{m}$ 的区域,峰值 0.223 mL/g 对就孔径 $18.9\text{ }\mu\text{m}$,饱和后曲线上的单峰向左移动,出现在孔径 $2\text{—}20\text{ }\mu\text{m}$ 的区域,同时峰值也略有降低,峰值 0.201 mL/g 对就孔径 $7.7\text{ }\mu\text{m}$;三种土样中孔径 $0.1\text{—}1\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙基本相同;孔径小于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙饱和和后略高于未饱和土样,脱湿后明显增加减少。即在原状样抽气饱和主要影响的是孔径 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以上的孔隙,使这一部分的孔隙缩小;而恒温恒湿箱脱湿使得所有的孔隙都要减少,只是减少的程度不同,而孔径 $0.1\text{—}1\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙变化不明显。

在图 3 孔隙累积曲线上可以看出饱和后的累计孔隙体积要小于饱和前的,其值分别为 0.169 mL/g 和 0.186 mL/g ,两者比例为 90.91% ;脱湿样总的累计体积 0.079 mL/g ,明显小于冻干样,只有冻干样的 42.80% 和 47.07% 。脱湿样孔径的累积体积在大于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 时要大于冻干样,在小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 时孔隙的累积体积明显小于冻干样。

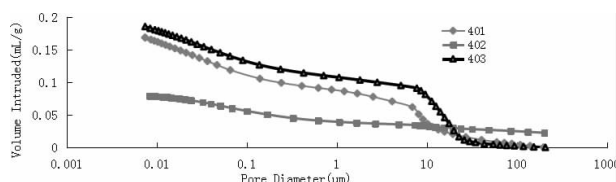


图3 大于某孔径的孔隙累积体积

图4中,在大于10 μm 区域,脱湿样孔隙累积体积与总孔隙的百分比要远大于冻干样,脱湿样在一开始就有一个较大的值,说明在脱湿条件下出现了较多的开展裂隙。

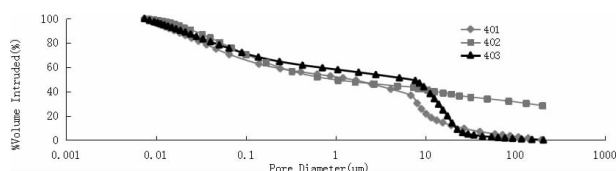


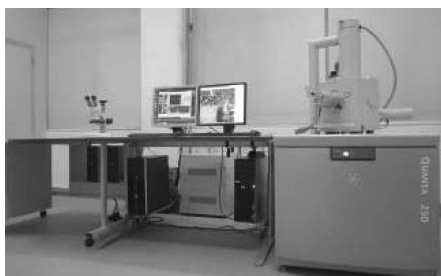
图4 大于某孔径的孔隙累积体积与总孔隙的百分比

总之,土样饱和前后总孔隙体积减小,浸水饱和后膨胀土发生膨胀,内部孔隙变小,孔隙变化主要集中在大于1 μm 和小于0.1 μm 的区域,但饱和前后孔隙孔径分布曲线形态基本相似;恒温恒湿环境下脱湿试样微观结构变化剧烈,总孔隙体积急剧减小,但脱湿样中大于10 μm 孔隙的孔隙累积体积与总孔隙的百分比要远大于冻干样,即试样脱湿后总孔隙体积要减小,但大孔隙所占相对比例急剧增加。

4 电镜试验

4.1 实验仪器

如图5所示,电镜扫描设备为 Q μ anta 250 扫描电子显微镜,本实验测试分析系统用聚焦电子束在试样表面逐点扫描成像。其中试样一般采用粉末或块状颗粒,并使用二次电子、背散射电子或吸收电子的成像信号。

图5 Q μ anta 250 扫描电子显微镜

Q μ anta 250 扫描电子显微镜可用于室内对矿物、岩石、金属、陶瓷、生物等样品以及各种固体材料

进行观察和分析研究。其技术参数如表5所示。

表5 Q μ anta 250 扫描电子显微镜技术参数

技术参数	技术指标
放大倍数	6x - 1,000,000 x 二次电子(SE)成像: 高真空模式:30 kV 时 3.0 nm;3 kV 时 8.0 nm
分辨率	低真空模式:30 kV 时 3.0 nm;3 kV 时 10.0 nm ESEM TM 环境真空模式:30 kV 时 3.0 nm 背散射电子(BSE)成像:30 kV 时 4 nm
能谱仪	20 mm ² 大面积活区; 在 MnK α 处的分辨率:保证优于 127 eV; 分析元素范围:Be-P μ 94

土体内部是一些片状粘土矿物颗粒,这些颗粒是由许多硅氧四面体以及铝氧八面体晶包所组成的,在各种连结力的作用下,按一定的组合方式组合成粘土矿物粒团,这种粒团也称为基本结构单元。由于粘土矿物粒团的颗粒细小,并且表面特征较为复杂,所以难以确定颗粒之间的界限。

4.2 电镜扫描结果与分析

经过从低倍到高倍,不同视域区间的对比观察分析,选取较具代表性的视域作显微照相。特征区域的电镜照片列于图6中,放大倍数为100、800、2 000、5 000 倍。

从图6中可以看出,倍数100电镜图片中冻干样发育有很多裂隙,脱湿样中孔隙发生了明显的闭合;倍数800、2 000电镜图片中冻干样结构单元体微小,表现为颗粒聚集状,孔隙为集聚体之间的孔隙、碎屑颗粒之间以及粘土矿物粒团与碎屑颗粒之间形成的微小孔隙,脱湿样表现为片、层状,脱湿样中孔隙也比冻干样明显缩小;倍数5 000电镜图片中冻干样粘粒连接在一起,形态表现为单一片状,脱湿样粘粒发生脱离,能看到很多的短片状卷起,由于片状矿物的叠聚而形成的微小孔隙,脱湿样中微小孔隙明显比冻干样增多。

5 结论

采用扫描电镜法和压汞法相结合的方法从定性和定量方面对膨胀土脱湿前后的微结构开展研究,对原状样经抽气饱和后土体内部孔隙变化及在恒温恒湿条件下脱湿后土体内部孔隙变化进行研究,主要得出以下结论:

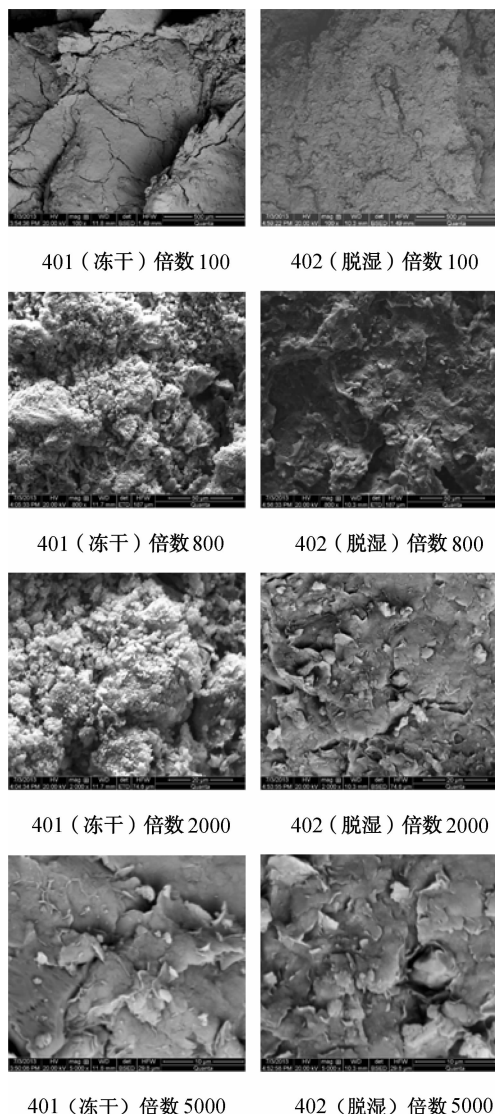


图6 不同倍数电镜图片

(1)原状膨胀土样抽气饱和后膨胀土发生膨胀,内部孔隙变小,孔隙变化主要集中在大于 $1\mu\text{m}$ 和小于 $0.1\mu\text{m}$ 的区域,饱和后总孔隙体积减小,但饱和前后孔隙孔径分布曲线形态基本相似。

(2)原状膨胀土样恒温恒湿环境下脱湿后,微观结构变化剧烈,总孔隙体积急剧减小,但大孔隙所占相对比例急剧增加。

(3)膨胀土脱湿干燥时孔隙收缩,土中的大孔隙变为小孔隙,导致小孔隙和超微孔隙增多,土样中的总孔隙体积减小

(4)通过原状膨胀土样脱湿前后结果分析比较发现,脱湿后原状样内部孔隙结构发生剧烈变化,目前关于这种结果变化在脱湿过程中如何发生的研究较少,在后续的研究中要加强这一方面的研究。

笔者只是对土体脱湿前后微观结构进行了基础

性的研究,主要还是以定性描述为主,在此基础上进行了一定的定量分析。目前大部分微观结构研究都处在定性描述层面,定量描述仍有很多难题需解决,本文对土体微观结构的研究具有一定的意义,而更深入的研究如通过微观结构研究建立膨胀土土体结构的本构模型等问题仍需进行不停的试验和探索。

参考文献:

- [1] 齐吉琳,谢定义,石玉成. 土结构性的研究方法及其现状[J]. 西北地震学报, 2001, 23(1): 99-103.
- [2] 沈珠江. 土体结构性的数学模型——21 世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95-97.
- [3] 谢定义,齐吉琳. 土结构性及其定量化研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651-656.
- [4] 洪振舜,立石义孝,邓永锋. 天然硅藻土的应力水平与孔隙空间分布的关系[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1023-1026.
- [5] 徐春华,徐学燕,沈晓东. 不等幅值循环荷载下冻土残余应变研究及其 CT 分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 572-576.
- [6] 董好刚,张卫明,贾永刚,等. 循环振动导致黄河河口潮坪土成分结构变异研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(3): 133-141.
- [7] 雷胜友,唐文栋. 原状黄土硬化屈服的损伤试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(2): 73-77.
- [8] 王朝阳,倪万魁,蒲毅彬. 三轴剪切条件下黄土结构特征变化细观试验[J]. 西安科技大学学报, 2006, 26(1): 51-54.
- [9] 姜岩,雷华阳,郑刚,等. 动荷载作用下结构性软土微结构变化的分形研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3075-3080.
- [10] 丁建文,洪振舜,刘松玉. 疏浚淤泥流动固化土的压汞试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3591-3597.
- [11] 张先伟,孔令伟,郭爱国,等. 基于 SEM 和 MIP 试验结构性黏土压缩过程中微观孔隙的变化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 406-412.
- [12] 李生林,秦素娟,薄遵昭,等. 中国膨胀土工程地质研究[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.

(下转第 81 页)

参考文献:

- [1] GB/T 50378-2014,绿色建筑评价标准[S].
- [2] 金龙,杨星光,姚浩.绿色建筑的技术经济评价体系研究[J].建筑经济,2014,(4):82-84.
- [3] 张川,宋凌,孙满月.2014年度绿色建筑评价标识统计报告[J].建设科技,2015,(6):20-23.
- [4] 孙大明,邵文晔.当前中国绿色建筑增量成本统计研究[J].动感(生态城市与绿色建筑),2010(4):43-49.
- [5] 陈国芳.浅析绿色建筑经济评价指标[J].中国新技术新产品,2011(18):187-188.
- [6] Hadas Gabay, Isaac A Meir, Moshe Schwartz, et al. Cost-benefit analysis of green buildings: an Israeli office Buildings case study [J]. Building and Environment,2014,76:558-568.
- [7] Omer Tatari, Murat Kucukvar. Cost premium prediction of certified green buildings: A neural network approach [J]. Building and Environment,2011,46(5): 1081-1086.
- [8] 张巍,吕鹏,王英.影响绿色建筑推广的因素:来自建筑业的实证研究[J].建筑经济,2008,(2):26-30.
- [9] 林震岩.多变量分析 SPSS 的操作与应用[M].北京:北京大学出版社,2007.
-
- (上接第 74 页)
- [13] 谭罗荣,张梅英,邵梧敏,等.灾害性膨胀土的微结构特征及其工程性质[J].岩土工程学报,1994,16(2):48-57.
- [14] 叶为民,钱丽鑫,陈宝,等.高压实高庙子膨润土的微观结构特征[J].同济大学学报,2009,37(1):31-33.
- [15] 王明光,刘太乾,赵丹.浅谈风干法和冻干法制备微结构试验用土样[J].山西建筑,2010,36(1):111-112.
- [16] 傅喆,叶为民,万敏.温控下高压实膨润土持水特性及预测研究[J].低温建筑技术,2009(11):78-81.
- [17] 周晖,房营光,禹长江.广州软土固结过程微观结构的显微观测与分析[J].石力学与工程学报,2009,28(增刊2):3830-3837.