

DOI: 10.11779/CJGE201503018

高压下饱和黏土 B 系数研究

商翔宇^{1, 2}, 郑秀忠², 周国庆¹

(1. 中国矿业大学深部岩土与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 为了对高压与常压固结后饱和黏土 B 系数之间存在差异性与否, 及其影响因素展开研究, 利用 GDS 三轴试验机开展了固结压力为 2 MPa 的饱和黏土等向固结试验, 其中特别设计进行了高压固结前后的 B 系数检测试验。试验结果表明: “饱和”黏土高压固结 B 系数明显小于 1 的原因在于试样无法达到饱和度 100% 的理想饱和状态, 而并非先前研究报道的高压固结后黏土样内孔隙水以物理性质明显不同于自由水的结合水为主。另外, 饱和黏土高压固结过程中, 孔压完全消散明显滞后于常规体积变形 - 时间对数曲线上主固结完成点的出现; 高压固结后饱和黏土 B 系数达到稳定的时间明显长于常压相应值。

关键词: 高压; 饱和黏土; B 系数

中图分类号: TU44 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)03-0532-05

作者简介: 商翔宇(1977-), 男, 河南汝阳人, 博士, 副教授, 主要从事深土力学、深部岩土工程等方面的研究与教学工作。E-mail: xyshang@126.com。

Coefficient B of saturated clay under high pressure

SHANG Xiang-yu^{1, 2}, ZHENG Xiu-zhong², ZHOU Guo-qing¹

(1. State Key Lab for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008,

China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In order to make an investigation into the possible difference in coefficient B of saturated clay under high and normal pressures and the relevant contributory factors, isotropic consolidation tests on saturated clay under pressures of 2 MPa are conducted by GDS triaxial apparatus, and a novel test procedure is designed to check coefficient B before and after consolidation. The test results indicate that the reason for unusually small coefficient B of “saturated” clay after high-pressure consolidation is that the soil sample cannot reach 100% ideal saturation, rather than, as reported previously, the majority of the pore water in high pressure consolidation sample being bound water whose physical characteristics obviously differ from those of bulk water. In addition, the complete dissipation of the pore water pressure significantly lags behind the end of the primary consolidation in volume-logarithmic time curve during high pressure consolidation tests on saturated clay, and the process of coefficient B of consolidated clay under high pressure getting to be stable takes much longer time than that under normal pressure.

Key words: high pressure; saturated clay; coefficient B

0 引言

深部矿井建设与研究实践表明, 深部黏性土的力学性质与浅部不同^[1-2], 同一黏性土高压力学性质与常规压力不同^[3-5]。

为了研究黏性土在高压下的特性, 首先要对高低压状态的分界进行确定。矿山建设认为超过 150 m (3 MPa) 埋深的土为高应力状态的深层土^[6]; 三浦哲彦等^[7]认为室内土工试验应力超过 1 MPa 为高应力; 马金荣等^[3]以 50 m (1 MPa) 为界划分深土 (高应力)、浅土 (低应力)。笔者^[4]研究发现, 对于山东某矿区的深部重塑饱和黏土, 高压力下该饱和黏土的固结压缩曲线、

渗透系数、剪切强度包线等均在 1.6 MPa 处产生转折差异, 并以 1.6 MPa 作为该黏土高低应力水平的分界点。

孔隙水压力系数表示土中孔隙水与外荷载之间的关系。通过对孔隙水压力系数的研究, 可以得到外荷载作用下土中有效应力的分布、传递以及变化规律。为了描述三轴试验中等向围压引起的孔隙水压力变化情况, Skempton^[8]于 1954 年提出孔隙水压力系数 B , 并作如下定义:

基金项目: 国家自然科学基金项目(51009136); 江苏省自然科学基金项目(BK2011212); 中国博士后自然科学基金项目(2012M521145)

收稿日期: 2014-06-11

$$\Delta u = B \cdot \Delta \sigma \quad , \quad (1)$$

$$B = 1/[1 + nC_v/C_b] \quad , \quad (2)$$

式中, n 表示土的孔隙率, Δu 表示孔隙水压力增量, $\Delta \sigma$ 表示等向围压增量, C_v 表示孔隙中气水混合物的体积压缩系数, C_b 表示土骨架的压缩系数(原文中用 C_s 表示)。

对于常压下岩土材料 B 系数的研究很多, B 系数能够较好的反映土体中孔压以及有效应力的变化规律, 但关于高压下饱和黏土 B 系数的研究有限。

Graham^[9] 在研究有效应力原理对饱和密实黏土的适用性中发现, 对于最大有效固结压力为 1 MPa 的等向固结试验, 密实黏土的 B 系数为 1。

Jiang^[10] 通过弹性波法对日本大阪湾地表下 100~1500 m 深天然沉积黏土的土骨架体积压缩模量进行了研究, 得到该处土体的 B 系数在 0.50~0.95 之间, 且总体上随深度的增加而减小。

李文平^[5] 对张双楼矿底饱和粉质黏土进行了逐级加载的等向固结试验。试验中发现当黏土试样在 1 MPa 压力下固结完全以后, 孔隙水压力系数仅有 0.324, 远小于 1。其分析认为, 高压固结以后, 黏土中含水率急剧减小, 试样中的孔隙水以弱结合水为主, 黏性土的性质发生很大变化, 从而导致 B 系数小于 1。

上述有限的高压下黏性土研究表明, 无论原状土还是重塑土, 都出现过高压下 B 系数明显小于 1 的现象^[5, 10], 但也有 B 等于 1 的试验结果^[9]。

基于与土骨架相比土颗粒和孔隙水压缩性可忽略的假设, Skempton 提出了如式(1)所示的 B 系数公式。对于土骨架压缩性非常小的高压密实土, 式(1)不再适用。Skempton^[11]、Bishop^[12]、Lade 等^[13]、陈晶晶等^[14]从变形等效的角度, 通过理论推导得出考虑土颗粒和孔隙水压缩性的 B 系数表达式:

$$B = 1/\left[1 + n\frac{C_w - C_s}{C_b - C_s}\right] \quad , \quad (3)$$

式中, n 表示土的孔隙率, C_b , C_s , C_w 分别表示土骨架、土颗粒和孔隙水的压缩系数。

从式(3)可以看出, 只有当孔隙水的压缩系数 C_w 远远小于 C_b , 且 C_s 接近为 0 时, 孔隙水压力系数 B 才能接近于 1。根据已有的试验资料^[14-15], 对于绝大多数岩土介质材料 C_s 一般介于 $(1 \sim 3) \times 10^{-8}$ kPa⁻¹ 之间, C_w 约为 48×10^{-8} kPa⁻¹。Akai 等^[16] 通过对沉积岩(软岩)的测定, 得到的 B 系数为 0.865; 对密砂的测定, 得到的 B 系数为 0.987。对于黏土材料, B 系数应大于 0.987。本文利用文献[5]的试验数据, 根据式(3)对其 B 系数进行计算, 得到 1 MPa 固结后, B 系数的计算值为 0.996, 远大于实测值。

从理论上讲, 不论饱和黏性土处于高压还是低压状态, B 系数应当总是等于或者很接近于 1。试验中饱和黏土高压下与常规压力下 B 系数的差异性, 无法从 B 系数的理论公式(3)中得到合理解释。事实上, 有研究表明, 初始饱和的土样在固结后 B 系数会减小。

早在 1957 年, Bishop^[17] 对黏性土的孔压消散试验研究中发现, 孔隙水压力系数随着固结次数的增加而逐渐减小, 并且认为与试样的起始饱和度有关。Black 等^[18] 对不同饱和度的黏土施加 68.95, 344.75, 1034.25 kPa 固结压力, 得到孔压系数随着固结压力增大而减小的现象, 分析认为是固结后压缩系数减小的原因。娄炎^[19] 对标准砂进行最大 350 kPa 的逐级加载等向固结试验, 测得各级荷载下的孔隙水压力系数。试验中发现, 当试样饱和时, B 系数会随着固结压力的提高而逐渐减小, 但变化不会很大; 当试样不饱和时, B 值将随着加荷次数的增加而明显减小。随后, 王志玲等^[20] 通过最大 300 kPa 的黏土等向固结试验研究发现, 即使土样的饱和度达到 95% 以上, 固结后土样的 B 系数也将明显小于 1。可以看出, 饱和度对 B 系数的影响很大, 但文献[17~20]给出的结论对高压黏土是否适用尚属未知。

对于高压下黏土 B 系数的研究, 李文平^[5]、Jiang^[10]、Graham^[9] 的研究结论并不统一, 并且从 B 系数的理论公式上得不到合理的解释。从以上论述中可以看出, B 系数高低压下的差异性, 可能是高压下黏土试样中弱结合水的影响, 也可能是试样未达到理想饱和的影响。本文旨在探究高压下影响 B 系数的关键因素。

1 试验方案与仪器

1.1 试验用土与仪器

本文试验中使用的黏土取自山东某矿区深厚表土矿井井底, 与文献[4]中土样相同。黏土的相对密度 2.715, 初始含水率 8%; 颗粒分析结果表明该黏性土为细粒土; 塑限含水率 23.67%, 液限含水率 51.88%, 塑性指数 28.2。

试验采用英国 GDS 公司生产的三轴试验机进行反压饱和、等向固结以及 B 检测试验。该试验机的围压能够达到 3 MPa, 可以精确控制围压压力、反压压力, 测量排水体积、孔隙水压力, 控制系统界面可视化程度高, 易于操作。

1.2 土样制备与系统饱和

试样中的黏土经风干后, 通过橡皮锤击碎, 过 1 mm 筛。试样干密度 1.453 g/cm³, 直径 39.1 mm, 高度 80 mm。将风干土均分成 5 份, 分 5 层击实, 每层土击

实至16 mm后，用修土刀刮毛，加入下一层土，直至干土全部装入制样器中。制样完成以后，将试样置于真空饱和装置中抽真空。待压力表指针不再变化时继续抽真空2 h；然后打开进水管吸入蒸馏水至超过制样器高度，并浸泡24 h。

通过反压控制器将GDS三轴试验机上的管路中充满无气水；同时将透水石、滤纸、乳胶膜等湿润备用；然后将真空饱和的试样取出套上乳胶膜置于GDS三轴试验机上。根据文献[20]的建议，首先增加围压20 kPa，让试样预固结，排出透水石、乳胶膜与试样之间的水；然后在GDS三轴试验机上逐级同时施加围压和反压进行反压饱和，直至孔隙水压力系数 B 接近于1。

1.3 试验方案

如引言中所述，文献[4]中建议所研究黏土的高低压分界点为1.6 MPa左右。该结论的微观基础在于，大于1.6 MPa的高压固结后，黏土内部孔隙水性质发生了变化，由以自由水为主变成以结合水为主^[21]。因此，2 MPa固结完成后，土样内含水率可降至弱结合水含水率甚至更小。由于本文所使用设备的最大围压为3 MPa，考虑到固结前后的反压饱和过程要增加围压，本文中设计的固结压力为2 MPa。

为了探究影响 B 系数在高低压下差异性的关键因素，本文设计的试验方案为：试验前对试样进行真空饱和、逐级反压饱和；待孔隙水压力系数 B 接近于1后，进行高压固结排水试验；固结排水完成后，进行 B 检测；若试样的孔隙水压力系数小于1，则增加反压，继续进行反压饱和，检测孔隙水压力系数 B 的变化情况。

表1 不同反压饱和后 B 系数

Table 1 Coefficient B under different back pressure

反压/kPa	B 系数	
	固结前	固结后
100	0.943	
200	0.963	
300	0.964	
500	0.993	0.762
600		0.968
700		0.997

2 分析与讨论

2.1 试验结果

试样在真空饱和缸中进行标准的真空饱和后（通过含水率计算得到试样的饱和度为98.3%），装入三轴试验机上，逐级同时增加相同的围压和反压进行反压饱和。各级压力下反压饱和后的孔隙水压力系数随时间的变化规律如图1所示，其稳定值如表1所示。当完成500 kPa的反压饱和后，得到最大的孔隙水压力系数为0.993。可以认为，试样已经饱和。

反压饱和完成以后，将围压增加2 MPa，待压力

稳定后，打开上下端阀门进行双面排水固结。试样的起始含水率为31.99%，排水固结后的含水率为16.02%，低于文献[5]中提及的弱结合水含水率20.95%（弱结合水含水率为塑限含水率的0.885倍^[22]）。排水过程中的总排水量为22.285 cm³，试验中的排水体积-时间对数曲线关系如图2所示。

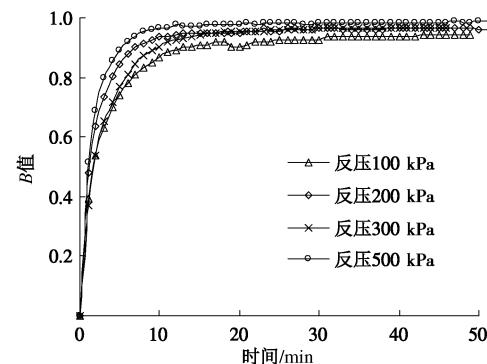


图1 固结前 B 系数

Fig. 1 Coefficient B before consolidation

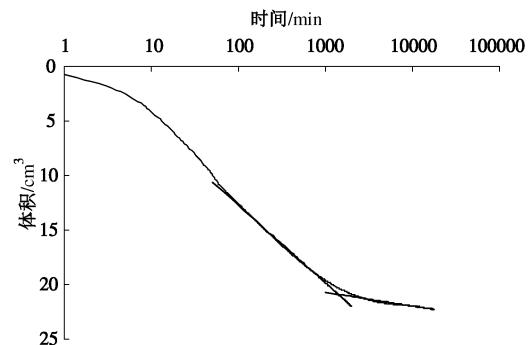


图2 固结排水体积-时间对数曲线

Fig. 2 Curve of drainage volume - logarithmic time

当孔隙水压力稳定时，认为固结完成，开始对试样进行 B 系数检测。2 MPa排水固结完成后的 B 系数及试样在600 kPa和700 kPa反压饱和后的 B 系数变化规律如图3所示，其稳定值如表1所示。

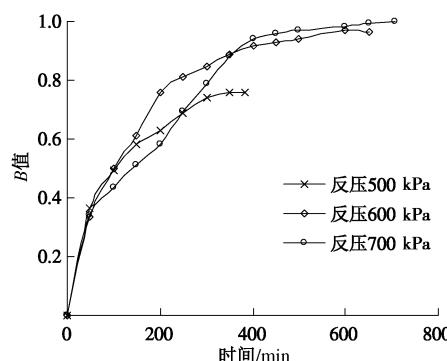


图3 固结后 B 系数

Fig. 3 Coefficient B after consolidation

2.2 试验分析

(1) B 系数

经过多级反压饱和, 固结前的孔隙数压力系数 B 达到了0.993, 接近于1, 可以认为试样已经完全饱和。试样在2 MPa的等向固结压力下, 经过11 d的排水固结, 再次进行 B 检测, 得到 B 系数为0.762(此时反压为500 kPa)。这说明, 固结以后试样的孔隙水压力系数减小。这一现象与文献[16]对不同干密度的黏性土进行的最大300 kPa逐级加载固结试验结果一致。初次 B 检测后, 继续增加围压和反压, 分别在600 kPa和700 kPa的反压下进行反压饱和; 反压饱和后分别进行 B 检测, 得到的 B 系数分别为0.968和0.997。可以看出, 固结以后反压饱和可以提升试样的孔隙水压力系数, 在700 kPa的反压下达到了0.997。

提高反压, 并不改变孔隙中的含水率及其以弱结合水为主的性质。因此, 高压固结后, 即使土样内部以弱结合水和强结合水为主, 饱和土 B 系数为1的性质并不受影响。另外, 当孔隙中含有少量气体时, C_w 明显增大(当 $S_r=0.99$ 时, C_w 和 C_b 即为一个量级^[19])。在高压固结后, 由于骨架的压缩系数 C_b 减小, C_w 和 C_b 更加接近。因此, 由式(3)得出的 B 系数也就远小于1。“饱和”黏土高压固结后 B 系数远小于1的现象, 并非由于黏土中水的性质改变而产生的, 而是由试样在制样以及装样过程中, 不能达到理想饱和度产生的。

(2) 主固结完成标准与土骨架响应

为了加快排水固结, 本试验采用双面排水的方法。在试样的体积变形-时间对数曲线上出现完整反弯段之后的第8000分钟, 关闭底部排水阀门, 测量底部孔隙水压力, 同时保持上部排水阀门打开。若孔压不变, 则说明试样已经固结完成; 若孔压增加, 则保持上部单面排水, 直至底部孔压稳定不变。

通过作图法绘出主固结和次固结曲线的切线, 并交汇于一点, 该点所对应的时间为1030 min(如图2所示)。然而, 由图4所示的孔隙水压力-时间曲线可以看出, 在第8000分钟关闭底部阀门时, 底部孔隙水压力上升, 说明此时土样内部孔隙水压力并未消散完全。由此可以看出, 高压下试样的主固结完成后, 试样内部的孔隙水压力并未完全消散; 而常规压力下, 主固结完成和孔隙水压力消散完全几乎同时达到^[23]。因此, 高压下采用常规的固结曲线来判断试样固结完成并不合理。

另外, 对比图1和图3可以看出: 在固结压力为20 kPa时, 各级反压下的孔隙水压力系数在加围压10 min后即达到稳定值; 2 MPa固结后, 孔隙水压力系数在加围压500 min后才能达到稳定值。其原因可能是高压固结后黏土内孔隙水以结合水为主, 而结合水的黏性较之自由水更大, 从而使水-黏土体系表现出更加明显的迟滞性。此过程的机理有待进一步研究。

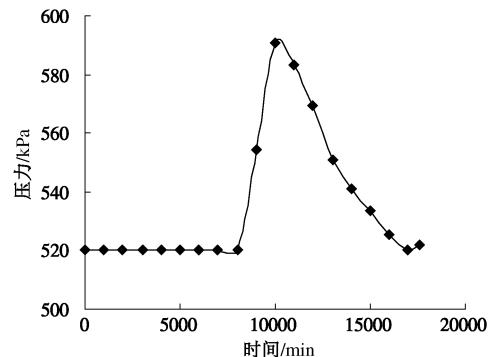


图4 排水固结时孔隙水压力变化曲线

Fig. 4 Curve of pore water pressure in consolidation

3 结 论

(1) 高压固结后, 黏性土的孔隙水压力系数明显小于1的现象, 并非由黏性土在高压固结后土中孔隙水性质改变产生的, 而是黏土试样在实际试验条件下很难达到理想饱和状态, 试样中的少量气体增加了孔隙水的压缩性导致的。这种现象在高压固结后土骨架的压缩系数变小的情况下尤为明显。

(2) 对于高压固结试验, 孔隙水压力完全消散要明显滞后于常规体积变形-时间对数曲线上主固结完成点的出现。高压固结完成后, 增加围压, 孔隙水压力系数达到稳定值所耗时间是常规压力的50倍; 该现象有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 张永双, 曲永新. 鲁西南地区上第三系硬黏土的工程特性及工程环境效应研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 446 - 449. (ZHANG Yong-shuang, QU Yong-xin. Study on the engineering properties and engineering-environmental effects of neogene hard clays in south-west of Shandong province[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4): 446 - 449. (in Chinese))
- [2] 许延春. 深部饱和黏土的力学性质特征[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 26 - 30. (XU Yan-chun. Mechanics characteristics of deep saturated clay[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(01): 26 - 30. (in Chinese))
- [3] 马金荣, 秦勇, 周国庆. 黏土的高压三轴剪切特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(2): 176 - 179. (MA Jin-rong, QIN Yong, ZHOU Guo-qing. Research on tri-axial shear properties of clay under high pressures[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(2): 176 - 179. (in Chinese))
- [4] 商翔宇, 余海岁, 周国庆, 等. 高应力水平下深部黏土力学特性微观分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 363 - 368.

- (SHANG Xiang-yu, YU Hai-sui, ZHOU Guo-qing, et al. Micro analysis of mechanical characteristics of deep clay under high stress level[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(2): 363 – 368. (in Chinese))
- [5] 李文平. 饱水黏性土高压密实过程中孔压及体应变变化试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(6): 666 – 669. (LI Wen-ping. Variation of pore water pressure and volume strain of saturated clayey soil during high pressure compression test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(6): 666 – 669. (in Chinese))
- [6] 殷家瑜, 赖安宁, 姜朴. 高应力下尾矿砂的强度与变形特性[J]. 岩土工程学报, 1980, **2**(2): 1 – 10. (YIN Jia-yu, LAI An-ning, JIANG Pu. Strength and deformation characteristics of tailing under high pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1980, **2**(2): 1 – 10. (in Chinese))
- [7] 三浦哲彦, 山本哲郎. 砂の高压三轴压缩试验の结果に及ぼす2、3の要因について[M]// 日本土质工学会论文报告集, 1976, **16**(3): 123 – 128. (MIURA Norihiko, YAMAMOTO Tetsuro. Some factors affecting the results of high pressure triaxial test on sands[M]// Mechanics and Foundation Engineering, 1976, **16**(3): 123 – 128. (in Japanese))
- [8] SKEMPTON A W. The pore-pressure coefficients A and B [J]. Géotechnique, 1954, **4**(4): 143 – 147.
- [9] GRAHAM J. The effective stress concept in saturated sand clay buffer[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, **29**: 1033 – 1043.
- [10] JIANG Ming-Jing. Pre-failure behavior of deep Situated Osaka clays[J]. China Ocean Engineering, 1998, **12**(4): 453 – 565.
- [11] SKEMPTON A W. Effective stress in soils, concrete and rocks[C]// Proceedings of the Conference on Pore Pressure and Suction in Soils. London, 1960: 4 – 16.
- [12] BISHOP A W. The influence of an undrained change in stress on the pore pressure in porous media of low compressibility[J]. Géotechnique, 1973, **23**(3): 435 – 442.
- [13] LADE P V, DE BOER R. The concept of effective stress for soil, concrete and rock[J]. Géotechnique, 1997, **47**(1): 61 – 78.
- [14] 陈晶晶, 雷国辉. 决定饱和岩土材料变形的有效应力及孔压系数[J]. 岩土力学, 2012, **33**(12): 3696 – 3703. (CHEN Jing-jing, LEI Guo-hui. Effective stress and pore pressure coefficient controlling the deformation of saturated geomaterials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(12): 3696 – 3703. (in Chinese))
- [15] OKA F. Validity and limits of the effective stress concept in geomechanics[J]. Mechanics of Cohesive-Frictional Materials, 1996, **1**: 219 – 234.
- [16] AKAI K, ADACHI T, NISHI K. Mechanical properties of soft rocks[C]// Proc 9th ICSMFE. Yokyo, JSSMFE, 1977: 7 – 10.
- [17] BISHOP A W. The measurement of soil properties in the triaxial test[M]. London: Edward Arnold Publishers LTD, 1957: 131 – 136.
- [18] BLACK D K, LEE K L. Saturating laboratory sample by back pressure[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, **99**: 75 – 93.
- [19] 娄炎. 孔隙水压力系数与饱和度的关系[J]. 岩土工程学报, 1985, **7**(3): 62 – 67. (LOU Yan. The relationship of pore water coefficient and saturability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **7**(3): 62 – 67. (in Chinese))
- [20] 王志玲, 方涤华, 吕洪予. 击实黏土固结前后孔隙水压力系数的变化及对强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(2): 47 – 54. (WANG Zhi-ling, FANG Di-hua, LÜ Hong-yu. Pore pressure parameter of compacted clay consolidation and its effect on strength properties[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(2): 47 – 54. (in Chinese))
- [21] SHANG Xiang-yu, ZHOU Guo-qing, KUANG Lian-fei, et al. Compressibility of deep clay in East China subjected to a wide range of consolidation stresses[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, **52**(10): 1139.
- [22] 李文平, 于双忠, 王柏荣, 等. 煤矿区深部黏性土吸附结合水含量测定及其意义[J]. 水文地质工程地质, 1995, **22**(3): 31 – 34. (LI Weng-ping, YU Shuang-zhong, WANG Bai-rong, et al. The measurement and significance on adsorbed bound water of deep cohesive clay in diggings[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1995, **22**(3): 31 – 34. (in Chinese))
- [23] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Theory and numerical calculation of soil engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese))