

等加载速率下软土固结特性试验研究

周文渊¹, 闪黎², 宋新江¹, 徐海波¹

(1. 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 安徽 蚌埠 233000;
2. 淮河水利委员会 治淮工程建设管理局, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 等加载速率固结试验是在控制固结应力的施加速率为一常数条件下研究土体固结特性的试验方法。采用GDS高级固结仪, 开展了四种加载速率与瞬时加载的软土固结试验研究, 分析了土样的固结变形特性与孔隙水压力变化规律。试验与分析结果表明, 加载速率越大土样固结速率越快, 土样完成固结所需的时间越短; 土体的最终变形量由固结应力大小决定, 与加载速率无关; 随着固结应力施加速率的增加, 加载完成时土样的平均固结度呈下降趋势; 加载速率越大, 土样底部的孔隙水压力上升速率越快, 孔隙水压力极值越大; 孔隙水压力在固结应力加载完成前达到极值, 随后呈下降趋势, 有效应力迅速增加。

关键词: 等加载速率固结; GDS高级固结仪; 孔隙水压力; 固结变形; 固结度; 最终变形量; 软土
中图分类号: TU447 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0695-05

Research on consolidation test of soft clay under constant loading rate

ZHOU Wen yuan¹, SHAN Li², SONG Xin jiang¹, XU Hai bo¹

(1. Anhui and Huaihe River Water Resources Research Institute, Bengbu 233000, China;
2. Huaihe River Project Construction Authority of Huaihe River Water Resources Committee, Bengbu 233000, China)

Abstract: Consolidation test under constant loading rate is the test method for the consolidation process of clayey soil with a constant rate of control consolidation stress. Consolidation tests with four different loading rates and instantaneous loading were carried out using the GDS advanced consolidation testing system. The consolidation deformation characteristics of soft clay and the change law of pore water pressure were analyzed. The findings indicated that (1) the faster of loading rate, the larger deformation rate and the shorter time for consolidation of soil sample; (2) the final deformation of soil sample is independent of the loading rate but dependent on the magnitude of consolidation stress; (3) with the increasing of loading rate of consolidation stress, the average consolidation degree of soil sample decreases after loading; (4) the higher the loading rate, the faster the increasing rate of pore pressure in the soil sample bottom and the larger the extreme value of pore pressure; and (5) the pore pressure reaches the maximum before the completion of loading of consolidation stress, then decreases while the effective stress increases rapidly.

Key words: consolidation under constant loading rate; GDS advanced consolidation testing system; pore pressure; consolidation deformation; degree of consolidation; final deformation; soft clay

固结是土体在外部荷载作用下, 超静孔隙水压力减少, 有效应力增加, 土体压缩的过程^[1]; 荷载作用、孔隙水压力与压缩变形是固结试验研究的重点。常规固结试验是研究土体固结特性最常用的方法, 但存在耗时长、不能监测固结过程中孔隙水压力的变化、对土样扰动较大并且加载方式与实际施工情况差别较大等不足^[2]。为更好地模拟工程中实际

的固结加载方式, 相关学者提出了等加载速率固结试验方法 (Constant rate of loading consolidation test, 简称CRL), 即加载过程中控制试样的固结应力增长(加载速率)为常数的一种固结试验。CRL固结试验的加载方式与岩土工程实际加载相似, 不仅克服了常规固结试验的缺点, 而且具备加荷稳定, 操作简单, 对土样扰动小的特点^[3-5]。

收稿日期: 2014-10-29 修回日期: 2015-06-18 网络出版时间: 2015-07-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150724.0911.002.html>

基金项目: 水利部科技推广计划项目(TG1414); 水利部科技推广计划项目(1408085ME99); 2015年安徽省省属社会公益类科研机构专项资金项目

作者简介: 周文渊(1988-), 男, 河南周口人, 助理工程师, 主要从事岩土工程试验研究。E-mail: 574058817@qq.com

通讯作者: 宋新江(1970-), 男, 安徽滁州人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事岩土工程试验研究。E-mail: sxj06@163.com

国外学者较早对等加载速率固结试验开展了研究, Aboshi^[9] 等首次提出了等加载速率试验, 并基于 Schiffman^[7] 变荷载一维固结理论, 确定了固结系数随有效应力变化的关系式。Von Fay^[8] 等发现常规固结试验与 CRL 固结试验测得的固结系数与有效应力的关系曲线基本一致; CRL 固结试验所需的时间取决于应变率和土体的渗透与压缩特性, 而且远小于常规固结试验, 认为 CRL 固结试验可代替常规固结试验。Hsu^[9] 等推广了 Olson^[10] 假定固结系数为常数的变荷载问题的一维固结解, 通过 CRL 试验总结出固结系数随时间变化的经验公式, 进而推导出超静孔隙水压力与平均位移的解析解; 与 CRL 试验结果对比表明, 变固结系数条件下的求解结果要优于常固结系数条件下的求解结果。国内方面, 孟晓非^[11] 利用计算机对等加载速率固结试验过程进行了模拟分析, 提出了利用 CRL 试验的变形速率~ 平均有效应力曲线确定前期固结应力的方法; 王正宏^[12] 认为连续加荷法较常规分级加荷法更接近于工程实际中荷重增长规律, 并进行了等速加荷试验与控制梯度固结试验对比研究。

加载方式是影响土体固结特性的主要因素。本文利用 GDS 高级固结试验系统, 针对软土开展等加载速率的固结试验与瞬时加载固结试验研究, 归纳分析不同加载速率下土样的固结变形特性与孔隙水压力消散特性, 并根据试验结论对实际工程的施工加载速度控制提出参考意见。

1 试验土样、仪器与方法

1.1 试验土样

固结试验采用的土样为高岭土。其主要矿物成分为高岭石。颗粒分析试验结果表明: 该土样中粒径 $d \leq 0.005 \text{ mm}$ 的黏粒含量达到 80% 以上。高岭土的物理性质指标见表 1。

表 1 高岭土的基本物理力学性质

Tab. 1 Basic physical and mechanical properties of kaolin

指标名称	比重	塑限 (%)	液限 (%)	塑性指数
指标值	2.62	22.2	43.7	21.5

1.2 试验仪器

试验采用的仪器为英国 GDS 公司生产的 GDS 高级固结试验系统(GDS Advanced Consolidation Testing System)。该固结试验系统完全使用计算机进行控制, 试验过程中的荷载施加及数据采集的完全自动化, 数据采集最短间隔为 2 s, 可测量固结应力、反压、轴向位移、孔隙水压力和体积变量, 克服了传统固结试验手动加压、人工记录数据、耗时费力且数据采集点不够等不足。

如图 1 所示, 该固结试验系统由硬件部分和软件部分组成。硬件部分包括固结压力室、GDS 线性位移传感器、GDS 孔隙水压力传感器、8 通道数据采集装置、GDS 2 MPa/200 mL 轴向压力/体积控制器等。软件部分为试验过程控制软件 GDSLAB, 安装在计算机内。

GDS 高级固结系统根据加荷方式可完成瞬时加载、分级加载、等应变速率和等加载速率等形式的固结试验。同时, 固结压力室底部的孔隙水压力传感器, 可以记录试验过程中试样底部孔隙水压力变化, 研究固结试验土样中孔隙水压力的变化规律。

固结容器内放置直径 76.2 mm, 高度 20 mm 的试样(图 1), 容器顶部安防位移传感器, 测定固结过程中试样的轴向变形, 容器底部连接孔隙水压力传感器, 测定试样的底部孔压。固结应力通过计算机软件控制轴压控制器施加, 作用于试样上表面的透水铜板上; 反压通过轴压控制器施加, 作用于试样内部, 主要用于饱和土样和土样饱和度的 B 值检测。试验前按照《土工试验方法标准》^[13] (GB/T 50123) 对仪器各元件进行校验。

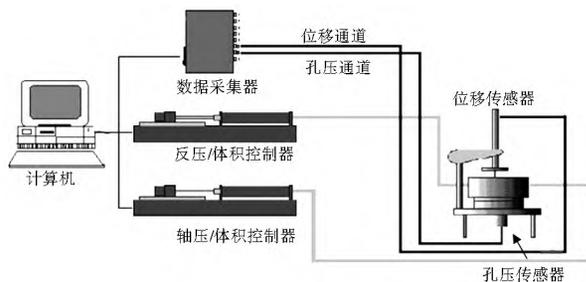


图 1 GDS 高级固结仪试验系统

Fig. 1 GDS advanced consolidation testing system

1.3 试样制备与饱和

试验所采用的土样为重塑土, 其试样制备方法严格按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123) 里的要求操作。采用土膏法制备试样, 取代表性风干土样, 加水调成土膏状, 注意制备土样的中水不能自由析出, 把制备好的土样置于密闭容器内 20 h 以上, 然后测定土膏的含水率, 控制试样含水量的平行差值不超过 1%。本文试验制备试样的初始含水率为 64.4%, 是土样液限的 1.47 倍。装样时先称取土膏质量, 然后用调土刀将土膏装入固结容器内, 装好试样后称剩余土膏质量, 计算装入土膏的质量, 控制试样的干密度为 0.98 g/cm^3 。

采用 GDS 固结仪对土样进行反压饱和, 具体方法是: 通过 GDS 固结系统的轴压控制器与反压控制器对试样同时施加固结应力 p_1 与反压 p_2 , 为防止土样膨胀, 需要保证土样中有一个较小的有效应力, 本试验中固结应力比反压大 2 kPa, 即 $\Delta p = p_1 - p_2 = 2 \text{ kPa}$, 每级反压饱和的时间为 4 h。通过计算试样底部孔隙水压力增量 Δu 与 Δp 的比值来判断试样是否饱和, 当 $B = \Delta u / \Delta p \geq 0.95$ 时, 可认为土样饱和; 若 B 值小于 0.95, 则应确保 $\Delta p = 2 \text{ kPa}$ 不变, 同时增大反压与固结应力, 继续进行反压饱和 4 h 后, 再计算 B 值, 直至 B 值大于 0.95。

1.4 试验方案

等加载速率固结试验采用 200 kPa/h、400 kPa/h、800 kPa/h 和 1 600 kPa/h 四种加载速率, 所施加的最终固结应力为 400 kPa, 以不同的加载速度达到最终荷载后, 保持 400 kPa 固结应力不变持续至固结试验完成。瞬时加载固结试验采用直接施加 400 kPa 的固结应力的加载方式。为确保试验结果可靠, 每组固结试验进行 3 个平行试验, 应用数理统计的方法对试验数据进行整理。

2 试验结果分析

2.1 试样变形

图 2 为瞬时加载 400 kPa 固结应力和以 200 kPa/h、400

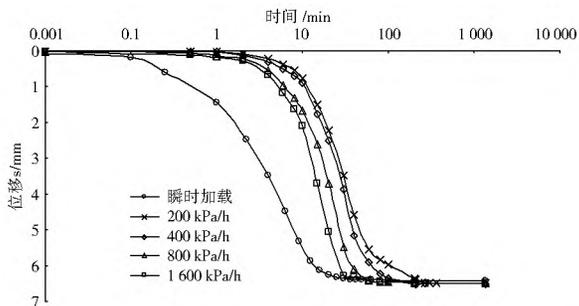


图2 瞬时加载与等加载速率固结试验 $s \sim \log t$ 曲线

Fig. 2 Axial strain curves versus time under different loading rates and instantaneous loading

200 kPa/h、400 kPa/h、800 kPa/h、1 600 kPa/h 四种加载速率加载至 400 kPa 固结应力,土样位移与时间对数关系的 $s \sim \log t$ 曲线。从图中可以看出,不同加载速率下试样的位移~ 时间对数曲线均呈“S”形状,梅国雄等^[14-15]从线性加载固结理论和土体的本构模型出发给出了这一现象的证明。

四组等加载速率固结试验中,加载速率越大,土样固结速率就越快;相同的时刻,加载速率越大土体固结产生的压缩变形值越大,固结历时相同时,加载速率越大的试样承受的固结应力相应也越大。瞬时加载土样最先固结完成,在等加载速率固结试验中,加载速率越大,土样变形达到最终变形量所需的固结时间越短。

不同固结速率下土样固结稳定后的最终压缩量基本一致,并且与瞬时加载固结试验结果一致。虽然加载速率不同,但其施加的最终固结荷载是相等的(400 kPa),土样在相等的荷载下固结稳定的,故其最终变形量也应相等。由此可见,加载速率影响土样的固结速率,而最终变形量是由土样所承受的最终固结应力大小确定的。

在某一固结应力下,土体某时刻的变形量与最终变形量的比值定义为平均固结度。表 2 为四组试验荷载达到目标荷载 400 kPa 时的压缩变形量 S_1 与试样最终变形 S_2 的比值关系,即加载完成时的土样所达到的固结度。

加载速率 200 kPa/h、400 kPa/h、800 kPa/h、1 600 kPa/h 分别历时 120 min、60 min、30 min 和 15 min 达到最终固结应力 400 kPa; 对应加载完成时刻土样的平均固结度分别为 0.94、0.91、0.84、0.57。加载速率越大,加载完成时土样的平均固结度越小,加载完成后试样的变形值越大。

表 2 不同加载速率下土样固结变形特性

Tab. 2 Consolidation deformation characteristics of soil sample under different loading rates

加载速率/(kPa·h ⁻¹)	S_1 与 S_2 的比值 (加载完成时试样平均固结度)
200	0.94
400	0.91
800	0.84
1 600	0.57

在工程实践中,经常出现施工期内土体变形过大和工后沉降量大的现象。从本文等加载速率固结变形特性研究成果来看,荷载施加速度过快有可能是导致这种现象出现的一

个因素。

2.2 试样底部孔隙水压力

图 3 为四种加载速率固结试验中的试样底部孔隙水压力变化曲线。从图中可以看出,加载速率对试样底部的孔隙水压力有显著的影响。试验初始阶段固结应力增加使孔隙水压力呈现出上升趋势,加载速率越大,孔隙水压力上升的速率也越大,达到孔隙水压力极值所需的时间也越短。加载速率 200 kPa/h、400 kPa/h、800 kPa/h、1 600 kPa/h 对应的土样底部的孔隙水压力极值分别为 98 kPa、152 kPa、259 kPa 和 339 kPa,可见加载速率越大,土样底部的孔隙水压力极值也越大,但均小于最终固结应力 400 kPa。各组试验的孔隙水压力达到极值后开始消散。

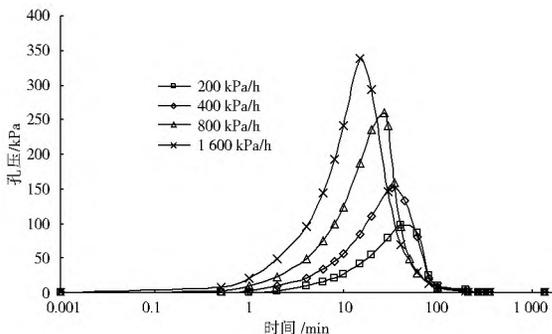


图 3 不同加载速率下孔隙水压力曲线

Fig. 3 Pore pressure dissipation curves versus time under different loading rates

根据太沙基一维固结理论假设与有效应力原理,固结应力瞬时作用于饱和土体,并由孔隙水承担,即固结应力转化为孔隙水压力,随着固结时间的增加,孔隙水压力逐渐消散,荷载转化为有效应力。等加载速率固结试验不满足荷载瞬时施加的条件,而是以一定的速率施加,根据试验结果,等加载速率固结试验试样底部孔隙水压力的变化规律和有效应力增长规律见图 4。图 4 是加载速率分别为 200 kPa/h、400 kPa/h、800 kPa/h 和 1 600 kPa/h 时试样底部孔隙水压力、有效应力与固结压力随时间变化曲线图。根据有效应力原理,有效应力值为固结应力与孔隙水压力的差值。从图 4 可以看出,加载速率为 200 kPa/h 和 400 kPa/h 时,试样底部的孔隙水压力在固结应力加载到最大值前上升到极值,然后进入消散状态,不再随固结应力增加而增加。加载速率为 800 kPa/h 和 1 600 kPa/h 时,孔隙水压力几乎在固结应力加载到 400 kPa 时达到极值,然后呈下降趋势。

四组固结试验的有效应力增长曲线均近似呈“S”状,试验前期,固结应力由孔隙水压力承担,有效应力增加缓慢;进入主固结阶段后,有效应力呈线性迅速增大。加载速率为 200 kPa/h 时,在加载完成时刻,固结应力几乎完全转化为有效应力;加载速率为 1 600 kPa/h 时,加载完成后相当长一段时间后固结应力才完全转化为有效应力。

试样上表面排水,试验中测得的孔隙水压力值为试样底部的孔隙水压力值,孔隙水压力与有效应力沿高度的分布形态受技术限制很难通过试验准确测定出来。本文试验数据仅能说明土样底部一点处的孔隙水压力的变化规律,但从中可以对土样在固结过程中的孔隙水压力变化规律有一个直

观的认识。

施工过程中,土体的孔隙水压力过大,会造成有效应力降低,土体强度减小,影响土的承载力等,对工程安全不利。

固结应力。等加载速率试验前期,孔隙水压力随固结应力增加而增加,有效应力增加缓慢;孔隙水压力在固结应力加载完成前达到极值,随后呈下降趋势,有效应力近似呈线性迅速增加。

参考文献(References):

[1] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 二版. 北京:中国水利水电出版社,2000. (QIAN Jiahuan, YIN Zongze. Theory and calculation of soil[M]. Beijing: China Water Power Press, 2000. (in Chinese))

[2] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2004. (LI Guangxin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))

[3] 齐添. 软土一维非线性固结理论与试验对比研究[D]. 杭州:浙江大学, 博士毕业论文, 2008. (QI Tian. Theoretical and experimental studies on one dimensional nonlinear consolidation of soft soil[D]. Zhejiang University, 2008. (in Chinese))

[4] 姚贝贝. 土的连续加载固结试验方法分析[D]. 西安:长安大学, 2010. (YAO Beibei. The continuous loading consolidation test method research on the soil. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese))

[5] Davison L R, Atkinson J H. 朱培红. 土的连续加荷固结试验[J]. 地质科学译丛, 1991, 8(4): 77-82. (Davison L R, Atkinson J H. Quarterly Journal of Engineering Geology[J]. 1991, 8(4): 77-82. (in Chinese))

[6] Aboshi H, Yoshikum H, Manuyama S. Constant loading rate of consolidation test[J]. Soil and Foundations, 1970, 10(1): 43-56.

[7] Schiffman R L. Consolidation of soil under time dependent loading and varying and varying permeability[J]. Proc. Highway Research Board, 1958, 37: 584-617.

[8] Von Fay K F, Cotton C E. Constant rate of loading(CRL) tests on soil[R]. Consolidation of soils, Testing and Evaluation, ASTM STP 892. Yong R N, and Townsend F C Eds, 1986, Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 236-256.

[9] Hsu T W, Lu S C. Behaviour of one dimensional consolidation under time dependent loading[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2006, 132(4): 457-462.

[10] Olson R E. Consolidation under time dependent loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceeding of ASCE 1977, 103(GT1): 55-60.

[11] 孟晓非. 在 CRL 固结试验中确定先期固结压力 P_c [J]. 岩土工程学报, 1986, 8(4): F 8. (MENG Xiaofei. Determination of the Preconsolidation Pressure by CRL Consolidation Test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(4): F 8. (in Chinese))

[12] 王正宏, 李文林. 土的连续加荷固结试验初探[J]. 大坝观测与土工测试, 1983(1): 3-13. (WANG Zhenghong, LI Wenlin. On the consolidation test for soil by progressive loading[J]. Dam Observation And Geotechnical Tests, 1983(1): 3-13. (in Chinese))

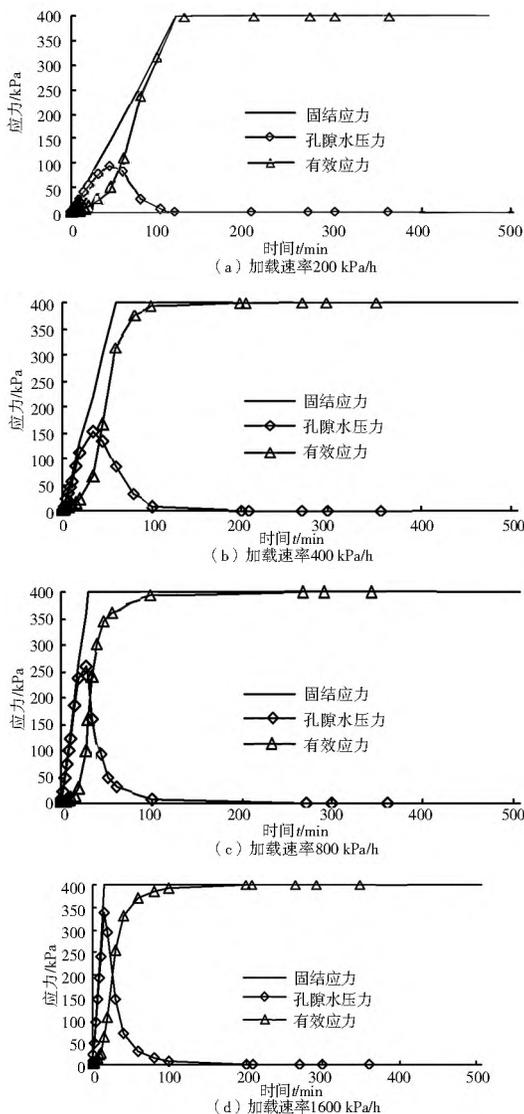


图 4 不同加载速率下孔隙水压力、有效应力与固结应力关系曲线

Fig. 4 Relationship between pore pressure, effective stress and consolidation stress under different loading rates

从本文试验结论来看,合理控制施工荷载的施加速率,是避免土体中产生过大孔隙水压力的一种方法。

3 结论

(1) 加载速率越大,土样的固结速率越快,完成固结所需的时间越短。土体最终固结变形量由所施加的最终固结应力决定,与加载速率无关,在相同的固结应力作用下,不同加载速率土样的最终固结变形量一致。随着固结应力施加速率的增加,加载完成时土样的平均固结度呈下降趋势。

(2) 加载速率对试样底部的孔隙水压力有显著的影响,加载速率越大,土样底部的孔隙水压力上升速率越快,孔隙水压力极值越大,但四组试验的孔隙水压力极值均小于最终

(下转第 712 页)

- Hydropower Engineering, 2010, 41(11): 29-33. (in Chinese)
- [2] 陈松山, 颜红勤, 周正富, 等. 泵站前置竖井进水流道三维湍流数值模拟与模型试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 63-70. (CHEN Song-shan, YAN Hong-qin, ZHOU Zheng-fu, et al. Three-dimensional turbulent numerical simulation and model test of front shaft tubular inlet conduit of pumping station[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(2): 63-70. (in Chinese))
- [3] 施高萍. 轴流泵站开敞式进水池的数值模拟与技术改造[J]. 水电能源科学, 2013, 30(1): 192-194. (SHI Gao-ping. Numerical simulation and technical transformation for open suction sump of axial flow pump station[J]. Water Resources and Power, 2013, 30(1): 192-194. (in Chinese))
- [4] 史志鹏, 刘家春, 尹伟, 等. 泵站开敞式进水池水流水力特性研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(4): 153-155. (SHI Zhi-peng, LIU Jia-chun, YIN Wei, et al. Research on flow characteristics in open inlet sump of pump station[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(4): 153-155. (in Chinese))
- [5] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (LIU Chao. Water pump and water pump station[M]. Beijing: China Water Power Press, 2009. (in Chinese))
- [6] GB/T 50265-2010, 泵站设计规范[S]. (GB/T 50265-2010 Standard for the design of pumping stations[S]. (in Chinese))
- [7] 陈方旒, 沈颖, 白玉川. 水泵站进水池物理模型试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(2): 155-159. (CHEN Fang-lu, SHEN Ying, BAI Yu-chuan, Experiment on physical model of intake at pumping station[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(2): 155-159. (in Chinese))
- [8] 郑亚军, 蔡付林, 雷兴春. 水泵进水流道水工模型试验研究[J]. 人民长江, 2008, 29(24): 77-80. (ZHENG Ya-jun, CAI Fu-lin, LEI Xing-chun. Experimental study on water intake pipe of pump by hydraulic model[J]. Yangtze River, 2008, 29(24): 77-80. (in Chinese))
- [9] 孙永明, 陈宝华. 梅梁湖泵站进水引渠水工模型试验研究[J]. 江苏水利, 2007(3): 25-26. (SUN Yong-ming, Chen Baohua. Experimental study on water intake channel of Mei liang lake pumping station by hydraulic model test[J]. Jiangsu Water Resources, 2007(3): 25-26. (in Chinese))
- [10] 沈磊. 虹桥枢纽 2 号雨水泵站水力特性与整流优化[J]. 中国市政工程, 2010(6): 36-38. (SHEN Lei. A Research of hydraulic characteristics & rectification optimization of no. 2 rainwater pumping station, Hongqiao Comprehensive Transport Hub[J]. China Municipal Engineering, 2010(6): 36-38. (in Chinese))
- [11] 甄峰. 乌江泵站水力模型选择及泵装置模型试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2013. (ZHEN Fen. Hydraulic model selection and model experimental study on pump sets of Wujiang pumping Station[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2013. (in Chinese))
- [12] 左东启. 模型试验的理论和方法[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984. (ZUO Qidong. [SZZ] Theory and Method of Model Experiment[M]. Beijing: Water conservancy and electric power press, 1984 (in Chinese))
- [13] 牛权, 储训. 瘦西湖引水泵站输水管道系统水力模型试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(3): 121-123. (NIU Quan, CHU Xun. Hydraulic model test research of water distribution pipeline system of pumping station in slender west lake[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(3): 121-123. (in Chinese))
- [14] 朱红耕. 进水池对水泵进水条件影响的数值模拟和试验[J]. 农业机械学报, 2005, 36(6): 57-60. (ZHU Hong-geng. Numerical simulation and model test for the influence of pump intake design on pump flow conditions[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(6): 57-60. (in Chinese))
- [15] ANSI/HI 9.8-1998, American National Standards Institute. Pump Intake Design[S].
- (上接第 698 页)
- [13] GB/T 50123-1999, 《土工试验方法标准》[S]. (GB/T 50123-1999, Standard for soil test method[S]. (in Chinese))
- [14] 梅国雄, 宰金珉, 殷宗泽, 等. 沉降时间曲线呈“S”型的证明[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 20-22. (MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min, YIN Zong-ze, et al. Proof of s t curve appearing “S” shape based on one dimensional consolidation theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 20-22. (in Chinese))
- [15] 梅国雄, 宰金珉, 殷宗泽, 等. 沉降时间曲线呈“S”型的证明及其应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(S1): 21-24. (MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min, YIN Zong-ze, et al. Proof of settlement-time curve appearing “S” shape with ramp load and its application base on stress-strain relationship[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S1): 21-24. (in Chinese))