



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.02.023

谌柳明, 戴小松, 徐顺平. 水泥固化东湖淤泥的工程性质试验研究[J]. 2016, 14(2): 131-135.

CHEN Lir ming, DAI Xiaosong, XU Shunping. Behavior of cement stabilized sludge in East Lake[J]. 2016, 14(2): 131-135. (in Chinese)

# 水泥固化东湖淤泥的工程性质试验研究

谌柳明<sup>1</sup>, 戴小松<sup>2</sup>, 徐顺平<sup>2</sup>

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072; 2. 中建三局投资发展有限公司, 武汉 430070)

**摘要:** 利用将水泥、化学固化剂和机械力脱水三种方法相结合的方式对东湖淤泥进行固化处理, 通过界限含水率、强度试验(包括 CBR 和直剪试验)以及渗透试验研究了在使用水泥固化过程中水泥掺量、养护龄期以及压实度对固化土工程性质的影响。结果发现: 仅使用化学固化剂和机械脱水固化处理后的淤泥属于高液限粉土, CBR 强度低, 不能满足路基填料的要求。使用水泥能够有效提高一次改性固化土的 CBR 强度和直剪黏聚力, 养护龄期对 CBR 强度影响很小, 而水泥掺量、养护龄期和压实度对内摩擦角的影响均不大。此外, 在水泥掺量从 0% 增大到 8% 的过程中, 渗透系数呈现出先增大后减小的趋势, 在水泥掺量为 2% 时达到最大值。综合分析, 在水泥二次改性过程中, 为符合路基填筑要求, 水泥掺量宜为 8%, 压实度宜大于 92%。

**关键词:** 淤泥; 高液限; 水泥固化; 强度特性; 渗透系数

**中图分类号:** TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)02-0131-05

## Behavior of cement stabilized sludge in East Lake

CHEN Lir ming<sup>1</sup>, DAI Xiaosong<sup>2</sup>, XU Shunping<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Investment Development Co., Ltd, CCTEB, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** This paper used a combined treatment of cement, chemical stabilization and mechanical dehydration to stabilize the East Lake sludge. The effects of cement content, curing age and compaction degree on soil engineering properties was investigated by limit moisture test, strength test (including CBR and direct shear test) and permeability test. The results showed that the East Lake sludge stabilized by chemical stabilization and mechanical dehydration was high liquid limit silt with low CBR strength, and could not meet the requirements of subgrade. Cement could effectively improve the CBR strength and cohesion of the secondary modified cement stabilized soil. Curing age contributed little to CBR strength. Cement content, curing age and compaction degree had little effects on internal friction angle. In addition, permeability coefficient increased at first and then decreased in the process of cement content increasing from 0% to 8%. Permeability coefficient reached the maximum when cement content was 2%. According to the comprehensive analysis in the process of sludge modified by cement, the cement content should be 8%, and compaction degree should be more than 92% to meet the requirements of subgrade filling.

**Key words:** sludge; high liquid limit; cement stabilized; strength behavior; permeability coefficient

收稿日期: 2015-03-12 修回日期: 2015-09-09 网络出版时间: 2016-04-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160414.1442.013.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479148); 中建三局投资发展有限公司科技项目(250000270)

**Fund:** National Natural Science Foundation of China(51479148); Chinese Construction Engineering Bureau of the Third Project of Science and Technology Investment and Development Co. Ltd. (250000270)

**作者简介:** 谌柳明(1990), 男, 湖北武汉人, 主要从事非饱和土特性、地基处理方面的研究。E-mail: shenlmw@hotm.ail.com

**通讯作者:** 戴小松(1974), 男, 湖北武汉人, 教授级高级工程师, 主要从事地基处理方面的研究。E-mail: daixs@163.com

随着城市建设规模的不断扩大,与之相关的河流、湖泊疏浚淤泥以及生活淤泥处理需求日益增多。这些淤泥含水率高,强度低,难以直接用于工程填土,直接海洋抛弃或路堤堆砌不仅浪费土地还会对环境造成污染。目前在对淤泥进行处理的各种方法中,掺入固化剂进行改性是最常用的方法<sup>[1]</sup>。

国内外众多学者用不同的固化剂(如石膏<sup>[1]</sup>、粉煤灰<sup>[2,3]</sup>、砂<sup>[4]</sup>、水泥<sup>[5-11]</sup>以及化学合成固化剂<sup>[12]</sup>)对淤泥或其他工程性质不良的土进行了改性,并研究了固化剂掺量、养护龄期、延迟时间、制样方法以及压实度等因素对固化淤泥力学特性的影响。

以上不同的改性方法各有优劣,而且现有研究多集中于仅探讨其中一种方法或两种改性剂相混合方式的固化效果,多种方法相结合的复合方法尚未见相关研究。

为了能够快速有效地对淤泥进行固化处理,往往还需要结合其他方法对淤泥进行处理。本文结合化学固化剂、机械压缩脱水和水泥固化三种方法对东湖淤泥进行固化,集中探讨了水泥掺量、养护龄期和压实度对固化土工程性质的影响。

## 1 项目背景及试验材料

武汉东湖通道工程湖中隧道段采用围堰挡水、堰内明挖施工,围堰总面积约为 55 万 m<sup>2</sup>,工程范围内湖底淤泥平均深度约 1.5 m,淤泥总处理量约 82.5 万 m<sup>3</sup>,体量大且工期短,为了达到不占用土地并资源化利用的目标,需要对淤泥进行快速有效的固化处理。

原状淤泥呈流塑状态,有机质含量很低(0.99%),基本物性指标见表 1。淤泥首先使用陈士强等<sup>[13]</sup>所发明的“清淤泥浆脱水固结一体化处理方法”进行处理,本文简称该过程为“一次固化”,得到含水率不大于 30% 的泥饼集中堆放,下文称之为“一次固化土”。一次固化后所得到的原状泥饼物性指标见表 1,其中压缩系数为在实验室内重塑击实后(压实度 92%~98%)通过单轴压缩得到。重型击实试验得到一次固化土的最优含水率和最大干密度分别为 24.4% 和 1.543 g/cm<sup>3</sup>。

表 1 基本物性指标

Tab.1 Basic physical indexes

指标	含水率 (%)	孔隙比	塑限 (%)	液限 (%)	压缩系数 a <sub>1-2</sub>
原状淤泥	62.8	1.84	29.3	55.2	1.47
一次固化	≤30	/	30.01	54.85	/

通过塑性图分类发现其为高液限粉土(MH),

不能直接用于路基填筑<sup>[14]</sup>,通过对“一次固化土”进行 CBR 试验发现,其 CBR 强度也不能满足《公路路基设计规范》(JT G D 30-2004)和《公路路基施工技术规范》(JT G F 10-2006)对路床填料的强度要求(CBR ≥8%)。为了使“一次固化土”能够用于路基的填筑,需要对其进行进一步的“二次改性”。

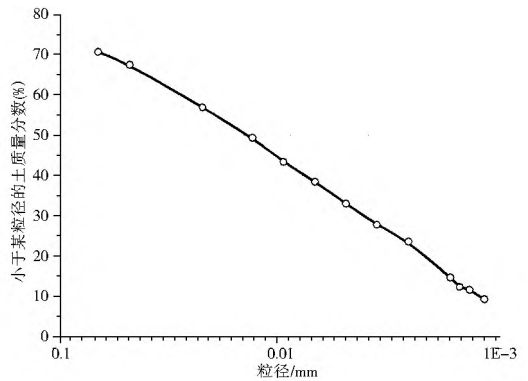


图 1 一次固化土粒径级配累积曲线

Fig. 1 Grain size gradation curve of stabilized soil

## 2 试验方案及操作步骤

在二次改性阶段,改性剂采用华兴 PC32.5 复合普通硅酸盐水泥,通过室内试验研究水泥掺量、养护时间和压实度对固化土力学性质的影响规律,室内试验主要包括界限含水率、强度(包括 CBR 强度和直剪强度)和渗透性三个方面的试验。

每项试验设置三个控制变量—水泥掺量(2%、4%、6%和 8%)、养护龄期(7 d、14 d 和 28 d)、压实度(98%、96%、94%和 92%),养护条件为湿度 98% ±1% 和温度 25 ±0.5 °C,其中水泥掺量的定义为水泥质量占“一次固化土”干重的百分比。

首先对不同水泥掺量的二次固化土进行重型击实试验,得到不同水泥掺量所对应的最优含水率。在后续试验中,所有试样制样的初始含水率均为其水泥掺量下所对应的最优含水率。

上述各试验均按照《公路土工试验规程》(JT G E40-2007)进行,在“一次固化土”干燥状态下按照预设掺量掺入水泥后,使用喷壶加入蒸馏水至其水泥掺量所对应的最优含水率。将备好的土置于塑料袋中密封 24 h 后,测定其含水率,如果含水率在预设含水率误差范围内(±0.5%)则开始试验或置于养护箱中开始计算养护时间,如果含水率超过误差范围,则按上述步骤重新备土。

## 3 试验结果

### 3.1 界限含水率

土的界限含水率能够在一定程度上反映土颗粒

与土中水、土颗粒之间相互作用的规律,而且还能够描述土对外力引起变形和破坏的抵抗能力<sup>[15]</sup>。不同养护龄期的水泥二次固化土界限含水率随水泥掺量的变化曲线见图2。

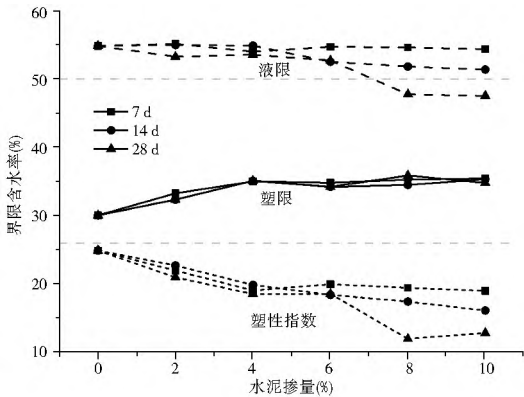


图2 界限含水率随水泥掺量变化曲线

Fig. 2 Variation curve of limit water content with cement content

从图中可以发现: (1) 一次固化土的液限大于50%,属于高液限土,根据《公路路基设计规范》和《公路路基施工技术规范》中相关规定,其不能直接作为路基填料。(2) 随着水泥掺量的增大,固化土的塑限略有增大,而液限略有减小,从而使塑性指数减小,这与白寿光<sup>[16]</sup>的研究结果相符。其中,当水泥掺量小于4%时,塑限增大而液限几乎不变,而当水泥掺量大于4%时,塑限几乎不变,液限开始减小。(3) 当水泥掺量达到8%,养护龄期达到28 d时,固化土的液限减小到小于50%的范围内,可以用于路基填料。(4) 养护龄期几乎不影响固化土的塑限,而在水泥掺量大于6%时,养护龄期对液限产生了一定的影响,随着养护龄期的延长,液限明显降低。

### 3.2 强度试验

#### 3.2.1 CBR 强度

图3为一次固化土 CBR 强度随压实度的变化曲线,结果表明:为了达到《公路路基设计规范》(JTG D30-2004)和《公路路基施工技术规范》(JTG F10-2006)中路床 CBR 强度大于8%的要求,压实度需要达到100%,这在工程施工中是难以实现的。

图4和图5分别为在不同状态下水泥二次改性固化土随水泥掺量和养护龄期的变化曲线,其中N代表击实次数,其中击实次数98、70、60、50、40和35所对应的压实度分别大约为100%、98%、96%、95%、92.5%和92%。

从其中能够得到以下规律:

(1) 随着水泥掺量的增大, CBR 值呈不断增大,

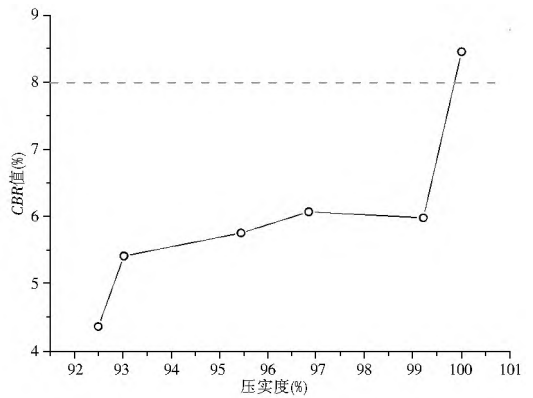


图3 一次固化土 CBR 强度随压实度变化曲线

Fig. 3 Variation curve of CBR strength of stabilized soil with compaction degree

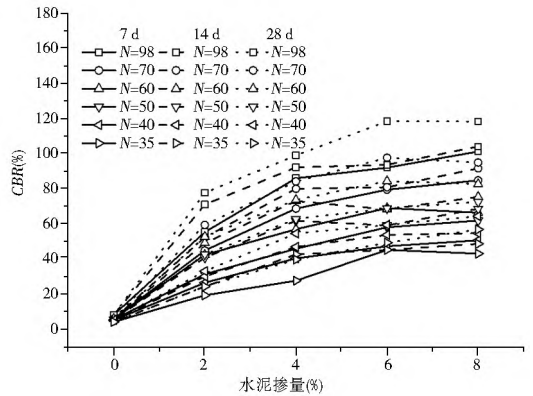


图4 CBR 强度随水泥掺量变化曲线

Fig. 4 Variation curve of CBR strength with cement content

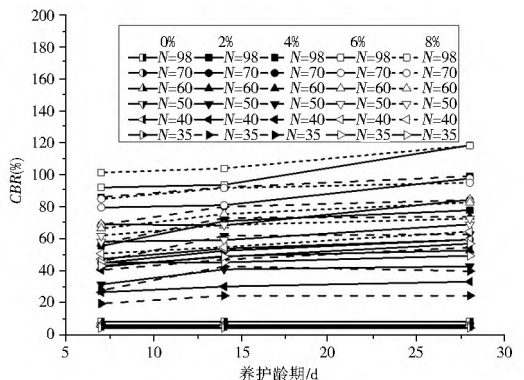


图5 CBR 强度随养护龄期的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of CBR strength with curing age

并且增长幅度不断减小, CBR 强度随水泥掺量的增加变化拐点在4%左右,当水泥掺量从6%增加到8%时, CBR 值几乎不变。(2) 相比于水泥掺量和击实次数两个影响因素,养护龄期对 CBR 强度的影响很小,尤其是在养护龄期为7 d 和14 d 范围内。

#### 3.2.2 直剪强度

白玉恒<sup>[3]</sup>通过对粉煤灰改性淤泥土的研究,发现固化淤泥土黏聚力的增长速率随粉煤灰掺量的增加和养护龄期的延长而增大。研究还发现粉煤灰的掺量对淤泥土的内摩擦角的影响不大。黄英豪等<sup>[5]</sup>

使用水泥进行淤泥土的改性,发现黏聚力随着水泥量和龄期的增加而增大,而内摩擦角则有减小的趋势。

图 6 和图 7 分别为黏聚力和内摩擦角随水泥掺量的变化曲线,从图中可以发现:(1)二次固化土的黏聚力总体上随水泥掺量的增大而不断增加,呈近似线性的关系;(2)相对于压实度和水泥掺量两个因素,养护龄期对黏聚力的影响最小;(3)除一次固化土 92% 压实度下内摩擦角以外,水泥掺量以及其他因素对二次固化土内摩擦角的影响均不大,总体上都位于  $29^{\circ} \sim 32^{\circ}$  之间。所以,水泥改性对固化土强度的影响主要体现在黏聚力上。

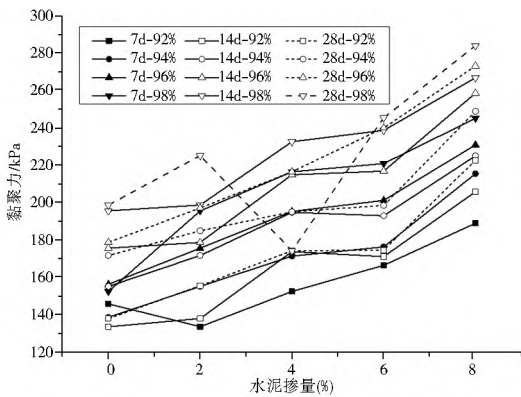


图 6 二次固化土黏聚力随水泥掺量变化曲线

Fig. 6 Variation curve of cohesion with cement content

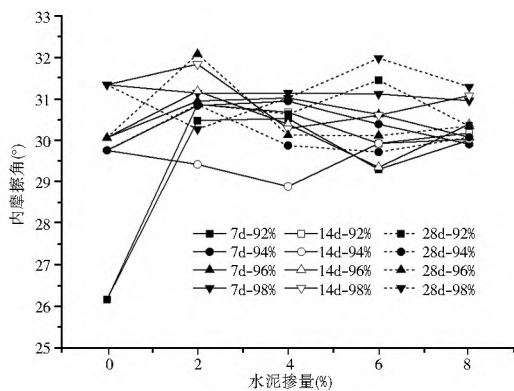


图 7 二次固化土内摩擦角随水泥掺量变化曲线

Fig 7 Variation curve of internal friction angle with cement content

### 3.3 渗透系数

采用变水头法进行了不同压实度下不同水泥掺量以及不同养护龄期水泥二次固化土的渗透试验,不同条件下渗透系数随水泥掺量的变化见图 8,可以发现:(1)总体上固化土的渗透系数都很小 ( $10^{-8} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$ ) 数量级范围内,在相同压实度下,没有经过水泥二次改性的一次固化土渗透系数最小,当掺入 2% 水泥时,渗透系数明显增大,但是当水泥掺量进一步增大时,渗透系数又随之减小,其原因还需要进一步探讨;(2)随着养护龄期的延长,渗透系数也有一定程度的减小;(3)与水泥掺量和养护

龄期相比,压实度对渗透系数的影响最为明显。

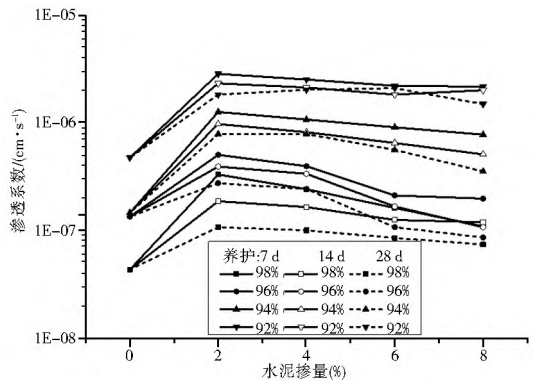


图 8 固化土渗透系数随水泥掺量变化曲线

Fig. 8 Variation curve of coefficient of permeability with cement content

### 4 结论

本文使用水泥对采用“清淤泥浆脱水固结一体化处理方法”处理的东湖固化淤泥进行二次固化,通过界限含水率、CBR 试验、直剪试验以及渗透试验研究了水泥固化过程中水泥掺量、养护龄期以及压实度对固化土工程性质的影响,为路基填筑方案的制定提供依据。得出以下结论。

(1) 仅使用陈士强等<sup>[3]</sup>化学和机械脱水固化方法得到的东湖淤泥固化为高液限粉土,且 CBR 强度低,不能作为路床填料。

(2) 使用水泥二次改性能够有效改善一次固化土的界限含水率,随着水泥掺量的增加,当水泥掺量小于 4% 时塑限会有所增大,当水泥掺量大于 4% 时,液限会有所减小,直到水泥掺量达到 8% 时液限减小至小于 50%,能够满足规范对路基填料的要求。

(3) 强度方面,随着水泥掺量的增加,固化土的 CBR 强度和黏聚力会有明显的增大,而其内摩擦角变化很小。并且,当水泥掺量大于 6% 时, CBR 强度并不随水泥掺量的增加而进一步增大。

(4) 压实度是对渗透系数最显著的影响因素,随着养护龄期的延长,渗透系数也会随之减小。

(5) 在水泥掺量从 0% 增大到 8% 的过程中,渗透系数呈现出先增大后减小的趋势,在水泥掺量为 2% 时达到最大值。

(6) 综合分析,水泥改性的最佳掺量为 8%,压实度宜为 92% 以上。

#### 参考文献 (References):

[1] 姬凤玲,朱伟,张春雷. 疏浚淤泥的土工材料化处理技术的试验与探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1999-2002. (JI Feng-ling, ZHU Wei, ZHANG Chun-lei. Study of treatment technology of dredging sludge with geosyntheticizing method[J]. Rock and Soil

- Mechanics, 2004, 25(12): 1999-2002. (in Chinese)
- [2] 王东星, 徐卫亚. 大掺量粉煤灰淤泥固化土的强度与耐久性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3659-3664. (WANG Dongxing, XU Weiyu. Research on strength and durability of sediments solidified with high volume fly ash[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3659-3664. (in Chinese))
- [3] 白玉恒. 粉煤灰固化淤泥路用性能及填筑技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009. (BAI Yuheng. Study on road performance and filling technology of solidified muddy soil by fly ash[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009. (in Chinese))
- [4] 范公俊. 固化淤泥的收缩性质及其控制措施研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (FAN Gongjun. Study on the shrinkage property and shrinkage control of solidified dredged material[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [5] 黄英豪, 朱伟, 张春雷, 等. 固化淤泥重塑土力学性质及其强度来源[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1352-1356. (HUANG Yinghao, ZHU Wei, ZHANG Chunlei, et al. Mechanical characteristics and strength source of remolded solidified dredged material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1352-1356. (in Chinese))
- [6] 黄英豪, 董婵, 关云飞, 等. 击实对固化淤泥物理力学性质的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(09): 1728-1733. (HUANG Yinghao, DONG Chan, GUAN Yunfei, et al. Effect of compaction on physical and mechanical properties of solidified dredged materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(09): 1728-1733. (in Chinese))
- [7] 黄英豪, 朱伟, 周宣兆, 等. 固化淤泥压缩特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 2923-2928. (HUANG Yinghao, ZHU Wei, ZHOU Xuanzhao, et al. Experimental study of compressibility behavior of solidified dredged material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 2923-2928. (in Chinese))
- [8] 朱伟, 冯志超, 张春雷, 等. 疏浚泥固化处理进行填海工程的现场试验研究[J]. 中国港湾建设, 2005(5): 27-30. (ZHU Wei, FENG Zhichao, ZHANG Chunlei, et al. Field experiment of dredged spoil solidified with cement for marine reclamation works[J]. China Harbour Engineering, 2005(5): 32-35. (in Chinese))
- [9] 刘仁钊. 基于不同固化剂作用下淤泥改良前后力学性能变化研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2013. (LIU Renzhao. Based on the effect of different curing agents and the change of mechanical properties of sludge improved research[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [10] Bahar R, Benazzoug M, Kenai S. Performance of compacted cement stabilised soil[J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(7): 811-820.
- [11] Kaniraj S R, Havanagi V G. Compressive strength of cement stabilized fly ash soil mixtures[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(5): 673-677.
- [12] 耿树泽, 侯明业, 赵娟娟, 等. HSC301 化淤泥填筑路基性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2013(6): 49-51. (GENG Shuze, HOU Mingye, ZHAO Juanjuan, et al. Study on performance of subgrade built with HSC301 solidified silt[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2013(6): 49-51. (in Chinese))
- [13] 陈士强, 季光明, 杨国录等. 清淤泥浆脱水固结一体化处理方法[P]. 中国: CN101746942A, 2010. (CHENG Shiqiang, JI Guangming, YANG Guolu, et al. Dredging dewatering and consolidation of mud integration processing method[P]. China: CN101746942A, 2010)
- [14] JTG D030-2004, 公路路基设计规范[S]. 2004. (JTG D030-2004, Specifications for Design of Highway Subgrades[S]. 2004. (in Chinese))
- [15] 陈仲颐, 周景星, 王洪谨. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994. (CHEN Zhongyi, ZHOU Jingxing, WANG Hongjin. Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994. (in Chinese))
- [16] 白寿光. 某市政道路改良土水泥掺量研究[J]. 山西建筑, 2007, 33(10): 303-304. (BAI Shouguang. Research into cement admixture quantity of improved soil in a certain municipal road[J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(10): 303-304. (in Chinese))

(上接第 74 页)

- [13] Wang D, Adams B J. Optimization of real time reservoir operations with Markov decision processes[J]. Water Resources Research, 1986, 22: 345-352.
- [14] Pereira M V F, Pinto L M V G. Stochastic optimization of a multi-reservoir hydroelectric system: a decomposition approach[J]. Water Resources Research, 1985, 21(6): 779-792.
- [15] Pereira M V F, Pinto L M V G. Multi stage stochastic optimization applied to energy planning[J]. Mathematical Programming, 1991, 52: 359-375.
- [16] Chakraborty M, Gupta S. Fuzzy mathematical programming for multi objective linear fractional programming problem[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2002, 125(3): 335-342.
- [17] Stancu Minasian I M. A fifth bibliography of fractional programming[J]. Optimization, 1999, 5(4): 343-67.
- [18] 漳卫南运河志(1996-2005)编委会. 漳卫南运河志[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. (Zhangweinan Canal Chronicles volunteers (1996-2005). Zhangweinan Canal Chronicles[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013. (in Chinese))
- [19] 漳卫南运河管理局 GEF 海河项目办, 漳卫南运河管理局规划设计研究院. 漳卫南运河水资源水环境综合管理战略行动计划(SAP)基线调查报告[R]. 2006. (GEF Haihe River Project Office of Zhangweinan Canal Management Bureau, Zhangweinan Canal Administration Planning Design and Research Institute. Baseline survey report of Zhangweinan Canal water resources and water environment management strategy action plan (SAP)[R]. 2006. (in Chinese))
- [20] Charnes A, Cooper W W. Programming with linear fractional functionals[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1962, 9(3-4): 181-186.
- [21] Chadha S S, Chadha V. Linear fractional programming and duality[J]. Central European Journal of Operations Research, 2007, 15(2): 119-125.