



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.01.020

万清琦, 崔自治, 杨宁宁, 等. 压实水泥湿陷性黄土的力学特性[J]. 2016, 14(1): 119-123, 130.

WAN Qing qi, CUI Zi zhi, YANG Ning ning, et al. Mechanical properties of compacted cement loess[J]. 2016, 14(1): 119-123, 130. (in Chinese)

# 压实水泥湿陷性黄土的力学特性

万清琦, 崔自治, 杨宁宁, 刘生雨

(宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021)

**摘要:** 为拓展压实水泥土在黄土地基处理中的应用, 以水泥掺量、粉煤灰掺量和含水量为因素, 设计  $L_9(3^4)$  正交试验方案, 击实试验法成样, 试验研究了压实水泥黄土 28 d 和 56 d 的力学特性, 分析了各因素对水泥土的干密度、强度和弹性模量的作用规律、作用机理, 弹性模量与强度的关系。结果表明: 粉煤灰掺量对压实水泥黄土的干密度影响极显著, 含水量的影响显著, 水泥掺量的影响不显著。水泥黄土的最大干密度和最优含水量应考虑粉煤灰掺量的影响, 可不考虑水泥掺量的影响。粉煤灰能显著提高压实水泥黄土的强度和弹性模量, 尤其是后期强度。水泥掺量对压实水泥黄土两个龄期的强度和弹性模量影响均极显著, 粉煤灰掺量的后期影响极显著, 含水量的影响显著。

**关键词:** 水泥黄土; 强度; 弹性模量; 干密度

中图分类号: TU47 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2016)01-0119-05

## Mechanical properties of compacted cement loess

WAN Qing qi, CUI Zi zhi, YANG Ning ning, LIU Sheng yu

(College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** In order to expand the application of compacted soil-cement in loess foundation treatment, taking cement dosage, fly ash dosage and water content as factors, an orthogonal experimental scheme  $L_9(3^4)$  was carried out to study the mechanical properties of compacted cement loess at 28d and 56d. The effect of various factors on dry density, strength and elastic modulus, mechanism, relationship between elastic modulus and strength were analyzed. The results showed that there was an extremely significant influence of fly ash dosage on dry density of compacted cement loess, followed by water content and but not found of cement dosage. The influence of fly ash dosage should be taken into account when maximum dry density and optimum water content of cement soil are determined, the influence of cement dosage can be ignored. Fly ash can significantly increase the strength and elastic modulus of compacted cement loess, especially the later strength. The influence of cement dosage on strength and elastic modulus of compacted cement loess at two ages is extremely significant, as well as the fly ash dosage; in addition, the water content also showed a significant influence effect.

**Key words:** cement loess; strength; elastic modulus; dry density

夯实水泥土桩和压实水泥土填层在软土地基处理中已得到广泛应用。国内外学者已对水泥土的强度<sup>[1-15]</sup>、弹性模量<sup>[16]</sup>、抗渗性能<sup>[17-18]</sup>等进行了深入的

研究。水泥基材料常用掺合料有粉煤灰、矿粉、石灰石粉、硅粉等, 其中以粉煤灰应用最广, 性价比最高。土料的类别是影响水泥土强度的重要因素, 土料的颗

收稿日期: 2015-01-18 修回日期: 2015-11-14 网络出版时间: 2016-2-27  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160227.1655.019.html>  
基金项目: 长江学者和创新团队发展计划(IRT1067)

**Fund:** Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University(IRT1067)

**作者简介:** 万清琦(1992-), 男, 山东即墨人, 主要从事岩土工程方面研究。E-mail: 1029320240@qq.com

**通讯作者:** 崔自治(1963-), 男, 河南永城人, 教授, 主要从事岩土工程方面研究。E-mail: czz2062428@qq.com

粒粗, 水泥土的强度大。黄土因湿陷性, 往往需要处理, 常用的处理方法有换填法, 挤密桩法和桩基等, 挤密桩孔内填料必要时可用强度高水泥土<sup>[9]</sup>, 道路工程的路基、水利工程的输水建筑和储水建筑, 以及多层房屋建筑的黄土地基处理, 因上部荷载较小, 多采用换填法。换填材料以素土或灰土为主, 素土或灰土垫层的强度和抗渗性较低, 扩散能力小, 设计厚度大, 常出现防水失效, 而引起工程事故。水泥土较素土或灰土的强度大, 抗渗性好, 反复冻融作用下水泥比石灰对土的改良效果好<sup>[6]</sup>, 水泥土处治粉土路基隔绝毛细水的效果优于灰土<sup>[17]</sup>。因此, 研究掺加粉煤灰的压实水泥黄土的力学特性, 对应用压实水泥土垫层和夯实水泥土桩处理黄土地基具有重要意义。

## 1 材料及方法

### 1.1 材料及处理

试验所用黄土取自宁夏同心县下马关, 密度  $\rho = 1.56 \text{ g/cm}^3$ , 含水量  $w = 12.2\%$ , 土粒比重  $d_s = 2.72$ , 塑限  $w_p = 17.0\%$ , 液限  $w_l = 26.6\%$ , 塑性指数  $I_p = 9.6$ , 最大干密度  $\rho_{\max} = 1.69$ , 最优含水量  $w_{\text{opt}} = 15.0\%$ 。颗粒组成见表 1, 主要为  $0.075 \sim 0.005$  的粉粒, 占  $83.9\%$ 。

表 1 黄土的颗粒组成

Tab. 1 Particles composition of loess

粒径/mm	> 0.075	0.075~ 0.05	0.05~ 0.01	0.01~ 0.005	< 0.005
含量(%)	5.9	58.5	20.3	5.1	10.2

水泥为宁夏建材集团生产的双鹿牌 P-O42.5 级的水泥, 28 d 抗压强度  $46.2 \text{ MPa}$ 。粉煤灰为 N 级粉煤灰,  $45 \mu\text{m}$  筛余  $5.8\%$ , 需水比  $93\%$ 。水为洁

净的自来水。

### 1.2 试验方案与试验方法

以水泥掺量  $c$  (水泥与干土质量之比)、粉煤灰掺量  $f$  (粉煤灰与干土质量之比) 和含水量  $w$  (水与混合料质量之比) 为因素, 设计正交试验方案  $L_9(3^4)$ , 方案的因素水平列于表 2。共 9 个配合比, 测定每个配合比试样 28 d 和 56 d 的抗压强度和弹性模量, 每个龄期 3 个平行试验。

试样制备。将黄土土样风干、碾散、拌均, 测定土样的风干含水量。按试验方案设定的配合比称取各项材料的用量, 首先将粉煤灰、黄土和水泥拌均, 然后再加水拌均, 用轻型击实试验的成样方法成样 2 组, 每组 3 块, 置于塑料袋中养护 2 d 后, 移至标准养护室中养护至要求的龄期。

表 2 因素水平表

Tab. 2 Factors and levels

水平	因素		
	$C(\%)$	$F(\%)$	$W(\%)$
1	6.0	0.0	13.0
2	10.0	10.0	15.0
3	14.0	20.0	17.0

强度和弹性模量测定。试样的抗压强度  $f_{cu}$  用万能压力机测定, 取 3 块试样的抗压强度平均值作为测定结果。变形应用千分表测定, 弹性模量应用应力-应变关系直线段部分的拟合曲线确定。

## 2 结果与分析

正交试验各组试样的干密度  $\rho_d$ 、压实系数  $\lambda$ 、抗压强度  $f_{cu}$  和弹性模量  $E$  试验结果见表 3, 表中  $e$  为误差列。

表 3 正交试验结果

Tab. 3 Results of orthogonal test

组别	$c(\%)$	$f(\%)$	$w(\%)$	$e$	$\rho_d$ $/(g \cdot cm^{-3})$	$f_{cu}/\text{MPa}$		$E/\text{MPa}$		
						$c$		$c$		
						28 d	56 d	28 d	56 d	
G1	6.0	0.0	13.0	1	1.65	0.98	2.4	2.8	640	670
G2	6.0	10.0	15.0	2	1.62	0.96	2.8	3.8	740	942
G3	6.0	20.0	17.0	3	1.58	0.93	3.0	4.3	773	1120
G4	10.0	0.0	15.0	3	1.68	0.99	3.1	3.7	792	938
G5	10.0	10.0	17.0	1	1.64	0.97	3.4	4.6	900	1180
G6	10.0	20.0	13.0	2	1.55	0.92	3.1	4.5	817	1158
G7	14.0	0.0	17.0	2	1.67	0.99	3.5	4.4	943	1118
G8	14.0	10.0	13.0	3	1.60	0.95	3.4	4.7	920	1238
G9	14.0	20.0	15.0	1	1.56	0.92	3.8	5.5	1000	1393

水泥土的弹性模量与抗压强度常呈很好的线性

相关性<sup>[7]</sup>, 实测水泥黄土弹性模量与抗压强度的关

系见图 1。应用最小二乘法得拟合方程  $E = 252.1f_{cu} + 24.4$ , 相关系数  $R^2 = 0.9846$ , 二者具有很好的线性相关关系, 弹性模量与抗压强度的比值为 250.0 左右。

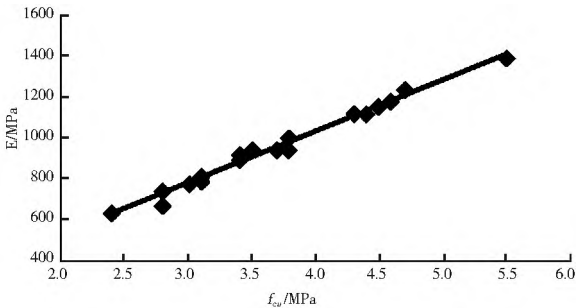


图 1 弹性模量与强度的关系

Fig. 1 Relationship between elastic modulus and strength

赵程<sup>51</sup>等人研究认为: 在配合比相同的条件下, 水泥土的压实度对强度有明显影响, 7 d 的强度和压实度间呈良好的非线性相关关系。以压实系数  $\lambda_c$  表示压实度, 实测水泥黄土的强度与压实系数的关系见图 2。应用最小二乘法线性拟合得 28 d 强度与压实系数的相关系数  $R^2 = 0.3351$ , 56 d 强度与压实系数的相关系数  $R^2 = 0.0557$ , 与压实度相关性 28 d 强度较 56 d 强度高, 两个龄期的强度与压实系数均没有明显的相关性。配合比相同的水泥土, 其各龄期的强度与压实度的相关性密切, 压实度越高, 强度越大; 而配合比不同的水泥土, 龄期越短, 其强度与压实度的相关性越密切。在龄期较小时, 胶凝材料的水化程度低, 胶结力弱, 其强度主要取决于压实度; 在龄期较大时, 胶凝材料的水化程度高, 胶结力强, 其强度主要取决于胶凝材料的掺量。该正交实验方案, 各组胶凝材料(水泥, 粉煤灰)的掺量不同,

所测强度的龄期较大, 故强度与压实度的相关性较低, 与压实度相关性 28 d 强度较 56 d 强度高。

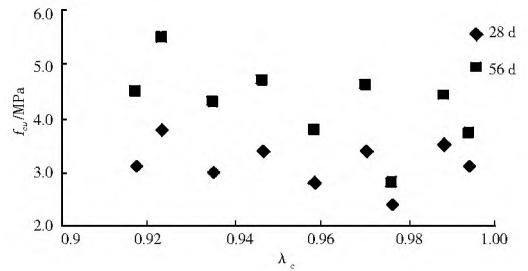


图 2 强度与压实系数的关系

Fig. 2 Relationship between strength and compaction coefficient

### 2.1 极差分析

水泥黄土的弹性模量与强度具有很好的线性相关性, 因此, 二者也有相同的变化规律, 故仅对其中的强度作极差分析, 以防赘述。

按正交试验分析理论计算出各因素相同水平组水泥黄土的干密度和强度的平均值及其极差, 干密度和强度平均值的趋势见图 3, 极差见图 4。试样的破坏形态见图 5, 微观结构见图 6。

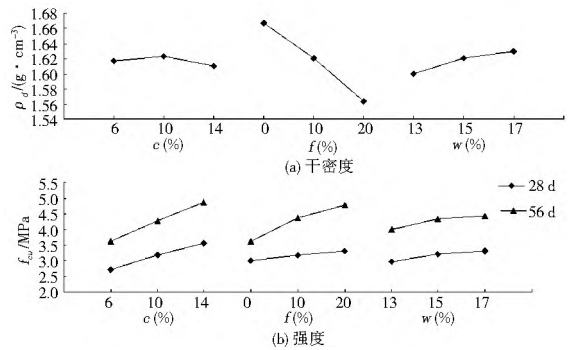


图 3 趋势图

Fig. 3 Trend charts

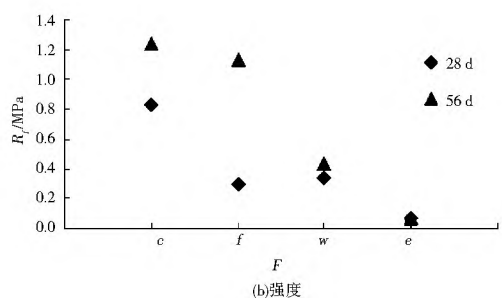
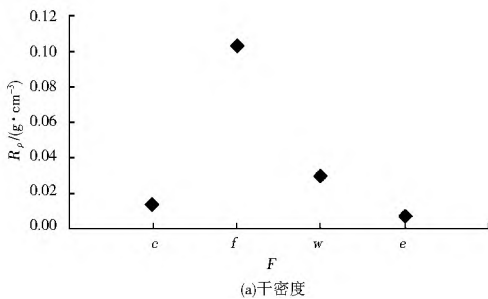


图 4 极差图

Fig. 4 Range charts

由图 3 可见, 试样的干密度随水泥掺量的增大先增大后减小, 随着粉煤灰掺量的增大减小, 随着含水率的增大而增大。水泥和粉煤灰的颗粒均较黄土的颗粒细, 掺入黄土会使水泥土的最优含水量增加, 故含水量大于黄土土样的最优含水量为 15%, 水泥土的干密度仍有所增长。水泥颗粒细, 在掺量少时,

水泥土的级配得到改善, 密实性提高; 掺量过多, 水泥土的级配转而趋于恶化, 同时最优含水量稍有提高<sup>[3]</sup>, 压实效果降低, 干密度减小。粉煤灰的掺入进一步使水泥土的级配趋于恶化, 最优含水量提高, 压实效果降低, 致使水泥土的干密度随粉煤灰掺量的增大减小。

试样的强度随水泥掺量、粉煤灰掺量和含水量的增大而增大。强度与水泥掺量近似呈直线关系,与粉煤灰掺量和含水量呈非线性关系,在因素的水平低时( $f = 0 \sim 10\%$ ,  $w = 13\% \sim 15\%$ ),增加快,水平高时,增加慢。强度趋势线的斜率,关于含水量两龄期的近似相等,即含水量的作用不随龄期变化,含水量主要通过影响水泥土的密实度,来影响强度;关于水泥掺量随龄期稍有增加,说明水泥在后期仍有一定的水化效应;关于粉煤灰掺量随龄期有明显的增加,说明粉煤灰的作用效应主要在后期。掺粉煤灰的水泥黄土的强度后期增长强劲,56 d 强度较 28 d 的强度增长从 15% 以上增大到 45%,且强度增长随水泥和粉煤灰掺量的增加而增加,掺粉煤灰的水泥黄土应以后期强度进行复合地基设计。

差小。各因素的作用极差均随龄期的增加而增大,粉煤灰掺量的作用极差增加最大,水泥的次之,含水量的作用极差增加非常微小。粉煤灰早期水化慢,后期水化快,对水泥土的强度贡献主要在后期。水泥在后期仍有一定程度的水化,对水泥土的后期强度也有一定的贡献。

研究范围内的水泥土均表现出明显的脆性破坏,随着龄期的增加脆性破坏特征越明显见图 5。

图 6 是与图 5 对应的试样的细观结构,试样中有许多短柱状的团粒结构,这些短柱状团粒是水泥和粉煤灰水化和离子交换的产物。56 d 龄期试样中的短柱状团粒明显的多于 28 d 龄期试样中的短柱状团粒,说明短柱状团粒的数量随龄期的增加明显增大,是粉煤灰后期水化强劲的佐证,水泥粉煤灰黄土后期强度明显增长的根本原因。

### 2.2 方差分析

水泥土的强度、弹性模量和干密度等参量方差分析所得的  $F$  值及显著性列于表 4,表中  $N$  表示不显著,  $R$  表示较显著,  $M$  表示显著,  $U$  表示极显著。正交试验方案  $L_9(3^4)$  置信度为 90%、95% 和 99% 时,对应的  $F_{1-\alpha}(2, 2)$  分别为 9.0、19.0 和 99.0。

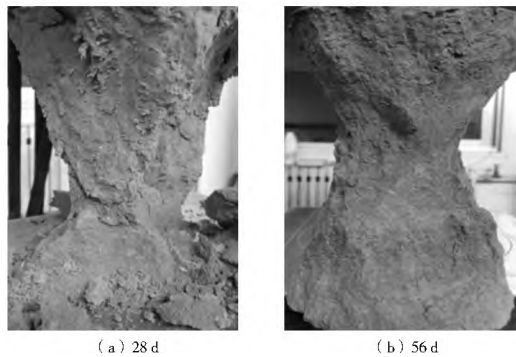


图 5 破坏形态  
Fig. 5 The fracture morphology

表 4  $F$ /显著性  
Tab. 4  $F$ /Remarkable

方差来源	$f_{cu}$		$E$		$\rho_d$
	28 d	56 d	28 d	56 d	
$c$	157.0/U	256.7/U	155.9/U	163.3/U	4.0/N
$f$	21.0/M	223.0/U	16.8/R	146.2/U	241.0/U
$w$	28.0/M	34.7/M	18.2/R	19.7/M	21.0/M

由表 4 可见,关于水泥土的干密度,粉煤灰掺量的影响极显著,是最重要的影响因素,含水量的影响显著,水泥掺量的影响不显著。粉煤灰掺量对水泥土干密度的影响极显著,反映了粉煤灰对水泥土的压实特性有重要影响,夯实水泥土的施工含水量应根据混合料的最优含水量确定。水泥掺量对水泥土干密度的影响不显著,反映了水泥掺量对水泥土的压实特性影响很小<sup>[3]</sup>,可不考虑水泥掺量对水泥土的压实特性影响,这一结论很有意义,水泥土的最大干密度和最优含水量可根据土料<sup>[21]</sup>或掺合料与土的混合料的击实试验确定,试验时可以保证水将土料或混合料充分拌均和润湿,消除水泥水化硬结的影响。关于水泥土的强度和弹性模量,水泥掺量的影响极显著,是最重要的影响因素,粉煤灰掺量的影响随龄期的增大而增大,由显著或较显著到极显著,含水量的影响显著。28 d 龄期粉煤灰掺量的影响

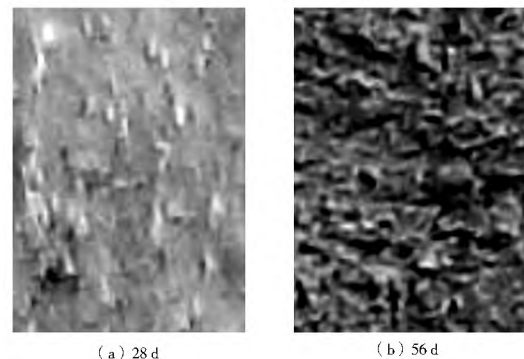


图 6 细观结构  
Fig. 6 Representative figure of micro structure

由图 4 极差分析可知,各因素对试样干密度影响的主次顺序为粉煤灰掺量、含水量和水泥掺量,误差列的极差最小,试验误差小。粉煤灰掺量对压实水泥土的干密度影响最大、含水量次之,水泥掺量有一定的影响。对水泥土压实特性的影响,粉煤灰掺量的影响远大于水泥掺量的影响。

各因素对试样 28 d 抗压强度影响的主次顺序为水泥掺量、含水量和粉煤灰掺量,对试样 58 d 抗压强度影响的主次顺序为水泥掺量、粉煤灰掺量和含水量,误差列两龄期的极差都是最小,说明试验误

较含水量的影响小一些,56 d 龄期粉煤灰掺量的影响较含水量的影响明显的高出许多。水泥在后期仍有一定的水化和强度增长,影响的显著性有所提高。粉煤灰的水化和对水泥土的强度贡献主要在后期,随龄期增加显著性明显提高。

含水量通过影响压实水泥土的干密度影响水泥土的强度和压缩性,是影响水泥土的强度和压缩性的显著因素,施工过程中应严格控制。

### 3 结论

(1) 对压实水泥土的干密度,粉煤灰掺量的影响极显著,含水量的影响显著,水泥掺量的影响不显著。水泥土最大干密度和最优含水量应考虑粉煤灰掺量的影响,可不考虑水泥掺量的影响。

(2) 对压实水泥土的强度和弹性模量,水泥掺量的影响极显著,含水量的影响显著,粉煤灰掺量的早期影响显著,粉煤灰掺量的后期影响极显著。粉煤灰能显著提高压实水泥黄土的强度和弹性模量,含水量主要通过对压实水泥黄土干密度的影响来影响强度和压缩性。

(3) 掺粉煤灰的水泥黄土后期强度增长大,56 d 强度较 28 d 的强度增长高达 45%,掺粉煤灰的水泥黄土应以后期强度进行复合地基设计。

(4) 水泥土的长期强度主要取决于胶凝材料的掺量,配合比不同的水泥黄土,其长期强度与压实度的相关性不显著。

#### 参考文献(References):

- [1] 王立峰,翟惠云. 纳米硅水泥土抗压强度的正交试验和多元线性回归分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 452-457. (WANG Lirong, ZHAI Huifun. Orthogonal test and regression analysis of compressive strength of nanometer silicon and cement stabilized soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 452-457. (in Chinese))
- [2] 周丽萍,申向东,白忠强. 外掺剂对冻融循环水泥土强度影响的试验研究[J]. 人民长江, 2008, 39(24): 73-76. (ZHOU Liping, SHEN Xiangdong, BAI Zhongqiang. Experimental study on the strength of cement soil impacted by the mixed agent under the cycling of freeze thaw[J]. Yangtze River, 2008, 39(24): 73-76. (in Chinese))
- [3] 汪海鹏,洪明强,谢镭. 夯实水泥土强度影响因素的试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2010, 29(2): 263-266. (WANG Haiou, HONG Mingqiang, XIE Lei. Experimental study on influence factors of compacted cement soil strength[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2010, 29(2): 263-266. (in Chinese))
- [4] 阮锦楼,阮波,阳军生,等. 粉质粘土水泥土无侧限抗压强度试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2009, 6(3): 56-60. (RUAN Jirou, RUAN Bo, YANG Junsheng, et al. Experimental study on cement-soil unconfined compressive strength of silty clay[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2009, 6(3): 56-60. (in Chinese))
- [5] 赵程,申向东,贾尚华,等. 密实度对压实水泥土强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S1): 360-365. (ZHAO Cheng, SHEN Xiangdong, JIA Shanghua, et al. Influence of density on strength of cemented soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 360-365. (in Chinese))
- [6] 王天亮,刘建坤,田亚护. 冻融作用下水泥及石灰改良土静力特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 193-198. (WANG Tianliang, LIU Jiankun, TIAN Yahu. Static properties of cement and lime modified soil subjected to freeze thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 193-198. (in Chinese))
- [7] 朱旋,孙勇,尚俊伟. 沙颍河耿楼枢纽高挡土墙墙后回填水泥土技术[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(6): 155-158. (ZHU Xuan, SUN Yong, SHANG Junwei. Technology Research of Backfill Cement Soil Behind High Retaining Wall of the Gerglou Control Project in Shayinghe River[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(6): 155-158. (in Chinese))
- [8] 韩鹏举,张文博,刘新,等. 氯化镁对水泥土早期强度的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 6(36): 1173-1178. (HAN Pengju, ZHANG Wenbo, LIU Xin, et al. Early strength of cemented soils polluted by magnesium chloride[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 6(36): 1173-1178. (in Chinese))
- [9] 于英霞,谢镭,张伟,等. 夯实水泥土强度影响因素的试验研究[J]. 煤炭工程, 2009(3): 87-89. (YU Yingxia, XIE Lei, ZHANG Wei, et al. Experimental research on factors influenced to compacted cement soil strength[J]. Coal Engineering, 2009(3): 87-89. (in Chinese))
- [10] 陈达,庄宁,廖迎娣,等. 水泥土力学特性随龄期发展规律试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(1): 26-29. (CHEN Da, ZHUANG Ning, LIAO Yingdi, et al. Experimental study on mechanical properties of cement soil with age[J]. Hydro Science and Engineering, 2012(1): 26-29. (in Chinese))
- [11] 刘飞,翟文静. 双灰夯实水泥土强度方差分析研究[J]. 建筑科学, 2010, 26(7): 5-9, 21. (LIU Fei, ZHAI Wenjing. A study on strength of cement soil mixed with lime and fly ash with analysis of variance[J]. Building Science, 2010, 26(7): 5-9, 21. (in Chinese))
- [12] 欧阳克连,宁宝宽. 水泥土强度影响因素的研究[J]. 中外公路, 2009, 29(4): 189-191. (OUYANG Kelian, Ning Baokuan. Study on the factors affecting the strength of cement soil[J]. Foreign Highway, 2009, 29(4): 189-191. (in Chinese))
- [13] 周丽萍,申向东,李学斌,等. 天然浮石粉水泥土力学性质的试验研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39(3): 492-497. (ZHOU Liping, SHEN Xiangdong, LI Xuebin, et al. Experiment study of mechanical properties of natural pumice powder cement soil[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(3): 492-497. (in Chinese))

(下转第 130 页)

- Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(2): 88-90. (in Chinese)
- [12] 施春蓉, 郭新蕾, 杨开林, 等. 旋流环形堰竖井泄洪洞三维流场数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(5): 1035-1039. (SHI Chunrong, GUO Xinlei, Yang KaiLin, et al. Three dimensional numerical simulation of morning glory shaft spillway with swirling flow[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(5): 1035-1039. (in Chinese))
- [13] 薛宏程, 刁明军, 岳书波, 等. 溢洪道出口斜切型挑坎挑射水舌三维数值模拟[J]. 水利学报, 2013, 44(6): 703-709. (XUE Hongcheng, DIAO Mingjun, YUE Shubo, et al. 3D numerical simulation of the jet nappe in the beveled flip bucket of the spillway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(6): 703-709. (in Chinese))
- [14] 王玲玲, 严忠民. 石梁河水库消力池强紊动水流的数值模拟[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 363-367. (WANG Lingling, YAN Zhongmin. Numerical simulation of energy dissipator flow field for shilianghe reservoir[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(3): 363-367. (in Chinese))
- [15] McGuirk J, Rodi W. A mathematical model for a vertical jet discharging into a shallow lakes[A]. Proceedings of the 17th IAHR Congress[C]. Baden Baden, A72, 1977.
- [16] 栗金钊, 罗文彪, 陈剑. 某斜向涵管进水泵站前池流态数值模拟与整流措施研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(6): 123-126, 153. (LI Jinzhao, LUO Wenbiao, CHEN Jian. Numerical simulation and study on modification of flow pattern at the forebay of a side inlet pump station[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(6): 123-126, 153. (in Chinese))
- [17] 刘达, 廖华胜, 李连侠, 等. 浅水垫消力池的大涡模拟研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(5): 28-34. (LIU Da, LI AOHuasheng, LI Lianxia, et al. Large eddy simulation on stilling basin with shallow water cushion[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2014, 46(5): 28-34. (in Chinese))
- [18] 吴战营, 牧振伟. 辅助消能工联合运用试验研究及数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2013, (7): 111-117. (WU Zhan Ying, MU Zhenwei. Numerical simulation and experimental investigation on the joint use of auxiliary energy dissipater[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013, (7): 111-117. (in Chinese))
- [19] 邱秀云. 水力学[M]. 乌鲁木齐: 新疆电子出版社, 2008. (QIU Xiuyun. Hydraulics[M]. Urumqi, Xinjiang Electronic Press, 2008. (in Chinese))
- [20] 张挺, 伍超, 卢红, 等. X型宽尾墩与阶梯溢流坝联合消能的三维流场数值模拟[J]. 水利学报, 2004, (8): 15-20. (ZHANG Ting, WU Chao, LU Hong, et al. 3D numerical simulation of flow on stepped spillway combined with X shape flaring gate piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (8): 15-20. (in Chinese))
- [21] 王月华, 包中进, 王斌. 基于 Flow-3D 软件的消力池三维水流数值模拟[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2012, 45(4): 454-457, 476. (WANG Yuehua, BAO Zhongjin, WANG Bin. Three dimensional numerical simulation of flow in stilling basin based on Flow-3D[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(4): 454-457, 476. (in Chinese))

## (上接第 123 页)

- [14] 周丽萍, 申向东, 白忠强. 外掺剂对水泥土改性效果的试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(7): 74-78. (ZHOU Liping, SHEN Xiangdong, BAI Zhongqiang. The experimental study on change in property of cement soil by added additives[J]. Industrial Construction, 2009, 39(7): 74-78. (in Chinese))
- [15] 王凤池, 燕晓, 刘涛, 等. 橡胶水泥土强度特性与机理研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(2): 46-51. (WANG Fengchi, YAN Xiao, LIU Tao, et al. Research on strength characteristics and mechanism of rubberized cement-soil[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2010, 42(2): 46-51. (in Chinese))
- [16] 李建军, 梁仁旺. 水泥土抗压强度和变形模量试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 473-477. (LI Jianjun, LIANG Renwang. Research on compression strength and modulus of deformation of cemented soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 473-477. (in Chinese))
- [17] 庞文台, 申向东. 复合水泥土抗渗性能的实验研究[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(6): 1617-1620. (PANG Wentai, SHEN Xiangdong. Study on impervious performance of cement-soil[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(6): 1617-1620. (in Chinese))
- [18] 苏玉杰, 何耀辉, 陈式华. 夯实水泥土抗渗性能试验研究[J]. 人民黄河, 2011, 33(12): 126-128. (SU Yujie, HE Yaohui, Chen Shihua. Experimental study of the permeability resistance of compacted cement soil[J]. Yellow River, 2011, 33(12): 126-128. (in Chinese))
- [19] GB 50025-2004, 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. GB 50025-2004, Code for building construction in collapsible loess regions[S]. (in Chinese)
- [20] 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)
- [21] JGJ 79-2002, 建筑地基处理规范[S]. JGJ 79-2002, code for ground treatment of buildings[S]. (in Chinese)