

文章编号:1673-2049(2013)03-0091-05

# 含盐量对水泥灰土强度特性的影响

米海珍<sup>1</sup>,王月礼<sup>1</sup>,赵景华<sup>2</sup>,文桃<sup>1</sup>,应赛<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050; 2. 安丘市房屋拆迁管理办公室,山东 安丘 262100)

**摘要:**通过对水泥灰土不同含盐量试样进行一系列三轴不固结不排水剪切试验,探讨了含盐量对水泥灰土剪切强度参数的影响,并从微观结构性上做出了合理的解释。试验结果表明:水泥灰土强度随含盐量的增加而增大,但当含盐量达到一定程度时,其强度又随含盐量的增大而降低,且含盐量存在一个分界值;此外,水泥灰土的脆断性受围压和含盐量等因素的影响,围压越小,含盐量越高,脆性就表现得越明显。

**关键词:**水泥灰土;剪切强度;含盐量;三轴试验;应力-应变曲线

**中图分类号:**TU411 **文献标志码:**A

## Effects of Salt Content on Strength Characteristic of Cement Lime Soil

MI Hai-zhen<sup>1</sup>, WANG Yue-li<sup>1</sup>, ZHAO Jing-hua<sup>2</sup>, WEN Tao<sup>1</sup>, YING Sai<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;

2. House Dismantlement Administrative Office of Anqiu, Anqiu 262100, Shandong, China)

**Abstract:** By a series of no consolidated undrained shear triaxial tests of cement lime soil specimens with different salt contents, effects of salt contents on shear strength parameters of cement lime soil were discussed and reasonable explanation on the micro-structure was introduced. The test results show that the intensity parameter of cement lime soil increases with increasing of salt content, but when the salt content reaches a certain level, its strength decreases with increasing of salt content, and there is a boundary value in salt content. Moreover, the brittle fracture resistance of cement lime soil is influenced by factors such as confining pressure, salt content, etc. The smaller the confining pressure is, the higher the salt content is, the more obvious the brittleness of cement lime soil is.

**Key words:** cement lime soil; shear strength; salt content; triaxial test; stress-strain curve

## 0 引言

石灰是一种资源极为丰富的廉价建筑材料,用其改善和增强土的性能,早已被人们所熟知。目前,灰土除大量用于处理湿陷性黄土地基以外,还被广泛用来处理其他非饱和土和杂填土地基,是用于改良软土地区地基最常用的一种材料。然而灰土在盐渍土地区的应用研究很欠缺,尤其是在西北硫酸盐盐渍土地区。灰土的性质受含水率、围压、龄期、干

密度、浸水等因素的影响。韩晓雷等<sup>[1]</sup>和刘有科<sup>[2]</sup>对灰土的影响因素和本构模型做了研究,也对灰土的最佳含水率和最大干密度进行了大量研究<sup>[3-4]</sup>,文献<sup>[5]</sup>,<sup>[6]</sup>中主要从浸水和围压2个方面进行试验研究,其他对灰土的研究大多是对具体工程中得到的灰土挤密桩、灰土垫层等参数进行的相关研究。然而关于硫酸盐含盐量对灰土强度有何影响的研究较少,甚至可以说是很欠缺。灰土在硫酸盐盐渍土地区应用广泛,随着时间的推移,难免会有盐分侵入

收稿日期:2013-05-15

基金项目:甘肃省自然科学基金项目(3ZS042-B25-031)

作者简介:米海珍(1956-),男,甘肃庆阳人,教授,工学博士,E-mail:mihaizhen@126.com。

灰土中,这样会对灰土的强度造成影响,出现腐蚀、盐胀、溶陷等不良工程特性,这与以氯盐为主的滨海盐渍土有很大的区别。因此,研究硫酸盐含盐量对灰土强度指标的影响,对盐渍土地基工程的设计施工及安全运行评估均有着十分重要的意义。

1 试验制备及试验方法

1.1 试验材料

试验所用土样为水泥灰土(黄土、石灰、水泥的体积比为 7 : 2 : 1),其中,黄土采用的是兰州兰工坪的扰动黄土,各物理性能指标如表 1 所示。水泥标号为 42.5,石灰为消解石灰, $w(\text{CaO})=74.6\%$ , $w(\text{MgO})=7.9\%$ , $w(\cdot)$ 为各化学成分的质量分数。

表 1 土的物理性能指标

Tab. 1 Physical Property Indexes of Soil

土粒相对密度	液限/%	塑限/%	塑性指数
2.73	25.4	16.1	9.3

1.2 试验方法

(1)试样制备:试样制备根据最新《土工试验规范》,在烘箱恒温 105 ℃下将土料烘干,碾碎后过粒径为 5 mm 孔径的筛,将其按水泥、石灰、黄土的体积比为 1 : 2 : 7 拌合均匀,然后经喷水制备不同含水量的试样,通过击实试验确定水泥灰土的击实最大干密度及相应的含水率。试验得到水泥灰土最大干密度  $\gamma_{\text{dmax}}=1.5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,最优含水量  $\omega_{\text{op}}=24\%$ 。最后在最优含水量下制备试验试样,试样为圆柱体,底面直径为 61.8 mm,高度为 125 mm。

(2)试验目的:对灰土性质的影响因素较多,本试验只考虑了围压、含盐量 2 个主要因素,以探求在不同含盐量及不同围压下水泥灰土力学性能的变化规律,进而为灰土处理硫酸盐土地地区地基提供试验参数。

(3)试验条件:将制备好的试样在塑料袋内密封养护,养护分为 2 个龄期,分别为 7,14 d,试验试样共 80 件,每个龄期各为 40 件(每组都有 1 个平行试验)。含盐量  $S$ (质量分数,下文同)为 0%,2%,4%,7%,12% 五种情况,围压为 0,100,200,300 kPa 四种情况。将分别达到 7,14 d 龄期的试样放在不同含盐量的盐水中进行浸泡,浸泡时间为 16 d,使试样达到饱和状态,然后对其做三轴应变控制式试验。

2 试验结果分析

2.1 围压对水泥灰土强度的影响

图 1 为水泥灰土(养护龄期 14 d)常规三轴不固

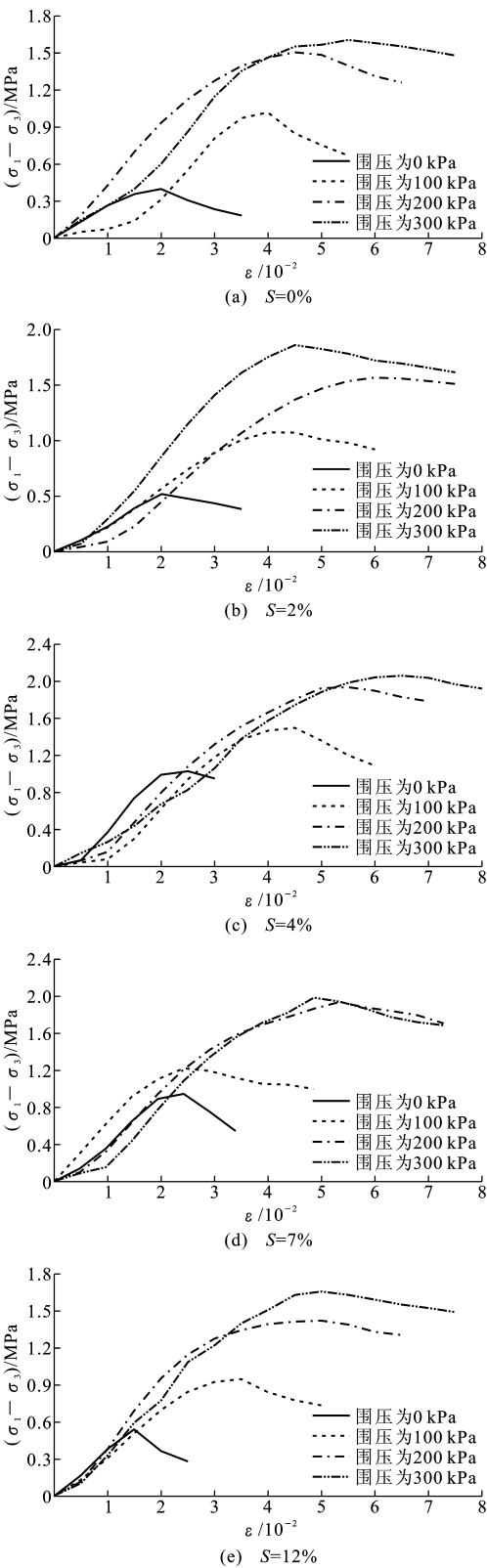


图 1 不同含盐量下水泥灰土的应力-应变曲线  
Fig. 1 Stress-strain Curves of Cement Lime Soils Under Different Salt Contents

结不排水剪切试验所得到的围压分别为 0,100,200,300 kPa 下的应力-应变曲线关系,其中, $\sigma_1$  为

垂直方向的应力,  $\sigma_3$  为围压,  $\epsilon$  为轴向应变。不难发现, 同一含盐量下的水泥灰土试样在剪切破坏时的主应力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  均随围压  $\sigma_3$  的增加而增加。试验结果表明, 水泥灰土具有很强的脆断性, 剪切破坏主要是脆性破坏。试样破坏时破裂面明显, 破坏面与大主应力作用面的夹角为  $45^\circ + \varphi/2$ ,  $\varphi$  为内摩擦角, 如图 2 所示。随着围压的增大, 水泥灰土的脆断性减弱, 此外, 经各种含盐量溶液浸泡后的水泥灰土的软化程度与围压有很大的关系, 该性质与文献[6]中研究的结果相吻合。

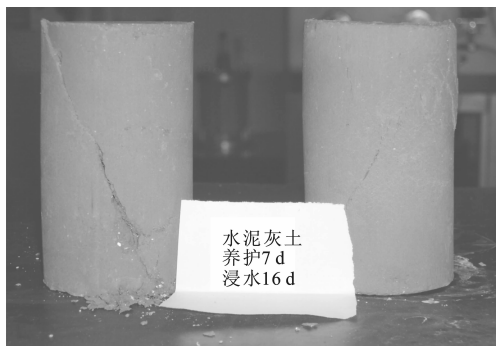


图2 三轴下水泥灰土试样破坏

Fig. 2 Sample Destruction of Cement Lime Soil Under Triaxial

## 2.2 含盐量对水泥灰土强度的影响

图3为水泥灰土(养护龄期14 d)在不同含盐量下的应力-应变曲线(含盐量分别为0%, 2%, 4%, 7%, 12%)。将不同含盐量下水泥灰土的峰值强度  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  绘制于图4中, 由试验数据可知, 水泥灰土的峰值强度随含盐量的增加先增大后减小。

由图4可以看出, 含盐量与水泥灰土峰值强度呈非线性(三次多项式)关系, 利用最小二乘法将表2中的数据多次拟合后得到峰值强度与含盐量的多项式关系, 即

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = A + B_1 S + B_2 S^2 + B_3 S^3 \quad (1)$$

式中:  $A, B_1, B_2, B_3$  均为系数。

经拟合后发现拟合效果较好, 相关系数绝对值在0.99左右。计算得到:  $A = 924.02, B_1 = 96.37, B_2 = 4.274, B_3 = -0.997$ , 判定系数  $R^2 = 0.980$ 。对式(1)进行数学求解可以得到: 当  $S = 4.8\%$  时其峰值强度达到最大值。由此可知, 在一定的含盐量范围内, 当周围土体含盐量小于4.8%时,  $\text{SO}_4^{2-}$  含量的增大有利于提高水泥灰土的强度, 但当  $\text{SO}_4^{2-}$  含量超过4.8%时, 随着  $\text{SO}_4^{2-}$  含量的增加, 水泥灰土的强度又会降低。

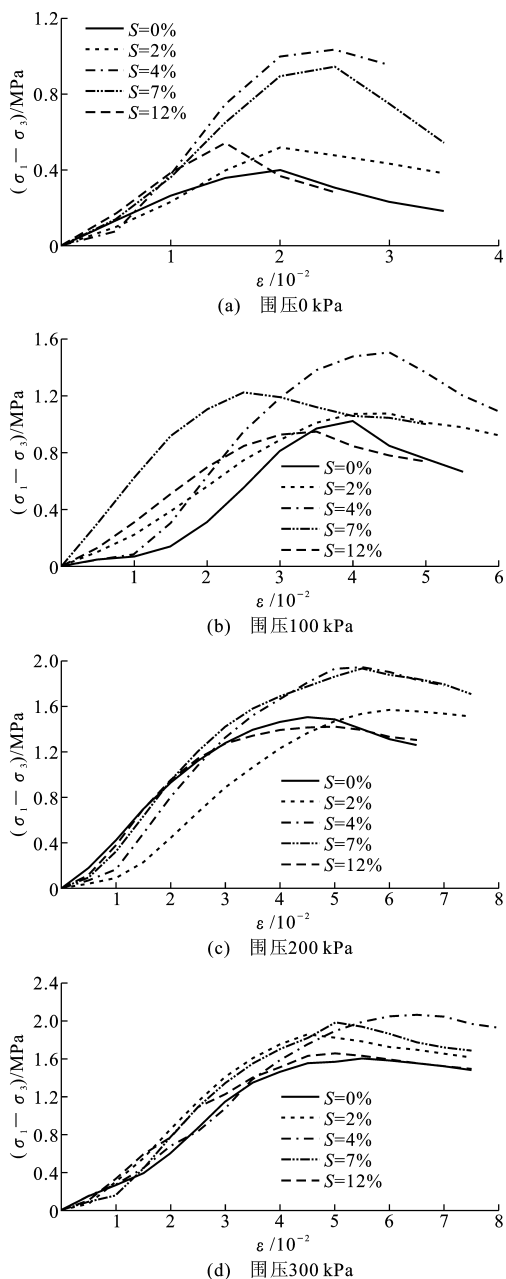


图3 不同围压下水泥灰土的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain Curves of Cement Lime Soils Under Different Confining Pressures

## 2.3 含盐量对水泥灰土强度参数的影响

图5为三轴下  $c, \varphi$  成果图(养护龄期14 d), 由此可以得到不同含盐量下水泥灰土的强度指标。图5中,  $\tau$  为剪切强度,  $\sigma$  为应力,  $c$  为粘聚力。不同含盐量下水泥灰土的强度指标统计值见表2。

图6为粘聚力  $c$  随不同含盐量的变化曲线, 图7为内摩擦角  $\varphi$  随不同含盐量的变化曲线。

试验发现, 水泥灰土的  $c, \varphi$  值均随着含盐量的增加先增大后减小。根据文献[7]中的研究可知, 水泥灰土中的  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  发生化学反应生成石膏

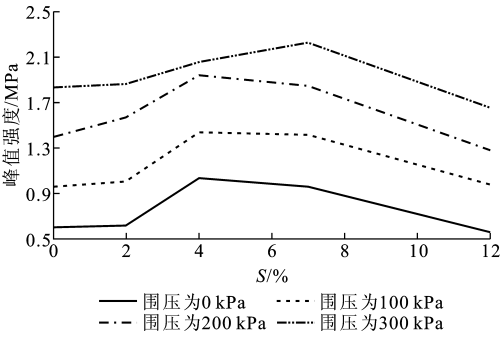
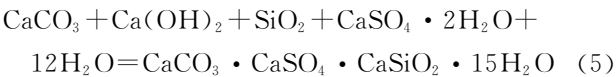
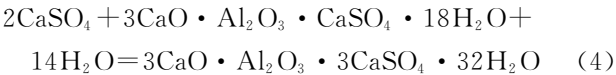
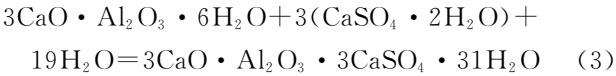


图 4 不同围压下水泥灰土峰值强度-含盐量曲线  
Fig. 4 Peak Strength-salt Content Curves of Cement Lime Soil Under Different Confining Pressures

( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), 石膏又与水化铝酸钙反应生成三硫型水化硫铝酸钙, 使一部分自由水转化成结晶水而减少水的含量, 同时体积增大, 使水泥灰土体积膨胀, 产生膨胀力。其主要化学反应方程式为



随着  $\text{SO}_4^{2-}$  的不断侵入, 水泥灰土中的离子浓度逐渐增大, 因此离子的交换作用就变强, 以上反应生成物的体积比原来增大 1.5 倍, 导致土体压密, 从而使水泥灰土颗粒间的联结变得丰富且咬合紧密, 故  $\varphi$  值增大; 同时反应生成的复杂铝酸钙水化物等使土颗粒间的联结增强、增多。另外, 水化硫酸钙晶体的胶结作用也有利于粘聚力的增大, 故  $c$  值也在不断增大。但若硫酸盐含量过大, 膨胀会超过水泥水化物胶结作用产生的粘结强度, 使已成型的水泥灰土结构发生破坏, 粘结强度显著减小, 即表现为  $c$  值的减小; 同时增大了水泥灰土的孔隙, 减小了水泥灰土之间的摩擦力, 即表现为  $\varphi$  值的减小, 也就体现了水泥灰土强度的降低。

### 3 结 语

(1) 含盐量是水泥灰土的抗剪强度指标的主要影响因素之一, 尤其是对粘聚力的影响较大, 粘聚力随着含盐量的增加先增大后减小; 对内摩擦角也有类似的影响规律, 只是没有粘聚力那么明显。

(2) 通过试验可以得出, 含盐量及围压对水泥灰土是否具有脆性的影响很大。

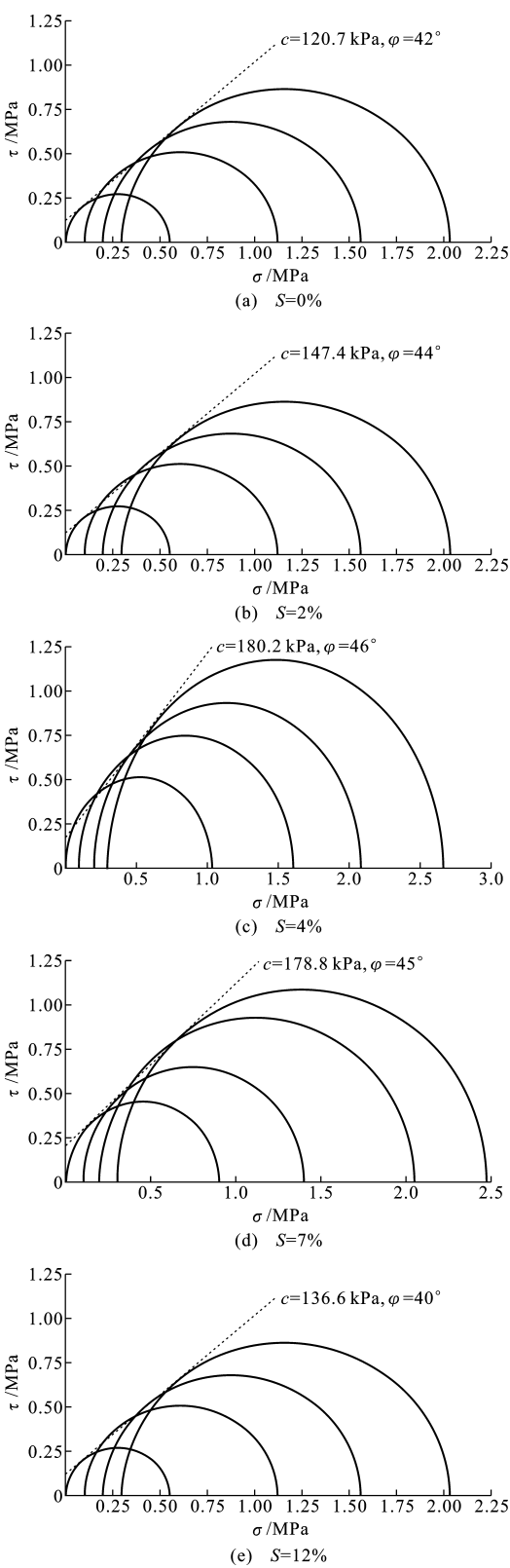


图 5 三轴下  $c, \varphi$  成果图  
Fig. 5  $c, \varphi$  Result Maps Under Triaxial

(3) 通过本试验所得出的含盐量对水泥灰土强度的影响界限可为工程设计、工程安全监测, 尤其是早期预测研究有重要参考意义。

表 2 不同含盐量下水泥灰土的强度指标统计值

Tab. 2 Statistical Results of Strength Index of Cement Lime Soil Under Different Salt Contents

养护龄期/d	7					14				
S/%	0	2	4	7	12	0	2	4	7	12
c/kPa	100.4	123.0	153.3	144.2	112.7	120.7	147.4	180.2	178.8	136.6
φ/(°)	41	42	43	40	38	42	44	46	45	40

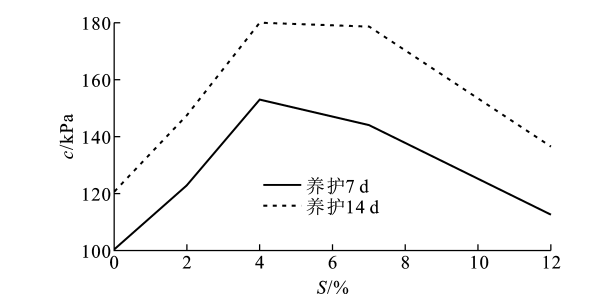


图 6 粘聚力随含盐量的变化曲线

Fig. 6 Variation Curves of Cohesions with Salt Contents

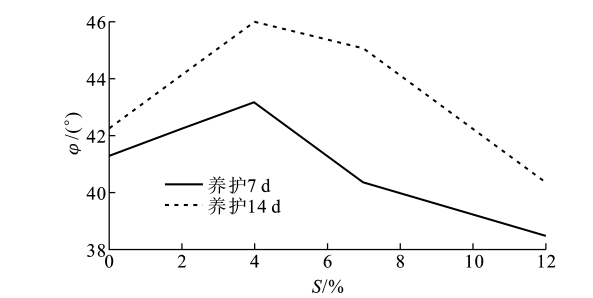


图 7 内摩擦角随含盐量的变化曲线

Fig. 7 Variation Curves of Internal Friction Angles with Salt Contents

(4)以上研究结果反映了水泥灰土强度变化的一个侧面,有关水泥灰土强度参数变化的其他影响因素还有待进行深入的研究。

参考文献:

References:

[1] 韩晓雷,郅彬,郭志勇.灰土强度影响因素研究[J].岩土工程学报,2002,24(5):667-669.  
HAN Xiao-lei, ZHI Bin, GUO Zhi-yong. Research on the Principal Factors in Strength of the Lime-loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5):667-669.

[2] 刘有科.灰土强度影响因素及其本构关系的研究[D].西安:西安建筑科技大学,2004.

LIU You-ke. Research on the Influence Factors in Strength and the Constitutive Relationship of the Lime-loess[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology University,2004.

[3] 王希玲.灰土击实试验及其应用[J].西北建筑工程学院学报:自然科学版,2002,19(3):18-21.  
WANG Xi-ling. Study of Compaction Test of Lime-soil and Its Use[J]. Journal of Northwestern Institute of Architectural Engineering: Natural Sciences, 2002, 19(3):18-21.

[4] 董玉文,张伯平,唐林.黄土灰土的击实性与抗剪性试验研究[J].西北水资源与水工程,2001,12(1):62-64.  
DONG Yu-wen, ZHANG Bo-ping, TANG Lin. Test About Compaction and Shearing Properties of Lime-loess[J]. Northwest Water Resources & Water Engineering, 2001, 12(1):62-64.

[5] 米海珍,王昊,高春,等.灰土的浸水强度及残余强度的试验研究[J].岩土力学,2010,31(9):2781-2785.  
MI Hai-zhen, WANG Hao, GAO Chun, et al. Study of Immersion Strength and Residual Strength of Lime-loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9):2781-2785.

[6] 米海珍,朱浩稳,王昊.三轴试验下二八灰土强度的变化规律[J].兰州理工大学学报,2009,35(4):117-120.  
MI Hai-zhen, ZHU Hao-wen, WANG Hao. Variation Pattern of Strength of 2 : 8 Lime-soil Based on Its Tri-axial Test[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2009, 35(4):117-120.

[7] 周承刚,高俊良.水泥土强度的影响因素[J].煤田地质与勘探,2001,29(1):45-48.  
ZHOU Cheng-gang, GAO Jun-liang. Control Factors of Grouting Soils[J]. Coal Geology & Exploration, 2001, 29(1):45-48.