

碱液加固黄土体的工程性质研究

金鑫¹, 王铁行¹, 于康康^{1,2}, 罗扬¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 郑州中核岩土工程有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 考虑NaOH掺量、黄土塑性指数、土样干密度、养护温度等因素, 基于碱液加固黄土试验研究, 揭示出: 加固体强度随NaOH掺量的增加而增大, 但当NaOH平均掺量超过3%时, 强度增长不明显. 土样塑性指数和干密度的增大, 使加固体强度增大. 加固体强度随养护温度的升高总体呈增大趋势, 当养护温度由60℃升至80℃时, 强度提高幅度显著. 综合对比上述因素对加固体强度的影响得出NaOH掺量和养护温度使其强度增长最为显著. 通过水稳性及冻融试验, 发现CaCl₂的加入有助于提高加固体水稳性, NaOH掺量的提高能削弱冻融作用对加固体的劣化. 通过现场自渗注浆试验, 得出单孔自渗注浆量与注浆时间的关系式并初步确定了碱液自渗加固的影响范围.

关键词: 黄土; 碱液; 加固体无侧限抗压强度; 水稳性及冻融试验; 自渗注浆

中图分类号: TU 444

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)03-0383-05

Research of engineering properties for sodium hydroxide solution reinforced loess

JIN Xin¹, WANG Tiehang¹, YU Kangkang^{1,2}, LUO Yang¹

(1. College of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. China Nuclear Industry Geotechnical Engineering Co., LTD, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: A research of sodium hydroxide solution reinforced loess is conducted by taking into account the different NaOH proportions, plasticity indices, dry densities and curing temperatures. The analysis result shows that the reinforced loess' strength increases with the increase of NaOH proportion and when the NaOH proportion exceeds 3%, the reinforced loess strength has no significant growth. The reinforced loess' strength increases with the increase of loess' plastic index and dry density. The reinforced loess' strength increases with the increase of curing temperature and has an obvious increase as the curing temperature rises from 60℃ to 80℃. Taken into consideration the above factors, the test results show that NaOH proportion and curing temperature may affect reinforced loess' strength significantly. Through water stability and freezing-thawing cycles test, the water stability of reinforced loess can be well improved by adding CaCl₂. The reinforced loess' deterioration can be weakened by means of increasing NaOH proportion in freezing-thawing cycles test. The reinforced range and relationship of single hole's grouting amount and time can be acquired via field self-permeated grouting test.

Key words: loess; NaOH solution; reinforced loess unconfined compressive strength; water stability and freezing-thawing cycles test; self-permeated grouting

处理湿陷性黄土地基的化学方法主要有硅化法和碱液法^[1-2], 目前硅化法的应用基本上参照其它地区经验, 采用压力注浆, 需压力设备, 成本较高^[2-3]. 碱液法相较硅化法, 浆材成本低廉且溶液性质为真溶液, 若结合黄土大孔隙的特点进行自渗注浆将大幅提高施工的便利性和经济性, 但目前碱液固化黄土研究侧重于碱液的改性, 考虑土体干密度及养护温度对加固体强度差异性尚缺乏认识, 对加固体水稳性及冻融强度变化尚缺乏研究, 在较为便利的自渗条件下, 加固效果尚难以评价^[4-6]. 基于此论文通过室内强度试验、加固体水稳性及冻融循环试验、现场注浆试验对碱液固化黄土的规律进行研究, 为碱液法在黄土地区进行地基处理, 原位加固工程提供参考.

1 室内试验

1.1 NaOH掺量对加固体强度的影响

选取四个地区的黄土样进行试验, 其物理性质见表1, 试验用NaOH参数见表2.

表1 试验黄土的物理、力学性质指标平均值

Tab.1 Average values of loess physical and mechanical properties

取样地点	土粒比重 d_s	含水量 $\omega/\%$	密度 ρ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	孔隙比 e	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 I_P
西安	2.71	18.28	1.47	1.17	29.23	17.56	11.67
咸阳	2.71	16.55	1.51	1.08	29.35	18.75	10.60
铜川	2.71	16.20	1.53	1.05	30.96	19.38	11.58
兰州	2.70	13.32	1.39	1.20	21.91	15.41	6.50

表2 试验用NaOH技术指标
Tab. 2 Parameters of NaOH

分子式	分子量	NaOH含量	杂质含量	钙、铝含量
NaOH	40	≥99%	≤1%	≤0.01%

将取自以上四个地区的黄土样自然风干后碾碎,过1 mm标准筛,由于实际工程中进行碱液加固时,加固范围内土体的含水量短时间内接近饱和,评价加固效果时其含水量也处于较高水平,故试验根据取样地点黄土样的液限平均值,将黄土样均配制成含水量为27%,干密度为1.5 g/cm³的试样,根据已有工程经验,当NaOH掺量为干土质量的3%时,土体强度已满足工程要求,为进一步探究加固体强度随NaOH掺量的变化规律,试验采用的掺量分别为1.2%、1.7%、2.2%、2.7%、3.2%、3.7%、4.2%、4.7% (NaOH质量与干土质量的百分比)。

将试样制成高80 mm,直径39.1 mm的圆柱形,在25℃室温下标准养护28 d,进行无侧限抗压强度试验^[7]结果如下:

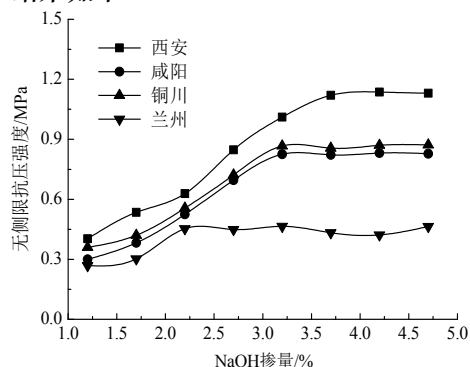


图1 加固体强度随NaOH掺量变化曲线

Fig.1 Curves of reinforced loess unconfined compressive strength of different NaOH proportions

由图1可以看出,用以上四个地区黄土样制成的加固体随着NaOH掺量的逐渐增大,其加固体强度逐渐增大,对兰州地区土样,当NaOH掺量超过2.3%时,其强度增长不显著.西安地区试样,NaOH掺量超过3.7%时,强度增长不明显.咸阳,铜川两地试样,当NaOH掺量超过3.3%时,强度增长不明显.总体上当NaOH掺量平均超过3.0%时,加固体强度增长趋势趋于平缓并且兰州地区试样强度低于西安、铜川、咸阳试样。

由于在碱液加固范围内,黄土样中呈游离状态的二氧化硅、铝氧化物及铝硅酸盐类与NaOH反应生成的硅酸凝胶数量一定,此时土中的Ca²⁺、Mg²⁺与NaOH溶液发生置换反应生成Ca(OH)₂、Mg(OH)₂.硅酸凝胶与Ca(OH)₂、Mg(OH)₂进行脱水缩合作用,生成强度更高且有水硬性的钙铝硅酸盐络合物,使土颗粒能更牢固地胶结在一起,当络合物生成达上限后即使提高NaOH掺量,加固体强度

增长不明显。

由于土中细颗粒含量愈多,土中SiO₂相对溶出量愈大土颗粒与NaOH的反应能力愈强,碱液对土的固化作用也愈佳所以试验中塑性指数相对较高的陕西地区黄土与碱液作用所形成加固体强度大于兰州地区。

1.2 土样干密度对加固体强度的影响

将来自于西安地区的黄土样配置成含水量均为24%,干密度分别为1.4 g/cm³、1.5 g/cm³、1.6 g/cm³的土样,常温养护28 d测定不同NaOH掺量下加固体无侧限抗压强度,试验结果如下:

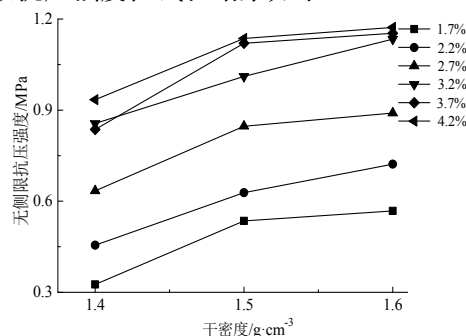


图2 加固体强度随干密度变化曲线

Fig.2 Curves of reinforced loess unconfined compressive strength of different dry densities

由图2可以看出,在相同NaOH掺量条件下,随着黄土样干密度的增大,加固体抗压强度逐渐增大;相同干密度条件下,随NaOH掺量的增加,加固体抗压强度增大.进一步分析图2可知,加固体强度随NaOH掺量增加的提高幅度大于随土样干密度增大的幅度,说明土颗粒与NaOH反应生成胶结物强度大于由于土颗粒挤密所产生的咬合强度。

1.3 温度对加固体强度的影响

常温下碱液对黄土的固化作用反应缓慢,为探究环境温度的变化对加固体强度变化的影响规律,现将西安地区黄土样制成的含水量为27%,干密度为1.5 g/cm³,NaOH掺量为1.7%的加固体用塑料薄膜包裹严实放入恒温水浴箱中进行养护^[8],其强度试验结果如下:

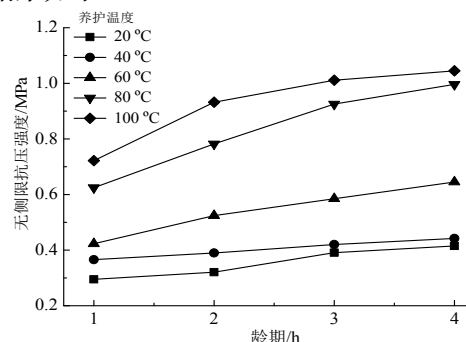


图3 加固体强度随养护温度变化曲线

Fig.3 Curves of reinforced loess unconfined compressive strength of different curing temperatures

由图3可看出, 在同一养护时间内, 随着养护温度升高, 加固体强度逐渐增大. 养护温度由20℃升至40℃时, 加固体强度增长趋势不明显, 温度由40℃升至80℃时, 加固体强度增长趋势显著, 在养护时间分别为1 h、2 h、3 h、4 h时, 80℃比40℃其强度分别提高了70.77%、100.51%、120.24%、125.34%强度和温度的关系呈非线性, 大于80℃时, 强度增长趋势减弱. 总体上, 温度越高, 养护时间越长, 加固体强度越高.

黄土样在加固过程中的主要反应是在固-液相之间进行的, 常温下其反应速度缓慢, 温度的提高会加快黄土与碱溶液反应生成硅酸凝胶的速度并促进其脱水缩合, 加强了矿物间的胶结作用, 提高了土颗粒之间的连接强度, 从而改善了土体强度.

通过上述试验, 得到NaOH掺量、黄土塑性指数、土样干密度、养护温度、龄期的变化对加固体强度的提高幅度, 结果见表3.

表3 不同试验变量对加固体强度的提高幅度
Tab.3 Range of reinforced loess' strength improvement by different test variables

NaOH掺量	塑性指数	干密度	温度	养护时间
135%	38%	54%	128%	41%

由表3可以看出, NaOH掺量和养护温度对加固体强度的提高最为关键.

1.4 加固体水稳定性试验

抗水解能力是检验加固体耐久性能的重要指标, 将含水量27%, 干密度为1.5 g/cm³, NaOH掺量分别为2.2%和3.2%的土样, 一组常温正常养护, 一组浸入到蒸馏水中^[9-10], 90 d后, 试验结果如下.

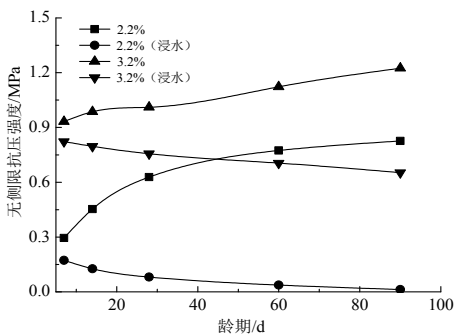


图4 浸水作用对加固体强度影响曲线
Fig.4 Curves of reinforced loess' strength variation under the effect of soaking

由图4可以看出, 随着时间的增长, 未浸水试样强度逐渐增大, 浸水试样强度逐渐减小. 掺量分别为2.2%和3.2%的未浸水土样, 90 d后的强度相较7d后强度增幅分别为180.00%和31.44%. 浸水土样, 90 d后的强度较7 d后强度降幅分别为92.49%和20.66%, 说明提高NaOH掺量, 有助于提高加固体水稳性.

加固体浸水时由于土颗粒间的钠铝硅酸盐类胶结是非水稳性的, 只有土颗粒周围有Ca(OH)₂存在的条件下, 才能使该胶结物成为强度高且具有水硬性的钙铝硅酸盐络合物, NaOH掺量的提高, 一定程度上促进该络合物的生成, 有助于提高加固体水稳性.

为验证Ca(OH)₂对生成络合物的作用, 将NaOH掺量为3.2%的试样, 放入50 g/L的CaCl₂溶液中, 进行为期90 d的养护, 试验结果如下.

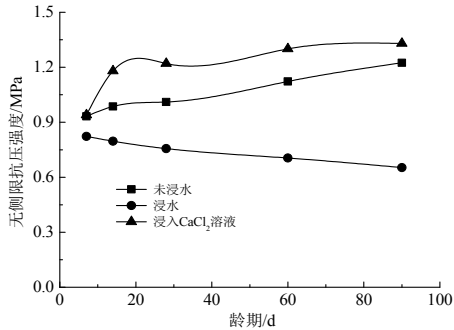


图5 CaCl₂对加固体强度影响曲线
Fig.5 Curves of reinforced loess' strength variation under the effect of CaCl₂

由图5可以看出, 浸入CaCl₂溶液中的试样, 强度随着龄期的增长而增大且大于未浸水试样. 由于NaOH与土作用后生成的钠硅酸盐有限, CaCl₂的加入不但能与土中的部分NaOH作用, 生成加固所需的Ca(OH)₂而且部分CaCl₂也能直接与钠铝硅酸盐络合物生成水硬性的胶结物, 使加固体强度进一步提高.

1.5 加固体冻融强度试验

黄土主要分布在季节性温差变化较大的西北地区, 强烈的冻融作用会引起土体结构发生破坏, 故将含水量为27%, 干密度为1.5 g/cm³, NaOH掺量分别为2.2%、2.7%、3.2%的加固体进行冻融循环试验 (冻融循环冻结温度为-10℃, 融化温度为10℃) 选取冻融周期为48 h (冷却24 h, 融化24 h) 分别进行0、1、3、5、7、9次的冻融循环^[11-14], 然后进行无侧限抗压强度试验结果如下.

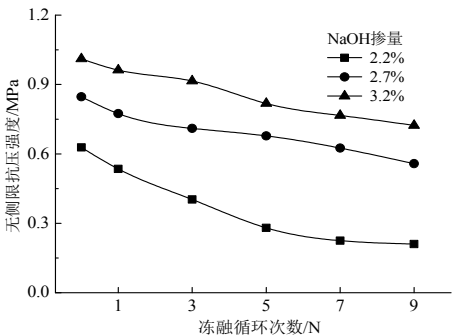


图6 冻融作用对加固体强度影响曲线
Fig.6 Curves of reinforced loess' strength variation under the effect of freezing-thawing cycles

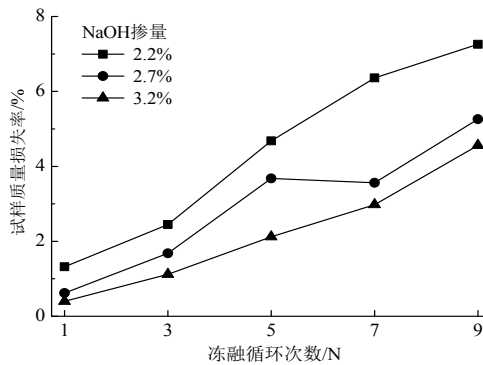


图7 冻融作用对加固体质量影响曲线
Fig.7 Curves of reinforced loess' mass variation under the effect of freezing-thawing cycles

由图6可以看出，总体上固化黄土的抗压强度随冻融循环次数的增加而减小．随NaOH掺量的提高，三种试样经9次冻融循环后强度减小幅值分别为45.86%、35.30%、30.76%．根据图7，随着冻融循环次数的增加，加固体的质量损失率增大，随NaOH掺量的提高，其质量损失率在冻融循环完成后分别为7.15%、5.31%、4.62%．

由于碱液固化黄土强度形成是一个长期反应的过程，若在强度增长过程中降低温度则会产生冷缩作用，使初期形成的凝胶体受拉开裂，使加固体产生大量硬化干缩和温度收缩裂缝并且土体经过冻融前后的体积变化，使黄土孔隙特性发生改变从而引起传力骨架结构内部细小的位移，导致黄土颗粒间胶结强度的降低．适当提高NaOH掺量能增加黄土颗粒间硅酸凝胶的数量，能一定程度上削弱冻融作用对加固体的劣化．

2 现场注浆试验

试验场地位于陕西彬县，场地地貌单元为黄土塬，试验用黄土物理、力学性质见表4．

表4 试验场地黄土的物理、力学性质指标平均值
Tab.4 Average values of field test's loess physical and mechanical properties

地层	含水量 $\omega/\%$	干重度 γ_d /kN·m ⁻³	孔隙比 e_0	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_p/\%$
Q ₃	13.7	12.9	1.1	27.7	20.7

现场试验用NaOH技术指标与室内试验相同，注浆浆液浓度为150 g/L，浆液温度控制在60 ℃-80 ℃．注浆采用单孔无压灌注，由洛阳铲成孔，成孔数3个，孔径0.15 m，孔深2.0 m，注浆管口深度为1.5 m，孔内填直径4~7 mm碎石，顶部用粘性土填实．注浆过程中记录单孔注浆量及注浆时间，结果如图8所示．

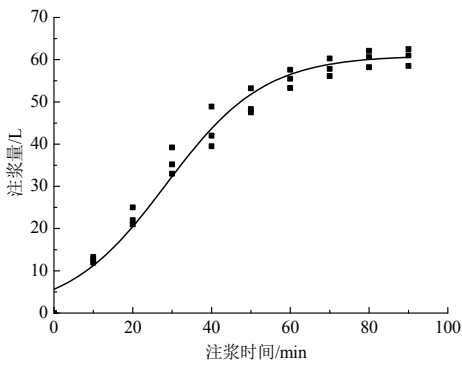


图8 单孔注浆量与注浆时间的关系曲线
Fig.8 Curves of relationship of self-permeated grouting time and amount of single grouting hole

根据试验数据，得到自渗注浆量与注浆时间的关系式（1）：

$$L = \frac{60}{1 + e^{-0.08(t-28)}} \quad (1)$$

式中： t 为注浆时间，min； L 为单孔注浆量，L； e 为自然对数取值2.72．

根据（1）式，将公式计算所得的自渗注浆量 L_c 与现场实测注浆量 L_t 进行比较，结果见表5：

表5 实测注浆量与计算注浆量对比
Tab.5 Grouting amount comparison of measured and calculated values

t/min	L_c/L	L_t/L	L_c/L_t
10	11.32	12.59	0.90
20	20.52	22.67	0.91
30	32.34	35.80	0.90
40	43.63	43.47	1.00
50	51.74	49.78	1.04
60	56.46	55.49	1.02
70	58.87	58.06	1.01
80	60.03	60.31	1.00
80	60.56	60.68	1.00

注浆量计算值 L_c 与实测值 L_t 比值的平均值为0.98，变异系数为0.06，说明（1）式计算得出的注浆量值离散性小，能较真实地反映实际注浆情况，根据（1）式，当 t 不断增大时， L 的增长率不断减小最终趋近于0，符合现场实际注浆情况．

由于在NaOH溶液作用下，土颗粒表层会逐渐发生膨胀和软化使相邻的土颗粒在这一过程中更紧密地相互接触，同时NaOH与土颗粒反应生成的水硬性胶结物会充填黄土中的细小孔隙，使其渗透能力下降，导致注浆速率下降．

注浆完成30 d后对注浆周围土体进行开挖，加固体较周围土体坚硬基本呈上粗下细的圆柱体，

根据开挖结果,得出取样半径、深度与土体强度的关系。

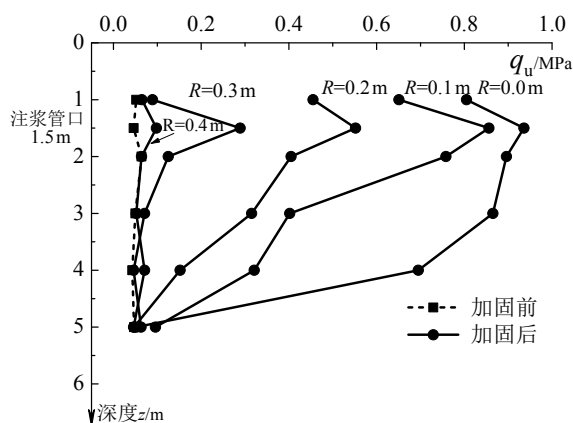


图9 碱液自渗加固原状黄土强度变化趋势

Fig.9 Reinforced original loess's strength variation trend of self-permeated grouting

现场试验表明用碱液自渗加固原状黄土可行,由图9可以看出,在同一深度水平方向上,加固体强度随距注浆中心距离 R 增大而减小,在 $R=0\sim 0.2$ m范围内,土体无侧限抗压强度 q_u 平均可提高10倍,在 $R=0.3\sim 0.4$ m范围内,强度可提高3~4倍,当 $R>0.4$ m时,土体强度几乎没有提高。碱液自渗加固原状黄土的有效半径为0.3 m。竖直方向,注浆管口处强度最高,由此往下,加固体强度逐渐减小,在深度 $Z=1.5\sim 3.0$ m范围内,土体抗压强度平均可提高8倍, $Z=3.0\sim 4.0$ m范围内,强度可提高4倍,当 $Z>4.0$ m时,加固效果不明显,加固有效深度为自注浆口向下2.0 m。

造成碱液加固原状黄土强度分布不均匀除原状土体自身因素外,主要是由于碱液与土中活性二氧化硅及钙镁离子的反应在高温下进行很快,在常温下进行缓慢,高温浆液自注浆管口流入注浆孔中,热量很快被紧挨管口的周围土体所吸收,只有待该部土体温度升高到一定程度后,其热量才能继续向周围土体扩散,虽碱液可以渗到下部或离孔中心一定距离的土体中,但由于土体温度上升有限,使加固效果不明显。碱液在自渗过程中所受的液体静压力和重力促进其在竖直方向的渗透,使碱液竖直向的自渗范围大于水平方向。

3 结论

(1) 通过室内试验,从NaOH掺量、黄土塑性指数、土样干密度、养护温度、龄期对固化黄土的强度影响规律中得出NaOH掺量和养护温度的变化对加固土体强度增长最为显著。

(2) 经碱液加固的黄土样具有良好的水稳性, CaCl_2 的加入有利于提高加固体的水稳性。

(3) 加固土体经冻融后强度降低,提高NaOH掺量能一定程度上削弱冻融对固化黄土的劣化。

(4) 在本文现场试验条件下,碱液自渗加固原状黄土可行,单管注浆其影响深度约为2.0 m,影响半径约为0.3 m。

参考文献 References

- [1] 葛家良. 化学灌浆技术的发展与展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S2): 3384-3392.
GE Jialing. Development and prospect of chemical grouting techniques[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3384-3392.
- [2] 王银梅, 高立成. 黄土化学改良试验研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(6): 1071-1077.
WANG Yinmei, GAO Licheng. Experimental research on chemical improvement of loess[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(6): 1071-1077.
- [3] 孙剑平, 徐向东, 鲍延安, 等. 碱液加固湿陷性黄土地基的工程实践[J]. 施工技术, 2000, 29(9): 32-33.
SUN Jianping, XU Xiangdong, BAO Yanan, et al. Engineering practice of strengthening wet-collapse loess soil with alkaline solution[J]. Construction Technology, 2000, 29(9): 32-33.
- [4] 蔡东艳, 韩晓雷. 水玻璃加固土的特性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2004, 36(2): 233-235.
CAI Dongyan, HAN Xiaolei. A research on the properties of loess reinforced with waterglass[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.(Natural Science Edition), 2004, 36(2): 233-235.
- [5] 杨晓华, 俞永华. 水泥-水玻璃双液注浆在黄土隧道施工中的应用[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 68-72.
YANG Xiaohua, YU Yonghua. Application of cement-silicate double solution grouting in loess tunnel construction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 68-72.
- [6] 李术才, 孙子正, 刘人太, 等. 基于裂隙动水注浆的水泥-水玻璃浆液相界面特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1640-1646.
LI Shucai, SUN Zizheng, LIU Rentai, et al. Research on phase interface characteristic of cement-silicate grout based on crack grouting with dynamic water[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1640-1646.
- [7] 贾厚华. 化学改良土无侧限抗压强度研究[J]. 土工基础, 2010, 24(3): 84-87.
JIA Houhua. Experimental research on unconfined compressive strength for chemical-improved soil[J]. Soil Engineering and Foundation, 2010, 24(3): 84-87.
- [8] 吕擎峰, 刘鹏飞, 申贝, 等. 温度改性水玻璃固化黄土冻融特性研究[J]. 工程地质学报, 2015(1): 59-64.

(下转第416页)

- YU Yakui. Research on green reconstruction of old industrial buildings in Shenzhen[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [7] GDANIEC C. Cultural industries, information technology and the regeneration of post-industrial urban land-scapes. Poblenu in Barcelona—a virtual city?[J]. GeoJournal, 2000, 50(4): 379-387.
- [8] ADRIENN Lepel. Changing the function of industrial buildings[J]. Architecture and Civil Engineering, 2006, 4(2): 71-84.
- [9] 张杨, 樊胜军, 李慧民. 旧工业建筑绿色再生评价指标体系研究[J]. 工业建筑, 2014(7): 56-59.
ZHANG Yang, FAN Shengjun, LI Huimin. Research on assessment index system for the green regeneration of old industrial buildings[J]. Industrial Construction, 2014(7): 56-59.
- [10] 秦荣生. AMOS与研究方法[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2010.
TAI Rongsheng. AMOS and research methods[M]. Chongqing: Chongqing university press, 2010.
- [11] 秦旋, 莫懿懿, 王景慧. 绿色建筑项目风险测度与评价假设模型研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(5): 706-715.
QIN Xuan, MO Yiyi, WANG Jinhui. Research on hy-potheses model of assessing and measuring risk factors on green buildings, projects[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.(Natural Science Edition), 2014, 46(5): 706-715.
- [12] CHEN F F. Sensitivity of goodness of fit indexes to lack of measurement invariance[J]. Structural Equation Modeling, 2007, 14(3): 464-504.

(编辑 桂智刚)

(上接第387页)

- LÜ Qingfeng, LIU Pengfei, SHEN Bei, et al. Laboratory study on peculiarity of loess solidified with temperature-modified sodium silicate under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Engineering Geology, 2015(1): 59-64.
- [9] 李喜安, 黄润秋, 彭建兵. 黄土崩解性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 3207-3213.
LI Xi'an, HUANG Runqiu, PENG Jianbing. Experimental research on disintegration of loess[J]. Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3207-3213.
- [10] 王红肖, 王银梅, 高立成, 等. 固化剂改良黄土的水稳定特性[J]. 低温建筑技术, 2014, 36(2): 115-118.
WANG Hongxiao, WANG Yinmei, GAO licheng, et al. Water stability properties of loess improved by solidified agents[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2014, 36(2): 115-118.
- [11] 王雪浪, 朱彦鹏. 灰土挤密桩处理湿陷性黄土地基理论分析及试验[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010, 42(2): 288-293.
WANG Xuelang, ZHU Yanpeng. Theoretical analysis and test of the foundation of collapsible loess reinforced by lime piles[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.(Natural Science Edition), 2010, 42(2): 288-293.
- [12] 程佳明, 王银梅, 苗世超, 等. 固化黄土的干湿循环特性研究[J]. 工程地质学报, 2014(2): 226-232.
CHENG Jiaming, WANG Yinmei, MIAO Shichao, et al. Property study of solidified loess under wet-dry cycles[J]. Journal of Engineering Geology, 2014(2): 226-232.
- [13] 宋春霞, 齐吉琳, 刘奉银, 等. 冻融作用对兰州黄土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1077-1080, 1086.
SUN Chunxia, QI Jilin, LIU Fengyin, et al. Influence of freeze-thaw on mechanical properties of Lanzhou loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1077-1080, 1086.
- [14] 董晓宏, 张爱军, 连江波, 等. 反复冻融下黄土抗剪强度劣化的试验研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(4): 767-772.
DONG Xiaohong, ZHANG Aijun, LIAN Jiangbo, et al. Study of shear strength deterioration of loess under repeated freezing-thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(4): 767-772.

(编辑 沈波)