

硫酸镁对水泥改良砂力学特性的影响研究

王 哲

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 选用 MgSO_4 溶液作为侵蚀液, 研究了侵蚀液浓度、侵蚀时间对水泥改良砂力学特性的影响, 探讨了 MgSO_4 溶液对水泥改良砂的侵蚀规律, 试验结果表明, 对于水泥掺量 2% 的改良砂, MgSO_4 溶液对其无侧限应力应变曲线特征影响较小, 而水泥掺量 6%、10% 的改良砂, 当 MgSO_4 溶液浓度小、侵蚀时间短时, 在荷载作用下试样能依次经历气孔闭合阶段、线弹性阶段、微缺陷的稳态扩展阶段而破坏, 而在 MgSO_4 溶液浓度高、侵蚀时间长的条件下, 试样经历气孔闭合阶段后即进入微缺陷的稳态扩展阶段, 线弹性阶段特征则不明显. MgSO_4 溶液对水泥改良砂的侵蚀存在浓度阈值, 浓度低于 4 g/L 时, 水泥改良砂无侧限强度在 4 周内变化并不显著, 而 MgSO_4 溶液浓度高于 4 g/L 时, 试样强度的衰减程度则很大.

关键词: MgSO_4 溶液; 水泥改良砂; 力学特性

中图分类号: TU525.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)06-0814-06

Study on the effect of magnesium sulfate to the mechanical properties of cement modified sand

WANG Zhe

(China Railway Siyuan Survey and Design Group co., LTD, Wuhan 430063, China)

Abstract: Choosing MgSO_4 solution as the erosion liquid, the effects of erosion concentration and erosion time on the mechanical character of cement modified sand were studied, the erosion law of MgSO_4 solution to cement modified sand is discussed, experimental results show that for sand modified by 2 percent cement, MgSO_4 solution has little impact on the sand's unconfined stress-strain curve, while for sand modified by 6 and 10 percent cement, when MgSO_4 solution concentration is low and erosion time is not long, the specimen would go through successively the Stomatal closure stage、linear elasticity stage、micro-defects's steady expansion stage and then emerges failure under the effect of stress, but when MgSO_4 solution concentration is dense and the erosion time is long enough, specimen would enter micro-defects's steady expansion stage after going through the Stomatal closure of the compaction part under the impact of stress, the characteristics of the linear elasticity stage are not obvious. MgSO_4 solution has a concentration threshold for the erosion of cement modified sand, when MgSO_4 solution concentration is below 4 gram per liter, the unconfined strength of cemented sand does not decrease significantly within 4 weeks, but when the concentration of MgSO_4 solution is higher than 4 gram per liter, cemented sand's strength would attenuate rapidly.

Key words: MgSO_4 solution; cement modified sand; mechanical character

海南国际旅游岛先行试验区第一期路网工程——文黎大道延伸线广泛分布滨海、泄湖相砂土, 该粉细砂粘粒含量低、级配不良, 为满足工程需要, 拟对该粉细砂进行水泥改良.

但由于拟建道路与外海邻近, 有着直接的水力联系, 相关研究表明, 水中的侵蚀性离子具有较强的结晶分解作用, 对水泥土的力学性能产生

重要影响^[1]. 海水中 SO_4^{2-} 主要来源于 MgSO_4 ^[2], 且相关文献也将 Mg^{2+} 浓度、 SO_4^{2-} 浓度作为腐蚀性评价的主要指标^[3-4], 故为了模拟海水环境对水泥改良砂力学性能的影响, 十分有必要开展 MgSO_4 溶液对水泥改良砂力学性能影响相关方面的研究.

硫酸盐对水泥水化物的侵蚀与水泥类型、硫酸盐浓度、侵蚀时间^[5]、钙离子的淋溶^[6]等多因素

有关, 学者们关于 MgSO_4 对水泥改良土的侵蚀进行了大量研究: 谈云志^[7]开展了海水对水泥改良土强度的研究, 并研究了盐溶液离子浸入试样的过程; 宁宝宽^[8]对环境侵蚀下水泥土的损伤破裂过程及本构关系进行了初步探讨; 柳志平^[9]提出, Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 同时存在时, 在水泥土中会引起较强胶凝性水化物——水化硅酸钙的分解, 导致水泥土受到的侵蚀作用加强; 刘泉声^[10]得到了 MgSO_4 溶液侵蚀下水泥土无侧限抗压强度的变化规律; 韩鹏举^[11]开展了 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 相互影响下水泥土的强度的研究, 建立了考虑 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度的水泥土强度模型; 王晓荣^[12]发现对于 MgSO_4 浓度低于 1.5 g/L 时, Mg^{2+} 发挥主要作用, 侵蚀后水泥土的无侧限强度较清水中浸泡试样的无侧限强度有所增加, 而 MgSO_4 浓度高于 9 g/L 后, SO_4^{2-} 的侵蚀作用占主导地位, 随着 MgSO_4 浓度的增加, 水泥土的无侧限强度逐渐降低; 任杰^[13]往经过 MgSO_4 污染后的土中掺加水泥, 发现在水泥土中 Mg^{2+} 含量一定时, 水泥土的无侧限强度随着时间呈对数函数关系, 而当水泥土养护时间一定时, 水泥土的强度则与 Mg^{2+} 含量呈指数函数关系. Salah^[14]则通过视觉的观察、试样无侧限强度损失和电镜扫描手段研究了不同 MgSO_4 浓度对水泥混凝土的侵蚀作用。

综上所述, 学者们虽然针对 MgSO_4 对水泥改良土的侵蚀作用展开了大量研究, 但是研究中侵蚀程度多只借助水泥土的无侧限强度的变化, 研究指标单一, 对侵蚀后水泥改良土其他力学性能如应力应变曲线的研究不够深入。

本文选取 MgSO_4 作为侵蚀液, 以海南东南部滨海细砂为研究对象, 借助于改装后的无侧限强度测试仪, 研究了不同侵蚀液浓度、不同侵蚀龄期对水泥改良砂应力应变曲线、无侧限强度的影响, 研究结果对于水泥改良砂 MgSO_4 侵蚀评价、侵蚀条件下本构关系等的研究都具有十分重要的意义。

1 试验仪器

试验中改良砂的水泥掺量为 2%、6%、10%, 上述三种水泥掺量的改良砂强度较大, 黏土无侧限强度测试仪并不适用, 故对三轴仪进行了改装, 以进行无侧限强度试验, 改装后仪器如图 1 所示。

图 1 中, 底座的位移通过与底座相连的百分表读取, 轴向应力则通过与试样相连的测力计百分

表读数经计算得到, 在实验开始前, 施加一定的预压力以使仪器连接部分接触充分, 在试验过程中, 底座每上升 0.02 mm 时读取一次测力计百分表的读数。



图 1 无侧限抗压强度试验仪

Fig. 1 Unconfined compressive strength tester

2 试验过程

2.1 试验材料

试验用砂取自海南省东南部陵水县, 历史沉积环境为低能的浅水环境, 以细砂为主, 主要成分为二氧化硅, 性质十分稳定。

试验用水泥为海螺牌 P. C325 复合硅酸盐水泥, 水泥在储存中用塑料桶密封, 防止水泥受潮。

2.2 试验方案

相关文献显示, 海水中 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度在 1.3 g/L、2.7 g/L^[2] 左右, 为了模拟海水中的实际环境和研究 SO_4^{2-} 浓度的变化对水泥改良砂侵蚀作用的影响, 共设置了 1 g/L、4 g/L、9 g/L、18 g/L MgSO_4 溶液浓度梯度, 设置了水泥掺量为砂土质量的 2%、6%、10% 三组对比组。试验采用标准三轴试样, 直径 3.91 cm, 高度 8 cm, 待试样制作完成后, 放入养护室养护一个月, 然后放入 MgSO_4 溶液中分别浸泡 1 周、2 周、3 周、4 周后取出进行无侧限抗压强度试验, 每一侵蚀条件设置两组对照组, 共需试样 96 个。

3 试验结果分析

3.1 硫酸镁溶液对无侧限强度的影响

水泥改良砂经 MgSO_4 溶液浸泡后的无侧限强度变化见图 2 至 3 所示。

在 1 g/L、4 g/L MgSO_4 溶液中即使浸泡 4 周水泥改良砂试样表面也无变化, 而在 9 g/L、18 g/L

MgSO_4 溶液中水泥改良砂在浸泡的第2周即出现明显的破损裂纹, 试样的破损情况见图4所示。

从图2、3, 并结合图4试验中的观察现象, 可以看出, MgSO_4 溶液浓度低于4 g/L时, 水泥改良砂的无侧限强度在4周内随着 MgSO_4 溶液浓

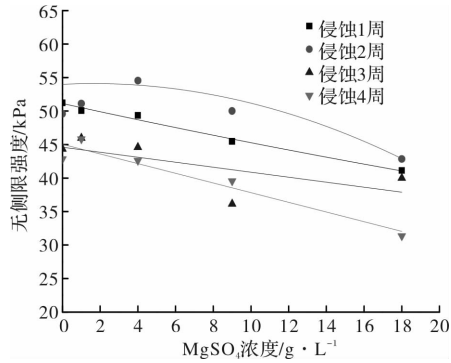


图2 水泥掺量2%改良砂 MgSO_4 溶液浸泡后无侧限强度变化

Fig. 2 Unconfined strength change of sand modified by 2 percent cement eroded by MgSO_4 liquid

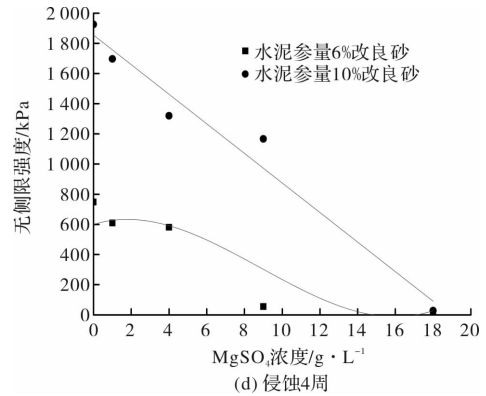
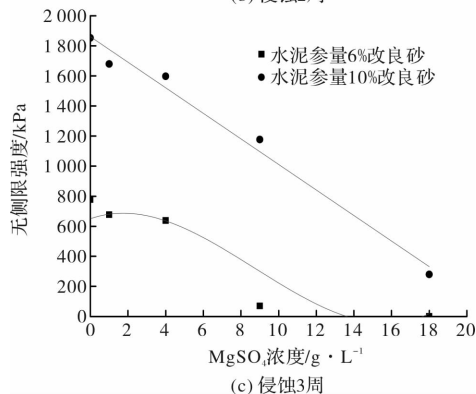
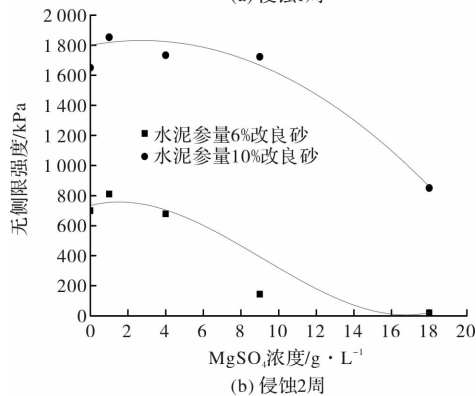
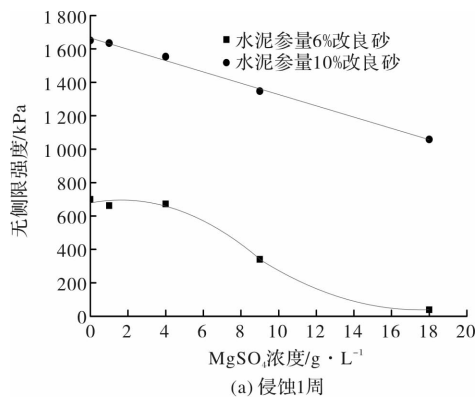


图3 水泥掺量6%、10%改良砂在 MgSO_4 溶液中浸泡后无侧限强度变化

Fig. 3 Unconfined strength change of sand modified by 6 and 10 percent cement eroded by MgSO_4 liquid

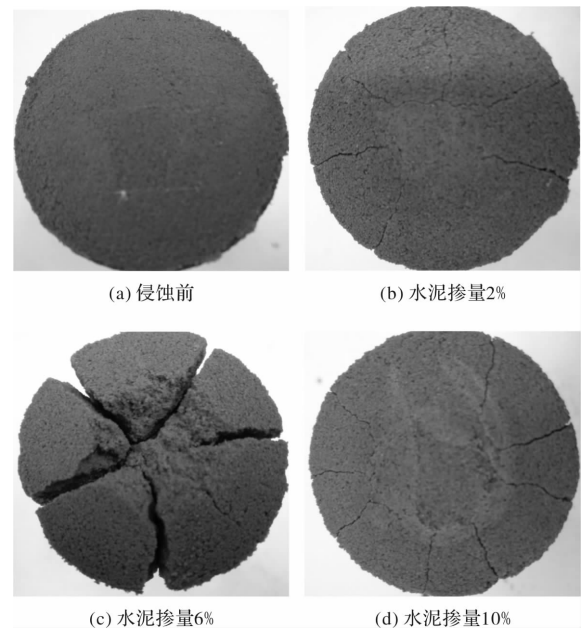


图4 水泥改良砂在9 g/L MgSO_4 溶液中侵蚀2周后试样表面破坏情况

Fig. 4 Surface damage of the cement modified sample after erosion in magnesium sulfate solution with a solution of 9 gram per liter for two weeks

度的增长并没有明显的下降, 而 MgSO_4 溶液浓度高于4 g/L时, 即使在侵蚀的早期试样强度衰减程度也很大, 且随着 MgSO_4 溶液浓度、侵蚀时间的增长, 这种侵蚀作用更加明显, 水泥改良砂强度进一步减小。

可见, MgSO_4 溶液对水泥砂的侵蚀存在一个浓度阈值, 低于这个浓度阈值时对水泥改良砂的侵蚀作用很小, 文献^[11]也通过试验得到 MgSO_4 溶液浓度大于4.5 g/L时, 对水泥土有强烈腐蚀作用。

这是由于 MgSO_4 浓度较小时, 其与水泥水化物反应生成的钙矾石较少, 该钙矾石填充了土颗

粒间的孔隙,使得水泥改良砂无侧限强度并未明显下降。随着 MgSO_4 溶液浓度、侵蚀龄期的增长,当土颗粒间的孔隙被填充后,新生成的钙矾石会对试样产生膨胀力,在试样中产生了微裂隙,进而导致试样强度降低。

3.2 硫酸镁溶液对无侧限应力应变曲线的影响

在不同 MgSO_4 浓度溶液中浸泡不同时间后各水泥改良砂无侧限应力应变曲线如图 5~6 所示。

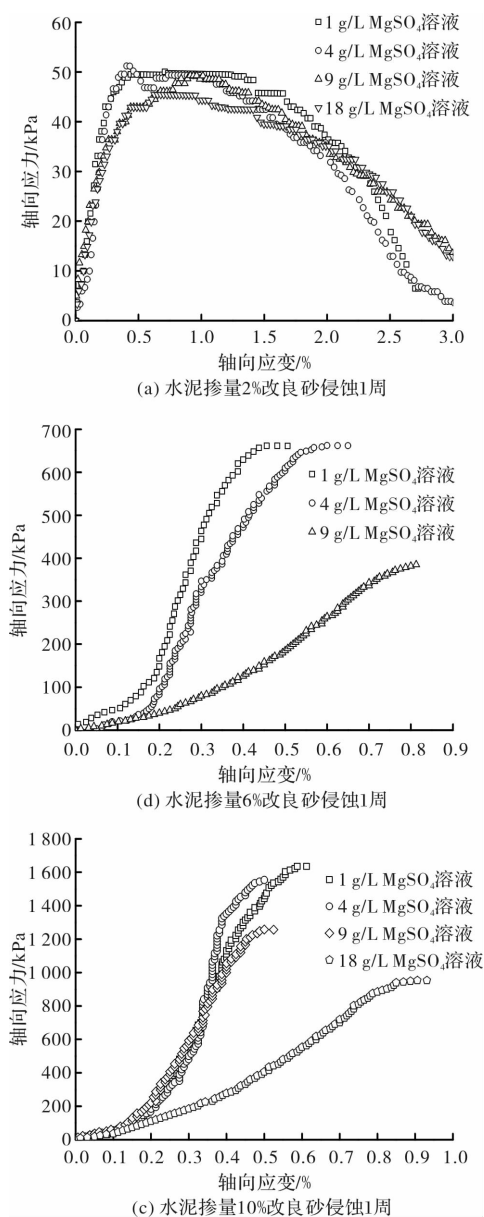


图 5 改良砂在不同浓度 MgSO_4 溶液中侵蚀后无侧限应力应变曲线

Fig. 5 Unconfined stress-strain curve of modified sand eroded by different concentration of MgSO_4 liquid

图 5(b) 中水泥掺量 6% 的改良砂在 18 g/L MgSO_4 溶液中侵蚀 1 周后试样即出现大量的裂纹,稍加荷载即破坏,无法获取其应力应变曲线。高

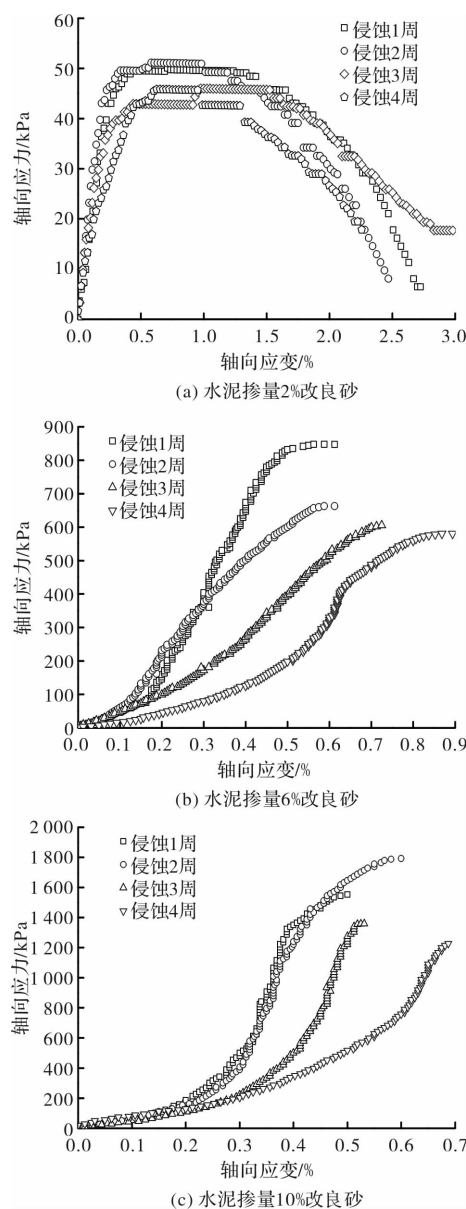


图 6 水泥改良砂在 4 g/L MgSO_4 溶液中侵蚀不同时间无侧限应力应变曲线

Fig. 6 Unconfined stress-strain curve of modified sand eroded by 4 g per liter of MgSO_4 liquid for different time

路彬^[15]发现水泥土无侧限应力应变曲线在荷载作用下将依次经历裂纹及气孔的闭合、线弹性响应、微缺陷稳态扩展、裂纹贯通及非稳态扩展 4 个阶段,4 个阶段特性如下:

(1) 裂纹及气孔闭合: 表现下凸性,材料被强化,垂直于压应力方向孔洞受压而闭合,故其下凸特性所持续的应变范围在一定程度上可以反映试样中孔隙的多少。

(2) 线弹性响应: 应力应变曲线近似为直线,此阶段局部应力集中但还不足以使材料中的微裂纹缺陷演化。

(3)微缺陷稳态扩展:应力应变曲线发生弯曲,并伴有非弹性变形。

(4)裂纹贯通及非稳态扩展:试样中的裂纹发生分叉、绕行和贯通现象,应力水平降低,表现为峰值后的软化效应。

通过图5~6可以看到,水泥掺量为2%的改良砂的应力应变曲线将只经历线弹性响应、微缺陷稳态扩展、裂纹贯通及非稳态扩展而破坏,并没有气孔闭合阶段,而水泥掺量6%、10%的改良砂的应力应变曲线形态则依次经历气孔闭合阶段、线弹性响应、微缺陷稳态扩展而破坏,之所以未出现裂纹贯通及非稳态扩展的软化现象,主要是由于高掺量水泥改良砂试样脆性较强,在达到应力峰值时,试样即丧失强度。

水泥掺量2%与水泥掺量6%和10%改良砂应力应变曲线的差异主要是水泥掺量不同时砂颗粒间的胶结作用不同所导致:水泥掺量为2%的改良砂颗粒间连接较弱,由于没有围压的约束,在轴向荷载作用下,砂颗粒间的侧向挤压变形也较明显,难以压实,故并没有出现气孔闭合阶段,而水泥掺量6%、10%的改良砂颗粒间胶结作用强,试样以轴向变形为主,能够依次经历气孔闭合阶段、线弹性响应、微缺陷稳态扩展阶段。

比较图5至图6还可以发现,对于低掺量的改良砂, MgSO_4 溶液浓度、侵蚀时间对改良砂无侧限应力应变曲线形态的影响很小,随着在 MgSO_4 溶液浓度、侵蚀时间的增长,水泥改良砂无侧限应力应变曲线峰值前曲线的上凸特性逐渐明显,表明试样受到 MgSO_4 溶液侵蚀后微缺陷稳态发展阶段逐渐明显,非弹性变形逐渐增大,但曲线整体形态变化不大;而 MgSO_4 溶液浓度、侵蚀时间对高掺量水泥改良砂的应力应变曲线形态影响较大。在 MgSO_4 溶液浓度较低、侵蚀早期,水泥掺量6%、10%的改良砂的应力应变曲线表现三阶段特性,而随着 MgSO_4 溶液浓度、侵蚀时间的增长,改良砂的无侧限应力应变曲线逐渐过渡到以气孔闭合阶段、微缺陷的稳态扩展为主,而线弹性阶段特征不明显,表明在 MgSO_4 溶液的侵蚀下,试样在荷载作用下局部应力集中较快,很快跳过线弹性阶段,这是由于随着 MgSO_4 溶液侵蚀作用的加强,试样中的微裂缝逐渐积累,在荷载作用下应力易于集中的缘故;且随着 MgSO_4 溶液浓度、

侵蚀时间的增长,水泥改良砂试样的气孔闭合阶段所持续的应变逐渐增长,表明试样里的孔隙逐渐增多,在一定程度上反映受到 MgSO_4 溶液的侵蚀越严重。改良砂无侧限应力应变曲线显示的侵蚀规律与无侧限强度显示的侵蚀规律整体上一致。

MgSO_4 浓度在1 g/L时,水泥掺量6%、10%的改良砂试样经过4周的侵蚀,试样的无侧限强度损失约10%,且该浓度与实际海水中 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度1.3 g/L、2.7 g/L^[2]较接近,故当水泥土路基填料穿越海水倒灌区时一定要做好高掺量水泥改良路基填料的防渗措施。

4 结论

对 MgSO_4 溶液侵蚀作用下水泥改良砂在不同侵蚀液浓度、侵蚀时间条件下无侧限强度变化和无侧限应力应变曲线形态的发展规律进行了研究,得到的结论如下:

(1) MgSO_4 溶液对水泥改良砂的侵蚀存在一个浓度阈值,浓度低于4 g/L时,水泥改良砂无侧限强度在4周内并没有明显的下降,而 MgSO_4 溶液浓度高于4 g/L时,试样强度衰减程度则很大,随着 MgSO_4 浓度的增加和侵蚀时间的增长,整体上水泥改良砂强度逐渐减小。

(2)水泥掺量2%的改良砂, MgSO_4 溶液浓度和侵蚀时间对其无侧限应力应变曲线形态的影响较小,改良砂的应力应变曲线将只经历线弹性响应、微缺陷稳态扩展而破坏,并没有气孔闭合阶段。

(3)水泥掺量6%、10%的改良砂,在 MgSO_4 溶液浓度小、侵蚀早期,在轴向应力的作用下,试样能依次经历气孔闭合阶段、线弹性阶段、微缺陷的稳态扩展阶段三阶段而破坏;而在 MgSO_4 溶液浓度高、侵蚀时间长时,试样气孔闭合阶段持续应变增大,此后试样即进入微缺陷的稳态扩展阶段,线弹性阶段不明显。

参考文献 References

- [1] 白晓红,赵永强,韩鹏举,等. 污染环境对水泥土力学特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1260-1263.
BAI Xiaohong, ZHAO Yongqiang, HAN Pengju, et al. Experimental study on mechanical property of ce-

- mented soil under environmental contaminations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1260-1263.
- [2] 葛安亮. 钢筋混凝土在海水中的腐蚀性能研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2004.
- GE Anliang. Studies on corrosion performance of reinforced concrete in seawater[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.
- [3] 中华人民共和国住建部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 岩土工程勘察规范:GB50021-2001[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- People's Republic of China Ministry of Housing and Urban, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for investigation of geotechnical engineering; GB/50021-2001[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2009.
- [4] 中华人民共和国住建部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 工业建筑防腐蚀设计规范: GB50046-2008[S]. 北京:中国计划出版社, 2008.
- People's Republic of China Ministry of Housing and Urban, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for anticorrosion design of industrial constructions; GB/50046-2008[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [5] ZELIC J, RADOVANOVIC I, JOZIC D. The effect of silica fume additions on the durability of Portland cement mortars exposed to magnesium sulfate attack[J]. Materiali in Tehnologije, 2007, 41(2): 91-94.
- [6] TERASHI M, KITAZUME M. An investigation of long term strength of lime and cemented treated marine clay[R], Technical Note of Port and Harbour Research Institute, 1992, 1-15.
- [7] 谈云志, 胡莫珍, 杨爱武, 等. 水泥改良土强度的海水侵蚀效应与数值模拟[J]. 岩土力学, 2015, 36(增2): 492-498.
- TAN Yunzhi, HU Mozhen, YANG Aiwu, et al. Brine erosion effect on strength of cement improved soil and its numerical simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(z2): 492-498.
- [8] 宁宝宽. 环境侵蚀下水泥土的损伤破裂试验及其本构模型[D]. 沈阳:东北大学, 2004.
- NING Baokuan. Experiments and its constitutive model of cement-mixed soil under environmental erosion [D]. Shenyang: Northeastern University, 2004.
- [9] 柳志平. 海水侵蚀环境下水泥土的力学性质试验研究及耐久性分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- LIU Zhiping. Laboratory test of mechanical properties of cemented soil under brine corrosion environment and durability analysis[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [10] 刘泉声, 屈家旺, 柳志平, 等. 侵蚀影响下水泥土的力学性质试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3377-3384.
- LIU Quansheng, QU Jiawang, LIU Zhiping, et al. Experimental study of mechanical properties of cemented soil under corrosion influence[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3377-3384.
- [11] 韩鹏举, 白晓红, 赵永强, 等. Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 相互影响对水泥土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 72-76.
- HAN Pengju, BAI Xiaohong, ZHAO Yongqiang, et al. Experimental study on strength of cement soil under Mg^{2+} and SO_4^{2-} interaction influence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(1): 72-76.
- [12] 王晓荣, 赵轶, 韩鹏举, 等. 污染环境下水泥土的力学特性研究[J]. 太原理工大学学报, 2008, 39(专增): 112-114.
- WANG Xiaorong, ZHAO Yi, HAN Pengju, et al. Study on mechanical property of cemented soil under environmental contaminations[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2008, 39(z): 112-114.
- [13] 任杰. 镁盐污染对水泥土力学性能的影响研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2009.
- REN Jie. Study on mechanical property of cemented soil under magnesium salts contamination[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2009.
- [14] SALAH U. Al-Dulaijan. Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to magnesium sulfate solutions[J]. Construction and Building Materials, 2007(21): 1792-1802.
- [15] 高路彬. 混凝土变形与损伤的分析[J]. 力学进展, 1993, 23(4): 510-519.
- GAO Lubin. Analysis of deformation and damage for concrete[J]. Advances in Mechanics, 1993, 23(4): 510-519.

(编辑 吴海西)