

硫酸盐侵蚀环境下水泥土的力学行为研究

傅小茜¹, 冯俊德¹, 谢友均²

(1. 铁道第二勘察设计院 成都 610031; 2. 中南大学 土木建筑学院, 长沙 410075)

摘 要: 针对含硫酸盐介质的环境水服役条件, 通过室内模拟试验手段, 研究了不同配合比参数和不同条件下水泥土的无侧限强度、弹性模量以及应力-应变的变化规律, 分析了硫酸盐侵蚀环境下水泥土力学性能的劣化机理。结果表明, 配合比参数以及环境条件对水泥土的无侧限抗压强度、弹性模量、应力-应变曲线有显著的影响; 硫酸盐溶液中的水、硫酸根离子与水泥土之间的复杂物理、化学作用, 影响水泥土内部微观观结构, 从而对水泥土的力学性能存在显著劣化作用; 且这种侵蚀作用在 90d 龄期内最为显著。

关 键 词: 硫酸盐环境; 力学行为; 无侧限强度; 应力-应变曲线; 水泥土

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Mechanical behavior of soil cement under ambient with sulfate conditions

FU Xiao-qian¹, FENG Jun-de¹, XIE You-jun²

(1. Second Survey and Design Institute of Railway, Chengdu 610031, China;

2. School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Based on the service ambient with sulfate condition, the evolution of strength unconfined, elastic modulus and stress-strain curve of corresponding samples under various conditions are investigated by experimental simulation method; the deterioration of mechanical properties of soil cement is also studied. Results show that the parameters of different ratios of cement to soil and different water contents and ambient condition have great influence on strength and elastic modulus of soil cement. The mechanical behaviors such as compressive strength and elastic modulus of soil cement can be degraded by underground water with sulfate due to complicated physicochemical reaction between soil cement and water and sulfate ion in ambient. And the bad effects of sulfate ion in ambient on mechanical behaviors of soil cement is prominent within 90 d ages.

Key words: environments with sulfate; mechanical behavior; unconfined compressive strength; stress-strain curve; soil cement

1 前 言

水泥土是将土、硅酸盐水泥和水等按一定比例拌和而成的一种具有一定工程性质的材料, 一般可采用注浆法、深层搅拌法、高压旋喷法等进行施工, 起支护、防渗作用加固软土地基^[1-3]。水泥土通常应用于具有海水、地下水、生活污水等侵蚀环境条件下的基础工程。目前, 国内外学者主要集中于水泥土配合比参数对其强度的影响^[4-8], 而有关针对水泥土特定服役环境条件下, 其力学性能及其劣化规律方面的系统研究成果还非常有限^[9,10]。我国包括铁路、公路在内的大规模的基础设施建设方兴未艾, 传统的地基加固处理方法还将大量应用, 而且大部分新建工程结构要求有更高的使用性能, 如新建高速铁路、客运专线的路基工程需要更高的稳定

性和耐久性。在这种新的形式下, 非常有必要进一步了解和掌握水泥土等基础工程材料在相应服役环境条件下的力学性能演化规律, 以发展高性能的基础工程材料, 适应我国工程建设的需要。

本文主要针对武广客运专线韶关至花都段的地下水环境(具有中等硫酸盐侵蚀性)特点, 通过室内快速模拟试验条件, 试验研究硫酸盐侵蚀环境条件下, 水泥土的耐久性能, 以期掌握含硫酸盐侵蚀的地下水环境条件下水泥土桩基的劣化行为, 为我国高速铁路路基加固与防护工程的设计与施工提供技术基础。

2 试验简介

2.1 原材料及其性能

水泥: 广东省英德市龙山水泥有限公司生产的

海螺牌 32.5 R 普通硅酸盐水泥, 其实测 28 d 龄期抗折、抗压强度分别为 7.71 MPa 和 38.1 MPa。

土样: 于武广客运专线广东韶关—花都段现场的路基土取样, 用塑料袋密封后带回到实验室。取回后立即按照《土工试验规程》(SL237-1999) 的规范, 测定其天然含水量、液塑限等物理性质指标, 鉴定土的性质, 并测试土体的化学成分。然后取其余的土进行风干处理, 用橡皮锤捣碎, 并过 2 mm 筛放入塑料桶内密封保存备用, 以方便试验室试验用。其物理指标和化学成分分别见表 1 和表 2 所示, 根据液塑性指标判定试验土样为可塑性黏土。

拌和水: 自来水。

表 1 土样物理性质

Fig.1 Physical properties of the soil samples

含水率/%	塑限/%	液限/%	塑性指数	液性指数
31.03	19.69	40.24	20.55	0.55

表 2 土样的化学成分

Fig.2 Chemical constituents of the soil samples

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO
含量/%	63.49	13.57	6.53	1.43	0.15	0.039

2.2 试样制备

按照不同的水泥掺入比 α_w (水泥占土样的比例)、综合含水率 (指天然土中的水与加固过程中外掺的水之和, 本试验由于已将土样进行了烘干捣碎处理, 综合含水量即为试验工程中外掺的水量) 称取相应的土样、水泥和水, 用胶砂搅拌机进行搅拌, 成型试件尺寸分别为 40 mm × 40 mm × 160 mm, 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm, 70.7 mm × 70.7 mm × 212.1 mm, 采用振捣密实成型。

2.3 环境条件模拟

水泥土一般应用于地下工程中。根据地质环境条件的不同, 水泥土桩一般处于潮湿、水中浸泡等几种环境下。为此, 试验采用 3 种养护条件。将成型好的试件盖上塑料布, 约在 1 d~2 d 内拆模。一部分试件拆模后立即装入塑料袋内密封, 置于温度为 20 ± 3 °C 的环境下养护至规定龄期, 称为基准养护试件。另一部分试件采用浸泡处理, 即在清水中浸泡和硫酸钠溶液中浸泡处理, 试件脱模后即分别置于温度为 (20 ± 3) °C 的清水或硫酸盐溶液中浸泡至规定龄期。硫酸钠溶液采用纯硫酸钠试剂与纯净水配制, 为加速试验过程, 硫酸钠溶液浓度为 0.1 mol/L, 相当于 E 级化学腐蚀环境 (按混凝土结构耐久性设计与施工指南 CCES01-2004)。

2.4 试验方法

无侧限抗压强度、抗折强度按照水泥胶砂强度法和普通混凝土力学性能测试方法进行测定。除特别说明外, 水泥土的强度均采用 40 mm × 40 mm × 160 mm 胶砂试件测试得到。弹性模量采用 70.7 mm × 70.7 mm × 212.1 mm 的棱柱体试件, 取加载至棱柱体轴心抗压强度的 40 % 进行测试。水泥土的应力-应变曲线采用尺寸为 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 试件测试, 采用 SJ-1A 三轴剪力仪进行测试。

3 试验结果与分析

3.1 综合含水量对水泥土无侧限强度的影响

图 1 和图 2 分别给出了基准养护条件下不同综合含水量水泥土试件无侧限抗压强度、抗折强度的试验结果。

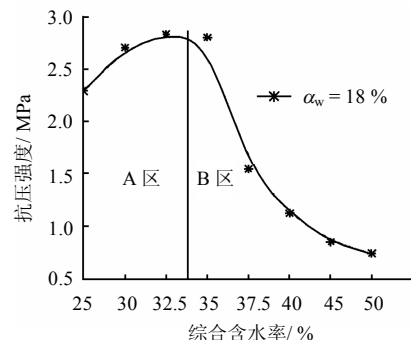


图 1 综合含水率对水泥土抗压强度的影响

Fig.1 Effects of water content on compressive strength

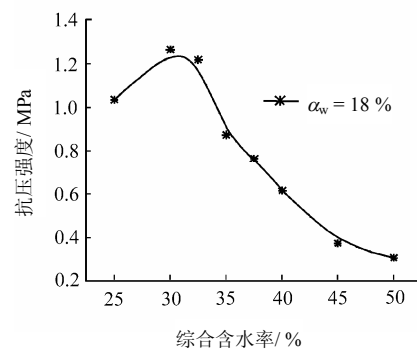


图 2 综合含水量对水泥土抗折强度的影响

Fig.2 Effects of water content on flexural strength of soil cement

从图 1 中可以看到, 在基准养护条件下, 水泥土存在一个最佳综合含水量, 使得水泥土的抗压强度达到最大。通过分析, 可将水泥土强度随综合含水量的变化分为 A、B 二区域。在 A 区 (综合含水率小于最佳综合含水率) 水泥土强度随综合含水量增加而增长; 在 B 区 (综合含水率大于最佳综合含水率) 水泥土强度随综合含水率增长而降低。图 2

中的试验结果与图 1 具有相似性。显然, 综合含水量增加, 水泥土的孔隙率增大, 强度降低, 综合含水量过少, 工作性小, 不易振捣密实, 且不利于水泥土中水泥的水化, 因而强度也会降低。

3.2 水泥掺入比对水泥土无侧限强度的影响

基准养护条件下, 水泥掺入比对 90 d 龄期试件抗折、无侧限抗压强度的影响结果如图 3 所示。从图 3 的结果可知, 在基准养护条件下, 随着水泥掺入比的增加, 水泥土的抗折、抗压强度整体上呈上升的趋势, 水泥土的抗折强度明显小于其抗压强度; 值得注意的是, 在水泥掺量较小时, 水泥土的抗压强度低, 且水泥土的抗压强度随水泥掺入比的变化不明显。这主要是由于水泥掺入比过小时, 水泥水化产物少, 形成的凝胶产物网络结构不足以包括土体颗粒, 因而水泥土的强度低; 当水泥掺入比大于 15 % 后, 水泥土的强度随水泥掺入比增加而明显增大。

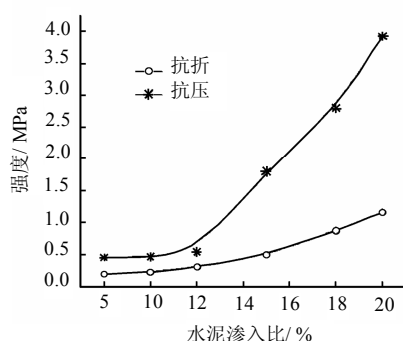


图 3 水泥掺入比对 90 d 龄期水泥土强度的影响

Fig.3 Effect of cement content on strength of soil cement at 90 d

3.3 硫酸盐环境条件对水泥土无侧限抗压强度的影响

图 4 给出了综合含水量为 35 %、水泥掺入比分别为 12 % 和 18 % 的两种水泥土试件在不同环境下, 其抗压强度随养护龄期变化的试验结果。结果表明, 在试验测试龄期范围内, 各环境条件下水泥土试件的抗压强度随着龄期的延长而呈现增加趋势。不同的环境条件下, 水泥土的强度差别显著。对于水泥掺入比为 12 % 的试件, 各龄期下强度增长缓慢, 且相对于基准养护试件, 浸泡于 0.1mol/L Na_2SO_4 溶液中的试件的强度更大。对于水泥掺入比为 18 % 的试件, 基准条件下试件的强度随着龄期的延长而一直增大, 且此条件下试件的强度最大, 在清水中浸泡的试件的强度最小, 在 0.1mol/L Na_2SO_4 溶液中浸泡的试件在 28 d 龄期时达到最大值, 与基准条件下 90 d 龄期的水泥土强度值接近, 但随着龄期的进一步延长, 其抗压强度值下降, 且强度测试值低于

基准养护条件下相应的强度值。这表明, 硫酸盐环境条件对水泥土试件的强度存在显著的影响。相对基准条件试件, 在水或硫酸盐溶液中浸泡的水泥土试件的强度存在明显的不同。清水中浸泡条件对水泥土试件的抗压强度有较大的不利影响, 这种不利影响至 90 d 时逐渐稳定, 此时抗压强度相对基准条件下降低率达 30 %; 浸泡于 0.1mol/L Na_2SO_4 溶液中的试件, 溶液中的水分子、硫酸盐根离子同时进入水泥土中, 由于硫酸根离子与水泥水化产物及土体之间发生的物理化学作用效应, 导致水泥土强度在 28 d 龄期内快速增加。随着龄期的进一步延长, 硫酸盐溶液条件下水泥土试件的抗压强度出现进一步的下降, 但在 90 d 龄期后, 浸泡在硫酸盐溶液中的水泥土试件的强度基本保持不变。而密封条件下的水泥土试件的强度存在进一步增长的趋势。

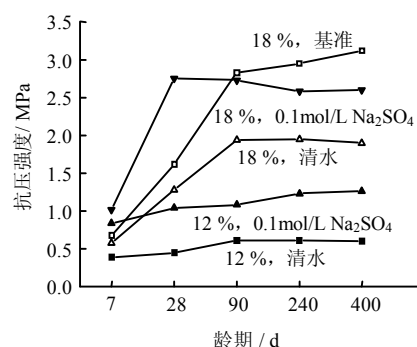


图 4 不同环境条件下水泥土抗压强度随龄期的变化

Fig.4 Variations of compressive strength of soil cement with ages under various ambient conditions

3.4 硫酸盐环境条件对水泥土弹性模量的影响

图 5 给出了综合含水率为 35 %, 龄期为 90 d 时不同条件下水泥土弹性模量的试验结果。

由图 5 可知, 基准养护条件下, 水泥土的弹性模量随着水泥掺入比的增加而增大。水泥掺入比在 10 % ~ 15 % 之间变化时, 水泥土的弹性模量随水泥掺入比的增加而迅速增加, 水泥掺入比进一步增加, 水泥土弹性模量的增长趋势减缓。环境条件对水泥土的弹性模量存在较大的影响。相对于基准养护条件, 清水中浸泡和硫酸钠溶液中浸泡的水泥土试件的弹性模量更小。这表明, 水或是硫酸盐溶液介质的作用对水泥土的弹性模量有不利的影响。这与水泥土强度的影响结果基本一致。

3.5 硫酸钠溶液侵蚀环境下对水泥土应力-应变曲线的影响

图 6 示出了分别在基准条件和浸泡在 0.1mol/L Na_2SO_4 溶液中 120 d 龄期的水泥土试件的应力-应变曲线。

从图 6 的试验结果可知,在水泥土的应力-应变曲线的初始和上升阶段,两种条件下的曲线的重叠性非常好,然而,相对基准养护条件,浸泡在 $0.1\text{mol/L Na}_2\text{SO}_4$ 溶液中的水泥土试件的峰值应力、峰值应变明显减小,其应力-应变曲线的下降段与基准养护条件下的具有一定的相似性,但极限应变更小。这表明,硫酸盐溶液作用条件下对水泥土的应力-应变行为有明显的影

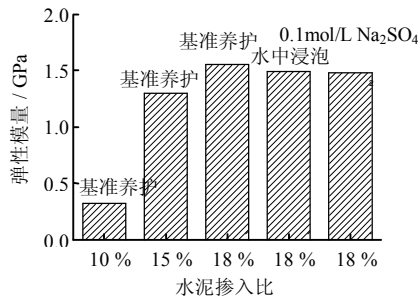


图 5 不同水泥掺入比和环境条件对水泥土弹性模量的影响

Fig.5 Effects of cement content and environmental conditions on elastic modulus of soil cement

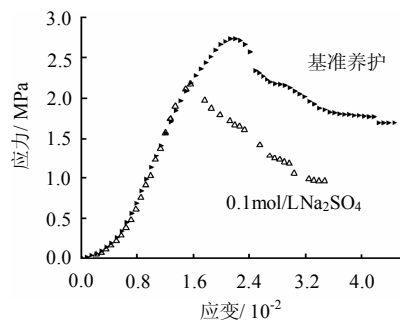


图 6 硫酸钠溶液侵蚀下水泥土应力-应变曲线的变化

Fig.6 Change of stress-strain curve of soil cement under sodium sulfate solution conditions

上述研究结果表明,环境条件对水泥土的力学性能存在显著的影响。清水以及硫酸盐离子介质浸泡条件对水泥土存在明显的劣化作用。这种劣化作用可从水泥土与环境条件之间的物理-化学作用效应来分析。水泥土是一种多孔体,水分或溶液中其它离子介质很容易进入其中,水分子吸附于土颗粒表面,一方面降低土颗粒之间的内聚力,另一方面水分子存在拆开力的作用,而水泥土中的离子也能渗入到溶液中,直至平衡,从而降低水泥土的力学性能,由于水泥孔隙率较大,水泥土与环境之间的离子交换在较短时间内可达到平衡,因而水泥土浸泡在水中 90 d 龄期内的力学性能基本达到稳定,但这是一种动态平衡,一旦地下水是流动的,则平衡被破坏,对水泥土的力学性能有更为不利的影响;溶液中的硫酸根离子进入水泥土内部,一方面影响

水泥土的水化过程,另一方面硫酸根离子能与水泥土中的水泥水化产物发生化学作用,产生体积更大的产物,堵塞了一部分孔隙,对强度有一定的积极作用,因而硫酸盐溶液浸泡条件下在 28 d 龄期内水泥土的强度就达到较高的值,随后由于水分的破坏作用占主导,水泥土的力学性能下降。

4 结 论

(1) 水泥掺入比、综合含水率、环境条件显著影响水泥土的无侧限强度、弹性模量以及应力-应变行为。水泥土中水泥的掺量必须达到足够的数量(本实验为 15%),才能对水泥土起到有效的加固、增强效应,且存在一个最佳的综合含水率,使得水泥土的无侧限抗压强度达到最大。

(2) 硫酸盐溶液对水泥土的侵蚀作用体现在两方面,即是溶液中水介质的侵蚀作用和硫酸根离子的化学侵蚀作用。这种侵蚀作用与水泥土的水泥掺入比和龄期有关。

(3) 环境水、硫酸盐溶液介质与水泥土之间发生复杂的物理化学作用效应,导致水泥土强度、弹性模量、应力应变行为产生损伤、劣化,工程设计必须予以重视。建议以水中浸泡 90 d 龄期时的水泥土强度作为在工程设计强度参考值。

参 考 文 献

- [1] 许贤敏, 路凡. 水泥土的性能及其在国外的应用[J]. 公路, 2005, (5): 117—124.
- [2] 谷秋芳, 潘盛山, 地下水影响粉喷桩强度的试验研究[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2001, 2(4): 361—363.
- [3] 刘正勇. 水泥土加固机理及材料性能[J]. 山西建筑, 2005, 131(3): 91—93.
- [4] AC I Committee 230. State-of-Art report on soil cement [J]. *ACI Materials Journal*, 1990, 87 (4): 98—110.
- [5] BASHA E A, HASHIM R, MAHMUD H B, et al. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement[J]. *Construction and Building Materials*, 2005, 19 (3): 448—453.
- [6] 郝巨涛. 水泥土材料力学特性的探讨[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(3): 53—59.
- [7] 张天红, 周易平, 叶阳生, 等. 水泥土的强度及影响因素初探[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(4): 53—56.
- [8] 杨庆丰, 柯云姝, 钟玉民. 综合水灰比对水泥土工程性质的影响[J]. 低温建筑技术, 2004, 98(2): 62—63.
- [9] FUKUE M, SATO Y, YAMASHITA M, et al. Change in microstructure of soils due to natural mineralization[J]. *Applied Clay Science*, 23 (2003) 169—177.
- [10] 宁宝宽, 刘斌, 陈四利. 环境侵蚀对水泥土桩承载力影响的试验及分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005, 6(1): 299—302.