

初始应力损伤对再生混凝土硫酸盐腐蚀的影响

蒋建华, 睦源, 翁伟新

(河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 开展了不同骨料取代率(30%、65%和100%)以及不同初始应力水平(0.2、0.4、0.6倍抗压强度)对于再生混凝土抗腐蚀性能影响的试验研究。结果表明,当再生骨料取代率逐级增高时,再生混凝土的腐蚀深度、质量损失率均增加,力学性能指标(抗压强度和动弹性模量)逐渐下降。初始应力损伤对混凝土的影响可以区分为两种,第一,其对腐蚀深度和质量损失率的影响存在阈值效应,只有当初始损伤度大于0.2时,混凝土的腐蚀深度、质量损失率才随损伤度的增大有明显增大的趋势;第二,对于再生混凝土的力学性能,不管是抗压强度还是动弹模量均会随着初始损伤的增大而出现明显的劣化。

关键词: 再生混凝土;硫酸盐腐蚀;初始应力损伤;力学性能

中图分类号: TU528.042

文献标识码: A

Effect of Initial Stress Damage on the Sulfate Corrosion of Recycled Concrete

JIANG Jianhua, SUI Yuan, WENG Weixin

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, P. R. China)

Abstract: Experimental studies on the effects of the replacement rates of recycled coarse aggregate (RCA) and the initial stress levels on the sulfate corrosion resistance of recycled concrete were carried out. Results show that when the replacement rate of RCA (denoted as ρ_r) increases step by step, the corrosion depth and mass loss rate of recycled concrete increase, and the mechanical properties including compressive strength and dynamic elastic modulus gradually decrease. The influence of initial stress damage on concrete can be divided into two types. Firstly, the initial stress damage has a threshold effect on the corrosion depth and mass loss rate of recycled concrete. Only when the initial damage degree is greater than 0.2, the corrosion depth and mass loss rate of concrete increase obviously with the increase of damage degree. Secondly, for the mechanical properties of recycled concrete, both the compressive strength and dynamic elastic modulus will deteriorate with the increase of initial damage.

Key words: recycled concrete; sulfate corrosion; initial stress damage; mechanical properties

近年来,我国的工程建设进入了高速发展的时期。与此同时,大量的建设也带来了砂石等自然资源的枯竭。将建筑废弃物通过机器破碎、分选等一系列操作,可产出用以替代混凝土中的天然石子的再生骨料,一定程度上减轻自然资源不足的影响。但由于机械破碎,再生骨料内部存在微裂纹,因此力学性能与耐久性较差。近年来,我国在海洋、近海盐碱地等众多腐蚀性地理条件中

建设的项目越来越多,混凝土耐久性问题愈发凸显,硫酸盐腐蚀作为影响混凝土耐久性最常见、最严重的因素之一^[1],值得深入地研究与探讨。影响混凝土硫酸盐腐蚀的因素包括材料组成、混凝土水灰比、环境中阳离子类型、硫酸盐浓度、腐蚀的形式与龄期等^[2-7]。对于服役环境中的混凝土结构,由于荷载、地质作用、温度变化等多种复杂作用,结构的损伤会逐渐在混凝土中累积,导致孔

收稿日期:2021-02-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51408192)

作者简介:蒋建华(1982-),男,重庆人,博士,副教授,从事混凝土耐久性方面研究。

表1 不同初始应力损伤再生混凝土配合比
Tab. 1 Mixture proportions of recycled concrete specimens

试件编号	ρ_r /%	配合比/(kg·m ⁻³)						初始应力水平
		水	水泥	砂	NCA	RCA	减水剂	
RC30-A/B/C	30	180	450	655	815.5	349.5	1.8	0.2/0.4/0.6
RC65-A/B/C	65	180	450	655	407.8	757.3	1.8	0.2/0.4/0.6
RC100-A/B/C	100	180	450	655	0.0	1 165.0	1.8	0.2/0.4/0.6

隙率增加。如果此时混凝土仍处于硫酸盐环境中,SO₄²⁻将更容易渗入其内部并加速腐蚀反应的发生^[8]。研究表明,弯曲和拉伸荷载会加速混凝土的硫酸盐侵蚀,而受压的混凝土试件的抗硫酸盐侵蚀能力会得到一定的增强^[9-11]。为了更好地适应工程实际,对损伤后的混凝土的耐久性进行研究是必须的。

目前,大部分研究都集中在普通混凝土的硫酸盐腐蚀上,对再生混凝土硫酸盐腐蚀的研究还不够。本试验设计了多组再生骨料取代率互不相同的试件,并对其预加了三种不同程度的初始应力损伤,通过模拟加速试验研究了再生混凝土在硫酸钠腐蚀下的劣化过程。

1 试验方案

1.1 试件设计

试验设计了尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件和100 mm×100 mm×300 mm的棱柱体试件,并对二者进行了物理力学性能测试。所用的混凝土水灰比为0.4,其配合比见表1。试验所采用的水泥是海螺牌普通硅酸盐水泥,型号为P.O 42.5;粉煤灰为F级粉煤灰,减水剂为液体标准型高效能减水剂,掺量为0.40%。制作试块使用的骨料分为再生粗骨料(RCA)、天然粗骨料(NCA)和细骨料三种。再生粗骨料为建筑垃圾资源回收再利用项目出产的连续级配的碎石,其粒径范围为5~16 mm,压碎指标值为21%,含泥量为2.5%;天然粗骨料为粒径10~25 mm的碎石,级配连续,压碎指标为16%,含泥量为0.7%;细骨料为河砂,细度模数为2.7。拌和用水为普通自来水。

本试验设计了三种再生骨料的取代率 ρ_r 分别为30%、65%和100%。为了研究初始损伤的影响,还设计了三种初始应力水平,即0.2、0.4、0.6倍的混凝土抗压强度。对于 ρ_r 为30%的混凝土,每种初始应力水平设计了三个棱柱体试块和九个立方体试块;对于 ρ_r 为65%和100%取代率的混凝土试块,每种初始应力水平设计了三个棱柱体试

块和三个立方体试块。

在混凝土浇筑24 h后,对各混凝土试件进行脱模,然后将试块置于相对湿度不低于95%、温度(20±2)℃的环境中养护28 d。

1.2 试验方法

1.2.1 抗压强度测试

采用万能力学试验机对混凝土试块进行力学试验。选择垂直于浇筑面的平整表面作为加载面,以3 kN/s的速率连续均匀加载,其峰值载荷作为试样的抗压强度。根据试验规范,三个试件抗压强度的实测值的平均值作为混凝土强度的代表值。

1.2.2 初始应力损伤的施加

对养护后不同取代率的再生混凝土进行抗压强度试验,测得其抗压强度值(表2),并以其28 d强度作为预制初始应力损伤的加载控制指标。

表2 不同取代率再生混凝土28 d抗压强度均值

Tab. 2 Compressive strength of recycled concrete with different ρ_r at 28 d

ρ_r /%	棱柱体强度均值/MPa	立方体强度均值/MPa
30	43.77	49.07
65	37.18	44.18
100	32.90	39.78

根据表1中各试件的初始应力水平设计值,通过加载对试件施加相应的初始应力。根据损伤力学理论,根据混凝土试件加载前后的超声波速计算损伤程度^[12]。

本试验采用对测法确定混凝土损伤度,原理如下:首先,选定混凝土的一个平整表面(非浇筑面)作为预制初始损伤的加载面。将两个超声探头置于与加载面垂直的两个相对表面中心点位置。加载前,测得混凝土的初始声时 T_0 。然后对混凝土进行五次往复加载,应力损伤预制完成后,再利用超声检测仪测量试件损伤后的超声声时 T 。可根据公式(1)计算混凝土的损伤度 D_0 ^[12]。

$$D_0 = 1 - \left(\frac{T_0}{T} \right)^2 \quad (1)$$

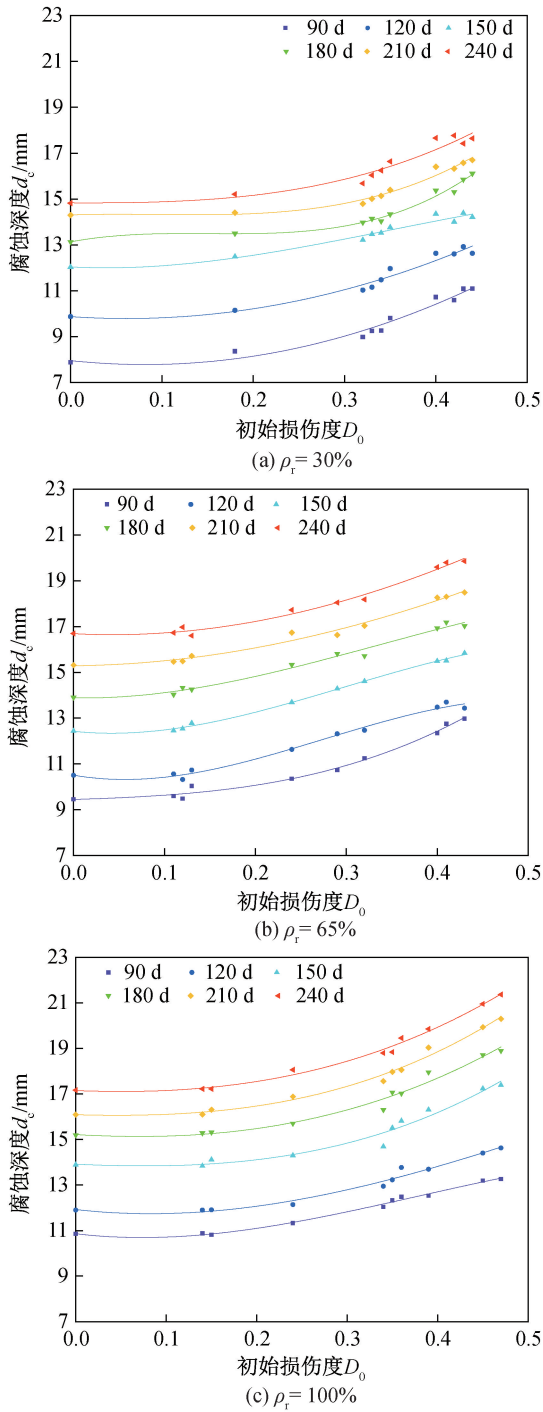


图3 不同再生骨料取代率混凝土腐蚀深度随初始损伤度的演变

Fig.3 Evolution of d_c of concrete with different D_0

块在同等腐蚀龄期下受到的腐蚀越严重,因此初始损伤度对取代率低的试件影响明显比取代率高的试件要小。

2.2 质量损失率

在每个腐蚀龄期后测定试块的质量,计算得到不同初始损伤度混凝土在每个腐蚀龄期的质量

损失率,并进行对比分析。图4为30%、65%和100%取代率再生混凝土质量损失率随腐蚀时间和初始损伤度 D_0 的变化曲线。

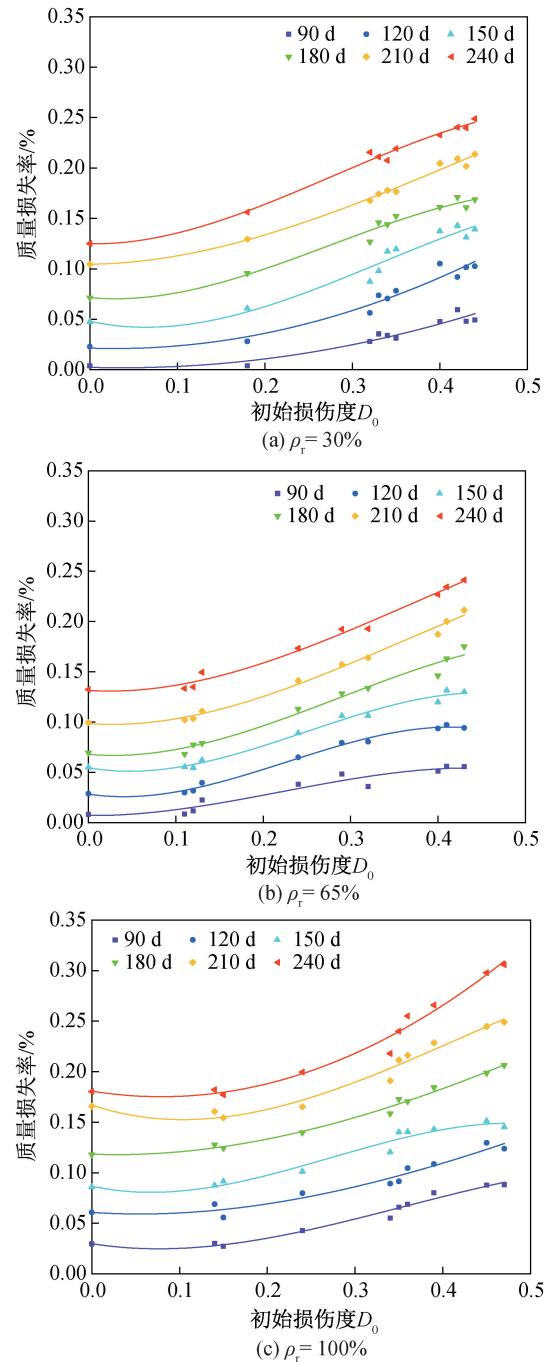


图4 不同再生骨料取代率混凝土质量损失率随初始损伤度的演变

Fig.4 Evolution of mass loss rate of concrete specimen with different D_0

如图4所示,在相同的腐蚀龄期下, $D_0 = 0.2$ 是质量损失率变化的一个转折点。 D_0 小于0.2的试件与未损伤混凝土的质量损失率几乎相同,而 D_0 大于0.2的试件随着其损伤度的进一步增长,

质量损失率的变化更加显著。

随着 ρ_r 的增大,试件的质量损失率的变化展现出增长的趋势。以腐蚀 240 d 的混凝土为例,30% RCA 取代率、初始损伤度 D_0 为 0.43 的混凝土质量损失率为 0.23%; RCA 取代率 65%、初始损伤度 D_0 为 0.43 的混凝土质量损失率为 0.24%; RCA 取代率 100%、初始损伤度 D_0 为 0.45 的混凝土质量损失率为 0.30%。此外,当腐蚀龄期变长时,试件的质量损失率随 D_0 增长的速度开始加快。

2.3 抗压强度

对于 30% 取代率的试块,研究了三个不同的腐蚀龄期(90、160 以及 240 d)后的抗压强度变化规律,其结果如图 5 所示。

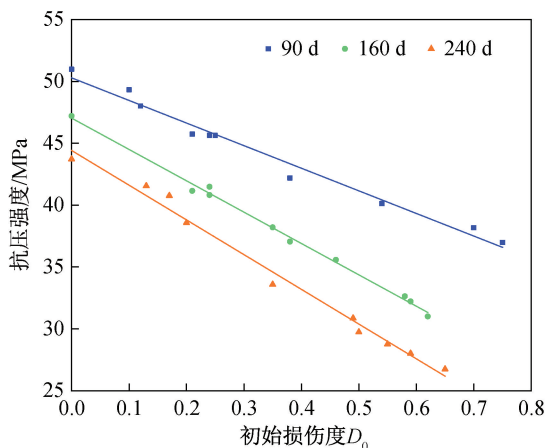


图 5 不同腐蚀龄期 30% 取代率混凝土抗压强度随初始损伤度变化曲线

Fig. 5 Compressive strength of corroded concrete with the ρ_r of 30%

图 5 表明,随着初始损伤度 D_0 的增加,试件的抗压强度降低。与未预制损伤的试件相比,当腐蚀 90 d 时, D_0 为 0.1 和 0.7 的试件抗压强度下降了 3.25% 和 25%; 当腐蚀 160 d 时, D_0 为 0.21 和 0.62 的试件抗压强度下降了 12.83% 和 34.32%; 当腐蚀 240 d 时, D_0 为 0.13 和 0.62 的试件抗压强度下降了 4.94% 和 38.82%。由此得出,对于腐蚀龄期更长的混凝土试件,其抗压强度随 D_0 增长而下降的速度更快。

此外,对于 ρ_r 为 30%、65% 和 100% 的试件,对硫酸盐腐蚀 160 d 的试块抗压强度进行了对比分析,结果如图 6 所示。

图 6 显示了随着 ρ_r 和 D_0 的增长,试件的抗压强度均呈现下降的趋势。腐蚀龄期为 160 d 时, ρ_r 为 30%、 D_0 为 0.38 的混凝土试件抗压强度为

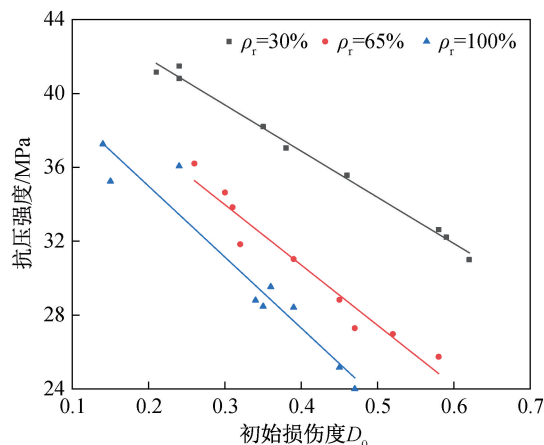


图 6 不同取代率混凝土 160 d 抗压强度

Fig. 6 Compressive strength of concrete with different ρ_r at 160 d

37.05 MPa; ρ_r 为 65%、 D_0 为 0.39 的混凝土试件抗压强度为 33.54 MPa; ρ_r 为 100%、 D_0 为 0.37 的混凝土试件抗压强度为 28.85 MPa。另外,随着 ρ_r 的增大, D_0 对腐蚀后混凝土抗压强度的影响更为显著。

2.4 动弹模量 E_d

动弹模量 E_d 也是混凝土力学性能的重要指标,也可以用于评估再生骨料取代率和初始损伤度对混凝土硫酸盐腐蚀的影响。 E_d 是评价混凝土性能的最常用的无损检测参数,因为它表达了混凝土试件的内部密实度,可以反映试件腐蚀损伤中的变化。 E_d 可以由式(3)^[14]得到:

$$E_d = v_r^2 \cdot \rho \cdot \frac{2(1 + \mu)^3}{(0.87 + 1.12\mu)^2} \quad (3)$$

式中: E_d 为混凝土动弹模量 (MPa); μ 为混凝土泊松比,本文统一取 0.2; ρ 为混凝土的密度 (kg/m^3); v_r 为混凝土表面波速 (m/s)。

图 7 是 ρ_r 为 30%、65%、100% 的混凝土试块的 E_d 随 D_0 的变化曲线。由图 7 可以看出,初始应力损伤对于动弹模量 E_d 存在负面影响,腐蚀后的再生混凝土的 E_d 随 D_0 和 ρ_r 的增大而减小,这是由于旧砂浆包裹的再生粗骨料的刚度小于天然骨料的刚度所致。对于不同的腐蚀龄期,同一 ρ_r 的损伤后混凝土试件的腐蚀速率随 D_0 的增加有相似的下降趋势。然而,初始应力损伤对腐蚀后混凝土抗蚀性能的影响在 ρ_r 较小的情况更为显著。

3 结论

本章研究了不同取代率 (30%、65% 和 100%)

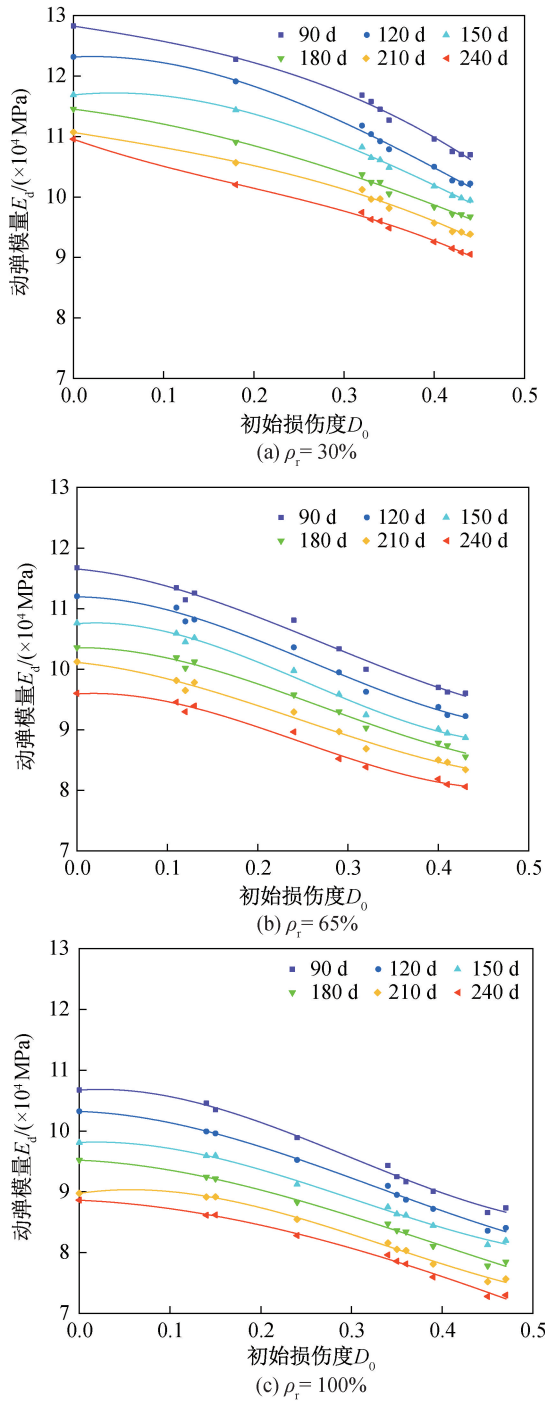


图7 不同再生骨料取代率混凝土动弹模量随初始损伤度的演变

Fig. 7 Evolution of E_d of concrete with different D_0

以及不同初始损伤度 D_0 对于再生混凝土腐蚀性能变化的影响规律:

1) 再生混凝土硫酸盐腐蚀深度 d_c 随腐蚀龄期和 RCA 取代率的增加而增大, 初始应力损伤 D_0 对再生混凝土硫酸盐腐蚀深度 d_c 的影响有阈值效应。当 D_0 小于 0.2 时, 对 d_c 影响不大; 当 D_0 大于 0.2 时, d_c 随 D_0 的增大而显著增大。

2) 质量损失率的变化趋势与腐蚀深度类似, 初始应力损伤对腐蚀后再生混凝土的质量损失率也存在阈值效应, 其变化拐点也在 $D_0 = 0.2$ 附近。混凝土试件的质量损失率随 ρ_r 的增大而增大, 腐蚀龄期越长, 初始应力损伤对质量损失率的影响越显著。

3) 腐蚀后再生混凝土抗压强度随 D_0 的增加呈线性下降趋势, 且腐蚀龄期越长, RCA 取代率越高, 初始应力损伤对抗压强度的影响越明显。

4) 腐蚀后再生混凝土的动弹性模量 E_d 随 D_0 和 ρ_r 的增大而减小, 对于不同的腐蚀龄期下的再生混凝土, ρ_r 相同的试件的 E_d 随 D_0 的增大有相似的下陷趋势。而初始应力损伤对 ρ_r 较小的混凝土的影响更为显著。

参考文献:

- [1] WANG D, ZHOU X, MENG Y, et al. Durability of Concrete Containing Fly Ash and Silica Fume Against Combined FREEZING-THAWING and Sulfate Attack[J]. Construction and Building Materials, 2017, 147: 398-406.
- [2] NEVILLE A. The Confused World of Sulfate Attack on Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(8): 1275-1296.
- [3] SABRINA R P, CAROLINE A, MUNHOZ C G S, et al. Durability of PHOSPHOGYPSUM-BASED Supersulfated Cement Mortar Against External Attack by Sodium and Magnesium Sulfate[J]. Cement and Concrete Research, 2020, 136: 106127.
- [4] RANJANI G I S, RAMAMURTHY K. Behaviour of Foam Concrete under Sulphate Environments[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(7): 825-834.
- [5] DEHWAH H A F. Effect of Sulfate Concentration and Associated Cation Type on Concrete Deterioration and Morphological Changes in Cement hydrates[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(1): 29-39.
- [6] LIU P, CHEN Y, YU Z, et al. Evolution of the Dynamic Properties of Concrete in a Sulfate Environment[J]. Construction and Building Materials, 2020, 245: 118468.
- [7] JIANG L, NIU D T, SUN Y Z, et al. Ultrasonic Testing and Microscopic Analysis on Concrete under Sulfate Attack and Cyclic Environment[J]. Journal of Centre South University, 2014, 21: 4723-4731.
- [8] STROH J, SCHLEGEL M C, IRASSAR E F, et al. Applying High Resolution Synchrotron XRD Analysis on Sulfate Attacked Concrete Field Samples[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 66: 19-26.

(下转第 37 页)

的形态产生改变。随着干湿循环次数的增加,试样表面裂隙会出现不同程度的“愈合”,但随着聚合物浓度的提高,土颗粒被弹性粘膜包裹与胶结,颗粒间的联结增强,在水体的作用下不会轻易被破坏,试样表面裂隙形态变化较小,整体稳定性得到一定程度的提升。

参考文献:

- [1] 周利恩, 尚彦, 余建新. 工程边坡生态防护技术[J]. 云南农业大学学报, 2006, 21(4): 517-522.
- [2] 李冰. 浅谈高速公路边坡生态防护技术[J]. 福建建材, 2014, 12: 13-15.
- [3] 廖琳. 边坡绿化防护技术的发展和植被护坡机理[J]. 企业科技与发展, 2016, 07: 78-80.
- [4] 徐文有. 公路岩石边坡 TBS 植被护坡绿化技术的应用[J]. 交通企业管理, 2012, 27(06): 64-65.
- [5] 廖一蕾, 张子新, 肖时辉, 等. 水泥加固黏土微观特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2): 4318-4327.
- [6] 曾智, 沈水龙, 王志丰, 等. 上海水泥固化黏土的强度与硬度相关性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(02): 311-314.
- [7] 钱程. 石灰改良红黏土试验研究[J]. 西部交通科技, 2020, 03: 36-38.
- [8] ATE A. The Effect of POLYMER-CEMENT Stabilization on the Unconfined Compressive Strength of Liquefiable Soils[J]. International Journal of Polymer Science, 2013: 155-171.
- [9] IYENGAR S R, MASAD E, RODRIGUEZ A K, et al. Pavement Subgrade Stabilization Using Polymers: Characterization and Performance[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(4): 472-483.
- [10] LIU Jin, BAI Yuxia, LI Ding, et al. An Experimental Study on the Shear Behaviors of POLYMER-SAND Composite Materials after Immersion[J]. Polymers, 2018, 10(8): 924.
- [11] LIU Jin, BAI Yuxia, SONG Zezhuo, et al. Evaluation of Strength Properties of Sand Modified with Organic Polymers[J]. Polymers, 2018, 10(3): 287.
- [12] LIU Jin, WANG Yong, LU Yi, et al. Effect of Polyvinyl Acetate Stabilization on the SWELLING-SHRINKAGE Properties of Expansive soil[J]. International Journal of Polymer Science, 2017: 1-8.
- [13] 张伟锋, 刘清秉, 蔡松桃. 用 HEC 聚合物加固黄土的试验研究[J]. 人民长江, 2009, 40(03): 56-59.
- [14] 王银梅, 杨重存, 谌文武, 等. 新型高分子材料 SH 加固黄土强度及机理探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 14: 2554-2559.
- [15] 董金梅, 王沛, 柴寿喜. 水泥改性聚乙烯醇固化轻质土的强度特性[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(04): 576-580.
- [16] 唐朝生, 崔玉军, ANH-Minh, 等. 膨胀土收缩开裂过程及其温度效应[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2181-2187.
- [17] 唐朝生, 施斌, 崔玉军. 土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(08): 1415-1423.
- [18] 罗茂泉, 杨松, 马泽慧, 等. 干湿循环下气-液界面张力对黏土收缩开裂的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(02): 369-379.

(责任编辑 王利君)

(上接第 13 页)

- [9] GAO J, YU Z, SONG L, et al. Durability of Concrete Exposed to Sulfate Attack under Flexural Loading and Drying-wetting Cycles[J]. Construction and Building Materials, 2013, 39(2): 33-38.
- [10] TAN Y, YU H, MA H, et al. Study on the Microcrack Evolution of Concrete Subjected to Stress Corrosion and Magnesium Sulfate[J]. Construction and Building Materials, 2017, 141: 453-460.
- [11] XU H, ZHAO Y, CUI L, et al. Sulphate Attack Resist-

ance of High-performance Concrete under Compressive Loading[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2013, 14(7): 459-468.

- [12] 高鑫, 申向东, 王萧萧, 等. 应力损伤轻骨料混凝土抗冻融性能[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(10): 1247-1252.
- [13] 梁咏宁, 袁迎曙. 超声检测混凝土硫酸盐侵蚀的研究[J]. 混凝土, 2004(8): 15-17.
- [14] 孙丛涛, 牛荻涛, 元成方. 混凝土动弹性模量与超声声速及抗压强度的关系研究[J]. 混凝土, 2010(04): 14-16.

(责任编辑 王利君)