

钢渣稳定土强度增长微观分析及路用性能研究^{*}周涛¹, 刘良玉¹, 宋心斌²

(1.长沙市城投基础设施建设项目管理有限公司, 湖南 长沙 410007;

2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:为探讨钢渣稳定土的强度增长机理,应用扫描电镜分析不同龄期钢渣稳定土结构的变化过程;设计 10% 溶积料钢渣稳定土与常规使用的 5% 水泥稳定土和 8% 石灰稳定土进行试验,分析钢渣稳定土的路用性能。结果表明,10% 钢渣稳定土具有较高的强度和良好的稳定性,满足路基路床填料使用要求。

关键词:公路;钢渣稳定土;水泥稳定土;石灰稳定土;强度;路用性能

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2019)03-0072-04

钢渣是炼钢中的副产品,由矿石、助熔剂中的易熔硅酸盐和燃料等组成,其再生利用是可持续发展战略的重要内容。钢渣应用于道路工程,国内外已有一定成果。Hisham Qasrawi 等将低 CaO 含量的未经处理的钢渣用作砂细骨料,替代率分别为 100%、50%、30%、15% 和 0,结果表明,替代率不大于 30% 时,砂的各种性能得到提升;K. L. Magadi 等将钢渣作为不同粒径粗骨料的替代材料进行沥青混合料性能试验,测试骨料、沥青和钢渣的物理性能;N. H. Roslan 等利用钢渣(炼钢工业副产品)和电弧炉钢渣作为砂中水泥替代物进行了室内试验研究;J. M. Yang 等研究了高炉渣掺量比和水胶比对砂抗压强度的影响;程涛等对煤矸石、粉煤灰、石灰钢渣稳定土进行对比分析,发现石灰钢渣稳定土的力学性能优于石灰、粉煤灰稳定土;黄毅等采用 XRD、SEM-ED、SXRF 等方法对多家钢铁企业的铁水脱硫渣、电炉氧化渣、转炉钢渣和精炼渣进行了化学分析、物相分析及显微形貌观察;吴子龙等对掺入偏高岭土与钢渣的水泥改性土进行室内试验,分析改性土的击实特性、劈裂抗拉强度及抗压强度。该文采用粒径 0~5 mm 的钢渣(俗称溶积料)作为稳定土改良剂,采用扫描电镜对溶积料钢渣稳定土强度形成机理进行微观分析,观察粒径、活性成分随养护龄期的变化,并与 8% 石灰稳定土、5% 水泥稳定土等常用路床改良稳定土进行路用性能对比分析。

1 钢渣稳定土强度形成机理微观分析

对钢渣稳定土进行混合料击实试验和基本力学

试验,确定其能达到最大强度的最佳配合比。利用扫描电镜观察粒径、活性成分等随龄期的变化,在微观方面分析其强度形成机理。

如图 1~3(图 1 反映的是养护 7 d 钢渣稳定土结构上的变化,相对图 2、图 3 来说是宏观上的物理变化;图 2、图 3 反映的是其生成物的变化,是微观上的化学变化)所示,养护 7 d 钢渣稳定土的结构处于疏松状态,小孔隙大量分布,钢渣分布在土颗粒中,没有完全联结,颗粒表面光滑,孔径较大;将观察倍数放大至 5 000 倍,细微的产物附着在钢渣颗粒上,有些片状产物沿钢渣颗粒边界联结处产生;将观察倍数放大至 10 000 倍,能清晰地看到有棒状产物产生。钢渣中的硅酸二钙 C_2S 、硅酸三钙 C_3S 等水硬性胶结矿物发生水化反应,生成水化硅酸钙凝胶 $C-S-H$ 类产物。在土的孔隙中,这些水化产物相互交接,土颗粒被包裹起来,导致黏土渐渐失去塑性。但视野范围内的产物数量并不多,钢渣稳定土 7 d 无侧限抗压强度相对较低。



图 1 养护 7 d 钢渣稳定土的结构

^{*} 基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ40312)

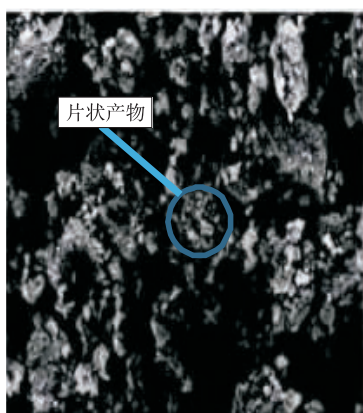


图 2 养护 7 d 钢渣稳定土的反应效果

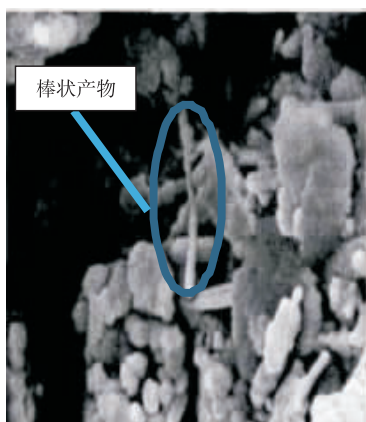


图 3 养护 7 d 钢渣稳定土的产物放大图

如图 4~6(图 4 反映的是养护 28 d 钢渣稳定土结构上的变化,相对图 5、图 6 来说是宏观上的物理变化;图 5、图 6 反映的是其生成物的变化,是微观上的化学变化)所示,养护 28 d 后,钢渣稳定土中小颗粒与大颗粒开始相互咬合,颗粒之间的接触关系变得模糊,孔隙分布减少,孔径变小;将观察倍数放大至 5 000 倍,钢渣表面棒状、针状产物增多,有相互联结成片的趋势;将观察倍数放大至 10 000 倍,针状的钙矾石和片状的水化硅酸钙凝胶大量产生,附着在钢渣表面,并且多种产物之间相互搭接,钢渣稳定土的无侧限抗压强度与 7 d 时的相比小幅提高。可以推断产物的生成对钢渣稳定土强度的提高起到了促进作用,也从微观上说明了龄期对钢渣稳定土强度的影响。

2 路用性能试验分析

参考以往工程经验,考虑到水泥稳定土和石灰稳定土强度形成机理及影响因素,将掺比为 10% 的溶积料钢渣稳定土、常规使用的 5% 水泥稳定土和



图 4 养护 28 d 钢渣稳定土的结构

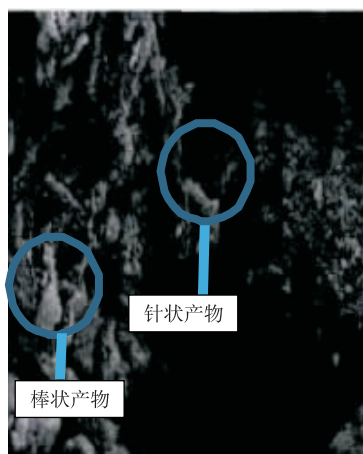


图 5 养护 28 d 钢渣稳定土的反应效果

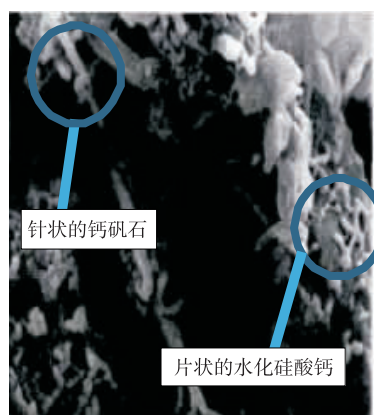


图 6 养护 28 d 钢渣稳定土的产物放大图

8% 石灰稳定土进行液限和塑限试验、击实试验、CBR 试验、CBR 浸水膨胀率试验和无侧限抗压强度试验,分析钢渣稳定土的路用性能。

2.1 液塑限联合试验

对 10% 溶积料钢渣稳定土、5% 水泥稳定土和

8%石灰稳定土进行液、塑限试验,并与素土对比,试验结果见表1。

表1 稳定土的液、塑限试验结果

土的类型	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑性指数 I_p
10%钢渣稳定土	45	27	18
5%水泥稳定土	44	31	13
8%石灰稳定土	45	29	16
素土	47	26	21

由表1可知:与素土相比,3种稳定土的液限有所降低,塑限明显上升,塑性指数明显下降。其中水泥稳定土的塑性指数降低幅度最大,说明水泥的掺入对降低土体塑性的效果明显;钢渣稳定土的塑性指数降低幅度最小,说明钢渣的掺入对降低土体塑性的效果不是很明显。

2.2 击实试验

对10%溶积料钢渣稳定土、5%水泥稳定土和8%石灰稳定土进行击实试验,并与素土对比,探讨钢渣稳定土的施工参数,试验结果见表2。

表2 稳定土的击实试验结果

土的类型	最大干密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	最佳含水率/ $\%$
10%钢渣稳定土	1.93	13.5
5%水泥稳定土	1.78	14.8
8%石灰稳定土	1.81	12.6
素土	1.74	18.5

由表2可知:3种稳定土的最大干密度与素土相比都增大,其中10%钢渣稳定土增加最明显;3种稳定土的最佳含水率与素土相比都显著降低,其中8%石灰稳定土最低。土中掺入稳定类材料使土体更密实,空隙率减小。

2.3 CBR 试验

稳定土材料用作路床不同深度范围内的路基填料,不同路床深度对压实度的要求不同,采用不同压实度下 CBR 值来反映路基承载能力。对10%溶积料钢渣稳定土、5%水泥稳定土和8%石灰稳定土进行 CBR 试验,并与素土对比,分析钢渣稳定土的性能,试验结果见表3。

表3 稳定土的 CBR 试验结果

土的类型	不同压实度($\%$)下的 CBR 值/ $\%$				
	100	98	96	94	93
10%钢渣稳定土	35.7	32.3	26.4	21.2	19.4
5%水泥稳定土	29.6	26.1	25.3	17.1	12.9
8%石灰稳定土	33.4	23.5	14.2	11.1	8.8
素土	16.4	13.7	10.9	8.5	7.3

由表3可知:和素土相比,3种稳定土的 CBR 值都明显提高,其中不同压实度下钢渣稳定土的 CBR 值都最大,钢渣稳定土的效果最明显;其次为水泥稳定土,石灰稳定土的最小。钢渣的掺入在一定程度上改善了稳定土混合料的颗粒级配,有利于机械压实从而形成强度,特别是当钢渣含量较多时,钢渣颗粒间的内摩阻力对其有很大影响。水泥稳定土的 CBR 值在压实度为93%~96%时增长速率最快,其受压实度影响最大的区域为93%~96%;石灰稳定土的 CBR 值在压实度为96%~100%时增长速率最快,其受压实度影响最大的区域为96%~100%;钢渣稳定土的 CBR 值在压实度为94%~98%时增长速率最快,其受压实度影响最大的区域为94%~98%;素土受压实度影响的区域较均匀。

2.4 CBR 浸水膨胀率试验

对10%溶积料钢渣稳定土、5%水泥稳定土和8%石灰稳定土进行不同压实度下 CBR 浸水膨胀率试验,并与素土对比,分析钢渣稳定土的膨胀性能,试验结果见表4。

表4 稳定土的 CBR 浸水膨胀率试验结果

压实度/ $\%$	各类土的 CBR 浸水膨胀率/ $\%$			
	素土	5%水泥稳定土	8%石灰稳定土	10%钢渣稳定土
93	2.52	0.13	0.37	2.03
94	2.83	0.34	0.50	2.03
96	3.64	0.57	0.69	1.75
98	4.31	0.61	1.13	1.70
100	5.09	0.68	1.52	1.67

由表4可知:素土、5%水泥稳定土和8%石灰稳定土的 CBR 浸水膨胀率随压实度的提高而增大,10%钢渣稳定土的 CBR 浸水膨胀率随压实度的提高而减小。压实度增大使素土、水泥稳定土和石灰稳定土变得更密实,空隙率减小,土的膨胀力、膨胀量变大,收缩力、收缩量变小。压实度提高加剧了钢渣与素土中矿物的化学反应,使反应更充分,生成的胶结物大大提高了对素土膨胀的约束力。素土的 CBR 浸水膨胀率最大,其次为钢渣稳定土和8%石灰稳定土。压实度为96%以上时,钢渣稳定土的 CBR 浸水膨胀率小于2%,满足 GB/T 25824—2010《道路用钢渣》的要求。

2.5 无侧限抗压强度试验

对10%溶积料钢渣稳定土、5%水泥稳定土、8%石灰稳定土进行不同龄期下无侧限抗压强度试

验,并与素土对比,分析钢渣稳定土的强度性能,试验结果见表 5。

表 5 不同龄期下稳定土的无侧限抗压强度

土的类型	各龄期(d)无侧限抗压强度/MPa	
	7	28
10%钢渣稳定土	0.76	1.03
5%水泥稳定土	1.22	1.73
8%石灰稳定土	1.04	1.38
素土	0.18	0.18

由表 5 可知:1) 和素土相比,5%水泥稳定土、8%石灰稳定土和 10%钢渣稳定土的 7、28 d 无侧限抗压强度明显提高,其中 5%水泥稳定土的最高,其次为 8%石灰稳定土,10%钢渣稳定土的最小。2) 3 种稳定土的无侧限抗压强度随龄期的增长而提高,其中 10%钢渣稳定土的 28 d 强度约为 7 d 的 1.35 倍,5%水泥稳定土的 28 d 强度约 7 d 的 1.42 倍,8%石灰稳定土的 28 d 强度约 7 d 的 1.32 倍。在 7~28 d 龄期,5%水泥稳定土的强度提高最多,其次为 8%石灰稳定土,10%钢渣稳定土提高最小,说明水泥稳定土、石灰稳定土的主要强度增长期是 28 d。在 1~2 个月内,水泥稳定土的抗压强度随养生时间而增加,与龄期成对数关系;石灰掺入土中,初期表现为土的结团,后期主要是结晶结构的形成,土的强度与稳定性得到提高;钢渣稳定土的强度主要来源于机械压实作用、钢渣的水化反应、碳酸化作用和结晶硬化作用,相对于水泥、石灰,钢渣粒径较大,与土的接触面积小,两者之间的胶结化学反应缓慢。

3 结论

(1) 通过扫描电镜扫描 7、28 d 龄期 10%钢渣稳定土,观察到在稳定过程中矿物成分和数量的变化、稳定土的结构变化和孔隙、孔径的变化,结合 7、28 d 强度差异,分析了钢渣稳定土强度随龄期的增长机理。

(2) 水泥稳定土的塑性指数降低幅度最大,钢渣稳定土的塑性指数降低幅度最小;和素土相比,3 种稳定土的 CBR 值都明显提高,其中钢渣稳定土效果最明显,其次为水泥稳定土,石灰稳定土最小。

(3) 3 种稳定土中,5%水泥稳定土的 7、28 d 无侧限抗压强度最高,其次是 8%石灰稳定土,10%钢渣稳定土最小。

(4) 素土、5%水泥稳定土和 8%石灰稳定土的 CBR 浸水膨胀率随压实度的提高而增大,10%钢渣稳定土的 CBR 浸水膨胀率随压实度的提高而减小。素土的 CBR 浸水膨胀率最大,其次为钢渣稳定土和 8%石灰稳定土,5%水泥稳定土最小。

(5) 10%钢渣稳定土的液塑限、CBR 强度、无侧限抗压强度和 CBR 浸水膨胀率等路用性能均满足规范要求,可作为路床改良土应用于各级公路。

参考文献:

- [1] Hisham Qasrawi, Faisal Shalabi, Ibrahim Asi. Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2).
- [2] K L Magadi, N Anirudh, K M Mallesh. Evaluation of bituminous concrete mixture properties with steel slag [J]. Transportation Research Procedia, 2016, 17.
- [3] N H Roslan, M Ismail, Z Abdul-Majid, et al. Performance of steel slag and steel sludge in concrete[J]. Construction & Building Materials, 2016, 104.
- [4] J M Yang, D Y Yoo, Y C Kim, et al. Mechanical properties of steam cured high-strength steel fiber-reinforced concrete with high-volume blast furnace slag[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2017, 11(2).
- [5] 张林. 钢渣桩在湿陷性黄土地基处理中的应用[D]. 郑州: 郑州大学, 2006.
- [6] 程涛, 晏克勤. 不同工业废渣石灰稳定土力学性质对比分析[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(2).
- [7] 黄毅, 徐国平, 程慧高, 等. 典型钢渣的化学成分、显微形貌及物相分析[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(8).
- [8] 吴子龙, 朱向阳, 邓永锋, 等. 掺入钢渣与偏高岭土水泥改性土的性能与微观机制[J]. 中国公路学报, 2017, 30(9).
- [9] 陈晓. 钢渣 SMA-13 油石比及路用性能研究[J]. 公路与汽运, 2018(4).

收稿日期: 2019-01-05

(上接第 71 页)

- [4] GB 50315—2011, 砌体工程现场检测技术标准[S].
- [5] GB/T 50344—2004, 建筑结构检测技术标准[S].

[6] GB 50007—2011, 建筑地基基础设计规范[S].

收稿日期: 2019-01-06