

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.037

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



钢渣-土混拌基层材料试验研究及微观机理分析

黄伟¹, 邱鹏¹, 赵鲁卿², 唐钢¹, 王宗森²

(1. 安徽工业大学 建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002; 2. 安徽马钢嘉华新型建材有限公司, 安徽 马鞍山 243000)

摘要:针对钢渣用于基层材料易发生膨胀的问题,采用钢渣、高炉矿渣微粉、土混拌并结合土体固化技术,制备道路基层材料钢渣混合土。对16组不同配比土样开展了击实、膨胀率、无侧限抗压强度试验。研究表明:钢渣混合土最佳含水率受配比影响较小,均维持在12%~14%;最大干密度随钢渣掺量的减少而降低,随高炉矿渣微粉掺量的增加而降低;高炉矿渣微粉的掺入可显著降低钢渣混合土膨胀率,提高其无侧限抗压强度;7、14、28、90 d无侧限抗压强度均随钢渣占比增加呈先增后减趋势,配比为50%钢渣、50%土时达到最大。微观结构分析表明:土颗粒表面电荷的改变使得钢渣混合土体结构在成型时更易受压密实,钢渣中游离氧化钙(f-CaO)在固化过程中的水化反应受到明显抑制,主要与矿渣中二氧化硅(SiO₂)发生消解反应生成水化硅酸钙凝胶(C—S—H);与此同时,钢渣、土相互包裹的颗粒间堆叠效应及C—S—H凝胶填充混合料缝隙产生的自密实效应进一步提高了土体强度,从而制备出强度高、安定性好的钢渣混合土。

关键词:道路工程;钢渣混合土;抗压强度;膨胀抑制;最优配比

中图分类号:TU411.3;U416.1 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2020)04-0044-09

Experimental study and micro-mechanism analysis of steel slag-soil mixed road base material

Huang Wei¹, Qiu Peng¹, Zhao Luqing², Tang Gang¹, Wang Zongsen²

(1. School of Architectural Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, Anhui, P. R. China;

2. Anhui Magang Jiahua New Building Materials Co., Ltd., Maanshan 243000, Anhui, P. R. China)

Abstract: In view of the problem that steel slag is prone to expand in base material, steel slag, blast furnace slag micro-powder and soil were mixed to prepare a road base material-steel slag mixed soil using soil solidification technology. The compaction, expansion rate and unconfined compressive strength tests were carried out on 16 soil samples with different mixture ratios. The results show that the optimum moisture content of the steel slag mixed soil is little affected by the mixture ratio, which maintained at 12~14%. The maximal dry density decreases with steel slag content, and decreases as the content of blast furnace slag micro-powder rises. Blast furnace slag micro-powder could significantly reduce the expansion rate of steel slag mixed soil and increase its unconfined compressive strength. The 7 d, 14 d, 28 d and 90 d unconfined compressive strength of steel slag mixed soil are firstly increase then decrease with steel slag content, and the strength reaches the maximum value when the mixture ratio is 50% steel slag and 50%

收稿日期:2019-10-20

基金项目:安徽省高校自然科学研究重大项目(KJ2018ZD006);安徽省住房城乡建设科学技术计划(2018YF-007)

作者简介:黄伟(1963-),男,教授,主要从事道路材料研究,E-mail:hwpsagd@163.com。

Received:2019-10-20

Foundation items: Major Projects of Natural Science Research of Anhui Universities (No. KJ2018ZD006); Anhui Housing Urban and Rural Construction Science and Technology Program Project (No. 2018YF-007)

Author brief: Huang Wei (1963-), professor, main research interest: road materials, E-mail: hwpsagd@163.com.

soil. Microstructural analysis shows that the change of surface charge of soil particle enhance the compactness of steel slag mixed soil in molding process. The hydration reaction of f-CaO in the steel slag was inhibited during solidification, and which conduct digestion reaction with SiO_2 in the mineral slag to form hydrated calcium silicate gel (C—S—H). At the same time, inter-particle stacking effect between steel slag and soil and self-compacting effect produced by C—S—H gel could enhance strength of steel slag mixed soil, and thus steel slag mixed soil with high strength and stability is prepared.

Keywords: road engineering; steel slag mixed soil; compressive strength; expansion inhibition; optimum ratio

中国交通运输建设正处于高速增长时期,2017 年底召开的全国交通运输工作会议中明确,2018 年新增不同等级道路总里程数达 23 万 $\text{km}^{[1]}$ 。在大规模道路工程建设背景下,作为道路基层工程主要原材料的天然砂、石料的需求存在巨大缺口^[2]。更为严峻的是,随着近两年国家对环境保护的愈加重视,天然砂、石料的开采受到严格控制,其市场供应短缺问题日益突出,价格急剧攀升。此外,在城市道路建设过程中往往存在土方排放困难问题,较远的排放地点导致土方长距离运输,既增加了工程造价,也容易造成环境污染。

传统道路基层材料主要有无机结合料稳定细粒土和中、粗粒土等,其中,以土料为主的石灰土、水泥土、二灰土等强度均较低,应用范围受到限制^[3]。近年来,随着新型土壤固化剂的诞生,工程建设领域研究人员开展了深入研究。然而,基于土壤固化机理的固化土基层材料强度相比石灰土、水泥土、二灰土等提升并不明显,较无机结合料稳定中、粗粒土承载力尚有差距,难于满足高等级道路的强度指标要求^[4-5]。钢渣是钢铁企业生产过程中大量生成的工业废渣,未经处理钢渣在占用土地、污染环境的同时,还会造成资源的严重浪费。现阶段,随着环保政策的趋严,对钢渣进行处理及资源综合利用已成为钢铁工业可持续发展的主要任务之一,建筑工程领域是钢渣资源化综合利用的重要发展方向^[6-13]。已有相关研究成果表明,钢渣具有颗粒级配良好、强度高、硬度大、透水性强、可压缩度小等诸多优点,同时,钢渣自身富含潜在活性成分,可用于工程回填料、水泥掺加料、筑路材料、烧结砖等领域^[14-16]。但是,钢渣中存在一定含量的活性成分游离氧化钙(f-CaO),将未经处理的钢渣直接应用于道路工程,会引起道路的鼓包开裂。中国钢铁企业现阶段对钢渣的主要处理方式是先经热闷池热闷,而后渣场堆置,自然陈化降解钢渣中的 f-CaO,整个过程需时较长、效率低下,既降低了土地有效利用率,又对周围环境

构成严重影响^[17-18]。

笔者以膨胀率和无侧限抗压强度为双控目标,采用钢渣、高炉渣微粉、土混拌并结合土体固化技术,制备道路基层材料钢渣混合土,开展钢渣混合土体基本性能试验研究,并对其进行微观机理分析。

1 试验主要原材料

1.1 钢渣

钢渣为马钢公司热闷处理渣,采用 X 射线荧光光谱(XRF)以及 X 射线衍射光谱(XRD)对试验钢渣进行化学成分及矿物组分测定。钢渣主要化学成分见表 1。

表 1 钢渣化学成分及含量

Table 1 Chemical composition and content of steel slag %

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅
58.13	16.31	1.89	14.36	1.03	3.58	0.35	1.54

钢渣碱度(CaO/SiO_2)为 3.56,属于高碱度渣,具有较高活性;钢渣中矿物组分结果见图 1,从图中可以看出,试验钢渣中主要矿物成分有 $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ 、 $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ 和 Ca_3SiO_5 ,与水泥熟料基本矿物类似,在 32.46° 、 37.68° 、 54.32° 对应其 f-CaO 成分,特征峰较为明显,说明钢渣中 f-CaO 含量较高。

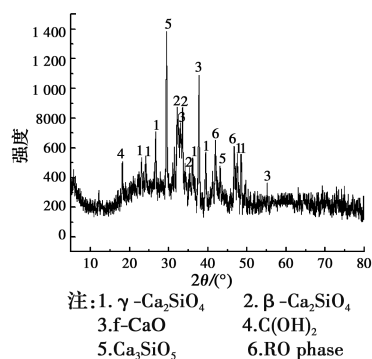


图 1 钢渣 XRD 图

Fig. 1 XRD pattern of steel slag

1.2 土样

考虑试验成果指导实际工程应用的可行性,试验土样取自马鞍山市杨坝村某建筑工地地表以下 1.5~2 m 处。土样液限 39.6%,塑限 21.3%,塑性指数 18.3%,属低液限黏土。

1.3 高炉矿渣微粉

试验所用高炉矿渣微粉产自马钢嘉华新型建材有限公司,表观密度为 2 900 kg/m³,比表面积为 400 m²/kg,主要成分如表 2 所示。

表 2 高炉矿渣微粉成分及含量

Table 2 Composition and content of blast furnace slag

powder					%
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	
33.4	16.1	0.28	0.60	38.3	
MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	Loss		
7.89	2.42	0.028	0.56		

1.4 土壤固化剂

试验所用土壤固化剂为易孚森离子型液体土壤固化剂,固化剂性能依据《土壤外加剂》(CJ/T 486—2015)进行检测。凝结时间影响系数比为 108.1%,无侧限抗压强度比为 139.3%,水稳系数比为 115.3%,相关指标均满足该规范技术要求。

2 测试及表征

2.1 试验配合比设计

试验规定 4 种比例钢渣混合土:60% 钢渣 + 40% 土、50% 钢渣 + 50% 土、40% 钢渣 + 60% 土、30% 钢渣 + 70% 土(对应配比编号为 A、B、C、D),分别掺入 0、30%、40%、50% 高炉矿渣微粉(占钢渣质量的百分比,对应微粉掺量水平为 1、2、3、4),制备土样试件。其中,各组试件中土壤固化剂及水泥用量均分别按钢渣混合土质量的 0.02% 和 5% 掺入,具体配合比见表 3。

表 3 钢渣-土-矿渣微粉配合比

Table 3 Mix ratio of steel slag, soil-slag and slag

micro-powder			
试件	微粉掺量/%	渣占比/%	土占比/%
A-1	0	60	40
A-2	30	60	40
A-3	40	60	40
A-4	50	60	40
B-1	0	50	50
B-2	30	50	50
B-3	40	50	50
B-4	50	50	50

续表 3

试件	微粉掺量/%	渣占比/%	土占比/%
C-1	0	40	60
C-2	30	40	60
C-3	40	40	60
C-4	50	40	60
D-1	0	30	70
D-2	30	30	70
D-3	40	30	70
D-4	50	30	70

2.2 试验方法

击实试验:对钢渣混合土试件进行击实试验,依据《公路土工试验规程》(JTG E 40—2007)中的规定,利用 CSK-VI 型击实仪选择重型 II-2 方法。

膨胀率试验:试验依据《钢渣稳定性试验方法》(GB/T 24175—2009),采用 CF-B 型标准恒水浴箱中进行高温水浴试验。每天在 90±1 °C 条件下恒温 6 h,然后自然冷却,记录膨胀值,持续观测 10 d;然后选定一组试件进行长期观测。试验由重型击实成型试件,试件尺寸 Φ152 mm×170 mm,每组 3 个平行试件,试验结果取三者的平均值。

无侧限抗压强度试验:无侧限抗压强度是道路基层材料承载力的重要力学指标,为材料在无侧向压力条件下轴力与接触面积的比值。试验依据《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)将钢渣混合土制成 50 mm×50 mm 圆柱体试块,分别测试其 7、14、28、90 d 无侧限抗压强度;补充最优配比的钢渣混合土无侧限抗压强度龄期试验。

XRD 分析:采用德国 Bruker 公司 SMARTAPEX II 型 X 射线衍射仪测试养护 28 d 钢渣混合土 B-3 试件及其同配比干粉混合料样品图谱,Cu 靶,扫描范围 2θ 为 5°~80°,扫描速率 0.01(°)/s。

SEM 分析:采用日本电子株式会社 JSM-6490LV 扫描电镜分析钢渣混合土试件,研究钢渣混合土不同龄期内部微观结构,工作电压 10 kV。

3 试验结果及讨论

3.1 击实试验

图 2 是 4 组 16 个钢渣混合土试件击实试验干密度-含水率曲线测试结果。由图 2 可见,16 组钢渣混合土干密度均随着含水率增加呈先增后减趋势,高炉矿渣微粉的掺量对其最佳含水率影响较小,且最佳含水率保持在 12%~14%;由图 2 可以发现,钢渣混合土最大干密度随着钢渣掺入比例降低

而不断减小,随着高炉矿渣微粉掺入量增加而不断降低,具体数据见表 4。

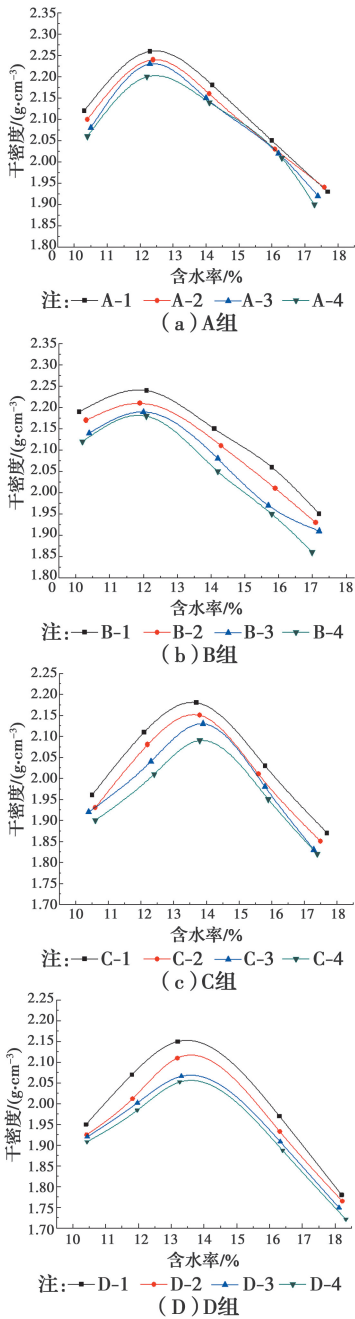


图 2 钢渣混合土击实曲线图

Fig. 2 Compaction curves of steel slag mixed soil

表 4 钢渣混合土最佳含水率与最大干密度

Table 4 Optimum water content and Maximum dry density of steel slag mixed soil

试件	最佳含水量/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)
A-1	12.5	2.262
A-2	12.5	2.220
A-3	12.4	2.123
A-4	12.5	2.175

续表 4

试件	最佳含水量/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)
B-1	12.1	2.241
B-2	11.9	2.202
B-3	12.0	2.174
B-4	12.0	2.166
C-1	13.6	2.168
C-2	13.8	2.137
C-3	13.9	2.117
C-4	14.0	2.079
D-1	13.5	2.154
D-2	13.6	2.117
D-3	13.7	2.069
D-4	13.7	2.055

3.2 膨胀率试验

图 3 是 4 组 16 个钢渣混合土试件膨胀率试验结果,可以看出:

1)未掺入高炉矿渣微粉的钢渣混合土各组试件膨胀率随试件放入高温水浴时间的增加先期增速较快,其后增速减缓,于 7 d 时膨胀率值趋于稳定;各组试件膨胀率均在前 4 d 超过国家规范<2%要求,10 d 膨胀率值最小值已达 2.5%,且随钢渣掺量增加,试件膨胀率增大。

2)掺入高炉矿渣微粉的钢渣混合土各组试件膨胀率均未掺加高炉矿渣微粉试件低很多,且掺量大抑胀效果好;随着试件放入高温水浴时间的增加,膨胀率总体增长缓慢,于 7 d 时膨胀率值趋于稳定;各组试件 10 d 膨胀率值均符合国家规范<2%要求,其中最大值不超过 1.5%,最小值仅为 0.15%。图 4 为文中选定最优配合比土样 B-3 试件 180 d 持续观测值,可以看出,在高温水浴持续激发下,7 d 试件膨胀率约 0.25%,其后观测值较 7 d 增长几乎很小,表现出良好的长期安定性。

3.3 无侧限抗压强度试验

图 5 为 4 组 16 个钢渣混合土试件分别对应龄期 7、14、28、90 d 无侧限抗压强度变化曲线。由图 5 可以看出:

1)在不同龄期下,各组试件无侧限抗压强度变化曲线分布特征相似;未掺高炉矿渣微粉试件无侧限抗压强度值均低于掺有高炉矿渣微粉试件,且差值随龄期增长而加大;掺有高炉矿渣微粉试件 7 d 无侧限抗压强度最小值大于 3 MPa,超过道路规范基层材料不低于 2 MPa 的要求,说明矿渣微粉对于

混合土体强度提升起着关键作用。

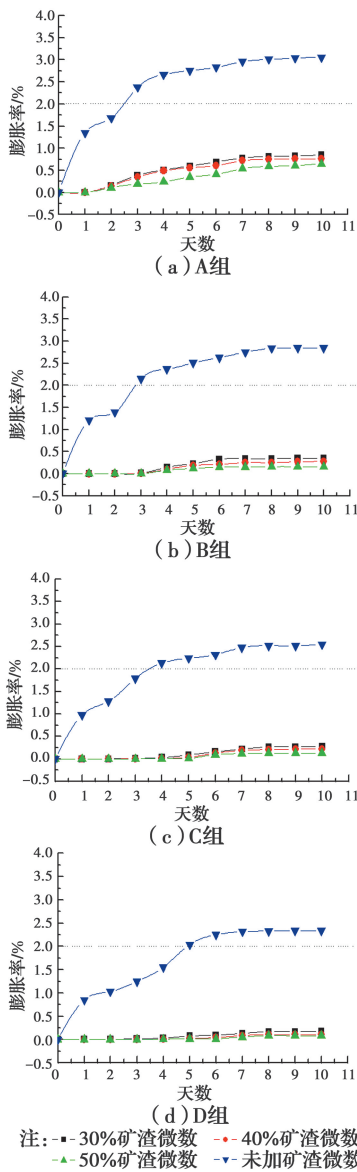


图 3 钢渣混合土膨胀率

Fig. 3 Expansion ratio of steel slag mixed soil

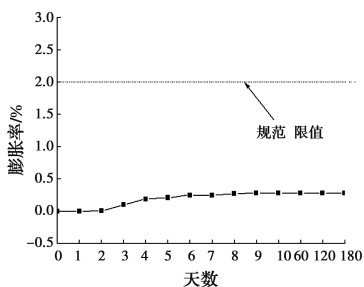


图 4 最优配合比土样膨胀率

Fig. 4 Optimum mix ratio soil sample expansion ratio

2) 未掺高炉矿渣微粉试件和不同掺量高炉矿渣微粉试件的无侧限抗压强度变化曲线分布特征不同,前者随钢渣掺量增加缓慢增长,后者则随钢渣掺

量增加均呈现先增后减,于钢渣掺量为 50% 时,试件无侧限抗压强度达到峰值,其 7 d 最大强度为 7.45 MPa,28 d 最大强度可达 19 MPa,90 d 高达 30 MPa。

3) 同一组试件无侧限抗压强度随矿渣微粉掺量的增加而增大,但比较矿渣微粉掺量为 40%、50% 试件在不同龄期的强度值可以发现,二者均相差约 0.3 MPa,由此可见,数值较为接近,说明矿渣微粉掺量增加的有益作用在降低。因此,考虑高炉矿渣微粉使用成本,认定试件 B-3 为钢渣混合土最优配比。

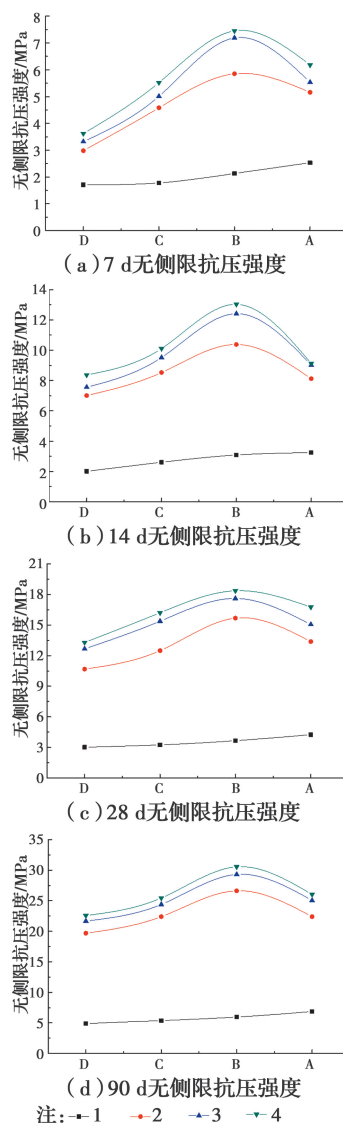


图 5 不同龄期的钢渣混合土无侧限抗压强度

Fig. 5 Unconfined compressive strength of steel slag mixed soil at different ages

表 5 为最优配比 B-3 试件不同龄期的无侧限抗压强度试验值,可以看出,试件的无侧限抗压强度随

龄期增加前期增长较快,90 d 后则基本稳定。

表 5 不同龄期的无侧限抗压强度

Table 5 Unconfined compressive strength at different ages

龄期/d	强度/MPa
7	7.25
14	8.56
28	12.21
60	17.55
90	28.93
180	29.23

3.4 XRD 分析

为探究钢渣混合土固化前后矿物成分变化,根据无侧限抗压强度值,选择养护 28 d 的 B-3 钢渣混合土试件与同配比干粉混合料分别进行 XRD 分析,如图 6 所示。由图 6 可以看出:钢渣混合土固化后的 X 射线衍射图谱中均出现了原材料中矿物成分,并未有新的矿物成分出现。固化后的钢渣混合土 X 射线衍射图谱中 SiO_2 特征峰相较于钢渣-土干粉混合料存在明显的降低;钢渣-土干粉混合料图谱中有明显 f-CaO 特征峰(32.46° 、 37.68° 、 54.32°),固化后的钢渣混合土 f-CaO 特征峰消失,说明钢渣所含的 f-CaO 在固化过程中主要与高炉矿渣微粉中 SiO_2 发生了消解反应,从而避免了 f-CaO 水化形成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 造成土样膨胀,与前述膨胀率试验结果相印证。

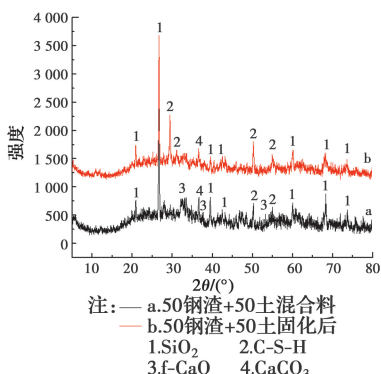


图 6 B-3 试件固化前后 XRD 图

Fig. 6 XRD pattern of B-3 specimen before and after curing

图 7 为 A-3、B-3、C-3、D-3 试件固化 60 d X 射线衍射图谱,从图 8 可以看出:4 种配比土样均未有新的矿物成分特征峰出现;X 射线衍射图谱中,在 29.4° 、 31.5° 、 50.1° 、 54.9° 衍射角度时均有不同强度的水化硅酸钙凝胶(C—S—H)特征峰出现;B-3 试件各角度 C—S—H 凝胶特征峰强度值为 4 个

试件中最高。

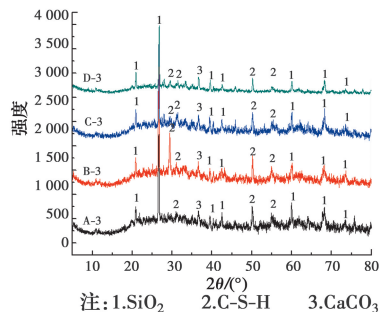


图 7 试件固化后 XRD 图

Fig. 7 XRD pattern of test piece after curing

3.5 SEM 电镜观察

根据前述结论,最优配比钢渣混合土试件强度在 90 d 后已逐渐趋于稳定,其内部结构基本定型。故为进一步研究钢渣混合土微观构造,选取养护周期为 90 d A-3、B-3、C-3、D-3 钢渣混合土试件进行 5 000、10 000 倍扫描电镜观察,研究钢渣混合土内部结构随钢渣掺量变化规律。如图 8 所示,钢渣掺量 30% 时,钢渣混合土整体结构主要以混合土团聚堆叠形成,由于钢渣掺量较低,有少量针状 C—S—H 生成,该配比下的钢渣混合土样强度主要来源于团聚体间粘接力;钢渣掺量 40% 时,钢渣混合土结构中团聚体体积增大,由于钢渣掺量增加,所产生的 C—S—H 凝胶相对于钢渣掺量 30% 的钢渣混合土

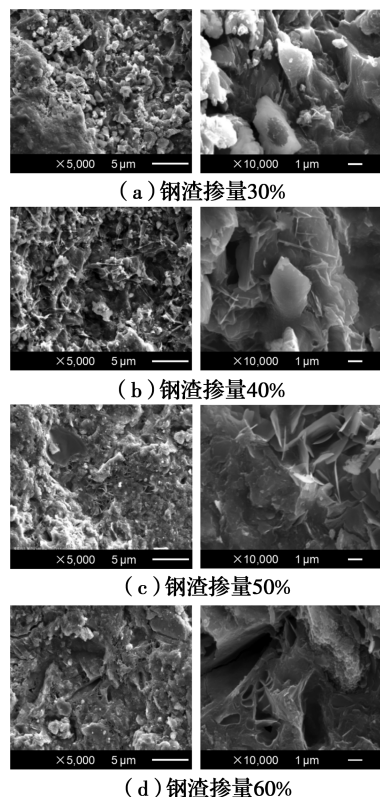


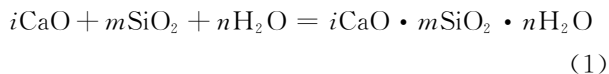
图 8 钢渣混合土 SEM 图

Fig. 8 SEM pattern of steel slag mixed soil

明显增多,且凝胶物质填充于团聚体间隙,有效降低混合土的孔隙率,增加了密实度;当钢渣掺量 50% 时,在高炉矿渣微粉作用下,钢渣潜在胶凝性激发明显,此时 C—S—H 凝胶已衍生为片状网格结构,填充于团聚体孔隙间,说明凝胶在生长过程中使得混合土体更加致密,结构更为稳定,因此,强度得以提高;但随着钢渣掺量进一步增加,达到 60% 时,虽然所生成的 C—S—H 凝胶产物及形成的片状网格结构相应增加,但由于土量占比较低,所形成的混合料团聚体孔隙增多,孔径增大,C—S—H 凝胶产物与团聚体间结合后的密实度降低,相对钢渣掺量 50% 时,强度会有所下降。

4 机理分析

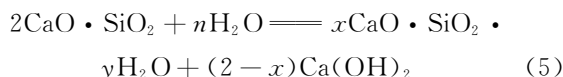
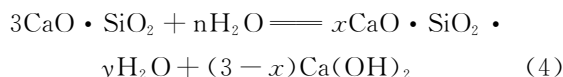
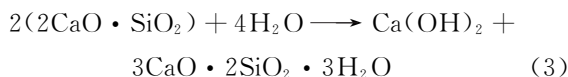
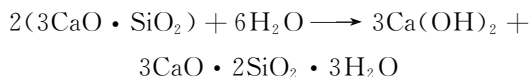
钢渣的膨胀性主要是由于钢渣中 f-CaO 遭遇大量自由水发生充分水化反应,生成氢氧化钙 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$),体积增大 1~2 倍所致。在钢渣中掺入高炉矿渣微粉,微粉中二氧化硅 (SiO_2) 与 f-CaO 发生消解反应生成水化硅酸钙凝胶 (C—S—H),从而有效抑制钢渣膨胀^[19]。离子型土壤固化剂能有效破坏土颗粒表面双层膜,改变其电荷性,降低土颗粒间排斥力使颗粒间的引力增加,土颗粒结合更为密实,从而由亲水性改为憎水性^[5]。采用钢渣、土、高炉矿渣微粉、水泥混拌并结合土体固化技术,可从物理、化学双重角度消解钢渣中 f-CaO 对土体的安定性影响,有效抑制钢渣膨胀,实现钢渣混合土基层材料主要性能指标满足规范要求。高炉矿渣微粉中含有 30% 左右的 SiO_2 ,能使钢渣混合土中 Ca/Si 得以降低,且 SiO_2 能参与钢渣中的 f-CaO 水化反应并最终生成 C—S—H 凝胶,反应式为



但二者反应较为缓慢,钢渣中 f-CaO 极易与自由水发生水化反应生成氢氧化钙 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$),造成体积迅速膨胀。将配比合理的各类材料充分拌合得到的钢渣混合土中钢渣颗粒和土颗粒相互包裹,在离子型土壤固化剂作用下,土颗粒经改性后表面呈现憎水性,且使得钢渣混合土在荷载作用下土体结构更易密实,二者共同作用有利于隔绝外界自由水的持续侵入,同时配合水泥作用及其提供的碱性环境,高炉矿渣微粉中 SiO_2 能与钢渣在合适的环境中充分发生消解反应,促进 C—S—H 凝胶生成,从而消解 f-CaO 含量,抑制钢渣体积膨胀。

钢渣中还含有大量与水泥熟料成分相似的硅酸二钙 (C_2S)、硅酸三钙 (C_3S)。高炉矿渣微粉的化学

成分同钢渣较为接近,整体均呈碱性,都具有潜在胶凝活性,配合水泥能在碱性环境下相互激发,发生水化反应从而生成胶凝物质^[20-21],反应式为



结合宏观试验及微观分析,获得钢渣混合土抑胀及增强机制,如图 9 所示。钢渣混合土的早期结构主要由土体固化后的混合料颗粒相互包裹、团聚堆叠,强度主要来源于钢渣固化土中骨料之间的内摩擦力及混合料团聚体之间的粘聚力。在前期,水泥水化生成的 C—S—H 形成网状、片状结构,有效地填充于整体结构中,使得钢渣混合土具有良好的早强性,随着时间推移,钢渣中 f-CaO 与高炉矿渣微粉中二氧化硅 (SiO_2) 与发生消解反应,生成水化硅酸钙凝胶 (C—S—H);同时,钢渣中的 C_2S 、 C_3S 在矿渣微粉作用下发生水化反应,并与钢渣混合土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成 C—S—H 胶凝产物;另外,由于矿渣微粉的成分同钢渣相似,具有潜在的胶凝性,其水化后 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反过来也能与钢渣中的活性氧化物发生火山灰反应,也可生成 C—S—H 胶凝产物。该凝胶产物填充于混合料团聚体之间的孔隙中,增加团聚体之间的粘聚力,使得土体结构密实。随着反应缓慢持续进行,反应生成的 C—S—H 胶凝产物可不断生长并衍变成片状网格结构,紧密填充于团聚体孔隙间,且由于土颗粒自身塑性特征使得 C—S—H 胶凝产物生长变大过程中对团聚体的形成一

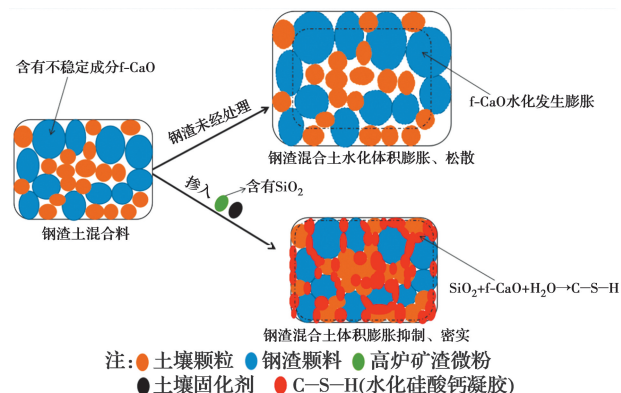


图 9 钢渣混合土抑胀增强机制

Fig. 9 Strengthening mechanism of steel slag mixed soil

定挤压,进一步提升相互之间的粘聚力,土体结构更为紧密,从而实现钢渣混合土强度高、膨胀率低的双控目标。

5 结论

1)通过击实试验,得出16组钢渣混合土最佳含水率均维持在12%~14%,最大干密度随着钢渣掺量的减少而降低,随着矿渣微粉掺量的增加而降低。

2)高炉矿渣微粉的掺入可显著降低钢渣混合土膨胀率,且随其掺量增加抑胀效果更好;各组试件10 d膨胀率的值均符合国家规范小于2%的要求,其中,最大值不超过1.5%,最小值仅为0.15%。最优配比土样试件在高温水浴持续激发下,7 d试件膨胀率约0.25%,其后观测值较7 d增长几乎很小。

3)掺有高炉矿渣微粉的4种配比钢渣混合土在7、14、28、90 d无侧限抗压强度均随钢渣占比增加呈先增后减趋势,其中,配比为50%钢渣+50%土时达到最大;矿渣微粉对于混合土体强度提升起着关键作用,且随其掺量增加而强度增大。

4)微观结构分析表明,土颗粒表面电极的改性使得钢渣混合土体结构在成型时更易受压密实,钢渣中f-CaO在固化过程中水化反应受到抑制,主要与矿渣中SiO₂发生消解反应生成C—S—H凝胶;借助于钢渣、土相互包裹的颗粒间堆叠效应及C—S—H凝胶填充混合料缝隙产生的自密实效应,保证了钢渣混合土强度高、膨胀率低的双控目标实现。

参考文献:

[1] 交通运输部. 一图看懂2017年交通运输行业发展统计公报[J]. 中国公路, 2018(7): 16-17.
Ministry of Transport. A picture to understand the transport industry development statistics bulletin of 2017 [J]. China Highway, 2018(7): 16-17. (in Chinese)

[2] 祁志刚, 王强. 我国高速公路建设行业发展趋势分析[J]. 交通世界(运输·车辆), 2011(5): 134-135.
QI Z G, WANG Q. Trend analysis of expressway construction industry in China [J]. TranspoWorld, 2011(5): 134-135. (in Chinese)

[3] 李峰. 基于石灰岩矿山开采条件下的生态环境恢复治理探讨[J]. 自然科学:全文版, 2016(7): 155.
LI F. Discussion on ecological environment restoration and control based on limestone mining condition [J]. Natural Science: Full Text, 2016(7): 155. (in Chinese)

[4] 李沛, 杨武, 邓永锋, 等. 土壤固化剂发展现状和趋势[J]. 路基工程, 2014(3): 1-8.
LI P, YANG W, DENG Y F, et al. Status quo and trend of soil stabilizer development [J]. Subgrade Engineering, 2014(3): 1-8. (in Chinese)

[5] 杨青, 罗小花, 邱欣, 等. 离子土壤固化剂固化土的微观结构特征及固化机理研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(11): 33-40.
YANG Q, LUO X H, QIU X, et al. Analysis of microstructure characteristics and stabilization mechanism of ionic soil stabilizer treated clay [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(11): 33-40. (in Chinese)

[6] 刘盛余, 邱伟, 吴萧, 等. 鼓泡塔中钢渣湿法烧结烟气脱硫过程及机理[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(1): 46-55.
LIU S Y, QIU W, WU X, et al. Mechanism and process of sintering flue gas desulfurization by steel slag in bubbling tower [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(1): 46-55. (in Chinese)

[7] BELHADJ E, DILIBERTO C, LECOMTE A. Properties of hydraulic paste of basic oxygen furnace slag [J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 45: 15-21.

[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): 18-26.
WU Z L, ZHU X Y, DENG Y F, et al. Behavior and micro-mechanism of cement-based modified compaction soil composed of steel slag and metakaolin [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(9): 18-26. (in Chinese)

[9] KRAYUSHKINA K, PRENTKOVSKIS O, BIELIATYNSKIY A, et al. Use of steel slags in automobile road construction [J]. Transport, 2012, 27(2): 129-137.

[10] AHMEDZADE P, SENGOZ B. Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165(1/2/3): 300-305.

[11] 李博. 钢渣沥青混合料路用性能及膨胀性能研究[J]. 交通世界(建养·机械), 2013(6): 305-307.
LI B. Study on Road performance and expansion performance of steel slag asphalt mixture [J]. TranspoWorld, 2013(6): 305-307. (in Chinese)

[12] 葛磊. 钢渣回填技术在奥林匹克公园中心区地下车库工程中的应用[J]. 建筑技术, 2007, 38(4): 302-304.
GE L. Application of steel slag refilling technique center carport of Olympic garden project [J]. Architecture Technology, 2007, 38(4): 302-304. (in Chinese)

- Chinese)
- [13] 李新明, 张小旺, 乐金朝, 等. 电炉钢渣路床材料安定性能试验研究[J]. 公路工程, 2016, 41(6): 93-97.
LI X M, ZHANG X W, YUE J C, et al. Experimental study on electric furnace slag stability for roadbed material [J]. Highway Engineering, 2016, 41(6): 93-97. (in Chinese)
- [14] 王丽艳, 高鹏, 陈国兴, 等. 掺合钢渣的新型混合土工填料压缩变形与强度特性研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(Sup2): 126-132.
WANG L Y, GAO P, CHEN G X, et al. Experimental study on deformation behavior and shear strength of mixed soil blended with steel slag [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (Sup2): 126-132. (in Chinese)
- [15] ABU-EISHAH S I, EL-DIEB A S, BEDIR M S. Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region [J]. Construction and Building Materials, 2012, 34: 249-256.
- [16] 肖文斌, 李兰兰, 赵风清. 钢渣体积稳定性处理及应用研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(12): 194-198.
XIAO W B, LI L L, ZHAO F Q. Processing of volume stability for steel slag and its application [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(12): 194-198. (in Chinese)
- [17] 尚建丽, 赵世冉, 李翔. 钢渣细集料及钢渣砂浆体积稳定性试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(6): 1611-1616.
SHANG J L, ZHAO S R, LI X. Experimental research on the volume stability of steel slag fine aggregate and steel slag mortar [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(6): 1611-1616. (in Chinese)
- [18] 赵计辉, 阎培渝. 钢渣的体积安定性问题及稳定化处理的国内研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(2): 477-484.
ZHAO J H, YAN P Y. Volume stability and stabilization treatment of steel slag in China [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(2): 477-484. (in Chinese)
- [19] 黄伟, 邱鹏, 唐刚, 等. 钢渣混合土基层材料制备及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10): 3237-3242, 3265.
HUANG W, QIU P, TANG G, et al. Study on preparation and performance of roadbase material of steel slag mixed soil [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(10): 3237-3242, 3265. (in Chinese)
- [20] 许远辉, 陆文雄, 王秀娟, 等. 钢渣活性激发的研究现状与发展[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2004, 10(1): 91-95.
XU Y H, LU W X, WANG X J, et al. Research and development in activation of steel slag activity [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2004, 10(1): 91-95. (in Chinese)
- [21] 李新明, 尹松, 乐金朝. 掺钢渣土强度的干湿循环劣化效应及机理研究[J]. 公路, 2017, 62(5): 199-204.
LI X M, YIN S, YUE J C. Mechanism of alteration in mechanical property of soil mixed with steel slag affected by dry-wet cycles [J]. Highway, 2017, 62 (5): 199-204. (in Chinese)

(编辑 胡玥)