



宝钢滚筒渣替代近海水工混凝土骨料的试验研究

黄东海，杨一琛，夏超群，田鹏

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司，上海 200120)

摘要：针对钢渣的资源化利用问题，进行钢渣替代近海水工混凝土骨料的可行性研究。以宝钢滚筒渣部分替代天然粗、细骨料进行钢渣混凝土配合比设计，通过室内试验研究钢渣混凝土的各项性能，并进行试点工程应用。结果表明：随着钢渣掺入量的提高，混凝土的坍落度逐渐降低，抗压强度、抗渗等级、耐磨度逐步提高，电通量和扩散系数略有增大，抗氯盐侵蚀性能略有下降，能够满足近海水工结构对混凝土的质量要求。试点工程结构表观质量与普通混凝土无异，结构强度达到设计要求，为沿海地区钢渣的消纳与利用提供了一种新途径。

关键词：钢渣；混凝土；骨料；配合比；性能；水工结构

中图分类号：TU 528；U 6

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)07-0027-05

Experimental research on substitution of aggregate in offshore hydraulic concrete by roller steel slag from Baosteel

HUANG Dong-hai, YANG Yi-chen, XIA Chao-qun, TIAN Peng

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: Feasibility study on steel slag substitution for offshore hydraulic concrete aggregates is conducted for the resource utilization of steel slag. The steel slag concrete ratio design is carried out by partially replacing natural coarse and fine aggregates with Baosteel roller slag, and various properties of steel slag concrete are studied through indoor tests and pilot project applications. The results indicate that with the increase of the portion of steel slag, concrete slump decreases gradually, the compressive strength, impermeability grade, and abrasion index increase, the electric flux and diffusion coefficient increase slightly, and the chloride resistance deteriorates slightly, and it can meet the quality requirements for the concrete applied in offshore hydraulic structure. The surface quality of the concrete applied in the pilot project is the same as that of the ordinary concrete, and the structural strength meets the design requirements, which provides a new way for the disposal and utilization of steel slag in coastal areas.

Keywords: steel slag; concrete; aggregate; mix proportion; property; hydraulic structure

钢渣是钢厂炼钢过程中伴随产出的固体废渣，其产量为粗钢产量的 10%~15%。2013 年，我国钢铁行业冶炼废渣产生量约 4.16 亿 t，综合利用率为 67%，其中钢渣 1.01 亿 t，综合利用率 30%^[1]。《工业绿色发展规划（2016—2020 年）》中指出，到 2020 年我国钢铁冶炼渣利用率要提高

到 95%。可见，研究探索钢渣的多样化利用途径是非常必要的。

我国大规模的经济基础设施建设对于混凝土的需求量相当大。2018 年，我国除港澳台外的商品混凝土的生产量多达 25.47 亿 m³。随着砂石材价格的不断上涨，越来越多的专家学者开始从

事有关钢渣性能及利用以代替混凝土骨料的研究。早期钢渣处理工艺落后, 其 f-CaO 含量较高, 达 5%以上, 直接利用其制备的钢渣混凝土存在安定性问题^[2-3], 通常将其破碎、磨细后再行利用^[4-6]。随着钢渣处理工艺的发展, 一些学者发现以钢渣作为骨料的混凝土的许多性能优于砂石骨料混凝土^[7-11]。

宝钢滚筒渣处理技术是将高温熔态冶金渣在一个转动的密闭容器中进行处理, 在工艺介质和冷却水的共同作用下, 高温熔渣被急速冷却和破碎, 并被排出, 经该工艺处理后的钢渣颗粒均匀、f-CaO 低、硬度大、耐磨, 可直接利用。本文采用宝钢滚筒渣不同程度地替代天然粗、细骨料制备

钢渣混凝土试件, 通过室内试验进行钢渣混凝土用于近海水工混凝土结构中的可行性研究。

1 试验材料

- 1) 水泥: P·O 42.5 普通硅酸盐水泥;
- 2) 粉煤灰: F 类Ⅱ级;
- 3) 矿粉: S95;
- 4) 外加剂: 减水剂(减水率 25%);
- 5) 骨料: 黄砂(中砂)、碎石(5~25 mm)及钢渣。钢渣化学组成见表 1, 其 X 射线衍射图谱见图 1, 颗粒级配见表 2 和图 2, 钢渣物理特性及 f-CaO 与金属铁含量见表 3。

表 1 钢渣的化学组成

成分	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	V ₂ O ₅	其他
含量/%	42.490	25.620	13.190	8.500	3.280	2.720	2.340	0.784	0.558	0.518

表 2 钢渣的颗粒级配

筛孔尺寸/mm	0.15	0.30	0.60	1.18	2.36	4.75	9.50	13.20	16.00
累计筛余/%	99.58	97.06	91.06	85.42	73.32	44.66	10.12	2.56	1.08

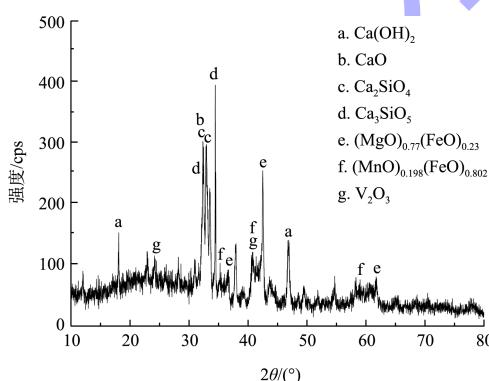


图 1 钢渣的 X 射线衍射图谱

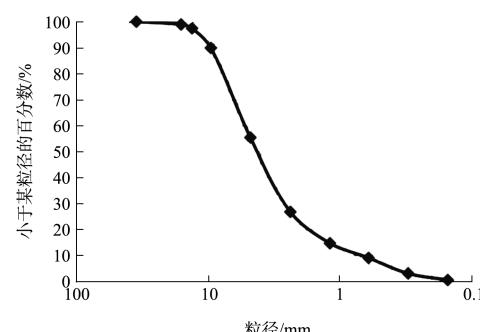


图 2 钢渣的颗粒级配

表 3 钢渣的物理特性

堆积密度/(kg·m ⁻³)	表观密度/(kg·m ⁻³)	吸水率/%	f-CaO 含量/%	金属铁含量/%
1 966.4~2 041.8	3 292.7~3 386.4	2.8	1.30~3.00	0.83~0.98

2 试验

2.1 配合比

本次试验基准混凝土等级为 C40, 编号 A0。

在其他条件相同的情况下, 根据钢渣自身级配, 分别采用 30%、40%、50% 的比例替代总集料配制钢渣混凝土, 编号分别为 A1~A3。配合比见表 4。

表4 试验混凝土配合比

试件编号	集料替代率/%	钢渣混凝土材料单位用量/(kg·m ⁻³)							
		水泥	粉煤灰	矿渣	砂	碎石	钢渣	水	外加剂
A0	0	224	75	75	739	1109	0	155	2.89
A1	30	224	75	75	434	860	554	155	2.89
A2	40	224	75	75	333	776	739	155	2.89
A3	50	224	75	75	231	693	924	155	2.89

2.2 试验方法

根据表4配合比配制混凝土试件, 试件尺寸

根据不同试验项目分别确定, 见表5。

表5 试验项目与试件尺寸

试验项目	试件尺寸/mm	依据规范
坍落度	—	普通混凝土拌合物性能试验方法标准(GB/T 50080—2016)
抗压强度	100×100×100(长×宽×高)	普通混凝土力学性能试验方法标准(GB/T 50081—2002)
抗渗等级	Φ175×Φ185×150(上口直径×下口直径×高度)	普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准(GB/T 50082—2009)
电通量	Φ100×50(直径×高度)	水运工程混凝土试验检测技术规范(JTS/T 236—2019)
扩散系数	Φ100×50(直径×高度)	水运工程混凝土试验检测技术规范(JTS/T 236—2019)
耐磨度	150×150×150(长×宽×高)	混凝土及其制品耐磨性试验方法(滚珠轴承法)(GB/T 16925—1997)
抗氯盐侵蚀性能	100×100×400(长×宽×高)	水运工程结构耐久性设计标准(JTS 153—2015)

3 试验结果与讨论

3.1 混凝土流动性

试验混凝土的坍落度及30 min坍落度损失见表6。从表6可见: 钢渣对混凝土的流动性具有不利影响, 钢渣混凝土的流动性较普通混凝土更差, 且钢渣掺入量越大, 试验混凝土的坍落度越小, 30 min坍落度损失越大。这是由于本次试验用砂吸水率为1.3%、碎石吸水率为0.9%, 而钢渣的吸水率达到2.8%。可见, 与普通砂、石骨料相比, 钢渣具有更强的吸水性, 钢渣掺入量越多, 混凝土需水量越大。

表6 坍落度与30 min坍落度损失

试件编号	集料替代率/%	坍落度/mm	30 min 坍落度损失/mm
A0	0	230	30
A1	30	180	—
A2	40	105	50
A3	50	85	80

3.2 抗压强度

试验混凝土的7 d和28 d抗压强度见图3。从图3可见: 钢渣混凝土的7 d和28 d抗压强度均优于普通混凝土, 且随着钢渣掺入量的提高, 抗压强度增长越大。一般来说, 混凝土的强度主要取决于骨料与硬化水泥浆体之间黏结界面的强度。

而与天然骨料相比, 钢渣中含有 Ca_2SiO_4 、 Ca_3SiO_5 等与水泥熟料相似的、具有水硬胶凝性的矿物组成, 因此从理论上讲, 钢渣中的活性矿物组分会在混凝土搅拌过程中发生水化反应, 提高与硬化水泥浆体之间黏结界面的强度。

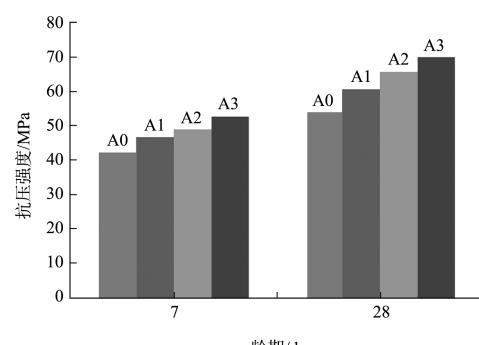


图3 试验混凝土的7 d和28 d抗压强度

3.3 抗渗等级

试验混凝土的抗渗等级见表7。从表7可见: 钢渣混凝土的抗渗等级达到P12, 优于普通混凝土的抗渗等级P10。与钢渣混凝土抗压强度增长的解释类似, 钢渣中的 Ca_2SiO_4 、 Ca_3SiO_5 等活性矿物组分发生水化反应后, 与硬化水泥浆体之间的粘结更紧密, 提高了混凝土的密实度, 即提高了其抗渗等级。

表 7 抗渗等级

试件编号	集料替代率/%	抗渗等级
A0	0	P10
A1	30	P12
A2	40	P12
A3	50	P12

3.4 抗氯离子侵蚀

试验混凝土的电通量和扩散系数见表 8。从表 8 可见：钢渣混凝土的电通量与扩散系数较普通混凝土大，且随着钢渣掺入量的提高，电通量与扩散系数略有增长。这可能是由于钢渣中含有微量金属铁，略微提高了钢渣混凝土的导电性。但电通量仍满足 JTS 202-2—2011《水运工程混凝土质量控制标准》中“海港工程浪溅区采用普通混凝土时，其抗氯离子渗透性指标不应大于 2 000 C”的要求，扩散系数仍满足 JTS 257-2—2012《海港工程高性能混凝土质量控制标准》中“海水环境钢筋混凝土中高性能混凝土氯离子渗透性扩散系数($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) ≤ 4.5 ”的要求。

表 8 电通量与扩散系数

试件编号	集料替代率/%	电通量/C	扩散系数/ $(10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
A0	0	499.09	2.3
A1	30	606.38	2.9
A2	40	612.78	—
A3	50	814.26	3.3

3.5 耐磨度

试验混凝土的耐磨度见表 9。从表 9 可见：钢渣混凝土的耐磨度优于普通混凝土，且随着钢渣掺入量的增加，耐磨度有所增长。这是由于钢渣自身的硬度和耐磨度均优于天然骨料。

表 9 耐磨度

试件编号	集料替代率/%	耐磨度
A0	0	1.45
A1	30	1.67
A2	40	1.81
A3	50	2.06

3.6 抗氯盐侵蚀性能

为了研究钢渣混凝土在近海水工环境下的耐久性能，进行混凝土抗氯盐侵蚀性能试验，试验参考 JTS 153—2015《水运工程结构耐久性设计标

准》J.3 节“钢筋阻锈剂在盐水浸烘环境中防锈性能试验”，利用盐水浸烘环境模拟加速的海水环境腐蚀情况，采用混凝土相对动弹性模量损失率表征强度损失率。试验混凝土相对动弹性模量变化率见图 4。从图 4 可见：钢渣对混凝土的抗氯盐侵蚀性能具有不利影响，当钢渣掺量在 30% 以内时，混凝土动弹性模量的下降速率变化不大，即对抗氯盐侵蚀性能影响不大，随着钢渣掺量的增大，混凝土动弹性模量的下降速率逐渐增大，即抗氯盐侵蚀性能逐渐降低。与钢渣混凝土的抗氯离子侵蚀性能下降相对应，钢渣提高了钢渣混凝土的导电性，加速了氯离子侵蚀的速率，导致钢渣混凝土的抗氯盐侵蚀性能有所降低。鉴于钢渣混凝土的抗氯盐侵蚀性能仍满足规范要求，可认为其抗氯盐侵蚀性能也满足使用要求。

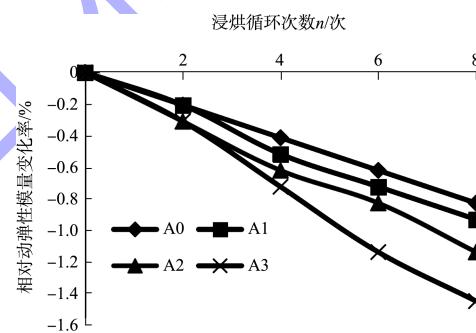


图 4 试验混凝土相对动弹性模量变化率

4 工程应用

2019 年 6 月，依托某围填海工程，利用上海宝钢集团提供的滚筒钢渣进行近海水工混凝土的应用研究，采用钢渣混凝土代替商品混凝土进行顺堤 S0+000~0+068.97 段外海侧 6.0 m 埋石混凝土消浪平台的现浇施工，以及扭王字块体的构件预制工作。其中埋石混凝土的设计强度等级为 C25，钢渣替代率为 40%；扭王字块体混凝土的设计强度等级为 C30，钢渣替代率为 50%。埋石混凝土平台浇筑完成 4 个月后，外观颜色与普通混凝土相差不大，浇筑后也未发现温缩等非沉降原因产生的裂缝，质量稳定可靠。

钢渣混凝土扭王字块安装完成后对块体强度进行强度回弹检测，检测结果见表 10。从表 10 可知，钢渣混凝土扭王字块浇筑成型后，强度增长

较快, 到 28 d 龄期强度略超设计标准值, 此后 3 个月内强度仍缓慢增长。

表 10 钢渣混凝土扭王字块体回弹强度

块体编号	回弹强度/MPa			
	8月2日	8月31日	9月27日	10月28日
1	30.7	32.1	33.3	34.2
2	31.2	33.4	34.9	36.2
3	30.4	32.9	34.8	35.5
4	31.8	33.4	35.2	36.7

5 结论

1) 钢渣对混凝土的流动性具有不利影响, 随着钢渣的掺入, 混凝土需水量增大, 和易性降低, 坍落度损失增大。

2) 钢渣的掺入对混凝土的力学性能有积极的影响, 钢渣混凝土的 7 d 和 28 d 抗压强度均优于普通混凝土, 且随着钢渣掺入量的提高, 抗压强度增长越大。

3) 钢渣混凝土的抗渗等级优于普通混凝土。

4) 随着钢渣掺量的增大, 钢渣混凝土的电通量和扩散系数略有增大, 抗氯离子侵蚀能力略有降低, 但仍满足相关规范对混凝土质量的控制要求。

5) 随着钢渣掺量的增大, 钢渣混凝土的耐磨度有所增长, 耐磨性能增强。

6) 钢渣对混凝土的抗氯盐侵蚀性能具有不利影响, 当钢渣掺量在 30% 以内时, 混凝土动弹性模量的下降速率变化不大, 即对抗氯盐侵蚀性能影响不大; 随着钢渣掺量的增大, 混凝土动弹性

模量的下降速率逐渐增大, 即抗氯盐侵蚀性能逐渐降低, 但仍满足使用要求。

7) 实际工程应用中, 钢渣混凝土结构的表观质量与普通混凝土无异, 结构强度达到设计要求。

参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会.中国资源综合利用年度报告[R].北京:国家发展和改革委员会, 2014.
- [2] 张朝晖, 廖杰龙, 巨建涛, 等.钢渣处理工艺与国内外钢渣利用技术[J].钢铁研究学报, 2013, 25(7): 1-4.
- [3] 高本恒, 郝以党, 张淑苓, 等.钢渣综合利用现状及发展趋势[J].环境工程, 2016, 34(S1): 776-779.
- [4] 孙家瑛.钢渣微粉对混凝土抗压强度和耐久性的影响[J].建筑材料学报, 2005(1): 63-66.
- [5] 王强, 鲍立楠, 阎培渝.转炉钢渣粉在水泥混凝土中应用的研究进展[J].混凝土, 2009(2): 53-56.
- [6] 蔡琪瑛.磨细钢渣粉对水泥混凝土性能影响的研究[J].混凝土与水泥制品, 2012(5): 5-8.
- [7] 白敏, 尚建丽, 张松榆, 等.钢渣替代粗集料配制混凝土的试验研究[J].混凝土, 2005(7): 62-64, 70.
- [8] 陈苗苗, 冯春花, 李东旭.钢渣作为混凝土掺合料的可行性研究[J].硅酸盐通报, 2011, 30(4): 751-754.
- [9] 於林锋, 徐兵, 王琼, 等.钢渣混凝土性能的试验研究及应用前景分析[J].混凝土, 2014(1): 79-81.
- [10] 王强, 曹丰泽, 于超, 等.钢渣骨料对混凝土性能的影响[J].硅酸盐通报, 2015, 34(4): 1004-1010.
- [11] 韩艳丽, 冯勇, 肖磊.粗细钢渣替代天然骨料对混凝土力学性能的影响[J].混凝土与水泥制品, 2015(2): 96-98.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第 13 页)

- [16] 谷国传, 胡方西, 宋元平.三门湾的悬沙分布和输移特性[J].东海海洋, 1991, 9(3): 1-11.
- [17] 赵方方, 李占海, 李九发, 等.长江口北支小潮至大潮水沙输运机制研究[J].泥沙研究, 2013(4): 55-62.
- [18] 吴创收, 赵鑫, 黄世昌.温州瓯飞浅滩及其附近海域枯季悬沙输运机制研究[J].泥沙研究, 2017, 42(6): 66-72.
- [19] 沈逸, 何青, 张迨, 等.长江口浑浊带北槽悬沙输运研究[J].泥沙研究, 2019, 44(1): 16-23.

- [20] 彭俊, 刘锋, 陈沈良.黄河三角洲强侵蚀岸段海域的悬沙输运机理研究[J].泥沙研究, 2015(5): 44-50.
- [21] 杜家笔, 裴艳东, 高建华, 等.弱动力浅海中的悬沙输运机制:以天津港附近海域为例[J].海洋学报(中文版), 2012, 34(1): 136-144.
- [22] 沈淇, 顾峰峰, 戚定满, 等.洋山港及邻近海域悬沙输运特征研究[J].水运工程, 2012(6): 21-27.

(本文编辑 武亚庆)