

文章编号:1672-9331(2017)02-0026-07

管廊工程钢渣配重混凝土材料设计与 结构受力仿真分析

刘娜¹, 黄士周¹, 杨三强¹, 赵旭¹, 吴浩楠²

(1.河北大学 建筑工程学院, 河北 保定 071002; 2.河北建设集团有限公司, 河北 保定 071051)

摘要:为了解决废弃钢渣污染环境、占用大量土地等问题,用钢渣做配重钢渣混凝土不仅能减少废弃钢渣带来的负面社会问题,而且还能改善管廊结构受力。依托阜平县管廊工程,通过室内试验与结构受力仿真分析,对不同配合比钢渣混凝土的工作性能进行了监测,分析和模拟了管廊变形特性与位移大小。研究表明,钢渣混凝土最佳配合比设计为水胶比 32.7%、砂率 33.3%、细集料占比 30%~35%;对比分析管廊受力,掺配钢渣时底部梁承受的弯矩为 4.571 kN·m,未掺加钢渣时底部梁承受的弯矩为 34.125 kN·m,是掺加钢渣配重混凝土时所受弯矩的 8.5 倍;对比分析管廊工程变形可知,掺配钢渣时管廊底部梁处发生的最大位移为 10.858 mm,未掺加钢渣时管廊底部梁处发生的最大位移为 110.921 mm,二者相差 10 倍。管廊配重混凝土掺加钢渣不仅能减小管廊所承受的弯矩,而且还能减小管廊的竖向变形,对提高管廊结构稳定性具有重要意义。

关键词:管廊工程;配重;钢渣;混凝土;材料设计;结构受力;仿真分析

中图分类号: TU528.19

文献标识码: A

Utility tunnel engineering steel slag weight concrete material design and the structure simulation analysis

LIU Na¹, HUANG Shi-zhou¹, YANG San-qiang¹, ZHAO Xu¹, WU Hao-nan²

(1.Architectural Engineering Institute, Hebei University, Baoding 071002, China;

2.Hebei Construction Group Co. Ltd., Baoding 071051, China)

Abstract: In order to solve the waste steel slag problems such as environmental pollution, occupied many places, the use of steel slag in weight of steel slag concrete not only can reduce the negative social issues, waste steel slag on the pipe rack structure, also has significant economic and social benefits. In this paper, relying on the fuping county utility tunnel engineering, through the indoor experiment and the simulation analysis, structure of different mixture ratio of steel slag concrete performance monitoring analysis and simulate the utility tunnel deformation characteristics and displacement size. Results show that the steel slag concrete mixture ratio design, best water-binder ratio 32.7%, sand ratio 33.3%, fine aggregate of 30% to 35%. Comparative analyses on pipe rack, blending, steel slag, the bottom of the beam under bending moment was 4.571 kN·m, not mixed with steel slag, the bottom of the beam under bending moment was 34.125 kN·m, mixed with steel slag is the

收稿日期: 2017-03-19

基金项目: 河北省教育厅科研重点项目(ZD2016073); 教育部中西部能力综合提升工程高层次引进人才项目

作者简介: 刘娜(1980-), 女, 陕西渭南人, 河北大学高级工程师, 主要从事公路路基和路面材料方面的研究。

8.5 times of the moment when weight concrete. A comparison analysis of utility tunnel engineering deformation, when mixed with steel slag, the biggest displacement at the bottom of the pipe rack beam is 10.858 mm, not mixed with steel slag, the biggest displacement at the bottom of the pipe rack beam is 110.921 mm, both differ ten times. Pipe rack weight concrete mixed with steel slag can not only reduce pipe gallery on the bending moment, but also can effectively decrease the vertical deformation of the pipe gallery, is of great significance in improving the utility tunnel structural stability.

Key words: tunnel engineering; weight; steel slag; concrete; material design; structural stress; simulation analysis

2016 年,我国的钢产量约为 8.4×10^8 t,居世界首位。由此产生的大量钢渣并未被合理地利用。它不仅占用大量土地资源,还严重污染当地环境^[1]。配重钢渣混凝土是解决废弃钢渣的主要途径之一,但国内对于废弃钢渣的研究还处于起始阶段,大部分的研究工作都集中在如何使用废弃钢渣,而对于钢渣混凝土材料设计与结构受力分析的研究还相对较少^[2]。因此,开展钢渣配重混凝土材料设计与结构受力仿真分析具有重要意义。

作者依托阜平县综合管廊工程,采用室内试验方法,分别测定钢渣混凝土原材料的各种物理性能指标^[3],对比分析不同配合比的钢渣混凝土,测定其和易性、强度等物理指标,确定最佳配比设计。并对管廊钢渣混凝土进行结构受力进行仿真分析,对比其施加配重与不加配重管廊受力变形特点以及竖向位移,通过在管廊中增加配重,以使管廊的受力更加均匀,变形显著减小。

1 工程背景

阜平县年平均降水量为 550~790 mm,其中,

阜东城区地下水位较浅。在此地域铺设管廊时,如不考虑配重,随着地下水位的上升,管廊将难以承受地下水产生的上浮力,容易导致管廊隆起、路面破坏,甚至对周围建筑物的地基承载力也造成重大影响而引发工程事故^[4]。经综合分析可知,管廊配重的试验研究对于此次工程意义重大。

管廊工程配重钢渣混凝土尺寸要求是 $25 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 1.7 \text{ m}$,中间间隔。由于管廊配重不承受任何荷载,所以其强度设计为 C20。为使管廊能承受水位上升引起的巨大上浮力,配重的容重要求达到 $3\,000 \text{ kg/m}^3$,以满足配重要求。

2 原材料检验分析

2.1 水泥技术指标

实验所用水泥采用曲阳太行山水泥有限公司生产的 42.5 普通硅酸盐水泥^[5],水泥技术指标检验结果如表 1 所示。

2.2 粉煤灰技术指标

粉煤灰采用石家庄上安电厂生产的 II 级粉煤灰,粉煤灰技术指标检验结果如表 2 所示。

表 1 水泥技术指标检验结果

Table 1 Technical indexes of cement

标号	3 d		28 d		比表面积/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	初凝时间/ min	终凝时间/ min
	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa			
42.5	22.4	4	45.4	7.1	430	201	293

2.3 减水剂技术指标

减水剂采用河北青华建材有限公司生产的聚羧酸减水剂^[6],减水剂技术指标检验结果如表 3 所示。

2.4 细集料技术指标

细集料主要采用河沙,其筛分结果见表 4。

由表 4 和图 1 可知,试验中所用河沙细沙占多数,且细度模数偏小,接近于特细沙范畴。

表2 粉煤灰技术指标检验结果

Table 2 Technical indexes of fly ash

型号	细度	烧失量/ %	需水量比/ %	含水性/ %	安定性/ min
Ⅱ级	9.8	4.40	105	0.50	3.0

表3 减水剂技术指标检验结果

Table 3 Test results of water reducing agent

含固量/ %	pH 值	密度/ (g·cm ⁻³)	减水率/ %	泌水率/ %	凝结时间差/min	
					初凝	终凝
23	6.1	1.088	27.70	54.80	-31	-22

表4 细集料筛分结果

Table 4 Screening results of fine aggregate

第1组(干燥试样总量为5.0 kg)					第2组(干燥试样总量为5.0 kg)				平均通过 百分率/%
筛孔尺寸/mm	筛上重/ kg	分计筛余/ %	累计筛余/ %	通过百分 率/%	筛上重/ kg	分计筛余/ %	累计筛余/ %	通过百分 率/%	
4.75	0.30	6.0	6.0	94.0	0.32	6.4	6.4	93.6	93.8
2.36	0.65	13.0	19.0	81.0	0.60	12.0	18.4	81.6	81.3
1.18	0.70	14.0	33.0	67.0	0.80	16.0	34.4	66.6	66.8
0.60	1.50	30.0	63.0	37.0	1.45	29.0	63.4	36.6	36.8
0.30	1.30	26.0	89.0	11.0	1.35	27.0	90.4	9.6	10.3
0.15	0.40	8.0	97.0	3.0	0.35	7.0	97.4	2.6	2.8
筛底 $m_{底}$	0.143 6	2.872 0	100.000 0	0.000 0	0.126 4	2.528 0	100.000 0	0.000 0	—
筛分后总量 $\sum m_i$ /kg	4.993 6	100.000 0	—	—	4.996 4	100.000 0	—	—	—
损耗 m_s /g	6.4	—	—	—	3.6	—	—	—	—
损耗率/%	0.128	—	—	—	0.072	—	—	—	—

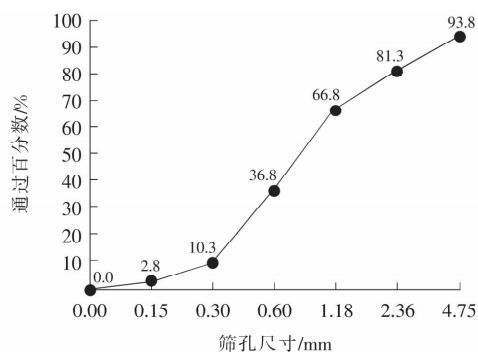


图1 细集料颗粒级配曲线

Fig. 1 Fine aggregate gradation curve

由表5可知,河沙中含泥量较多,细度模数为1.694,试验采用0.15 mm以下粒径筛除的河沙。河沙的表观密度为2 850 kg/m³。若试验中细集料全部采用河沙,则钢渣混凝土密度很难达到配重要求。

2.5 钢渣技术指标

粗骨料的抗压强度、粒径范围、颗粒级配、吸

水率等对混凝土的工作性能有重要影响。试验采用钢渣代替传统粗骨料^[7],钢渣筛分试验结果及技术指标见表6和表7。

表5 细集料技术指标检验结果

Table 5 Test results of technical indexes of fine aggregate

表观密度/ (g·cm ⁻³)	紧密堆积/ (g·cm ⁻³)	松散堆积/ (g·cm ⁻³)	石粉含 量/%	细度 模数
2 850	1 775	1 620	11.2	1.694

由表6和图2可知,钢渣集料中粒径为4.5~19 mm的占很大比例,此粒径钢渣可代替普通混凝土中的粗骨料。

由表7可知,钢渣作为粗骨料,其表观密度为3 360 kg/m³,合理的使用钢渣可以达到配重需求。钢渣1 h吸水率为1.84%,2 h吸水率为1.85%。在钢渣混凝土浇筑阶段,钢渣吸水会使混凝土中的水分快速丧失,对混凝土的和易性有较大影响。

表 6 钢渣筛分结果

Table 6 Screening results of steel slag

筛孔尺寸/mm	第 1 组(干燥试样总量为 8.0 kg)				第 2 组(干燥试样总量为 8.0 kg)				平均通过百分率/%
	筛上重 m_1/kg	分计筛余/ %	累计筛余/ %	通过百分 率/%	筛上重 m_1/kg	分计筛余/ %	累计筛余/ %	通过百分 率/%	
19.00	2.10	26.250	26.250	73.750	2.05	25.625	25.625	74.375	74.062 5
9.50	2.95	36.875	63.125	36.875	3.00	37.500	63.125	36.875	36.875 0
4.75	1.35	16.875	80.000	20.000	1.20	15.000	78.125	21.875	20.937 5
2.36	0.65	8.125	88.125	11.875	0.75	9.375	87.500	12.500	12.187 5
0.60	0.45	5.625	93.750	6.250	0.52	6.500	94.000	6.000	6.125 0
0.075	0.45	5.625	99.375	0.625	0.45	5.675	99.675	0.325	0.475 0
筛底 $m_{\text{底}}$	0.019 8	0.247 5	100.000 0	0.000 0	0.023 6	0.295 0	100.000 0	0.000 0	—
筛分后总量 $\sum m_i/\text{kg}$	7.969 8	100.000 0	—	—	7.997 6	100.000 0	—	—	—
损耗 m_5/g	30.2	—	—	—	2.4	—	—	—	—
损耗率/%	0.377 5	—	—	—	0.030 0	—	—	—	—

表 7 钢渣技术指标检验结果

Table 7 Test results of technical indexes of steel slag

表观密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	紧密堆积/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	松散堆积/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1 h 吸水 率/%	2 h 吸水 率/%	空隙 率/%
3 360.5	2 025	1 800	1.84	1.85	39.60

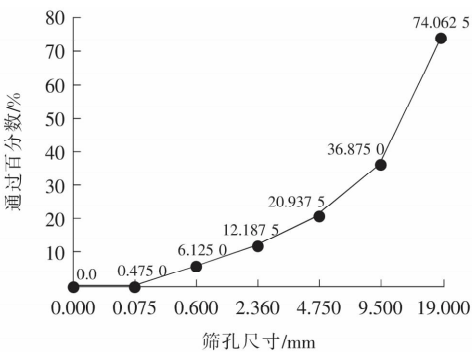


图 2 钢渣级配曲线

Fig. 2 Curve of steel slag

3 试验方案设计

3.1 普通混凝土

运用体积法进行普通混凝土的配合比设计,再结合工程需求,配制出不同强度的普通混凝土试块^[8]。具体方案如表 8 所示。

由表 8 可知,普通混凝土的强度随着水泥用量的增加和砂率的减少呈递增状态。按各方案其强度均能达到规范要求,且和易性良好。

3.2 配重钢渣混凝土

该管廊工程的配重要求为钢渣混凝土的容重达到 3 000 kg/m³。经试验测试可知,混凝土中所用材料只有钢渣的表观密度能达到 3 000 kg/m³,其他材料的表观密度均无法达到。在混凝土的配合比设计中,钢渣的含量必须较高才能使混凝土的容重达到要求。钢渣的吸水率较大,混凝土和易性损失会很快,必须使用高效减水剂来提高混凝土的工作性能^[9]。

由于钢渣表观密度较大,因此用量过多会导致混凝土发生分层、离析、难以搅拌等问题。试验通过加大胶凝材料的用量和合理使用减水剂等措施来保证混凝土的工作性能^[10]。试验制作了 9 组钢渣含量不同的钢渣混凝土试块,分别测定其和易性、密度与抗压强度,通过对比分析决定出最佳配合比设计。具体试验数据如表 9 所示。

通过表 9 对比分析 1,2 号试块可知,钢渣混凝土在用河沙作为细骨料时的和易性要比用细钢渣作为细骨料好,但其抗压强度和密度都较低。对比分析 3,4 号试块可知,在胶凝材料用量相同的情况下,使用高效减水剂减少用水量能有效提高混凝土的和易性,且试块的密度也较大。对比分析 5,6 号试块可知,通过调整粗细钢渣的比例和使用减水剂,可以提高混凝土的密度和工作性能。对比分析 7,8,9 号试块可知,在相同用水量的情况下,随着胶凝材料和减水剂用量的增加,混凝土的强度逐渐增加。

表 8 混凝土配合比设计方案

Table 8 Concrete mix design

方案	水/kg	水泥/kg	沙子/kg	碎石/kg	砂率/%	和易性	设计强度/MP	实际强度/MP	密度/(kg·m ⁻³)
A	99.0	220	750	1 270	37.13	良好	C10	16.5	2 347
B	121.5	270	700	1 260	35.71	良好	C15	23.6	2 353
C	148.5	330	680	1 200	36.17	良好	C20	31.3	2 365
D	166.5	370	650	1 180	35.52	良好	C25	35.6	2 384
E	189.0	420	620	1 150	35.03	良好	C30	41.4	2 425
F	207.0	460	590	1 140	34.10	良好	C35	46.5	2 436

表 9 配重钢渣混凝土配合比设计

Table 9 The weight of steel slag concrete mix design

方案	水/kg	水泥/kg	粉煤灰/kg	细钢渣/kg	河沙/kg	粗钢渣/kg	减水剂/kg	水胶比/%	砂率/%	和易性	抗压强度/MPa	密度/(kg·m ⁻³)
1	238	390	140	878	0	1 570	15	45.0	35.8	一般	33.5	2 815
2	238	390	140	0	878	1 570	15	45.0	35.8	可以	31.5	2 682
3	200	450	100	800	0	1 700	0	40.0	32.0	较差	40.6	2 800
4	180	450	100	800	0	1 700	25	32.7	32.0	可以	41.2	2 904
5	308	550	110	2 000	0	1 200	0	46.6	62.5	一般	46.5	2 857
6	195	550	110	946	0	1 758	30	30.0	35.0	可以	47.4	2 949
7	180	400	0	1 600	0	碎石 1 200	0	45.0	57.0	一般	35.6	2 815
8	180	420	100	0	配重沙 818	1 400	25	34.6	36.8	良好	38.3	3 135
9	180	450	100	245	605	1 700	30	32.7	33.3	良好	42.6	2 935

通过对比表 8 和表 9 可知,混凝土试块在同等强度下,钢渣混凝土的胶凝材料用量要大于普通混凝土。普通混凝土的密度一般在 2 350~2 450 kg/m³ 之间,钢渣的表观密度较普通碎石大,试块配制过程中需加入适量的减水剂和粉煤灰以改善其和易性。由于钢渣混凝土做配重,其水胶比应控制在 0.4 以下,而普通混凝土的水胶比在 0.42~0.45 之间。

通过以上分析可知,用细钢渣代替河沙作为细集料,混凝土的和易性一般,钢渣混凝土的表观密度均在 2 800 kg/m³ 以上,强度也满足配重要求。在 9 号试块中,水胶比为 32.7%,砂率为 33.3%,细集料中 1/3 为细钢渣,2/3 为河沙,混凝土坍落度在 160 mm 以上,能满足混凝土和易性要求与配重要求。

4 钢渣配重混凝土结构受力仿真分析

通过仿真建模分析^[11]可知,在管廊中放置钢渣配重混凝土,不仅能有效抑制水对管廊的上浮力,还能改善管廊的受力性能。管廊结构模型如图 3 所示。

在上述模型中,混凝土材料的弹性模量为 24 000 MP,泊松比为 0.2,其中,管廊混凝土材料的比重为 2 400 kg/m³,配重钢渣混凝土材料的比重为 3 000 kg/m³。管廊竖向两端施加水平约束,管廊顶部施加竖向约束,管廊底部节点受到均匀分布的上浮力,钢渣配重混凝土底部节点作用向下的自重力。模型建立完成后,其竖向应力云图如图 4 和图 5 所示。

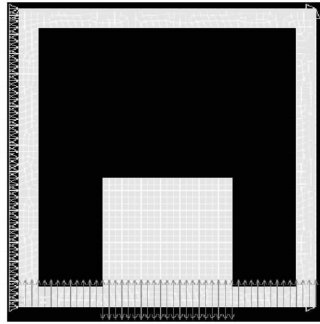


图 3 管廊工程受力分析云图

Fig. 3 Analysis on the force analysis of pipe gallery

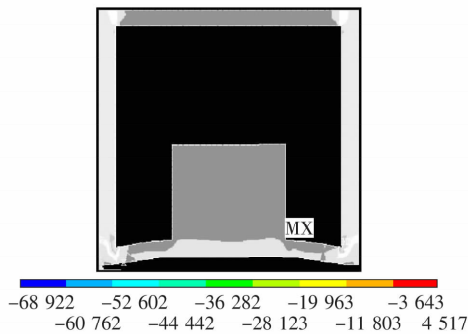


图 4 管廊工程施加配重竖向应力云图

Fig. 4 The utility tunnel engineering applied vertical stress nephogram of balancing

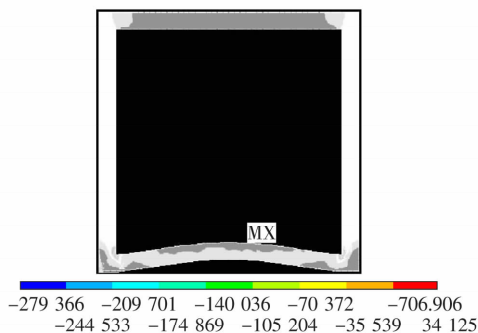


图 5 管廊工程未加配重竖向应力云图

Fig. 5 The utility tunnel engineering without counterweight vertical stress nephogram

对比分析图 4 和图 5 可知,管廊在施加钢渣配重混凝土时,其底部梁所承受的弯矩为 $4.571 \text{ kN} \cdot \text{m}$,且应力分布更加均匀。而管廊在没有施加钢渣配重混凝土时,其底部梁所承受的弯矩为 $34.125 \text{ kN} \cdot \text{m}$,是施加钢渣配重混凝土时所受弯矩的 8.5 倍。

对比分析图 6 和图 7 可知,管廊在施加钢渣

配重混凝土时,其底部梁处发生的最大位移为 10.858 mm ;而管廊在没有施加钢渣配重混凝土时,其底部梁处发生的最大位移为 110.921 mm ,约为施加钢渣配重混凝土时的 10 倍。

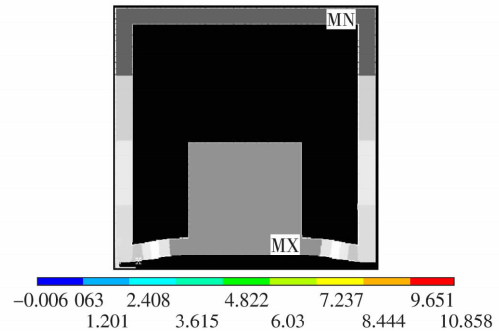


图 6 管廊工程施加配重竖向变形云图

Fig. 6 Tunnel counterweight vertical deformation nephogram

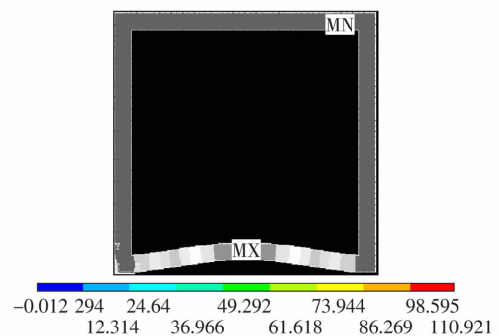


图 7 管廊工程未加配重竖向变形云图

Fig. 7 Pipe gallery project without counterweight and vertical deformation nephogram

5 结论

1) 由试验分析可知,钢渣混凝土配合比中,水胶比为 32.7%,砂率为 33.3%,细集料占比为 30%~35%,可以满足混凝土和易性要求与配重要求。

2) 对比分析管廊受力,掺配钢渣时,底部梁承受的弯矩为 $4.571 \text{ kN} \cdot \text{m}$;未掺加钢渣时,底部梁承受的弯矩为 $34.125 \text{ kN} \cdot \text{m}$,是掺加钢渣配重混凝土时所受弯矩的 8.5 倍。

3) 由有限元变形分析可知,掺配钢渣时管廊底部梁处发生的最大位移为 10.858 mm ,未掺加钢渣时管廊底部梁处发生的最大位移为 110.921 mm ,二者相差 10 倍。

管廊配重混凝土掺加钢渣不仅能减小管廊所承受的弯矩,而且还能减小管廊的竖向变形,对提高管廊结构稳定性具有重要意义。

〔参考文献〕

- [1] 施惠生,张德东,吴凯.钢渣作集料在混凝土中应用的研究进展[J].粉煤灰综合利用,2016(1):53-56.
SHI Hui-sheng, ZHANG De-dong, WU Kai. Research progress on application of steel slag as aggregate in concrete[J]. Comprehensive Utilization of Fly Ash, 2016(1):53-56.
- [2] 史阳光,冯勇,王怀义.掺粉煤灰对不同水泥品种钢渣混凝土基本力学性能试验研究[J].粉煤灰综合利用,2016(2):15-17.
SHI Yang-guang, FENG Yong, WANG Huai-yi. Experimental study on basic mechanical properties of steel slag concrete with fly ash by different fly ash [J]. Comprehensive Utilization of Fly Ash, 2016(2): 15-17.
- [3] 杨三强,杜二霞,刘娜,等.土木工程材料[M].北京:科学技术出版社,2016.
YANG San-qiang, DU Er-xia, LIU Na, et al. Civil engineering materials[M]. Beijing: Science and Technology Press, 2016.
- [4] 王飞虎,冯勇,晋强,等.钢渣粉部分替换不同水泥对混凝土力学性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2016(1):96-99.
WANG Fei-hu, FENG Yong, JIN Qiang, et al. Influence of different cement on mechanical properties of concrete with steel slag powder[J]. Concrete and Cement Products, 2016(1):96-99.
- [5] Xin Yu, Zhong Tao, Tian-Yi Song, et al. Performance of concrete made with steel slag and waste glass[J]. Construction and Building Materials, 2016(1):14-19.
- [6] 杨晨,刘华伟.钢渣粗骨料混凝土力学性能及耐久性研究[J].混凝土,2016(3):102-105.
YANG Chen, LIU Hua-wei. Study on mechanical properties and durability of steel slag coarse aggregate concrete[J]. Concrete, 2016(3):102-105.
- [7] 王欣,侍克斌.细集料钢渣混凝土的力学性能及抗冲磨性能[J].粉煤灰综合利用,2016(3):19-21.
WANG Xin, SHI Ke-bin. Mechanical properties and impact resistance of fine aggregate steel slag concrete [J]. Comprehensive Utilization of Fly Ash, 2016(3): 19-21.
- [8] HUANG Xiao-yan, WANG Zhong-jie, LIU ying. On the use of blast furnace slag and steel slag in the preparation of green artificial reef concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016(1):12-15.
- [9] 邹小平,陈平,刘荣进,等.利用钢渣作掺合料及骨料的高强混凝土试验[J].桂林理工大学学报,2014(3):532-537.
ZOU Xiao-ping, CHEN Ping, LIU Rong-jin, et al. Using steel slag as high strength concrete test[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2014(3): 532-537.
- [10] 杨建伟.钢渣和含钢渣的复合矿物掺合料对混凝土性能的影响[D].北京:清华大学,2013.
YANG Jian-wei. Effect of composite mineral admixtures containing steel slag and steel slag on the properties of concrete[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [11] 王海龙.道路刚度识别理论及仿真研究[D].南京:南京理工大学,2014.
WANG Hai-long. Roads stiffness identification theory and simulation research [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.