

文章编号: 1674—8247(2021)06—0042—05  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.06.009

## 严重腐蚀环境下混凝土灌注桩制备技术研究

陈思孝 王波涛

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**为满足严重腐蚀环境下混凝土灌注桩的工作、力学及耐久性能,本文进行了混凝土灌注桩制备技术试验研究,得出以下结论:(1)采用坍落度保留值、倒坍落度筒流出时间等指标来评价灌注桩混凝土的性能,建立包括力学、工作和耐久性的灌注桩混凝土性能评价指标体系;(2)采取降低混凝土粉煤灰与矿渣粉复掺、用水量,适当引气的混凝土制备技术途径,可制备出性能高(坍落扩展度 550 mm)、抗腐蚀的灌注桩混凝土;(3)在灌注桩混凝土中通过添加阻锈剂作为防腐蚀强化措施,阻锈剂应考虑其对混凝土工作、力学性能以及对钢筋保护性能的影响。

**关键词:**腐蚀环境;灌注桩;制备技术;耐久性能;评价指标

**中图分类号:**U214.1<sup>+</sup>8 **文献标志码:**A

## A Study on the Technology of Preparing Cast-in-place Concrete Pile under Severely Corrosive Conditionst

CHEN Sixiao WANG Botao

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In order to meet the working and mechanical properties and durability of cast-in-place concrete pile under severely corrosive conditions, this paper makes an experimental study on the technology of preparing cast-in-place concrete pile, and draws the following conclusions: (1) The concrete performance of cast-in-place pile is evaluated by indicators such as slump retention value and inverted slump cone outflow time, and an evaluation matrix for the concrete performance of cast-in-place pile including mechanical and working properties and durability is established. (2) The cast-in-place pile concrete with high performance (slump spread of 550 mm) and corrosion resistance can be prepared by reducing the proportion of fly ash and slag powder in concrete, water usage, and appropriate air-entraining for concrete preparation. (3) Corrosion inhibitor may be added to cast-in-place pile concrete as an anti-corrosion strengthening measure, and its influence on the working and mechanical properties of the concrete, and reinforcing bar protection shall be considered.

**Key words:** corrosive condition; cast-in-place pile; preparation technology; durability; evaluating index

随着沿海城市、海岛的建设发展,沿海铁路等基础设施不断增加,受海洋环境影响,建设工程不可避免的有位于严重腐蚀环境的情况,需解决混凝土结构的耐久性设计问题。

位于严重腐蚀环境下的混凝土结构需采用高标号混凝土,对于非隐蔽工程的高标号混凝土,可通过施工振捣等方法,来满足高标号混凝土的性能指标。而灌注桩混凝土却无法振捣,为满足灌注桩的性能指标要

收稿日期:2020-11-23

作者简介:陈思孝(1967-),男,教授级高级工程师。

引文格式:陈思孝,王波涛.严重腐蚀环境下混凝土灌注桩制备技术研究[J].高速铁路技术,2021,12(6):42-46.

CHEN Sixiao, WANG Botao. A Study on the Technology of Preparing Cast-in-place Concrete Pile under Severely Corrosive Conditionst[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(6):42-46.

求,需进行相关技术研究。

本文通过对严重腐蚀环境下混凝土灌注桩制备技术研究,来解决严重腐蚀环境下灌注桩耐久性问题。

1 严重腐蚀环境特点

沿海环岛工程,一般位于海洋环境,需跨越河流或海湾,因此基础多采用桩基。受海洋侵蚀环境影响,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>含量较高,极易成为氯盐环境(L3)、化学侵蚀环境(H4)、盐类结晶破坏环境(Y4),以及大于盐类结晶破坏环境的极端严重腐蚀环境。以海南环岛铁路某桥梁为例,该桥位于海湾的出海口,覆盖层较厚,采用桩基础,环境作用类别为化学侵蚀环境、氯盐环境,水中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>含量较高,如表1所示。

表1 侵蚀离子含量表<sup>[1]</sup>

化学成分	侵蚀离子含量			环境类别
	Cl <sup>-</sup> /(mmol/L)	437~781	15 491~27 686	
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /(mg/L)	22~174	2 113~16 714	H4, Y4、>Y4

2 制备技术

2.1 性能评价指标

灌注桩属于隐蔽工程,施工时难以振捣,这对混凝土制备提出了特殊要求。因此建立严重腐蚀环境下灌注桩混凝土性能评价指标,保证混凝土的性能非常重要。

针对灌注桩施工情况,结合TB 10005-2010《铁路混凝土结构耐久性设计规范》,通过研究灌注桩混凝土性能评价方法,扩展度、倒坍落度筒流出时间、Ormit仪流出时间,扩展度与倒坍落度筒流出时间的关系等,提出满足高标号灌注桩混凝土性能评价指标体系<sup>[2]</sup>,如表2所示。

表2 灌注桩混凝土性能评价指标体系表<sup>[3-5]</sup>

序号	性能	评价指标	
		评价方法	指标
1	工作	扩展度法/mm	≥450 ≤600
		扩展度损失值/(mm/h)	≤30
		倒坍落度筒流出时间/s	≤19
		Ormit 仪流出时间/s	≤13
		泌水率	0
2	力学(56 d或90 d)	抗压强度	C45(H4) C50(L3、Y4)
3	耐久性(56 d)	化学侵蚀等	胶凝材料耐蚀系数
			>0.8
		电通量/C	≤1 000
		氯盐环境	氯离子扩散系数/(m <sup>2</sup> /s)
			≤3×10 <sup>-12</sup>

2.2 胶凝材料抗蚀系数研究

通过测定浸泡在硫酸钠溶液及自配海水溶液中的胶凝材料胶砂试体与浸泡在洁净饮用水中的同龄期试体抗折强度,计算抗蚀系数,比较胶凝材料抗侵蚀的能力。

掺入的粉煤灰作为一种活性矿物掺合料,其在胶砂试件中发生二次水化反应,与水泥水化生成的Ca(OH)<sub>2</sub>与溶液中的OH<sup>-</sup>反应,消耗了胶材中的Ca(OH)<sub>2</sub>并形成C-S-H凝胶,改善了内部结构,提高胶砂试件的密实度。随着粉煤灰掺量的增加,当水泥水化提供的碱不足以使粉煤灰二次水化时,过量的粉煤灰会使胶砂出现比较多的孔隙,降低试件的密实度。由于海水溶液中的腐蚀性离子种类较多,含有大量的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mg<sup>2+</sup>,在侵蚀耦合作用下,导致海水溶液中的胶砂试件抗折强度低于Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中的胶砂试件抗折强度。

海水溶液和硫酸钠溶液中的胶凝材料胶砂试体在不同粉煤灰掺量(20%、30%、40%、50%、60%、70%) 28 d和56 d胶材耐蚀系数的影响如图1所示。从图1可以看出,粉煤灰的掺入提高了胶材的耐腐蚀系数,随着粉煤灰掺量的增加,胶材耐蚀系数先增大后减小,粉煤灰掺量宜在30%以上,但不宜超过50%,胶凝材料抗蚀系数较佳。

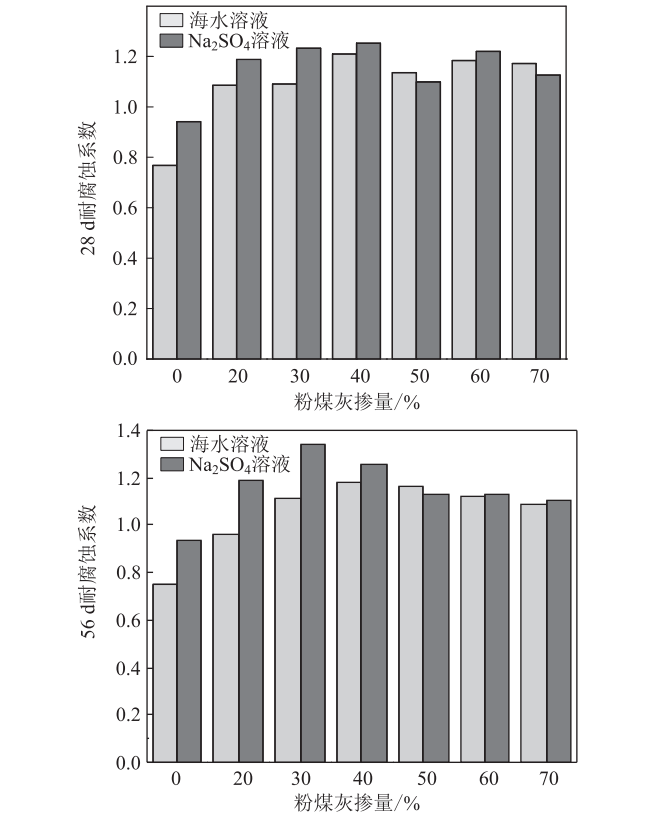


图1 粉煤灰掺量对胶材耐蚀系数的影响图

2.3 混凝土配合比参数研究

严重腐蚀环境下灌注桩混凝土配合比参数多规定最低水胶比及胶凝材料用量、矿物掺和料掺量、含气量等,为此进行不同配合比参数研究。

2.3.1 水胶比对抗氯离子渗透性能的影响

分别对不加掺合料不同龄期的 C30、C40、C50 混凝土,对应 0.45、0.38、0.33 不同水胶比进行抗氯离子渗透性能研究。

水胶比降低,混凝土电通量和氯离子扩散系数均下降;随着养护龄期的延长,电通量和氯离子扩散系数也有所下降<sup>[6]</sup>。即使是水胶比很低(仅为 0.33)的混凝土,也不适宜用于氯盐环境下的混凝土工程<sup>[7]</sup>。

2.3.2 矿物掺和料对抗氯离子渗透性能的影响

对 3 种矿物掺和比的混凝土在氯盐环境下进行电通量及抗氯离子渗透性能试验:①不掺加引气剂情况下的 C40 混凝土,通过对纯水泥掺粉煤灰(30%)、矿渣(30%)、硅灰(5%)、偏高岭土(10%)等量取代水泥<sup>[8]</sup>;②在 0.4 水胶比和 360 kg/m<sup>3</sup> 胶凝材料时掺不同量粉煤灰;③粉煤灰(20%)、硅灰(5%)双掺。

氯盐环境下混凝土必须掺加矿物掺和料,双掺的效果最好,如图 2 所示。氯盐环境下混凝土的粉煤灰掺量宜为 30% ~ 50%;矿渣的适宜掺量为 40% ~ 60%。强度等级越高,水胶比越大,胶凝材料中矿物掺和料越低。硅灰与粉煤灰的双掺可大幅度提高混凝土的抗氯离子渗透性能,因此对于处于严重腐蚀环境下的混凝土,应适当掺加硅灰。

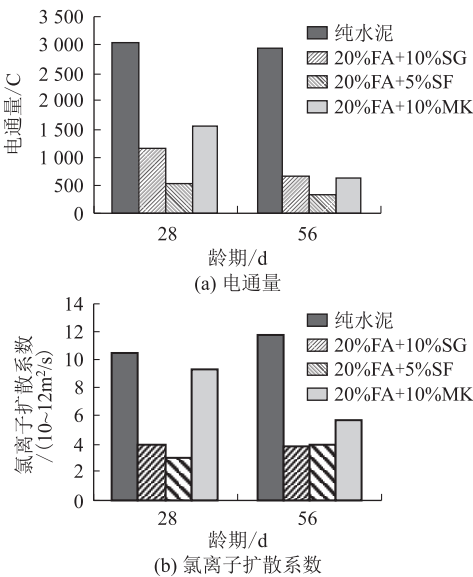


图2 双掺对混凝土抗氯离子渗透性能的影响图

2.3.3 含气量对抗氯离子渗透性能的影响

对不加掺合料的 C30、C40 及 C50 混凝土进行不

同含气量的抗氯离子渗透性能试验,结果表明,随含气量增大,混凝土的电通量和氯离子扩散系数均有所降低,强度等级为 C50 的混凝土,其电通量变化较小。

对加入不同掺和料的混凝土进行不同含气量的抗氯离子渗透性能试验,结果表明,含气量的变化对其电通量和氯离子扩散系数影响比较小。其它配比条件相同时,含气量越大,混凝土强度越低,抗氯离子渗透性能没有降低。混凝土强度相同时,引气混凝土抗氯离子渗透性能优于非引气混凝土<sup>[9]</sup>。

严重腐蚀环境下混凝土灌注桩,通过掺入掺和料引气混凝土,含气量增加 1%,其强度约降低 5MPa,综合考虑混凝土的力学及其抗氯离子渗透性能,氯盐环境下混凝土的含气量宜为 4% ~ 6%。

2.3.4 混凝土配合比优化

针对严重腐蚀环境下某桥梁开展灌注桩 C50 混凝土的配合比设计和比选试验,主要配合比如表 3 所示,拌和物性能测试结果如表 4 所示。

表 3 试验配合比表 (kg/m<sup>3</sup>)

编号	水泥	粉煤灰	矿渣粉	砂	碎石/mm		水	减水剂/%
					5 ~ 16	16 ~ 31.5		
0	321	0	173	722	485	594	153	1.50
1	307	64	123	722	485	594	153	1.40
2	321	0	173	722	485	594	153	1.45
3	307	123	64	722	485	594	153	1.20
4	321	49	124	722	485	594	153	1.25

表 4 试配混凝土拌和物性能表

编号	坍落度/mm	扩展度/mm	含气量/%	状态描述
0	255	650	4.5	损失快,比双掺粘
1	250	650	3.2	减水剂偏高,稍泌浆,但不抓底,坍损快
2	235	590	4.8	减水剂偏高,稍离析,骨料略有堆积
3	200	300	-	SF 出机目测大于 550 mm,测试时只有 300 mm,坍损很快,0.5 h 后丧失流动性
4	220	550/510	4.6	出机流动性好,不粘沉

由拌和物性能测试结果可得出以下结论:①当粉煤灰掺量由 15% 增至 25% 时,混凝土拌和物出机目测扩展度超过 500 mm,但测试完成后即损失到仅有 300 mm,0.5 h 后彻底失去工作性;②单掺矿渣粉混凝土拌和物粘度稍高于双掺情况,减水剂掺量有所增加;③考虑到混凝土水化温升控制,建议采用双掺矿粉和粉煤灰方式,粉煤灰掺量不超过 15%。

经试配试验选出具有代表性的 4 组混凝土强度发展情况,分别是 2 组灌注桩混凝土配合比和 2 组墩承

台混凝土配合比,如图3所示。从图3可以看出,4组混凝土28 d抗压强度均超过50 MPa,其中灌注桩混凝土28 d抗压强度超过60 MPa,由此可推断各组混凝土56 d强度均能满足C50强度等级混凝土试配强度要求;单掺矿渣粉混凝土配合比28 d抗压强度比矿渣粉+粉煤灰双掺高出约5 MPa。

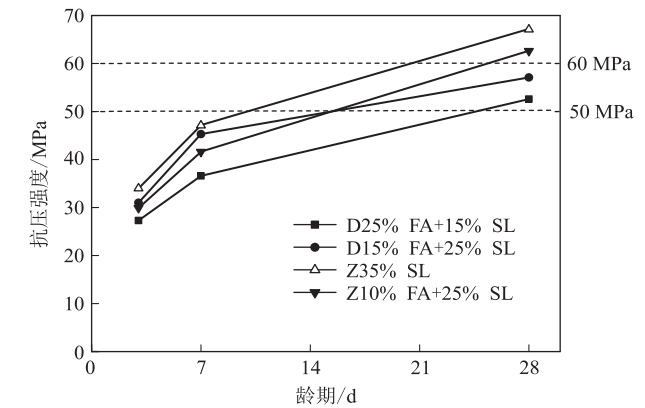


图3 试配混凝土抗压强度图

2.4 阻锈剂对混凝土性能的影响

在确定灌注桩基本配合比的情况下,研究阻锈剂的掺加对混凝土工作、力学性能的影响。根据砂、石原材料质量情况和混凝土容重情况,对所选定的混凝土试验配合比进行了优化,试验配合比如表5所示。

表5 试验配合比表(kg/m³)

编号	水泥	粉煤灰	矿渣粉	砂	碎石/mm		水	阻锈剂	减水剂/%
					5~16	16~31.5			
1	312	48	120	710	479	586	149	0	1.25
2	312	48	120	710	479	586	139	9.9	1.25
3	312	28	120	710	479	586	149	20.0	1.25

注:编号2采用液体型阻锈剂,编号3采用粉体型阻锈剂

对各试件进行电通量与氯离子扩散系数测试,数据如表6所示。随阻锈剂掺量提高,28 d的电通量与氯离子扩散系数均呈下降趋势;但56 d龄期,不同阻锈剂掺量混凝土的电通量与氯离子扩散系数差别不明显。

表6 抗氯离子渗透能力表

编号	电通量/C		氯离子扩散系数/(10 <sup>-12</sup> m²/s)	
	28 d	56 d	28 d	56 d
1	1 426	1 296	6.3	3.8
2	1 688	1 239	5.2	3.9
3	1 315	1 249	4.8	4.0

试件经历30次硫酸盐溶液干湿循环后的抗压强度如表7所示,经历0~150次硫酸盐溶液干湿循环后表面杨氏弹性模量的变化如表8所示。

表7 抗硫酸盐侵蚀表

编号	30次循环抗压强度/MPa	
	标养	泡溶液
1	50.4	44.4
2	59.5	54.6
3	46.3	43.4

表8 硫酸盐干湿循环作用下表面杨氏弹性模量变化表(GPa)

循环次数	1	2	3
0	50.0	49.2	50.0
15	48.8	50.5	47.8
30	46.9	49.5	47.9
45	45.9	49.0	48.5
60	47.6	49.9	49.1
75	49.2	49.1	49.4
150	48.0	48.1	48.2

研究表明,硫酸盐干湿循环作用对混凝土表面杨氏弹性模量的影响较小,但对抗压强度却有明显影响。

3 结论

为满足严重腐蚀环境下混凝土灌注桩的工作、力学及耐久性能,本文结合海南环岛铁路某桥梁桩基础的施工进行了混凝土灌注桩制备技术研究,得出结论:

- (1)采用坍落度保留值、倒坍落度筒流出时间等指标来评价灌注桩混凝土的性能,建立包括力学、工作和耐久性的灌注桩混凝土性能评价指标体系。
- (2)采取降低混凝土粉煤灰与矿渣粉复掺、用水量,适当引气的混凝土制备技术途径,可制备出性能高(坍落扩展度550 mm)、抗腐蚀的灌注桩混凝土。
- (3)在灌注桩混凝土中通过添加阻锈剂,作为防腐蚀强化措施。阻锈剂应考虑其对混凝土工作、力学性能以及对钢筋保护性能的影响。

参考文献:

[1] 陈思孝,王波涛. 严重腐蚀环境下桥梁混凝土结构耐久性研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(12): 26-30.  
CHEN Sixiao, WANG Botao. Research on the Durability of Bridge Concrete Structure under Severe Corrosive Environment[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(12): 26-30.

[2] 连新奇. 面向结构部位的铁路混凝土结构耐久性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(6): 1454-1458.  
LIAN Xinqi. Study on the Durability of Different Members of Railway Concrete Structures[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(6): 1454-1458.

[3] TB 10005-2010 铁路混凝土结构耐久性设计规范[S].  
TB 10005-2010 Code for Durability Design on Concrete Structure of Railway[S].

[4] CCES 01-2004 混凝土结构耐久性设计与施工指南[S].

CCES 01-2004 Guide to Durability Design and Construction of Reinforced Structures[S].

[5] JTJ 275-2000 海港工程混凝土结构防腐技术规范[S]. JTJ 275-2000 Corrosion Prevention Technical Specifications for Concrete Structures of Marine Harbour Engineering[S].

[6] 陈思孝,袁明,陈列. 氯盐环境下混凝土结构防腐措施研究[J]. 高速铁路技术, 2012, 3(4): 24-27. CHEN Sixiao, YUAN Ming, CHEN Lie. Study on Anti-corrosion Measure for Concrete Frame in Chloride Environment[J]. High Speed Railway Technology, 2012, 3(4): 24-27.

[7] 李化建,谢永江,易忠来,等. 氯盐环境下铁路混凝土配合比参数的研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(9): 111-116. LI Huajian, XIE Yongjiang, YI Zhonglai, et al. Mixture Ratio of Railway Concrete under Chloride Environment[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(9): 111-116.

[8] 姜瑞双,郭永智,康伟花,等. 粗集料石粉含量对C50混凝土力学及耐久性能影响研究[J]. 混凝土世界, 2020(2): 76-78. JIANG Ruishuang, GUO Yongzhi, KANG Weihua, et al. Study on the Effect of Coarse Aggregate Powder Content on the Mechanical Properties and Durability of C50 Concrete[J]. China Concrete, 2020(2): 76-78.

[9] 胡江. 不同掺合料及含气量对寒区混凝土耐久性的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009. HU Jiang. Study on the Durability of Cold Regions Concrete with Different Mineral Admixtures and Air Contents[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.



(上接第19页)

[2] 周玉辉. 三维激光扫描移动测量在铁路运营中的应用[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(1): 68-73. ZHOU Yuhui. Application of 3D Laser Scanning Mobile Surveying in Railway Operation[J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(1): 68-73.

[3] 曹培国,姚磊,李奎英,等. 三维实景地图生产与应用[J]. 山东国土资源, 2018, 34(9): 87-91. CAO Peiguo, YAO Lei, LI Kuiying, et al. Drawing and Application of Three Dimensional Real Map[J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(9): 87-91.

[4] TB 10012-2019 铁路工程地质勘察规范[S]. TB 10012-2019 Code for Geology Investigation of Railway Engineering[S].

[5] TB 10601-2009 高速铁路工程测量规范[S]. TB 10601-2009 Code for Engineering Survey of High Speed Railway[S].

[6] 鞠震,廉东本. 态势可视化的二三联动技术[J]. 计算机系统应用, 2019, 28(7): 79-84. JU Zhen, LIAN Dongben. Technology of 2D and 3D Linked Situation Visualization[J]. Computer Systems & Applications, 2019, 28(7): 79-84.

[7] 朱颖,魏永幸. 复杂艰险山区铁路减灾选线[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(6): 1-4. ZHU Ying, WEI Yongxing. Disaster Reduction Techniques for Route Selection of Railway in Complex and Dangerous Mountain[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(6): 1-4.

[8] 郝蕊,张敬涵,王辉麟,等. 参数化的铁路桥梁三维快速建模方法[J]. 铁道建筑, 2017, 57(8): 33-35. HAO Rui, ZHANG Jinghan, WANG Huilin, et al. Parameterization Modeling Based on 3D Railway Bridge Model by Rapid Establishment Method[J]. Railway Engineering, 2017, 57(8): 33-35.

[9] 周玉辉,梅熙,卢建康,等. 一种利用三维激光点云自动提取既有线路顶高程方法: 中国, ZL201710802183.2[P]. 2019-01-04. ZHOU Yuhui, MEI Xi, LU Jiankang, et al. Method for Automatically Extracting Existing Line Rail Top Elevation Through Three-Dimensional Laser Point Clouds; China, ZL201710802183.2[P]. 2019-01-04.

[10] 卢建康,周玉辉,周世明,等. 一种三维激光全景的铁路线路调绘方法: 中国, ZL201710802182.8[P]. 2019-12-03. LU Jiankang, ZHOU Yuhui, ZHOU Shiming, et al. Three-Dimensional Laser Panoramic Railway Line Plotting Method; China, ZL201710802182.8[P]. 2019-12-03.

[11] 周义高,胡玉芹. 连续运行参考站系统(CORS)应用技术研究[J]. 价值工程, 2012, 31(15): 201. ZHOU Yigao, HU Yubin. Research on Application Technology of Continuous Operation Reference Station System (CORS)[J]. Value Engineering, 2012, 31(15): 201.

[12] 陈治睿. 基于地面激光扫描的建筑物三维模型重建[D]. 抚州: 东华理工大学, 2012. CHEN Zhirui. 3D Building Model Reconstruction Technique Based on the Ground Laser Scanning[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2012.

[13] 丁浩,廖峻. 基于BIM技术的隧道工程信息平台设计与研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(S2): 60-68. DING Hao, LIAO Jun. Design and Research of Tunnel Engineering Information Platform Based on BIM Technology[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(S2): 60-68.

[14] 朱庆,朱军,黄华平,等. 实景三维空间信息平台与数字孪生川藏铁路[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(2): 46-53. ZHU Qing, ZHU Jun, HUANG Huaping, et al. Real 3D Spatial Information Platform and Digital Twin Sichuan-Tibet Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2): 46-53.