

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2023.03.002

白水泥对清水混凝土力学性能和耐久性影响

李惠霞¹, 舒展¹, 庄金平¹, 邬宇杰¹, 师军², 袁陈振³

- (1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118;
2. 福建省交通规划设计院有限公司, 福建 福州 350004;
3. 福建工程学院 管理学院, 福建 福州 350118)

摘要: 为推广白水泥在清水混凝土中的应用, 通过室内试验的方法, 针对掺入不同含量白水泥的清水混凝土在不同养护龄时开展了外观表现、工作性能、抗裂性能、抗拉强度、抗压强度和耐久性试验研究, 探讨了 $w_{\text{白水泥}}$ 和养护龄期对清水混凝土外观表现、力学性能和耐久性的影响。结果表明: 白水泥掺入量影响清水混凝土的外观, 白水泥掺量越大颜色越浅; 随着 $w_{\text{白水泥}}$ 的增加, 清水混凝土早期工作性能略有改善, 抗裂性能随之减弱, 早期抗压强度、抗拉强度随之增大, 电通量先增加后降低; 随着养护龄期增加, 养护 28、56 d 后, $w_{\text{白水泥}}$ 对抗压强度影响较小, 抗拉强度随 $w_{\text{白水泥}}$ 增加而减小; $w_{\text{白水泥}}$ 为 50% 时, 养护后期的清水混凝土既具有良好外观, 又具有较好的力学性能和耐久性。

关键词: 白水泥; 清水混凝土; 外观性能; 抗裂性能; 耐久性

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)03-0212-06

Effects of white cement on mechanical properties and durability of fair-faced concrete

LI Huixia¹, SHU Zhan¹, ZHUANG Jinping¹, WU Yujie¹, SHI Jun², YUAN Chenzhen³

- (1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. Fujian Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350004, China;
3. School of Management, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In order to promote the application of white cement in fair-faced concrete, laboratory tests were conducted to investigate the appearance, workability, crack resistance, tensile strength, compressive strength, and durability of fair-faced concrete mixed with different content of white cement at different curing ages. The effects of white cement content and curing age on the appearance, mechanical properties, and durability of fair-faced concrete were discussed. Results show that the amount of white cement added affects the appearance of fair-faced concrete, and the greater the amount of white cement added, the lighter the color; with the increase of white cement content, the early working performance of fair-faced concrete slightly improves, the crack resistance decreases, the early compressive strength and tensile strength increase, and the electrical flux first increases and then decreases; with the increase of curing age, the influence of white cement content on compressive strength is small after 28 and 56 days of curing, and the tensile strength decreases with the increase of white cement content; when the content of white cement is 50%, the cured fair-faced concrete at the later stage not only has a good appearance, but also has good mechanical properties and durability.

Keywords: white cement; fair-faced concrete; appearance performance; crack resistance; durability

白水泥较易改变混凝土的颜色^[1], 而且白水泥和普通硅酸盐水泥的化学组成基本类似^[2], 因此白水泥在装饰性清水混凝土中的应用日益增

多^[3-4]。在追求白色清水混凝土外观的同时, 一些学者也开展了白水泥对清水混凝土性能的影响研究。刘秀红^[5]从原材料的选择、配合比的设计

收稿日期: 2023-02-14

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2021J011060); 福建工程学院科研启动基金项目(GY-Z191292022); 2022 年大学生创新创业训练计划项目(S202210388064)

第一作者简介: 李惠霞(1979—), 女, 河南商丘人, 副教授, 博士, 研究方向: 工程材料。

等方面,进行 C40 高性能白色清水混凝土制备方法研究。吴永立^[6]研究了白水泥、普通水泥及矿物掺合料对白色清水混凝土工作性能与外观的影响。Hamad^[7]对比白水泥和灰水泥强度发现,白水泥中 C₃A 含量相对较高,导致白水泥混凝土构件的早期水化速率和强度增加较快。丁虹^[8]发现白水泥中 C₃S+C₃A 的含量比普通水泥高 15% 以上,使得白水泥具有更快的早期水化反应速度,影响白色清水混凝土的工作性能。

上述文献研究了白水泥影响清水混凝土外观及其力学性能,但是对于龄期和 $w_{\text{白水泥}}$ 对清水混凝土外观、工作性能、力学性能和耐久性能的影响研究较少。本文依托福建省平潭市演艺中心的清水混凝土项目,将白水泥与普通硅酸盐水泥拌和到清水混凝土中,研究不同龄期下掺入不同含量白水泥对清水混凝土综合性能的影响规律,旨在提出具有良好外观和使用性能的清水混凝土材料设计,以助

于白色清水混凝土推广应用于实际工程。

1 原料选用与试验方法

1.1 试件原材料

制作试件的水泥为 P · O 42.5 的普通硅酸盐水泥,细度为 0.9%,其密度及比表面积分别为 3.15 g / cm³、349 m²/kg。粗骨料采用 5~10 mm、10~25 mm 二级配碎石;细骨料采用细度模数为 2.7 的中砂;选用 II 级以上粉煤灰;用自来水拌和混凝土;减水剂为聚羧酸高效减水剂,坍落度控制在 240~250 mm。

1.2 配合比设计

通过室内配合比试验,得出细骨料为 752 kg · m⁻³,粗骨料为 1 083 kg · m⁻³,水灰比为 0.47。在普通硅酸盐水泥中复掺白水泥,分为 5 个配合比,各配合比中白水泥掺量分别占水泥总量的 0%、25%、50%、75%、100%,如表 1 所示。

表 1 清水混凝土配合比
Tab.1 Reference mix proportion of bare concrete

编号	kg · m ⁻³						
	$\rho_{\text{白水泥}}$	$\rho_{\text{普通硅酸盐水泥}}$	$\rho_{\text{粉煤灰}}$	$\rho_{\text{碎石}}$	$\rho_{\text{砂}}$	$\rho_{\text{水}}$	$\rho_{\text{减水剂}}$
1	0	317	133	1 083	752	150	4.6
2	79	238	133	1 083	752	150	4.6
3	158	158	133	1 083	752	150	4.6
4	238	79	133	1 083	752	150	4.6
5	317	0	133	1 083	752	150	4.6

1.3 试件制作

按 GB 50010—2015《混凝土结构设计规范》^[9]制作试件,不同配合比分别制作了 5 组 150 mm×150 mm×150 mm 立方体试件,每组 6 个共 30 个,用于力学性能测试。制作了 5 组 100 mm×100 mm² 的圆柱体试件,每组 3 个共 15 个试件,用于电通量试验。

1.4 试验方法

(1) 坍落度试验

按照 GB/T50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》^[10]检测白水泥清水混凝土拌和物的工作性能,以测得的混凝土初始坍落度和扩展度为指标,评价不同配合比的白水泥清水混凝土的工作性能。

(2) 平板开裂试验

采用 GB50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[11]中混凝土平板开裂试验,在 600 mm×600 mm×100 mm 的平面薄板型模具中浇筑混凝土,使用 100 倍读数显微镜测出每条裂缝的最大宽度(精度为 0.01 mm),对裂缝平均开裂面积、单位面积的裂缝数目和开裂总面积等进行测算,评价白水泥清水混凝土抗裂性能。

(3) 立方体抗压强度和劈裂强度试验

按照 GB/T50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[12]对依标准条件养护成型的 150 mm×150 mm×150 mm 试件进行检测,测定混凝土 3、7、28、56 d 的抗压强度和劈裂抗拉强度,

评价白水泥清水混凝土的力学性能。

(4)电通量试验

按照 GBT50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[11] 养护 28 d 后,试件按标准件规格切割,将制作完成的 $D\times H=100\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 标准件放入试验装置中,检测试件的电通量,按氯离子渗透判定指标,评价白水泥清水混凝土的耐久性。

2 试验结果及分析

2.1 白水泥清水混凝土工作性能

不同 $w_{\text{白水泥}}$ 的试件坍落度试验结果见表 2。按 GB/T50080—2002《普通混凝土拌合物性能试验方法》^[10],混凝土强度等级大于 C50 时,坍落度应大于 180 mm,由表 2 可知,5 种水泥比例配制的清水混凝土工作性能均能满足规范要求。各配合比的坍落度在 240~250 mm 之间,扩展度在 580~635 mm 之间。 $w_{\text{白水泥}}=100\%$ 时,综合性能最好,2 h 内坍落度/扩展度的损失最小,其白度高,表面气孔少,有比较好的和易性、保水性和流动性。普通硅酸盐水泥清水混凝土的白度较差,且 2 h 内坍落度/扩展度损失较大,保水性差,不易施工操作。白水泥清水混凝土的工作性能随白水泥掺量的提升而改善,白水泥清水混凝土相较于普通硅酸

盐清水混凝土拥有更为良好的工作性能。

表 2 清水混凝土工作性能指标
Tab.2 Workability index of bare concrete

配比	坍落度/扩展度		外观
	初始	2 h	
1	245/590	245/545	白度较差,表面气泡较少
2	240/610	240/570	白度一般,表面气泡较多
3	250/580	250/540	白度一般,表面气泡较少
4	240/635	240/600	白度较好,表面气泡较多
5	240/620	240/590	白度较好,表面气泡较少

注:表中配比编号顺序同表 1。

2.2 白水泥清水混凝土的外观表现

按照表 1 中 1~5 编号的配比顺序,将白水泥含量以 0%、25%、50%、75%、100% 的比例取代普通硅酸盐水泥制作清水混凝土试件(a)~(e),试件颜色如图 1 所示,随着 $w_{\text{白水泥}}$ 增加清水混凝土试件颜色逐渐变浅,说明 Fe_2O_3 含量较低的白色硅酸盐水泥加入起到调整清水混凝土颜色的作用,并且可以在白水泥清水混凝土中加入颜料实现彩色清水混凝土,为制作外观颜色多变的清水混凝土提供可能。

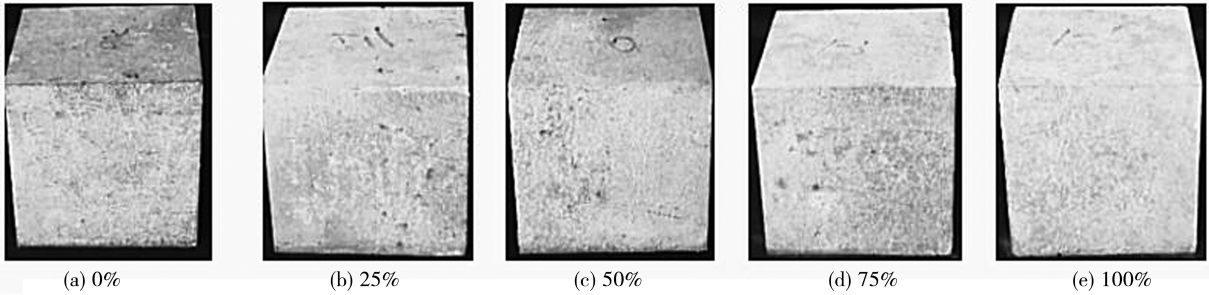


图 1 不同 $w_{\text{白水泥}}$ 混凝土的外观

Fig.1 Appearance of concrete with different white cement content

2.3 掺入白水泥对清水混凝土抗裂性能的影响

由图 2 可知,在前 8 h,各组混凝土裂缝的发生与发展增速较快,8 h 后裂缝数量的增长开始放缓,至 24 h 时混凝土的裂缝数量增长趋于稳定,对白色清水混凝土开裂的预防需在养护的早期进行。普通硅酸盐水泥清水混凝土试件的裂缝数量最少,其次为 $w_{\text{白水泥}}=100\%$ 的清水混凝土, $w_{\text{白水泥}}=75\%$ 时,裂缝数量最多。在不同白水泥含量下,试件裂缝开展情况不呈定向规律,若仅考虑

早期开裂方面的影响,推荐的白水泥最优掺量为 $w_{\text{白水泥}}=25\%$ 以下。

2.4 白水泥清水混凝土的抗压与抗拉性能

2.4.1 试件的破坏特点

在抗压与抗劈裂性能试验中,白水泥清水混凝土试件的破坏形式相似。混凝土试件在立方体抗压强度试验中,随着荷载的增加,混凝土试件两侧开始出现竖向裂缝,持续延伸到上下端部,伴随混凝土试块两侧边缘的脱落而破坏,

破坏形态见图 3。由图 3 可见,随着 $w_{\text{白水泥}}$ 增加,试件两侧脱落先减少后增加,说明 $w_{\text{白水泥}}$ 对强度有影响, $w_{\text{白水泥}}$ 在 25%~50% 时,强度较大。在劈裂强度试验中,试件表面正中先出现竖向裂缝,随荷载增加,裂缝由内向边缘发展,进而形成贯通裂缝后发生脆性破坏,试件被劈裂,见图 4。由图 4 可知,混凝土破坏裂缝宽度随着 $w_{\text{白水泥}}$ 增加先减少后增加,说明白水泥对清水混凝土的抗拉强度有影响, $w_{\text{白水泥}}$ 在 25%~50% 时抗拉强度较大。

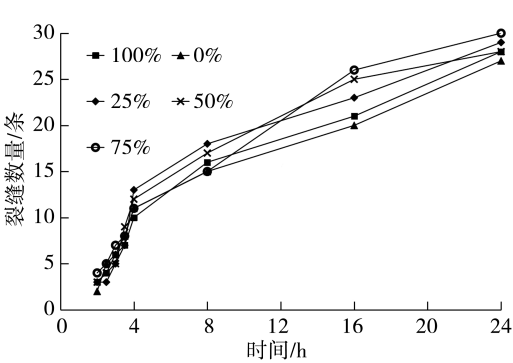


图 2 裂缝数量与时间的关系

Fig.2 Number of cracks in relation to time

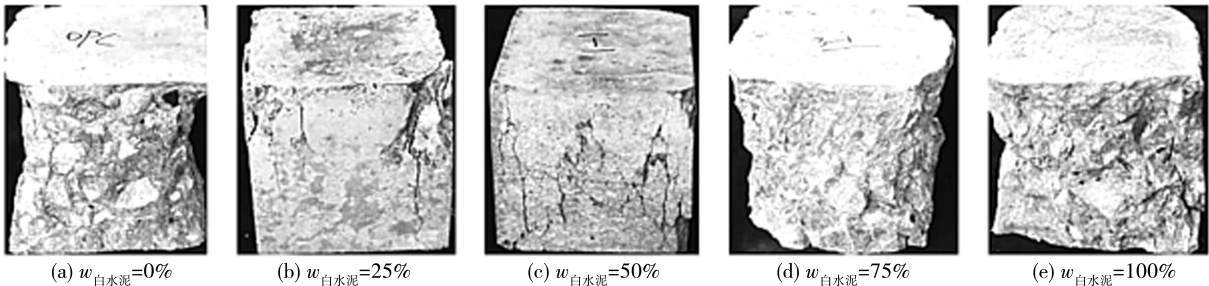


图 3 白水泥清水混凝土的抗压破坏特征

Fig.3 Compressive failure characteristics of white cement fair-faced concrete

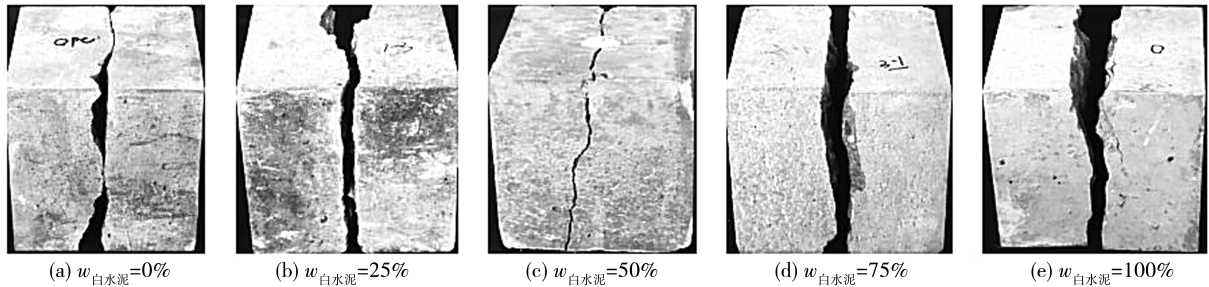


图 4 白水泥清水混凝土的劈裂破坏特征

Fig.4 Splitting failure characteristics of white cement fair-faced concrete

2.4.2 抗压强度

由图 5 可知,随着 $w_{\text{白水泥}}$ 的增加,白水泥清水混凝土的 3 d 抗压强度与 7 d 抗压强度呈上升趋势,而 28 d 抗压强度与 56 d 抗压强度大致呈下降趋势。 $w_{\text{白水泥}}=75\%$ 与 $w_{\text{白水泥}}=100\%$ 两组的 3 d 抗压强度与 7 d 抗压强度最大;随养护龄期的增长,不同 $w_{\text{白水泥}}$ 的清水混凝土抗压强度均明显提升。普通硅酸盐水泥清水混凝土的早期抗压强度略低于其他掺量的混凝土。在 28 d 养护龄期中,普通硅酸盐水泥清水混凝土抗压强度最大, $w_{\text{白水泥}}=75\%$ 的 28 d 抗压强度最小。由此得出, $w_{\text{白水泥}}=25\%$ 左右时,白水泥清水混凝土后期抗压性能较好。

2.4.3 抗拉强度

由图 6 可知,随着 $w_{\text{白水泥}}$ 的增加,混凝土 3 d 抗拉强度有小幅增长,而 7 d 与 56 d 抗拉强度呈下降趋势,28 d 抗拉强度的增长较为曲折, $w_{\text{白水泥}}=100\%$ 时,28 d 抗拉强度最大;随养护龄期的增长,不同 $w_{\text{白水泥}}$ 的清水混凝土抗拉强度呈先增长后下降趋势。各配比在 7 d 养护龄期的抗拉强度最大, $w_{\text{白水泥}}\leq 50\%$ 时,混凝土中后期抗拉强度随养护龄期的增加而降低,而对于 $w_{\text{白水泥}}>50\%$ 以上的白水泥清水混凝土,其后期抗拉强度随养护龄期的增加而提升。总体来看, $w_{\text{白水泥}}=50\%$ 的抗拉性能最稳定, $w_{\text{白水泥}}=75\%$ 的后期抗拉性能较为优异。

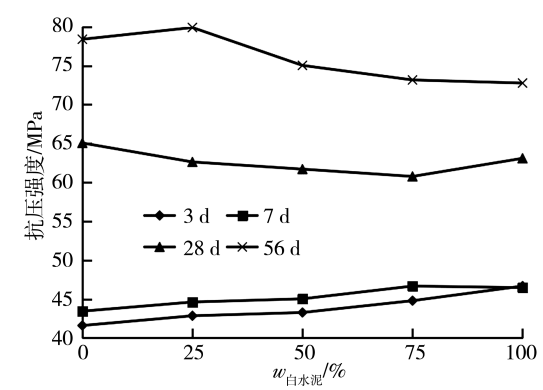


图 5 抗压强度随白水泥掺量变化图

Fig.5 Chart of compressive strength change with increasing amount of white cement

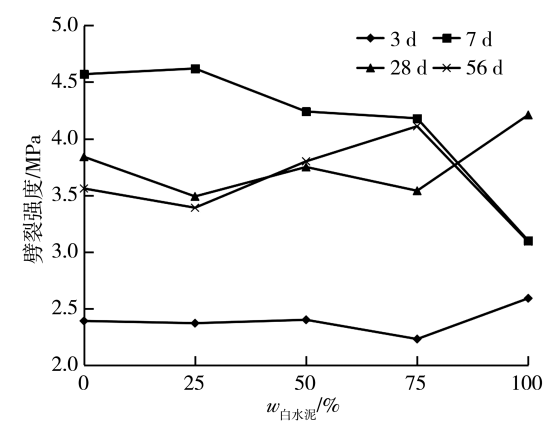


图 6 抗拉强度随白水泥掺量变化图

Fig.6 Chart of tensile strength change with increasing amount of white cement

2.5 掺入白水泥对清水混凝土耐久性能的影响

根据电通量试验结果,得到各配比的平均电通量 \bar{Q} 与换算后的电通量 Q_s (如图 7 所示)。

按照 JGJ/T193-2019《混凝土耐久性检验评定标准》^[13],各配比混凝土的电通量库伦电量值均处于 $500\text{ C} \leq Q_s < 1\,000\text{ C}$ 范围,评定为 Q -IV 等级。

由图 7 可知,白水泥与普通硅酸盐水泥复掺时,小粒径的白水泥颗粒能填补结构缝隙,形成良好级配,其中 $w_{\text{白水泥}} = 50\%$ 时,清水混凝土试件的抗氯离子渗透性最好,此配比混凝土内部孔隙少,结构紧密,有较为良好的耐久性。

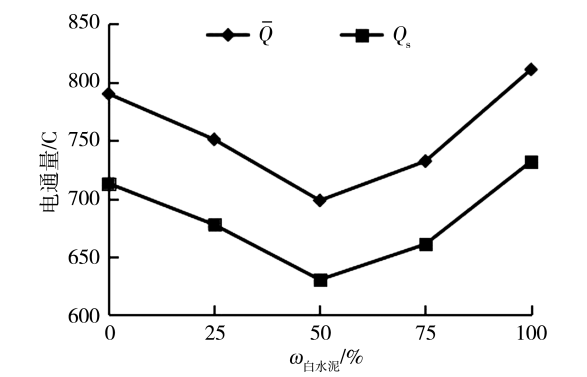


图 7 电通量法测定氯离子渗透试验结果

Fig.7 Determination of chloride ion penetration test results by electric flux method

3 依托工程研究

结合试验研究成果,开展工程现场足尺模型试验应用研究,采用上述 $w_{\text{白水泥}}$ 为 25%、50%、75%、100%制作的实验墙如图 8 所示,白水泥清水混凝土颜色均匀、亮白、光泽鲜亮,表面细腻没有气泡,没有裂缝。由图 8 可见,随 $w_{\text{白水泥}}$ 增加墙面颜色越来越亮白,增加了墙面的美观性。工程现场采用 $w_{\text{白水泥}} = 50\%$ 的清水混凝土试验,测得抗压强度 60.5 MPa,抗拉强度 3.75 MPa,电通量 628.5 C。由上述实验墙外观表现和性能测试可知,按上述实验结果配制的实验墙满足 JGJ 169—2019《清水混凝土应用技术规程》^[14] 中外观质量及检验标准,达到了混凝土提升外观、提高混凝土质量、延长混凝土使用寿命的需求。

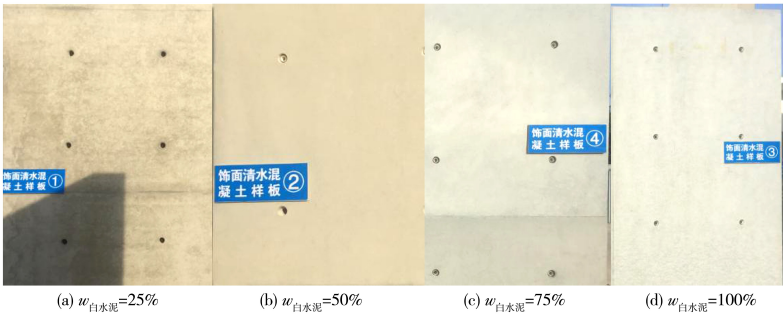


图 8 工程现场实验墙

Fig.8 Test wall in engineering site

4 结论

- 1)在 $w_{\text{白水泥}} = 50\%$ 时,混凝土的外表均匀,孔洞少,色泽较光亮,力学性能明显优于其他组别。
- 2) $w_{\text{白水泥}} < 25\%$ 时,白水泥清水混凝土的抗裂性能较好,后期抗压强度大,养护 56 d 时的抗劈

裂强度提升明显,有助于清水混凝土的后期维护。

3)在 $w_{\text{白水泥}} = 50\%$ 时,清水混凝土的抗氯离子渗透性能良好,结构内部孔隙减少,混凝土耐久性有一定增强。

4)白水泥清水混凝土的工作性能随 $w_{\text{白水泥}}$ 的增加而改善,纯白水泥清水混凝土的外观,更适用于装饰性建筑,并且工作性能良好,利于施工。

参考文献:

[1] 杨栋,曹长伟,夏京亮,等. 白色硅酸盐水泥在大体积混凝土中的应用研究[J]. 施工技术(中英文),2022,51(10): 107-111.

[2] 陈凌生. 彩色水泥混凝土路用性能试验研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2017.

[3] 杨栋,夏京亮,周永祥,等. 白色硅酸盐水泥在工程中应用综述[J]. 公路交通科技(应用技术版),2020,16(7):125-127,131.

[4] 刘力,李佑. 白色混凝土在建筑设计中的发展及应用[J]. 混凝土,2019(10):146-149,154.

[5] 刘秀红. 一种 C40 高性能白色清水混凝土制备方法[J]. 建筑施工,2022,44(6):1422-1425.

[6] 吴永立,刘伟,刘思楠,等. 太湖隧道主体结构白色清水混凝土优化配制研究[J]. 新型建筑材料,2021,48(6):46-50,110.

[7] HAMAD B S. Investigations of chemical and physical properties of white cement concrete[J]. Advanced Cement Based Materials,1995,2(4):161-167.

[8] 丁虹,高育欣,徐芬莲,等. C60 高性能白色清水混凝土的试验研究[J]. 新型建筑材料,2012,39(5):83-86.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB50010-2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准:GB/T50080-2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 清水混凝土应用技术规程:JGJ 169—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土耐久性检验评定标准:JGJ/T193-2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.

(责任编辑:陈雯)