

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2022.02.044

泵送高性能混凝土配合比设计和变形性能研究

徐天良¹, 王卿², 周洋²

(1. 中铁二局第六工程有限公司, 四川 成都 610031; 2. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410219)

摘要:该文结合三角岩大桥高扬程泵送混凝土的优化试验研究,以100年使用年限为目标,进行高性能混凝土的配合比设计、优选和优化,确定大桥混凝土箱梁高性能混凝土的配合比,并提出相应的高性能混凝土配合比设计新方法。对箱梁高性能混凝土的变形性能(各种收缩和徐变)进行系统的试验研究和长龄期的测试分析。结果表明:增加粉煤灰掺量,明显降低了早龄期混凝土的自收缩并改善了混凝土的徐变性能;在用水量一定时,随着混凝土强度等级的提高,胶凝材料用量增加,集料特别是粗骨料用量减少,混凝土的徐变系数增大。

关键词:高性能混凝土;配合比设计;变形性能;收缩;徐变

1 前言

目前,中国处于基础设施建设大开发阶段,高性能混凝土广泛应用于桥梁设计建造中。然而,混凝土开裂时有发生,致使混凝土耐久性差,严重威胁到桥梁的使用寿命。因此,控制优化混凝土变形性能十分必要^[1-9]。

仅出于对强度、经济性、安全性、工作性的考虑,传统混凝土配合比设计对混凝土配合比参数考虑不全面,仅仅限制最小水泥用量和最大水灰比,因此,混凝土

土耐久性很难得到保证。

关于对高性能混凝土进行配合比设计已有不少学者开展过研究。赵聪^[10]等研究了Ⅱ级粉煤灰部分代替水泥拌制成的高性能混凝土,从经济性、耐久性探讨了其优越性;米哲^[11]研究了C55高性能混凝土配合比的设计计算、试配调整和施工过程中配合比的调整对混凝土性能的影响;张剑峰^[12]等从粉煤灰掺量与混凝土工作性、强度及28d氯离子扩散系数之间的关系研究了粉煤灰掺量对混凝土性能的影响。

以上研究多局限于粉煤灰对混凝土强度、耐久性、经济性等一种或两种优越性进行比较,没有系统研究

- *****
- [4] 王志超,吕艳艳,杨国明,等. SBR胶乳掺量对改性乳化沥青性能的影响[J]. 当代化工, 2019, 48(6): 186-189.
- [5] 黄志军,刘伟铭,胡学斌. 一种用于微表处的乳化SBS改性沥青的试验研究[J]. 中外公路, 2014, 34(5): 302-306.
- [6] 畅润田,杜素军,裴强,等. SBR胶乳对乳化沥青流变性能的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(5): 38-41.
- [7] 王燕婷,董元帅,侯芸,等. SBS改性乳化沥青最佳乳化因素及性能研究[J]. 中外公路, 2018, 38(6): 238-242.
- [8] 韩春来. SBS改性乳化沥青研制及路用性能室内试验研究[D]. 长沙理工大学硕士学位论文, 2011.
- [9] 邓玉训,谢群. 水性环氧乳化沥青碎石封层性能研究[J]. 中外公路, 2019, 39(3): 260-264.
- [10] 余定洋,何兆益,李兴富,等. 水性环氧乳化沥青的制备

- 及混合料路用性能研究[J]. 中外公路, 2018, 38(2): 313-317.
- [11] 季节,刘禄厚,索智,等. 水性环氧树脂改性乳化沥青微表处性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(5): 23-30.
- [12] 暴兴才. 水性环氧树脂掺量对微表处混合料技术性能的影响[J]. 公路工程, 2015, 40(5): 161-164.
- [13] 韩继成. 聚氨酯(PU)改性乳化沥青制备及性能研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2017.
- [14] 王志祥,何创,李建阁. SBS-SBR复合改性乳化沥青混合料耐久性研究[J]. 石油沥青, 2015, 29(2): 19-24.
- [15] 郑洋,罗旭东,侯伟建,等. 乳化沥青改性高强砂浆性能研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(5): 53-57.
- [16] 顾建军,虞将苗,杨震,等. 基于加速加载试验的湖沥青微表处路用性能研究[J]. 公路, 2017, 62(5): 221-226.

收稿日期: 2021-03-12(修改稿)

作者简介: 徐天良,男,硕士,教授级高工. E-mail: 312727188@qq.com

配合比的设计方法以及混凝土的性能。基于此,该文以三角岩大桥为工程背景,针对工程结构的关键位置设计使用高性能混凝土。结合三角岩大桥高扬程泵送混凝土的优化试验研究,在研发高性能混凝土制备技术的基础上,提出高性能混凝土配合比设计方法,并且采用试验方法以探究粉煤灰对高性能混凝土变形性能的影响。

2 工程概况

三角岩大桥为湖南省高速公路网规划“五纵七横”路网中的第二横——张家界至花垣高速公路上的一座特大桥,跨越峡谷地貌,主桥为(66+3×120+66) m 连续刚构,长 492 m,桥墩为双肢变截面空心薄壁墩,最大墩高 132 m,如图 1 所示。

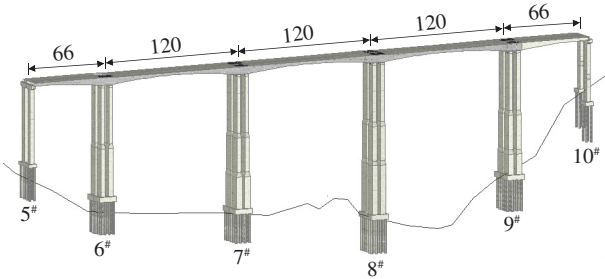


图 1 三角岩大桥立面图(单位:m)

3 箱梁 C55 高性能混凝土配合比设计

3.1 高性能混凝土配合比设计原则及方法

体积稳定性、抗裂性是提高混凝土耐久性的决定性因素,耐久性高的混凝土具有低渗透性、无龟裂性,

具有自愈性等特点。高性能混凝土配合比设计原则如表 1 所示。

表 1 高性能混凝土配合比设计原则	
设计原则	设计要求
低水泥用量	保证混凝土强度的同时减小水泥用量
低用水量	用水要求不大于 165 kg/m ³
最大堆积密度	优化混凝土中集料的级配设计,获取最大堆积密度和最小空隙率
活性掺合料与高效减水剂双掺	
水灰比	适当

对高性能混凝土进行配合比设计时,以混凝土的强度作为设计依据,综合考虑各种因素的影响。合理确定混凝土配合料中水泥,水灰比,外加剂等用量。

3.2 三角岩大桥箱梁 C55 混凝土配合比优化及其力学性能

基于配合比设计原则,以三角岩大桥为工程背景,设计优化了 4 组施工配合比。第 1 组 SG-XL1 没有添加粉煤灰,第 2~4 组 SG-XL2~SG-XL4 分别掺入 9.6%~10.7% 的Ⅱ级粉煤灰。分别对 3、7、28、90 d 混凝土进行物理力学性能、耐久性对比试验。C55 混凝土配合比如表 2 所示。

试验测试结果如表 3 所示。由表 3 可知:箱梁混凝土 28 d 抗压强度均已达到了 C55,添加粉煤灰的混凝土抗压强度发展更快,和易性也有所改善。因此,添加粉煤灰混凝土弹性模量、耐久性满足连续刚构混凝土与预应力施工要求,具有良好的抗碳化、抗渗和抗氯离子渗透能力,能够适应山区潮湿的环境要求。

表 2 箱梁 C55 混凝土配合比设计

编号	混凝土配合比/(kg·m ⁻³)						外加剂
	W/(C+F)	水泥(C)	细集料(S)	粗集料(G)	水(W)	粉煤灰(F)	
SG-XL1	0.36	428	710	1 158	154	0	6.42
SG-XL2	0.33	421	670	1 143	154	48.0	7.04
SG-XL3	0.31	447	658	1 125	154	51.0	7.47
SG-XL4	0.30	462	651	1 115	154	52.5	7.72

表 3 箱梁混凝土工作性能和抗压强度

编号	坍落度/	含气量/	表观密度/	抗压强度/MPa			
	mm	%	(kg·m ⁻³)	3 d	7 d	28 d	90 d
SG-XL1	200	2.5	2 450	44.1	49.9	57.6	65.4
SG-XL2	200	2.1	2 450	45.2	52.2	59.0	67.2

续表 3

编号	坍落度/ mm	含气量/ %	表观密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗压强度/MPa			
				3 d	7 d	28 d	90 d
SG—XL3	200	2.0	2 440	47.2	53.3	61.9	68.8
SG—XL4	200	2.0	2 450	49.4	56.2	66.4	72.5

4 桥用高性能粉煤灰混凝土变形性能

4.1 桥用高性能粉煤灰混凝土的收缩性能

混凝土的收缩是诱发混凝土开裂的重要原因,混凝土开裂严重影响混凝土的耐久性与桥梁的使用寿命。高性能粉煤灰混凝土收缩规律如图 2 所示。

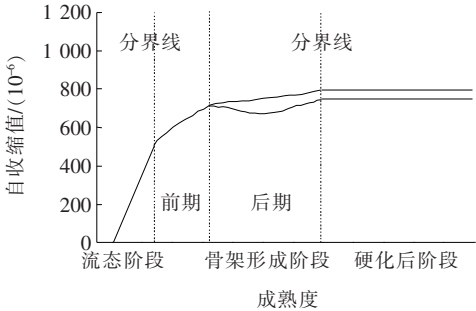


图 2 高性能混凝土自缩规律

由图 2 可以看出:从初凝至初始反应期的 2~4 h

内,早龄期混凝土的自收缩发展较迅速,高性能混凝土的自收缩值与养护时间呈线性关系。但是,随着混凝土的终凝,在硬化后阶段,混凝土自收缩值渐渐稳定,主要原因是结构强度增加,抵抗变形的能力增强。

混凝土收缩初期的收缩变形对结构的影响可以忽略,但是在结构成形后的收缩后期,收缩变形主要是以结构的缝隙来体现,这种变形对结构影响很大。

在混凝土中掺入粉煤灰,主要通过影响水泥的水化反应来调节结构的自干缩。一般而言,粉煤灰的反应机理是通过与水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进行反应,结构的反应活性与速度都很慢。因此,由水化反应产生的收缩也相对较慢,但是由于后期混凝土强度的提高,结构的收缩变形也会随之减小。

4.2 桥用高性能粉煤灰混凝土的徐变性能

针对同一强度等级 C55 混凝土,分别对每组箱梁试验试块采用不同的粉煤灰掺量,掺量百分比分别为 0、12%、10%、18%。试验工况如表 4 所示。

表 4 徐变试验混凝土配合比

组别	粉煤灰 掺量/%	配合比/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)						砂率/ %
		C	F	S	G	W	外加剂	
C55F0	0	480	0	678	1 106	154	12.0	38
C55F12	12	432	58	650	1 107	152	12.3	37
C55F10	10	458	50	662	1 087	150	12.7	38
C55F18	18	430	94	636	1 080	147	13.1	37

采用 GB/T 50082—2009 试验方法^[13],观测 4 组试块的徐变。

试验步骤:在标准养护室养护 7 d 后,对成型后的混凝土试件进行徐变测试^[14]。徐变应力取试块设计抗压强度的 40%,加载之前,需要对试块进行预压对中,对中完成后,试块加载到徐变应力,测量收缩应变值,同时设置不加载试块的对比试验。试验结果如表 5 所示。

由表 5 可知:高性能混凝土的徐变在混凝土初凝起始时间至 7 d 内,徐变发展很快,随着养护时间加长,发展趋于缓慢,到了 180 d,徐变发展平稳。掺入粉

煤灰的高性能混凝土徐变值明显低于没有掺入粉煤灰的高性能混凝土,主要原因是因为粉煤灰细化了混凝土毛细孔,改善了混凝土的内部结构,提高了结构的密实性,相应地提高了混凝土的后期强度^[15];在用水量一定时,随着混凝土强度等级的提高,胶凝材料用量增加,集料特别是粗骨料用量减少,混凝土的徐变值增大。

5 结论

结合三角岩大桥高扬程泵送混凝土的优化试验研

表 5 高性能混凝土徐变测试结果统计

龄期/ d	徐变 $C_t/(10^{-6} \cdot \text{MPa}^{-1})$				徐变系数 φ_{ct}			
	C55F0	C55F12	C55F10	C55F18	C55F0	C55F12	C55F10	C55F18
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	10.376	13.929	9.767	8.418	0.345	0.410	0.265	0.258
3	17.108	17.268	20.531	10.713	0.568	0.515	0.513	0.328
7	21.520	19.514	26.886	14.131	0.704	0.589	0.710	0.431
14	29.523	24.850	33.558	18.204	0.978	0.746	0.911	0.554
28	33.675	28.868	40.960	22.776	1.113	0.872	1.111	0.692
45	36.446	30.103	47.574	27.639	1.202	0.907	1.291	0.839
60	39.367	31.656	50.099	29.745	1.294	0.952	1.359	0.902
90	41.676	34.131	52.687	32.216	1.373	1.026	1.429	0.981
180	44.406	33.194	54.429	33.663	1.465	0.998	1.473	1.021
360	45.550	38.486	56.516	33.074	1.503	1.154	1.531	1.005

究,从原材料优选、混凝土配合比设计、混凝土的物理力学性能到变形性能方面,对高性能混凝土进行了全面系统的试验对比研究,得到以下结论:

- (1) 添加粉煤灰的混凝土抗压强度发展更快,和易性也有所改善。
- (2) 水胶比低,强度高,胶凝材料用量多的箱梁混凝土的早期自收缩明显要高于胶凝材料用量少的配合比混凝土;增加粉煤灰的掺量,可明显降低早龄期混凝土的自收缩。
- (3) 高性能混凝土中掺入粉煤灰,改善了混凝土内部结构,可提高其后期强度,徐变也明显减小。
- (4) 在用水量一定时,随着混凝土强度等级的提高,胶凝材料用量增加,集料特别是粗骨料用量减少,混凝土的徐变值增大。

参考文献:

[1] 黄士元. 高性能混凝土发展的回顾与思考[J]. 混凝土, 2003(7):3-9.

[2] 冷发光,冯乃谦. 高性能混凝土渗透性和耐久性评价方法研究[J]. 低温建筑技术,2000(4):14-16.

[3] 刘晓东,李固华. 混凝土渗透性和耐久性关系研究[J]. 四川建筑科学研究,2000,35(6):220-222.

[4] 王彦刚. 探讨混凝土结构耐久性 & 高性能混凝土的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版),2016,6(8).

[5] 万超,曾志兴. 基于耐久性的高性能混凝土配合比设计方法[J]. 建筑科技,2009,25(5):77-80.

[6] 刘辉. 高掺量粉煤灰对高性能混凝土体积稳定性及耐久性的影响[J]. 铁道建筑,2010(5):24-27.

[7] 赵海霞,杨国林. 浅析混凝土结构耐久性 & 高性能混凝土的应用[J]. 建筑与装饰,2010(38):80-81.

[8] 王斐峰,邓学钧,秦鸿根. 桥用高性能混凝土长期耐久性试验研究[J]. 公路交通科技,2005,22(3):82-85.

[9] 吴伟明. 泵送混凝土约束收缩开裂性能评价试验研究[D]. 河海大学硕士学位论文,2006.

[10] 赵聪,魏金梅. II 级粉煤灰在高性能混凝土中应用的初步探索[J]. 公路,2019,64(9):117-119

[11] 米哲. 高速铁路桥梁高性能混凝土配合比设计[J]. 铁道建筑技术,2014(S1):84-86.

[12] 张剑峰,王运金,唐凯,等. 九江长江公路大桥超宽箱梁 C55 粉煤灰高性能混凝土配合比设计[J]. 中国港湾建设,2012(3):57-60.

[13] GB/T 50082-2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S].

[14] 查进. 超大跨径混合梁斜拉桥宽箱梁高性能混凝土防裂技术与耐久性研究[D]. 武汉理工大学博士学位论文,2008.

[15] 王发洲. 高性能轻集料混凝土研究 & 应用[D]. 武汉理工大学博士学位论文,2003.