

不同胶凝材料掺配对混凝土性能的影响

杨俊峰, 刘江波

(中交一航局第二工程有限公司)

摘要: 在桥梁结构建设中,为解决 C55 混凝土在南方高温气候条件下早期水化热大,抗裂性能差,前期强度上升速度快等问题,依托范家湾桥主桥工程对 C55 混凝土进行研究。通过在混凝土中掺入适量的矿渣粉和粉煤灰等胶凝材料,得知在一定水泥用量范围内,采用一定比例的矿渣粉和粉煤灰混合材料,可以减缓混凝土前期温度上升速度,降低水化热,降低混凝土前期强度。粉煤灰的使用可以使混凝土的温升速度和早期强度增长速度变慢,抗裂性和经济性均得到提高,研究成果可为类似工程施工提供参考。

关键词: 抗裂性; 上升速度; 降低水化热; 温升速度; 早期强度

现浇变截面连续梁作为桥梁主要的受力结构,结构设计混凝土等级为 C55,混凝土中的水泥材料为活性效率更快的 P. II 52.5 水泥。C55 混凝土中掺入适量矿渣粉和粉煤灰,以充分发挥 P. II 52.5 水泥的强度活性效果,同时减缓混凝土早期强度的上升速度,降低混凝土早期的水化热,提高混凝土的耐久性,使其可塑性、延展性、抗裂性^[1]等方面都有明显的提高。本文结合范家湾桥悬臂连续梁挂篮施工实践,阐述了不同胶凝材料掺配对 C55 混凝土性能的影响,并择优选择悬臂现浇连续梁 C55 混凝土配合比。

1 工程概况

范家湾桥主桥为现浇变截面连续梁,桥梁中

心桩号为 K21+765,全长 702.04 m,跨径布置为 5×25 m+4×25 m+(60+100+60) m+5×25 m+5×25 m,其中第3联为变截面混凝土连续箱梁(悬臂现浇法施工)。第11孔跨越京杭运河Ⅲ级航道,路线前进方向与航道的右夹角为 78°,通航净空为 60 m×7 m。主桥上部结构设计为单箱单室形式,共 110 块,混凝土设计等级为 C55 的现浇预应力混凝土变截面连续箱梁,单个 0 号块方量 357.2 m³,主桥连续梁总方量 71 64.8 m³。C55 混凝土设计配合比中的砂率 39%,水胶比 W/B=0.32,外加剂掺量 1.7%,坍落度 200 mm,密度 2 460 kg/m³,7 d 抗压强度 58.2 MPa,28 d 抗压强度 67.9 MPa,混凝土设计配合比用量如表 1 所示。

表 1 C55 混凝土设计配合比用量表

材料名称	水泥	砂	碎石	矿渣粉	减水剂	水
规格型号	P. II 52.5	中砂	5~25 mm	S95	—	自来水
用量/(kg·m ⁻³)	380	655	1 042	110	8.33	155

2 C55 混凝土配合比技术研究

在南方夏季高温天气下,通过反复调整 C55 混凝土中水泥、矿渣粉、粉煤灰的掺配比例,并分组进行对比试验,在保证混凝土配合比中水胶比一定范围的前提下,检测不同掺合料下的混凝土性能。将制成的混凝土试块采用同等条件进行养护,并进行抗压强度检测,检测胶凝材料掺合比例不同条件下混凝土的强度。在范家湾桥变截面连续梁挂篮节段施工工况下分 2 步进行研究,首先由试验室对初步拌和比例进行评估,其次对

浇筑后的实体结构进行性能验证,为后续连续梁悬臂块体混凝土施工提供有利的试验参数^[2],为现浇连续梁 C55 混凝土配合比的推广提供参考依据。

3 关键材料性能研究

3.1 原材料检测

C55 混凝土配合比原材料主要包括:水泥、矿渣粉、粉煤灰、减水剂、碎石、天然砂和水,试验室对各种进厂原料按要求进行取样并检测。

1) 水泥

采用安徽海螺股份有限公司生产的 P. II 52.5

硅酸盐水泥。经检测,水泥的化学性能指标为:不溶物含量 0.95%,烧失量 1.68%,三氧化硫含量 2.17%,氧化镁含量 1.36%,氯离子含量 0.024%。水泥的物理性能指标为:密度 $3\,110\text{ kg/m}^3$,比表面积 $3\,520\text{ cm}^2/\text{g}$,标准稠度用水量 26%,初凝时间 132 min,终凝时间 205 min,3 d 抗折强度 5.2 MPa,28 d 抗折强度 7.1 MPa;3 d 抗压强度 35.8 MPa,28 d 抗压强度 55.3 MPa,主要指标满足 GB 175—2023《通用硅酸盐水泥》的技术标准要求。

2) 矿渣粉

采用湖州南浔兴云建材有限公司生产的矿渣粉。规格为 S95,经检测,矿渣粉的密度为 $2\,840\text{ kg/m}^3$,比表面积 $410\text{ m}^2/\text{kg}$,含水量 0.2%,7 d 活性指数 84%,28 d 活性指数 99%,流动比 100%,主要指标满足 GB/T 18046—2017《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》的技术标准要求。

3) 粉煤灰

采用长兴天达环保建材有限公司生产的粉煤灰。规格为 F 类 I 级。经检测,粉煤灰的化学成分二氧化硅含量 61.23%;三氧化二铝含量 19.86%,三氧化二铁含量 7.91%,氧化钙含量 4.24%,氧化镁含量 4.10%,烧失量为 2.29%,需水量比 92%,含水量 0.6%,0.045 mm 方孔筛筛余量 10.0%,主要指标满足 GB/T 1596—2017《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》中 F 类 I 级的技术要求。

4) 外加剂

采用湖州绿色新材股份有限公司生产的外加剂。规格为 LJ 聚羧酸高性能减水剂。经检测,外加剂的减水率 28.4%,初凝时间差 +55 min,终凝时间差 +55 min,泌水率比为 12%,主要指标均满足 GB 8076—2008《混凝土外加剂》技术要求。

5) 粗集料

采用湖州通元石料有限公司生产的粗集料。粒径为 5~25 mm,满足连续级配要求。经检测,碎石的表观密度为 $2\,713\text{ kg/m}^3$,含泥量 0.2%,泥块含量 0%,吸水率 1.18%,压碎值 6.2%,针片状颗粒含量 5.4%,主要指标满足 JTG/T 3650—2020《公路桥涵施工技术规范》技术要求。

6) 细集料

采用天然砂,产地为洞庭湖。经检测,天然砂细度模数为 2.60,含泥量 1.7%,泥块含量 0.6%,堆积密度 $1\,490\text{ kg/m}^3$,氯离子含量 0%,主

要指标均满足《公路桥涵施工技术规范》的技术标准要求。

7) 水

采用湖州地下水。经检测,拌和用水的不溶物含量 254 mg/L,可溶物含量 386 mg/L,pH 值 6.82,氯化物含量 95 mg/L,主要指标满足《公路桥涵施工技术规范》技术要求。

3.2 粉煤灰特征和作用原理

1) 特征

粉煤灰玻璃状颗粒主要分为微珠、葡萄珠、碳粒、碎屑 4 种状态,是在高温煅烧条件下形成的。其中微珠表面光滑、细小,呈圆形;碳粒燃烧不充分,表面有孔;碎屑的比例较少。粉煤灰中主要为粗矿和玻璃碎屑。在混凝土中掺入粉煤灰,可节约大量水泥和集料,减少用水量,改善混凝土的拌和性能,增强混凝土的可泵性,使混凝土的徐变变小,混凝土的结构得到改善。粉煤灰的掺入可以降低混凝土的水化热和热膨胀性,改善防渗性能,提升修饰作用。

2) 作用原理

粉煤灰^[2]中含有丰富的活性物质,如硅酸、铝酸、氧化铁等,能与水中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生化学反应,生成硅酸钙、铝酸钙胶状物质。对混凝土内部孔隙进行填充,有助于增强混凝土的密实性和防渗性,减少氯离子和二氧化碳等物质对混凝土的侵蚀,对混凝土碱骨料反应起到一定的阻滞作用,对其长期松散化过程起到延缓作用。粉煤灰的主要矿物成分是外表光滑、粒度细致、质地致密、内表面积小、对水吸附力小的玻璃体,能在自流的砂浆中制造出滚珠效应。因此,添加粉煤灰能降低混凝土配制时所需的水量,降低水灰比同时提高流动性,使混凝土在早期干燥时收缩减少,从而使混凝土的密实性得到有效增加。此外,粉煤灰还具有填充作用,能将水泥颗粒间的空隙均匀地分布在粉煤灰中,使胶凝材料的级配得到改善,水泥胶体的密实度也得到提高。

4 方案实施和性能检测

4.1 方案实施

参考现浇变截面挂篮连续梁^[3]每 m^3 C55 混凝土用量参数表,在确保水胶比一定范围内,在每 m^3 混凝土配合比中,水泥含量分别为 380 kg/m^3 、 390 kg/m^3 、 400 kg/m^3 ,胶凝材料中分别对应单独掺入矿渣粉 70 kg/m^3 、 80 kg/m^3 、 90 kg/m^3 、 100 kg/m^3 ,

调整水泥、矿渣粉主要胶凝材料的掺合料用量，适当调整砂率，确保混凝土工作性能良好，在混凝土拌合站试验室成型相应试件，检测坍落度为200~220 mm，黏聚性良好。为提高混凝土抗裂性，优化配合比设计，择优选择配合比中水泥和矿渣粉用量，检测数据如表 2 所示。

表 2 单掺模式下混凝土强度增长统计表

水泥/ (kg·m ⁻³)	矿渣粉/ (kg·m ⁻³)	粉煤灰/ (kg·m ⁻³)	3 d 抗压强度/ MPa	5 d 抗压强度/ MPa	7 d 抗压强度/ MPa	10 d 抗压强度/ MPa	14 d 抗压强度/ MPa	28 d 抗压强度/ MPa
380	70	0	38.3	41.0	44.2	48.1	52.3	58.2
380	80	0	44.2	51.0	55.3	58.1	62.6	67.1
380	90	0	45.2	52.9	55.8	58.6	62.7	68.4
380	100	0	53.2	54.0	57.6	59.3	64.1	68.5
390	70	0	37.5	44.7	51.9	55.7	60.2	64.9
390	80	0	39.6	45.6	55.2	59.7	64.4	67.3
390	90	0	41.9	51.3	56.2	60.2	65.1	68.4
390	100	0	45.2	58.8	59.6	63.8	65.3	69.2
400	70	0	48.5	54.8	58.1	62.6	65.1	69.6
400	80	0	50.6	57.1	58.4	63.1	65.2	69.9
400	90	0	53.5	59.6	61.7	64.1	67.4	71.5
400	100	0	53.9	59.9	61.8	66.2	67.9	71.8

由表 2 分析可知，在水泥用量不变的情况下，增加矿渣粉掺量，可提高混凝土的早期强度。

在水胶比为 $W/B=0.32$ 不变的情况下，水泥用量为 380 kg/m^3 ，同时采用矿渣粉和粉煤灰双掺模式，通过分组对比不同掺配比例下混凝土早期强度上升速度和最终强度。混凝土坍落度控制在 200 mm 左右，外加剂掺量 1.7% ，检测数据如表 3 所示。

表 3 双掺模式下混凝土强度增长统计表

水泥/ (kg·m ⁻³)	矿渣粉/ (kg·m ⁻³)	粉煤灰/ (kg·m ⁻³)	3 d 抗压强度/ MPa	5 d 抗压强度/ MPa	7 d 抗压强度/ MPa	10 d 抗压强度/ MPa	14 d 抗压强度/ MPa	28 d 抗压强度/ MPa
380	60	50	38.6	46.5	49.8	53.6	58.1	62.6
380	70	40	39.7	48.9	51.3	54.5	59.1	65.3
380	80	30	39.9	52.8	58.9	63.9	67.3	70.1
380	90	20	48.7	53.5	61.1	64.4	67.8	70.5
380	100	10	49.5	53.9	63.1	64.6	68.1	71.4

水泥用量为 380 kg/m^3 不变，矿渣粉和粉煤灰总掺合料为 110 kg/m^3 情况下，通过不同掺配比例下的对比试验分析可知，在混凝土配合比中，当每 m^3 混凝土中采用水泥 380 kg/mm^3 、矿渣粉 80 kg/mm^3 、粉煤灰 30 kg/mm^3 时，混凝土前期强度上升缓慢，水化热小，且有利于减少混凝土表面裂缝。其中，混凝土 3 d 抗压强度可达设计强度(55 MPa)的 73% ，5 d 抗压强度可达设计强度(55 MPa)的 96% ，7 d 抗压强度可达设计强度(55 MPa)的 107% ，28 d 抗压强度可达设计强度(55 MPa)的 127% 。择优调整一定比例的粉煤灰和矿渣粉掺合料，使混凝土早期强度上升速度减慢，抗裂性提高，最终强度良好。其中，粉煤灰起到降低温升、减少收缩的作用，最终使混凝土内部结构更加密实，结构性能得到显著改善。

4.2 构件性能检测

根据前期试验室拌和试验结果，调整后的 C55 混凝土配合比中的砂率为 39% ，水胶比 $W/B=0.32$ ，外加剂掺量 1.7% ，浇筑用混凝土每 m^3 用量及浇筑后的实体结构性能参数如表 4、表 5 所示。

表 4 C55 混凝土每m³用量表

材料名称	水泥	砂	碎石	粉煤灰	矿渣粉	减水剂	水
规格型号	P.Ⅱ 52.5	中砂	5~25 mm	F 类Ⅰ级	S95	—	自来水
用量/(kg·m ⁻³)	380	655	1 042	30	80	8.33	158

表 5 C55 混凝土性能参数表

性能参数	坍落度/mm	实测密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 d 抗压 强度/MPa	28 d 抗压 强度/MPa
检测数据	200	2 450	58.9	70.1

5 掺入粉煤灰的优点

高标号混凝土的前期强度提高较快,水化热增加,但混凝土的流动性变差,抗裂性能下降。对现浇连续梁 C55 混凝土进行了研究,发现在混凝土中掺入适量的粉煤灰,混凝土开裂性能得到改善。粉煤灰在混凝土未硬化前,其自身结构中的玻璃珠在混凝土中产生滚珠效应,充盈了骨料间的空隙,提高了黏结性,因而使混凝土更黏稠,使用也更简便。在混凝土中,粉煤灰能对细骨料中的石屑含量起到补偿作用,同时还能阻隔渗水通道,抑制混凝土泌水。掺入粉煤灰后,混凝土的抗压强度在 3 d、5 d、7 d、10 d、14 d、28 d 上升速率减缓。高标号混凝土在早期水化时热量释放较大,加上适量的粉煤灰,尤其是在高温环境下施工时,能有效减缓水化反应速度,效果更为显著。掺入一定比例的粉煤灰,有助于抑制碱性骨料反应,降低混凝土的干缩率,进而改善结构的抗冰冻融性,提高结构整体耐久性。在混凝土中掺入适量粉煤灰,增强了胶凝材料含量,增大整体材料的密实度,能够提高混凝土结构的后期强度。

6 工程质量和经济效益

6.1 工程质量

在保证水胶比基本稳定前提下,采用一定比例的矿渣粉和粉煤灰作为双胶凝材料,新拌混凝土具有更好的流动性及和易性,内部更密实,减少了孔隙,提高了工作性能,同时使混凝土的水化热降低、早期强度上升速率减缓,混凝土后期

强度良好,耐久性提高的同时混凝土的抗裂性明显增强。

6.2 经济效益

在混凝土原设计配合比中的水泥用量为 380 kg/m^3 ,矿渣粉用量为 110 kg/m^3 ,通过不同材料的配合比优化试验,优化后的混凝土配合比中水泥用量为 380 kg/m^3 ,矿渣粉用量为 80 kg/m^3 ,粉煤灰用量为 30 kg/m^3 。

每 m^3 混凝土中,采用 30 kg 粉煤灰替代 30 kg 矿渣粉,根据目前湖州市信息价中粉煤灰 120 元/t,矿渣粉 245 元/t,则每 m^3 混凝土节省费用为 3.75 元,本项目主桥连续梁总方量为 $7\,164.8 \text{ m}^3$,共节省金额为 26 868 元。

7 结语

范家湾主桥变截面箱梁施工过程中,通过优化 C55 混凝土配合比,采用一定比例的矿渣粉和粉煤灰作为双掺胶凝材料,充分发挥粉煤灰降低水化热、提高抗渗性、增强后期强度的补充作用。将矿渣粉和粉煤灰混合在胶凝材料中,大大降低了矿渣粉在混凝土中的比重和用量,节约了成本,粉煤灰混合在混凝土中,实现了工业废渣的二次利用,减缓了混凝土的前期强度,降低了水化热,改善和易性,增强了混凝土后期强度、耐久性,提高了混凝土的抗裂性和整体性能,使混凝土的综合性能更有利于环保,因此该项目的成功实施也带来了较好的经济效益和环境效益,可为类似工程施工提供参考。

参考文献:

- [1] 赵顺增,刘立.混凝土膨胀剂及其裂渗控制技术[C]//第五届全国混凝土膨胀剂学术交流会论文集.北京:中国建材工业出版社,2010.
- [2] 魏洪钢,臧斌浩,张睿,等.粉煤灰混凝土早龄期抗裂性能分析[J].浙江建筑.2019,36(6):40-44.
- [3] JTG/TF 50—2011,公路桥涵施工技术规范[S].