工程与管理科学
Engineering and Management Science
第 8 卷◆第 9 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

高性能混凝土在横钦高速郁江特大桥上的应用

陈志远[1] 戈文武[2] 崔培强[1] 梁叶云[1] 王军[2]
1.葛洲坝集团交通投资有限公司 湖北武汉 430030；2.广西横钦高速公路有限公司 广西钦州 535017
DOI：10.32629/ems.v8i9.22159

[摘 要] 本文介绍了一次高性能混凝土在高速公路特大桥钢混结合段的成功应用实践，所用高性能混凝土水胶比低至 0.22，加入粉煤灰微珠、硅灰和膨胀剂，双掺钢纤维和有机高纤维，扩展度超过 600mm，抗压强度大于 80MPa，抗裂性能优异，拌和生产采用小用量材料预先计量的方式，保证了配料精准，搅拌车运输，吊罐入仓，小振动棒适当振捣，浇筑顺畅，实体密实，表面平整，无裂缝，值得同类工程借鉴。

[关键词] 钢混结合段；高性能混凝土；高纤维掺量；预先计量；无裂缝。

1 背景

为满足公路桥梁特殊结构需求，在其关键部位可以采用高性能混凝土，比如斜拉桥的钢箱梁和混凝土梁结合段。这种钢混结合段一方面由于受力复杂，使用普通混凝土容易开裂；另一方面，混凝土拌和物工作性如果没有针对性的设计，在结合段钢筋、栓钉和开孔板密布的位置，浇筑密实性不易保证；还有一个不容忽视的方面是高性能混凝土的现场生产质量，需要依据拌和系统、原材料和运距等因素采取必要的措施才能得到保证。

2 工程概况

位于广西壮族自治区中东部的横钦高速上的郁江特大桥，就设置有钢混结合段。其主桥结构形式为双塔混合梁斜拉桥，主跨 580m，跨径为(4×50+580+4×50)m，中跨主梁为钢箱梁，边跨主梁为预应力混凝土箱梁，钢混结合面在中跨侧，距离塔中心线 18m。

钢箱梁与混凝土箱梁通过钢混结合段连接，结合段贯穿预应力钢束，使二者结合紧密。钢混结合段中的钢箱梁段为多格室结构，格室腹板上设置 PBL 剪力键，格室内填充混凝土，长度 2m，由剪力键、钢板与混凝土的摩擦力传递轴力、剪力和弯矩。钢格室高度为 800mm，选择此高度主要考虑因素为：填充混凝土应力分散所需的必要面积、格室内进行焊接的空间、预应力钢筋张拉及锚固作业空间、填充混凝土施工的方便性及构件加工制作可行性等因素。

钢混结合段一侧连接带 T 型加劲 U 肋的钢箱梁加强段，长 3.2m，另一侧连接高性能混凝土箱梁段，长约 3.5m，高性能混凝土箱梁另一侧则与既有混凝土箱梁连接。钢混结合段和高性能混凝土箱梁段的混凝土同仓浇筑。。

钢混结合段利用组合结构技术实现了钢梁和混凝土梁之间的结构过渡和荷载传递，受力状态复杂，容易开裂，且仓位结构复杂，配筋率高，构件间缝隙狭小，故在此部位浇筑高性能混凝土。

采用的高性能混凝土要求有较高的强度、抗裂性和流动性。

3 高性能混凝土设计指标

混凝土硬化性能要求：抗压强度[1]≥80MPa，弹性模量≥37GPa；

拌和物性能要求：扩展度≥600mm，间隙通过率等级为 PA1[2]，离析率≤15%。

4 高性能混凝土原材料

1）水泥：P.II 52.5 水泥[3]，密度为 3160kg/m^3,比表面积为 340m^2/kg。

2）粉煤灰：粉煤灰玻璃微珠，烧失量≤3%，需水量比≤100%，28 天活性指数[4]≥110%。

3）硅灰：7d 活性指数不小于 105%，需水量比 102%，比表面积为 18300 m^2/kg。

4）膨胀剂：钙镁复合Ⅱ型膨胀剂[5]。

5）减水剂：聚羧酸高效减水剂，减水率不低于 30%[6]，兼具保坍、减缩和抑制泌水复合功能。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

6）调粘增强剂：45μm 筛余＜10%，流动度比≥95%，28d 活性指数≥105%。

7）钢纤维：波浪压痕形多锚固点钢纤维，公称长度 25~30mm，弹性模量 200~220GPa[7]，断裂强度≥700MPa，断裂延伸率≥10%。

8）有机纤维：纤维长度 10~12mm，弹性模量＞6GPa[8]，断裂强度≥500MPa。

9）河砂：细度模数 2.8~3.0，含泥量小于 1.0%，泥块含量为 0[9]。

10）碎石：辉绿岩，最大粒径 10mm，含泥量小于 0.5%，泥块含量为 0，针片状含量 6%~7%，吸水率小于 1%，压碎值小于 13%[10]。

5 高性能混凝土配合比

主要配合比参数：水胶比 0.22，砂率 46%，胶凝材料用量 660kg/m^3，粉煤灰掺量 16%，硅灰掺量 8%，膨胀剂掺量 6%，有机纤维用量 1kg/m^3，钢纤维用量 40kg/m^3，调粘增强剂掺量 2%。高性能混凝土每方材料用量见表 1。混凝土性能室内测试结果见表 2。

表 1　高性能混凝土每方材料用量表　单位：kg/m^3

材料种类	水泥	粉煤灰	硅灰	膨胀剂	调粘增强剂	钢纤维	有机纤维	河砂	碎石	减水剂	水
用量	462	99	52.8	39.6	13.2	40	1.0	732	859	11.22	145

表 2　混凝土性能室内测试结果表

性能指标	扩展度/mm	容重/kg/m^3	1d 抗压强度/MPa	7d 抗压强度/MPa	28d 抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	离析率/%	间隙通过等级
测试结果	650	2546	35.2	82.2	93.7	38.6	7.6	PA1

在上述胶凝材料体系中，硅灰为无定形二氧化硅，属于高活性的火山灰质掺合料，可以与水泥水化反应产物 $Ca(OH)_2$ 发生第二次水化反应，生成 C-S-H 凝胶体，增强基体与纤维的界面粘结性能，提升强度，此外，硅灰颗粒很小，可以很好地填充水泥颗粒之间的间隙，从而优化水泥基材料的孔隙结构，提高基体密实度。粉煤灰玻璃微珠的水化活性高，需水量少，再加上粉煤灰玻璃微珠呈球形的玻璃珠状态，其“滚珠”效应可改善混凝土的流动性能。

在水泥基体中加入钢纤维和有机纤维用以提高混凝土的延展性和韧性。此种混凝土出色的延性，使其在受到外部应力作用时，能够保持强度和形状，在受到拉伸和压缩等多种应力条件下具有可塑性，从而使其在地震和其他外力冲击下，可以为桥梁提供更大的安全性和耐久性。

膨胀剂的补偿收缩作用提升了混凝土的体积稳定性。减水剂和调粘增强剂的加入，使水胶比在低至 0.22 的状况下，拌和物仍具有较好的流动性和通过性。

6 高性能混凝土模拟浇筑

6.1 模拟浇筑准备

为保证实体浇筑质量，检验浇筑方案的可行性，暴露浇筑过程中会出现的异常，预先进行了高性能混凝土模拟浇筑。

模拟浇筑仓位为 2 个钢制试模，壁厚 1mm，近似立方体，单个容量 1m^3，前后内壁焊接短钢筋，长约 10cm，模拟实体仓位中的栓钉，上盖设置 1 个腰形孔作为进料通道和振捣窗口，尺寸约为 30×60cm，上表面对角各焊接 1 个吊环，便于移动。

由于配制高性能混凝土的原材料种类较多，共 11 种，受拌和系统既有配料设施限制，其中的粉煤灰、硅灰、膨胀剂、调粘增强剂、钢纤维和有机纤维 6 种材料计划采用人工计量，人工辅助上料，水泥、河砂、碎石和减水剂计划采用系统自动计量和自动上料。

计划每盘生产 1m^3 混凝土，拌和时间定为 180s，人工辅助计量的材料通过带漏斗的钢制溜槽滑到上料皮带，再由皮带送入拌和机，每盘总量约 240kg，需要工人实施称量、装袋、搬运、倾倒和推送等操作。

6.2 拌和、浇筑和检验

为便于测试和观察，模拟浇筑试模放置在工地试验室门口，距离拌和系统数十米。按计划进行混凝土拌和，每盘混凝土实际用水量与理论用量相同。通过搅拌车转运混凝土拌和物，直接放料进入试模，流动顺畅。一个试模浇筑时完全靠自流填充，不振捣，另一个试模浇筑时稍加振捣。适当超

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

高浇筑，以使混凝土充填密实。

第二天混凝土完全硬化，割开上盖和一侧壁板，观察发现，混凝土侧面表观质量较好，上表面有浮浆，不平整，混凝土未填满至上盖。振捣工况与未振捣工况相比，表观质量差别不大。

在 2 个试模顶面架设钻芯机，分别抽取模拟浇筑的混凝土芯样。对芯样表面观察发现：芯样密实，气孔较少，仅有少量纤维聚集，2 种工况的芯样无明显差异。对芯样进行抗压强度和弹性模量测试，2 种工况结果相近，满足质量要求。

6.3 出现的问题和解决措施

通过模拟浇筑发现，混凝土原材料、配合比、运输和入仓方式应用到实体浇筑具有可行性。同时也发现，6 种小用量材料采用的人工上料方式存在问题：一个实体仓位浇筑方量约 250m^3，总浇筑时长超过 20h，每盘中 6 种需要人工操作的材料，其总质量约 240kg，工人要完成称量、转运、倾倒和推送一系列动作，即使实行“三班”工作制，每班 3 个工人，连续工作 8 小时，其体力也难以维继，极易出现材料遗漏、称量错误等质量问题。另外，由于劳动强度大，上料速度越来越慢，在实体浇筑时待料时间逐渐拉长，还会出现施工冷缝类的质量缺陷。

为此，提出解决方案：1）购买一批大编织袋，自带起吊环，单个编织袋的容积应能容纳一盘混凝土中的 6 种小用量材料。2）在浇筑前 2 天内，将每盘混凝土需要的小用量材料按配料单称重，装入 1 个个编织袋中。装料时，将其中的 2 种纤维材料用人工撒开，并与其它 4 种材料一同翻拌。3）上料时用装载机挑起装有材料的编织袋，转移到漏斗上方，人工用刀子划开编织袋底部，使材料自行卸出，进入溜槽，再辅以人工向下推送，材料即滑到砂、石传送带上，被送入拌和机。

这一方案的益处在于：1）工人称量、装袋的繁重劳动在混凝土拌和前进行，时间充裕，材料计量会更认真，拌和时由装载机转运材料，工人只需割开袋子，在溜槽上推送材料，体力消耗少，混凝土生产速度和质量都能得以保障。2）由于混凝土中掺入了 2 种纤维，每方混凝土中的钢纤维用量 40kg，有机纤维用量 1kg，拌和时容易成团，采用这种预先处理的方式，就能够人工将纤维撒开，并翻拌混入粉煤灰、硅灰、膨胀剂、调粘增强剂这些粉料中，使 6 种材料预先混合，增加纤维的分散均匀程度。

7 结合段实体浇筑

郁江特大桥南北岸 2 处钢混结合段分别于 2025 年 2、3 月份浇筑完成，每处各浇筑 C80 砼约 260m^3。

7.1 预处理小用量材料

实体浇筑过程中的混凝土生产按既定方案实施了小用量材料预计量、预装袋和预拌和。实际使用的编织袋为容积 1m^3 的吨袋，细如发丝的有机纤维放入 10mm 孔径的筛中，再手摇撒布在粉料上，分散效果较好，投入了 1 台装载机进行材料吊装转运。工人操作轻松，材料计量准确。预计拌和效率为 2 台拌和机组共计 15m^3/h，实际为 1 台机组 12m^3/h，生产效率大幅提高，混凝土质量控制稳定，供料顺畅，满足浇筑进料需求。

7.2 适度振捣高流态拌和物

混凝土拌和时，各种材料用量除按河砂含水率变化调整用水量外，其它材料用量与设计配合比一致，生产稳定。抽查仓位处的拌和物扩展度为 690mm，在预先设定的 650~700mm 控制范围内。现场采用吊罐、漏斗加软导管入仓，观察到混凝土粘聚性较好，无离析，流动性强，可自流密实。但因钢混结合段配筋率高，钢箱梁内结构复杂，为使混凝土能够充分填充仓内空间，混凝土入仓后仍采用小型振动棒适度振捣。这种小型振捣装置，直径较小，可以伸入钢筋间隙作业，激振力不大，既能满足气泡排出的需要，又能避免大功率振捣引起的集料和纤维下沉。

8 混凝土性能检测结果

在施工过程中，对南北岸两处钢混结合段浇筑的高性能混凝土进行了抽样检测，其中拌和物扩展度检测结果分别为 690mm、700mm，满足不小于 600mm 的标准要求，标准养护状态下的抗压强度大于 90MPa，同条件养护状态下的抗压强度分别为 96.1MPa、88.9MPa，满足不小于 80MPa 的标准要求，弹性模量分别为 51.8GPa、49.9GPa，满足不小于 37GPa 的标准要求。具体检测结果见表 3。

拆模后，检查人员钻入结合段和高性能混凝土箱梁段内

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

部腔体，肉眼观察混凝土内壁，并通过无人机拍摄混凝土实体两侧面和下表面，发现高性能混凝土表观质量较好，表面平整，气泡少，无裂缝，无露筋。检查混凝土实体的上表面，发现抹面平整，密实。

表 3　钢混结合段高性能混凝土检测结果表

检测项目	检测标准	北岸结合段	南岸结合段
坍落度（mm）	——	270	280
扩展度（mm）	≥600	700	690
抗压强度（MPa）	≥80	92.0；92.9；88.9(同条件养护)	90.9；91.6；96.1(同条件养护)
抗折强度（MPa）	——	13.2	16.3
弹性模量（GPa）	≥37	49.9	51.8
间隙通过性（mm）	≤50	30	20
离析率（%）	≤15	8.7	5.7

9 结束语

高性能混凝土在横钦高速公路郁江特大桥钢混结合段得以成功应用，混凝土浇筑顺利，实体质量满足工程要求。此次应用实践表明：

1）在胶凝材料达到 660kg/m^3 较高用量的前提下，使用掺加膨胀剂、钢纤维和有机纤维的关键措施，能够有效避免混凝土结构物裂缝的产生。

2)采用预计量、预装袋和预混合的方式处理小用量材料，对保证高性能混凝土用料精准、拌和均匀和生产效率提高效果显著。

3)混凝土入仓后用小振动棒适当振捣,有利于气泡排出，能有效保证结构体的密实，不可缺失。

4）由于表面高差、沉降、干缩和浮浆等的作用，结合段高性能混凝土与钢箱梁顶板下表面之间不能紧密贴合，敲击和观察发现存在缝隙，可通过压注高强度、高流动性砂浆将其充填密实。

为更好推动高性能混凝土在桥梁抗裂结合部位的应用，将高性能混凝土中除去水以外的原材料预拌成为干粉料，包装为半成品，在需要时运至现场，加水拌和，不失为一种更能保证质量，省事便捷的方式。

[参考文献]

[1]交通运输部公路科学研究院.公路工程水泥及水泥混凝土试验规程:JTG 3420-2020[S].北京:人民交通出版社,2021:153-156.

[2]住房和城乡建设部.自密实混凝土应用技术规程:JGJ/T283-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012:8.

[3]中华人民共和国工业和信息化部.通用硅酸盐水泥:GB175-2023[S].北京:中国标准出版社,2023:2.

[4]全国水泥标准化技术委员会.用于水泥和混凝土中的粉煤灰:GB/T1596-2017[S].北京:中国标准出版社,2017:10.

[5]全国水泥制品标准化技术委员会.混凝土膨胀剂:GB/T23439-2017[S].北京:中国标准出版社,2017:2.

[6]住房和城乡建设部.聚羧酸系高性能减水剂:JG/T223-2017[S].北京:中国标准出版社,2017:4.

[7]全国钢标准化技术委员会.混凝土用钢纤维:GB/T39147-2020[S].北京:中国标准出版社,2020:8.

[8]全国水泥制品标准化技术委员会.水泥混凝土和砂浆用合成纤维:GB/T21120-2018[S].北京:中国标准出版社,2018:4.

[9]中国建筑材料联合会.建设用砂:GB/T14684-2022[S].北京:中国标准出版社,2022:3-4.

[10]中国建筑材料联合会.建设用卵石、碎石:GB/T14685-2022[S].北京:中国标准出版社,2022:3-5.

作者简介：陈志远，1969，男，河南漯河，正高级工程师，工学学士，试验检测。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.