

公路桥梁预制梁用高性能混凝土配合比优化与早期开裂防控研究

吕志刚

内蒙古路桥工程技术检测有限责任公司

DOI:10.12238/jpm.v6i8.8313

[摘要] 公路桥梁预制梁用高性能混凝土易因配合比不合理及早期开裂影响结构安全。本文配合比优化技术，从胶凝材料体系、集料级配等方面优化；分析早期开裂机理，提出材料、施工工艺、养护制度层面的防控措施。这些措施能提升混凝土抗裂性能与耐久性，保障预制梁结构稳定，为工程应用提供技术支持。

[关键词] 公路桥梁；预制梁；高性能混凝土；配合比优化；早期开裂防控

Research on Optimization of High Performance Concrete Mix Proportion and Early Cracking Prevention for Prefabricated Beams of Highway Bridges

L ü Zhigang

Inner Mongolia Road and Bridge Engineering Technology Testing Co., Ltd.

[Abstract] High performance concrete used for prefabricated beams of highway bridges is prone to structural safety issues due to unreasonable mix proportions and early cracking. This article focuses on the optimization technology of mix proportion, optimizing the cementitious material system, aggregate gradation, and other aspects; Analyze the early cracking mechanism and propose prevention and control measures at the material, construction technology, and maintenance system levels. These measures can improve the crack resistance and durability of concrete, ensure the stability of prefabricated beam structures, and provide technical support for engineering applications.

[Key words] highway bridges; Prefabricated beams; High performance concrete; Optimization of mix proportion; Early cracking prevention and control

引言

随着公路桥梁建设发展，预制梁对高性能混凝土需求渐增。但高性能混凝土因材料特性与施工环境，易出现配合比不当及早期开裂问题，影响结构承载能力与使用寿命。开展公路桥梁预制梁用高性能混凝土配合比优化与早期开裂防控研究十分必要。在明确配合比与开裂的关联，提出有效技术措施，保障预制梁质量，推动公路桥梁工程技术进步。

1 高性能混凝土配合比设计基础

1.1 原材料性能要求

细骨料优先采用级配合理、质地均匀坚固、吸水率低且空隙率小的洁净天然中粗河砂，经多次循环后质量损失应控制在较低水平，以保障混凝土的工作性能与耐久性^[1]。粗骨料则选用级配合理、粒形良好、质地均匀坚固、线胀系数小的洁净碎石，确保其压碎指标与坚固性指标达标，为混凝土构建稳定的骨架结构。外加剂应选用减水率高、坍落度损失小、适量引气且能显著提升混凝土耐久性的产品，同时要与水泥具备良好

的相容性，从而有效调控混凝土性能。

1.2 配合比设计原则与方法

密实体积原则下，以石子为骨架，砂子填充石子缝隙，浆体填充砂石间隙并包裹二者，保证混凝土流动性。用水最少原则要求在满足工作性能前提下，尽量减少用水量，以获体积稳定且成本合理的混凝土。最小水泥用量原则强调在保障混凝土性能时，降低水泥用量，控制温升并增强抗腐蚀能力。设计方法上，先依混凝土强度等级、粗集料公称最大粒径、坍落度等预估拌和用水量；接着计算浆体体积，结合集料体积、表现密度、砂率得出砂与碎石质量，再依据强度等级、用水量、外加剂等调整集料配比；最后根据集料与凝胶材料密度及各材料体积，算出具体材料用量，并通过现场试验优化调整。

2 配合比优化技术研究

2.1 胶凝材料体系优化

全面检测水泥的基础性能，像标准稠度用水量、凝结时间以及各龄期强度，依据这些来判定它是否契合预制梁的施工要求以及强度发展规律^[2]。针对粉煤灰，着重剖析其细度与需水量比，因为细度会对水化反应速度产生影响，而需水量比关乎混凝土的工作性能；矿粉则要检测比表面积和活性指数，比表面积决定着它早期的反应活性，活性指数体现其与水泥协同水化的能力。根据检测所得结果，把矿物掺合料与水泥按不同比例进行复配，经过多组试配试验，观察混凝土的流动度、凝结时间、强度增长态势以及水化热释放状况，挑选出能够平衡工作性能、强度与抗裂性的最佳胶凝材料组合，保证该体系在满足强度标准的同时，降低因水化热导致的开裂风险。

2.2 集料级配优化

粗集料应首先考虑采用连续级配，这样可让颗粒间的空隙尽可能减小。与此同时，要把控好最大粒径，使其与预制梁的钢筋间距相适应，防止因集料粒径过大，造成浇筑过程不顺畅，或者出现局部强度不足的问题。细集料宜选用中砂，其细度模数必须在合理范围之内，如此一来，既能保证在填充粗集料空隙时的密实程度，又能有足够的浆体来包裹颗粒。通过对砂率进行调整，开展多组试配工作，测试混凝土的坍落度、扩展度等工作性能指标，以及硬化后的抗压强度、弹性模量等力学性能。深入分析不同砂率情况下集料骨架与浆体之间的协同作用，进而确定出能让混凝土达到最高密实度、最佳流动性且具备优良抗裂性的级配方案，为预制梁的浇筑提供稳固的集料结

构基础。

2.3 外加剂掺量优化

在选定外加剂类型之后，先设定一个合理的初始掺量范围。接着，在这个范围内按照一定梯度来调整掺量并开展试配工作。对于新搅拌的混凝土，要测试其坍落度损失速率、含气量以及保水性，从而评估它在施工过程中的适应程度；针对已经硬化的混凝土，则需检测不同龄期下的抗压强度、抗渗等级以及收缩值，以此分析外加剂对混凝土力学性能以及耐久性产生的影响。通过绘制外加剂掺量与混凝土各项性能之间的关系曲线，找到性能发生转折的关键点，也就是当掺量增加到某个数值时，混凝土性能提升的速度开始变缓，甚至出现下降的情况。依据这个转折点，确定出最优的外加剂掺量，这样就能在有效改善混凝土工作性能的同时，不会对其强度发展以及体积稳定性造成不利影响。

3 早期开裂机理分析

3.1 温度应力作用机制

公路桥梁预制梁用高性能混凝土在浇筑初期，水泥迅速水化释放大热量，使混凝土内部温度快速攀升，可在短时间内升温达 30 至 40℃。由于混凝土导热性差，内部热量难以快速散发，而表面散热较快，致使构件内部与表面形成显著温度梯度。当构件内部温度高于表面时，内部材料膨胀受限，产生压应力；表面材料受内部约束，形成拉应力。在某工程监测中，箱梁浇筑后 12 至 18 小时内，内部温度升至最高，与表面温差可达 20℃以上，此时表面拉应力急剧增大。随着水化反应持续，内部温度开始缓慢下降，在降温阶段，内部收缩变形大于表面，导致内部产生拉应力，表面为压应力。温度应力的与混凝土热物理性能、构件尺寸及环境温度密切相关。

3.2 收缩变形特性研究

在新拌混凝土阶段，水分蒸发速率高于泌水速率时，混凝土表面颗粒间形成弯月面体系，产生毛细管应力差，引发塑性收缩^[3]。高性能混凝土水胶比低，自由水分少，表面水分蒸发快，塑性收缩风险更高。在高温干燥天气下，浇筑后 1 至 2 小时内，混凝土表面就可能因塑性收缩出现细微裂缝。干燥收缩发生在混凝土硬化后，停止养护处于不饱和空气环境时，内部毛细孔和凝胶孔中的吸附水逐渐散失，导致混凝土体积不可逆减小。高性能混凝土水泥用量大，水化后孔隙率低，对干燥收缩有一定抑制作用，但随着暴露时间延长，收缩仍会持续发

展。研究表明，混凝土 2 周龄期的干燥收缩值可达 20 年龄期的 14% 至 34%。自生收缩则源于混凝土内部相对湿度降低引发的自干燥现象，高性能混凝土早期水化速度快，自干燥程度高，自收缩显著大于普通混凝土。水胶比越低，自收缩越大，如某水胶比 0.3 的高性能混凝土，2 个月龄期自收缩可达 2×10^{-4} 。

3.3 界面过渡区影响分析

水泥水化时，靠近骨料表面的水泥颗粒水化产物分布与内部不同，形成孔隙率较高、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体定向排列且取向性强的界面过渡区。其结构疏松，强度低于水泥浆体与骨料，弹性模量也相对较低。当混凝土受温度变化、收缩变形等作用产生内应力时，界面过渡区易率先产生微裂缝。在温度应力作用下，由于界面过渡区与水泥浆体、骨料变形协调性差，内部应力集中，导致微裂缝在此处萌生。且随着内应力持续作用或环境因素影响，微裂缝会不断扩展、连通，最终发展为宏观裂缝，降低混凝土整体性能与耐久性。矿物掺合料可改善界面过渡区结构，其活性成分与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次水化反应，生成 C-S-H 凝胶，填充孔隙，细化界面过渡区结构，增强其与水泥浆体、骨料的黏结力，有效抑制早期裂缝的产生与发展。

4 开裂防控技术措施

4.1 材料层面防控方法

在材料选择上，优先采用低水化热水泥，其 28d 水化热控制在一定范围内，以减少水化过程中释放的热量^[4]。合理掺入矿物掺合料，如粉煤灰需满足细度、需水量比等指标，矿粉则要达到相应的比表面积和活性指数要求，通过复掺技术优化胶凝材料体系，降低水化热峰值。对于集料，粗集料选用连续级配，控制最大粒径，确保颗粒级配曲线符合要求，细集料采用中砂，细度模数维持在合适区间，减少空隙率。外加剂方面，选用与胶凝材料相容性好的聚羧酸系减水剂，提升减水效果的同时，降低混凝土的坍落度损失。可掺入适量纤维，如钢纤维或聚丙烯纤维，纤维长度和直径需与混凝土配合比相适配，通过纤维的桥接作用增强混凝土的抗裂性能。

4.2 施工工艺调控手段

搅拌结束后，对新拌制的混凝土要检测坍落度、扩展度等关乎工作性能的指标，若不满足要求，该混凝土禁止使用。在运输期间，要防止出现过度颠簸以及长时间停留的状况，以防

混凝土出现离析或者初凝现象。进行浇筑时，选用分层连续浇筑的方法，每层的浇筑厚度依据振捣设备的有效作用深度来确定，通常不高于 300mm，以此保证振捣充分、密实。在振捣过程中，振捣棒的插入深度要深入到下层混凝土 50mm 及以上，振捣时长以混凝土表面泛出浆体且不再下沉为准，避免出现漏振或者过振的问题。浇筑完毕后，应及时处理混凝土表面，除去浮浆并将其抹平，以减少表面裂缝的产生。

4.3 养护制度优化方案

鉴于不同季节的气候差异，需实施针对性的养护手段。在夏季高温时节，可以在覆盖物上方搭建遮阳棚，防止阳光直接照射，以免混凝土表面温度急剧上升，同时通过喷雾的方式降低温度，维持环境湿度；到了冬季低温时期，则要做好保温工作，覆盖保温被，必要时运用蒸汽养护，务必将养护环境温度控制在不低于 5℃，防止混凝土遭受冻害。养护时长依据混凝土强度的增长情形来确定，一般来说不少于 14 天，要是混凝土中掺加了矿物掺合料，养护时间可适当延长。在整个养护过程里，要对混凝土表面温度以及环境温度进行实时监测，绘制出温度变化曲线，依据该曲线灵活调整养护措施，确保混凝土在合适的温度和湿度环境中硬化，最大程度减少因温度应力和干燥收缩而引发的开裂问题。

结语

针对公路桥梁预制梁所使用的高性能混凝土，展开关于配合比优化以及早期开裂防控方面的研究。在研究过程中，阐释配合比设计的基础要点以及优化所采用的技术，分析早期开裂的内在机理，并从多个层面提出相应的防控措施。这些研究内容彼此之间紧密相连，共同构成了一套较为完整的技术体系。借助这一体系，能够切实有效地改进高性能混凝土的性能，降低早期开裂情况的发生。

[参考文献]

- [1]张建军.粉煤灰掺量对桥梁高性能混凝土强度和耐久性影响试验研究[J].交通节能与环保,2025,21(03): 230-234.
- [2]胡涛,易韵仪,尹玲媛,等.超高性能混凝土桁架节点受力性能试验与有限元分析[J].铁道建筑,2025,65(05): 76-81.
- [3]关忠国.高性能混凝土在公路桥梁抗裂加固中应用分析[J].水泥,2025,(04): 81-83.
- [4]朱婧.公路桥梁工程中新型材料的应用及其性能分析[J].全面腐蚀控制,2025,39(01): 198-201.