

预制箱梁水泥混凝土水波纹形成机理及预防

范良银

中铁四局集团第二工程有限公司, 中国·江苏 苏州 215131

摘要: 预制箱梁是桥梁工程的核心承重构件, 在预制箱梁混凝土施工过程中, 表面水波纹是高发外观质量通病, 不仅破坏梁体外观完整性, 还会造成混凝土表层密实度不足、抗渗性下降, 加速碳化、腐蚀等病害发展, 影响桥梁整体使用寿命。为有效解决该工程质量问题, 本文依托预制箱梁施工实际工况, 从原材料特性、混凝土配合比、施工工艺、环境条件四大维度, 系统剖析水泥混凝土水波纹的形成机理, 明确各因素的作用机制与影响规律。结合现场施工经验, 针对性提出原材料管控、配合比动态优化、施工流程标准化、环境工况适配调整等全方位预防控制对策。

关键词: 预制箱梁; 水泥混凝土; 水波纹; 形成机理; 质量控制

Forming Mechanism and Prevention of Water Waves on Prefabricated Box Slabs' Cement Concrete

Fan Liangyin

China Railway Fourth Bureau Group Second Engineering Co., Ltd., China Jiangsu Suzhou 215131

Abstract: Prefabricated box slabs are the core load-bearing components of bridge engineering. During the construction of prefabricated box slab concrete, surface water waves are a common quality problem that frequently occurs. They not only damage the integrity of the slab's appearance but also lead to insufficient density of the concrete surface layer, decreased impermeability, accelerated carbonization and corrosion, and affect the overall service life of the bridge. To effectively solve this engineering quality problem, based on the actual construction conditions of prefabricated box slabs, this paper systematically analyzes the forming mechanism of water waves on cement concrete from four dimensions: raw material characteristics, concrete mix ratio, construction technology, and environmental conditions. It clarifies the mechanism and influence laws of each factor. Combined with on-site construction experience, targeted prevention and control countermeasures such as raw material control, dynamic optimization of mix ratio, standardization of construction process, and adjustment of environmental conditions are proposed.

Keywords: Prefabricated box slabs; Cement concrete; Water waves; Formation mechanism; Quality control

0 引言

预应力预制箱梁凭借刚度大、整体性强、施工效率高、适应性广等优势, 被广泛应用于公路、市政桥梁工程建设中。水泥混凝土作为箱梁的核心浇筑材料, 其成型质量直接决定箱梁的力学性能与服役年限。随着桥梁工程建设标准不断提升, 除结构承载力、强度等核心指标外, 混凝土外观质量已成为工程质量验收的重要内容。

现阶段预制箱梁施工中, 混凝土表面水波纹病害频发, 多集中于箱梁腹板、底板区域, 呈现不规则波浪状纹路。该病害不仅影响梁体美观度, 更会导致混凝土表层浆体分布不均、密实度偏差, 降低结构抗渗、抗冻及抗腐蚀性能, 长期服役过程中易引发表层剥落、钢筋锈蚀等次生病害, 严重影响桥梁工程的安全性与耐久性。目前工程领域对水波纹病害的成因把控不够全面, 防控措施缺乏系统

性, 导致病害反复出现。因此, 系统探究预制箱梁混凝土水波纹形成机理, 制定科学、可行的预防对策, 对提升桥梁预制施工质量、降低工程病害风险具有重要的工程价值与现实意义。

1 混凝土水波纹形成机理分析

预制箱梁混凝土水波纹的形成并非单一因素导致, 而是原材料、配合比、施工工艺、环境条件多因素耦合作用的结果。混凝土浇筑振捣及凝结硬化过程中, 拌合物内部水分、集料、浆体分布失衡, 表层水分迁移、蒸发不均匀, 最终形成规律性波浪状纹路, 具体影响因素及作用机理如下。

1.1 原材料因素

原材料是决定混凝土工作性能的基础, 水泥、集料、外加剂的性能差异及使用不当, 是诱发水波纹病害的核心源头因素。

水泥的品种、细度及矿物组成直接影响混凝土水化速率与凝结硬化进程。不同品种水泥水化特性差异显著,矿渣水泥早期水化速度缓慢,混凝土振捣阶段内部水分难以快速结合固化,易在表层聚集形成游离水,若振捣时间把控不当,水分蒸发后便会残留水波纹痕迹。同时,过细的水泥粉体需水量大、水化反应速率快,混凝土表层水分蒸发速度与内部水化速度不匹配,极易造成表层水分分布不均,进而形成波浪状纹路^[1]。

集料的级配、粒径、颗粒形态直接决定混凝土和易性与保水性。集料级配失衡、细集料含量过高或粗集料粒径超标,会大幅降低混凝土拌合物流动性,振捣过程中水分无法均匀扩散,局部积水聚集于表层,水分蒸发后形成水波纹。此外,针片状集料占比过高会增大混凝土内部摩擦阻力,打乱水分正常迁移路径,造成表层浆体与水分分布紊乱,进一步提升水波纹病害发生概率。

外加剂是优化混凝土性能的关键辅料,但使用不当会引发质量缺陷。减水剂掺量过大、品质不稳定时,混凝土拌合物流动性骤增,振捣后表层会形成厚水膜,水分蒸发后表层平整度被破坏,形成明显水波纹。缓凝剂过量使用会延长混凝土凝结时间,表层水分长期处于自由蒸发状态,微小的水分分布差异会随时间持续放大,最终形成不规则波浪纹路。

1.2 配合比因素

混凝土配合比设计不合理,是导致拌合物泌水、离析、水分分布不均的关键诱因,主要体现在水灰比与砂率两大核心参数。

水灰比直接决定混凝土含水量与密实性能。水灰比过大时,拌合物内部游离水分过剩,振捣过程中多余水分持续向表层迁移、积聚,形成表层积水层,水分蒸发后残留凹凸不平的波浪痕迹;水灰比过小时,混凝土拌合物流动性不足,振捣难以密实,内部空隙无法填满,水分无法均匀排出,同样会造成表层水分分布不均,诱发水波纹病害。

砂率把控不当也会直接影响混凝土工作性。砂率过高时,细集料占比过大,混凝土粘性大幅提升,内部水分迁移受阻,表层易积聚水膜,形成水波纹;砂率过低时,粗集料空隙无法被细集料充分填充,拌合物流动性变差,振捣过程中集料分布不均、水分扩散紊乱,最终引发表层水波纹缺陷。

1.3 施工工艺因素

施工工艺不规范是水波纹病害产生的主要人为因素,搅拌、运输、振捣全流程的操作偏差,都会破坏混凝土成

型均匀性。

搅拌环节中,搅拌时间不足、设备选型不当,会导致水泥、集料、外加剂混合不均匀,混凝土局部和易性、保水性存在差异,振捣时不同区域水分迁移速度、积聚程度不同,最终形成水波纹。相较于强制式搅拌机,自落式搅拌机搅拌均匀性较差,若施工中设备选用不当或搅拌流程简化,极易造成拌合物性能不均。

混凝土运输过程中,车辆颠簸、持续振动会引发拌合物离析,出现粗细集料分层、水分集中的问题。同时,运输时间过长会导致表层水分提前蒸发,拌合物工作性衰减,浇筑振捣后水分分布失衡,大幅增加水波纹病害发生概率。

振捣是影响混凝土表层成型质量的核心工序。振捣不足时,混凝土内部空隙无法排出,水分滞留内部并局部渗出表层,形成水洼,硬化后形成水波纹;振捣过度会引发浆体上浮、粗集料下沉,表层浆体与水分过度富集,蒸发后纹路缺陷显著。此外,振捣棒插入深度不足、移动间距不均,会造成局部振捣盲区,导致混凝土密实度、水分分布不一致,诱发水波纹病害^[2]。

1.4 环境因素

施工环境的温、湿度条件直接影响混凝土水化速率与水分蒸发速度,间接诱发水波纹病害。高温施工环境下,混凝土表层水分蒸发速率远大于内部水分迁移补充速率,表层快速失水收缩,而内部持续水化释水,内外干湿状态失衡,极易形成水波纹与干缩细纹。同时高温会加速水泥水化、缩短凝结时间,压缩振捣抹面的调整时间,进一步加大质量控制难度。

低温环境下水泥水化速率缓慢,水分迁移受阻,若保温保湿措施不到位,表层水分易出现局部冻结、积聚,破坏正常成型状态,引发水波纹缺陷。环境湿度过低时,表层水分蒸发过快且不均匀,干湿区域交错形成波浪纹路;湿度过高时,表层水分蒸发缓慢,长期潮湿积水会导致浆体缓慢流动、堆积,同样会形成不规则水波纹。同时施工环境湿度的频繁波动,会持续打乱混凝土内部水分迁移规律,加剧病害产生。

2 预制箱梁混凝土水波纹预防对策

针对上述多维度病害成因,结合预制箱梁梁施工工艺特点,从原材料管控、配合比优化、施工流程管控、坍落度精准调控等方面,制定系统性预防对策,全方位阻断水波纹形成条件。

2.1 严控原材料质量,动态适配施工工况

外加剂是防控水波纹的关键辅料,高性能外加剂减水

率高,但对砂石含水率、原材料状态敏感度极强,极易引发混凝土离析泌水。施工中需深度掌握外加剂复配机理与性能特点,根据料仓原材料波动情况、混凝土实时状态,采用动态调整法严控外加剂掺量。坚持每日两次检测砂石含水率,依据检测数据精准换算施工配合比,严格控制每方混凝土用水量,保障拌合物性能稳定,从源头规避离析泌水问题,破坏水波纹形成机理。

针对细集料粗细程度动态变化的问题,建立原材料常态化检测机制。黄砂细度模数变化会直接改变混凝土需水量,砂料偏细时比表面积增大、需水量提升,多余水分滞留表层易形成水波纹。施工中需实时监测细集料细度模数,动态优化砂率参数。如试验室适配细度模数 2.6 的细集料,现场进场材料细度模数提升至 2.9 时,需适度提高砂率,优化混凝土浆集比与工作性,保障表层成型平整。同时把控砂率最优区间,避免砂率过高导致保水性过强、水分积聚,平衡防控病害与保障混凝土性能。

2.2 优化配合比设计,严控混凝土坍落度

坍落度超标是诱发水波纹的重要因素,施工中需遵循“满足密实成型,严控最小坍落度”的原则,在符合箱梁施工工艺要求的前提下,尽可能选用较小出机坍落度,降低混凝土自然泌水概率,提升表层成型质量。结合预制箱梁金属波纹管密集、浇筑空间复杂的施工特点,严格界定坍落度控制标准:混凝土出机坍落度控制在 200mm 以内,到场浇筑坍落度控制在 190mm 以内,兼顾流动性与密实性,既规避水波纹病害,又防止锚后空洞、振捣不密实等缺陷。

建立坍落度实时检测与动态调整机制,混凝土出站前、到场后均需抽样检测。坍落度过大时,按照原配合比比例,将水泥、砂石干料均匀拌合后掺入搅拌车,持续搅拌 3-4 分钟,复测坍落度合格后方可浇筑;坍落度过小时,在保持水灰比不变的前提下,掺入适配水泥浆调整拌合物状态,确保流动性达标,杜绝不合格混凝土入模浇筑^[9]。

2.3 规范施工工艺,标准化全流程管控

优化搅拌与运输流程,根据设备类型设定标准搅拌时间,确保水泥、集料、外加剂充分拌合,杜绝局部拌合物性能不均。优先选用强制式搅拌机,提升搅拌均匀性。混凝土运输选用密闭运输车辆,严控运输时长,规避长途颠簸引发的离析问题,运输到位后快速浇筑,减少水分蒸发与性能衰减。

规范振捣施工工艺,明确振捣时间、频率、插入深度与移动间距,坚持“快插慢拔、均匀振捣”原则。杜绝振捣不足导致的内部积水、空隙问题,同时规避过度振捣引发的浆体上浮、表层积水。针对箱梁腹板、底板等易出现水波纹的区域,加密振捣点位,消除振捣盲区,保障混凝土整体密实度与水分分布均匀性。

2.4 适配环境工况,做好现场防护调控

根据施工环境温湿度变化,动态调整施工方案。高温施工时,避开正午高温时段浇筑,做好原材料遮阳、洒水降温,浇筑后及时覆盖保湿,减缓表层水分蒸发速度,缩小内外干湿差异;低温施工时,落实保温措施,杜绝表层水分冻结,延缓水化速率偏差带来的成型缺陷。湿度波动较大时,加强现场通风、保湿管控,保持混凝土表层水分蒸发速率均匀,避免局部积水、干湿不均引发水波纹。

3 结语

预制箱梁水泥混凝土水波纹病害是原材料性能、配合比设计、施工工艺、环境条件多因素耦合作用的结果,其中原材料品质波动、配合比参数失衡、振捣工艺不规范、温湿度适配不当是核心诱因。该病害不仅影响梁体外观质量,还会降低混凝土结构密实度与耐久性,对桥梁长期服役安全造成隐患。

在预制箱梁施工过程中,需建立全方位、全流程的质量管控体系,通过常态化原材料检测、动态化配合比优化、标准化施工工艺管控、适配化环境工况调整,从源头、施工过程、成型养护全环节阻断水波纹形成条件。本文提出的防控对策贴合现场施工实际,可有效解决预制箱梁混凝土水波纹质量通病,提升混凝土成型平整度与结构密实性,保障预制箱梁施工质量达标,为同类桥梁预制施工质量管控提供可靠的技术参考与实践借鉴。

参考文献:

- [1] 丁袁璞. 桥梁预制箱梁外观质量通病产生原因及预防措施[J]. 黑龙江交通科技, 2018, 41(01): 110+112.
- [2] 廖永芳. 浅析高铁预制箱梁外观通病产生原因及预防措施[J]. 城市道桥与防洪, 2015(03): 130-132+14.
- [3] 赵奎. 公路预制 30m 箱梁水波纹产生原因及防治措施分析[J]. 中国高新科技, 2020(10): 107-108.

作者简介: 范良银(1981-), 男, 中国安徽省滁州市, 本科学历, 工程师, 研究方向: 从事公路桥梁混凝土方面的研究。