

桥梁预应力孔道压浆质量检测与饱满度控制研究

李俊章

宜城市康路养建有限责任公司 湖北 宜城 441400

【摘要】：孔道压浆是后张法预应力桥梁工程中保证预应力体系耐久性和结构稳定性的主要工序。压浆饱满度不够、浆体密实度低等质量缺陷都会造成钢绞线锈蚀、预应力损失增大，直接降低桥梁的承载能力和使用寿命。本文根据桥梁工程施工经验，对预应力孔道压浆常见质量缺陷及原因进行分析，整理出冲击回波法、探地雷达法等无损检测技术的原理和操作要点，从原材料控制、施工工艺、过程监测、后期养护等几个方面提出饱满度综合控制措施。结合实际工程检测数据来检验技术应用的效果，以改善压浆施工质量控制体系，提高桥梁预应力结构的施工质量，给类似桥梁压浆工程提供技术上的参考。

【关键词】：桥梁工程；预应力孔道；压浆检测；饱满度控制；无损检测

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.028

1 引言

预应力混凝土桥梁因为刚度大、跨度适应性强、耐久性好等特点，在公路和市政交通工程中被广泛使用。后张法施工工艺中，预应力钢绞线张拉完成后，要向波纹管孔道内压注水泥浆，依靠浆体包裹钢绞线来达到钢筋防腐、预应力传递和孔道填充固结的目的。完整的浆体结构可以协调混凝土和预应力筋的受力，分散结构应力，减缓结构的老化。目前部分桥梁工程压浆施工管控不到位，孔道内空洞、浆液离析、压浆不连续等问题时有发生。隐蔽性质量缺陷不能用肉眼检查出来，在长期使用过程中，水汽和有害物质会渗透到孔道里，导致钢绞线锈蚀断裂，引起桥梁梁体开裂、挠度超限等问题，严重危及行车安全。根据国内大部分运营多年预应力桥梁的工程调研数据可知，其结构病害的根本原因都是由于早期压浆质量不好造成的。因此加强压浆质量检测技术的应用，改善饱满度控制工艺，对提高桥梁工程施工质量，延长结构使用寿命有重要的工程意义。

2 预应力孔道压浆常见质量缺陷及成因分析

2.1 常见质量缺陷类型

根据桥梁施工现场检测结果，预应力孔道压浆主要存在的问题有四类。第一类是孔道空洞缺陷，主要集中在孔道顶部、拐点和端部位置，空洞处没有浆液填充，形成密闭空腔。第二类是浆体密实度不够，浆体内部有细微气泡，结构疏松，整体性差。第三类是浆液分层离析，水分上浮、骨料下沉，浆体硬化后强度不均匀。第四类为裂缝缺陷，浆体硬化后产生细小裂缝，影响防水防腐性能。各种缺陷单独或者叠加出现都会破坏预应力体系的完整性。

2.2 缺陷形成原因

2.2.1 原材料性能不达标

压浆用的水泥、外加剂、拌合水的品质影响浆体性能。水泥安定性不合格、外加剂比例不合理，都会造成浆体流动性不好、凝结时间异常。拌合水中的杂质含量过多会造成浆液离析。

部分施工单位为了节约成本，使用低品质的压浆料，水胶比控制不当，硬化后的浆体收缩率偏大，造成收缩裂缝，不能满足密实填充的要求。

2.2.2 施工工艺管控不当

施工流程不规范是造成压浆缺陷的主要原因。孔道清理不彻底，孔道内留有积水、杂物，会妨碍浆液的流动，产生封堵空洞。压浆压力控制不合理，压力过低不能使浆液饱满填充，压力过高容易造成波纹管破损、浆液外泄。压浆顺序乱、排气孔设法不当，孔道内空气不能全部排尽，留有气泡形成疏松区。施工人员操作技能水平低，注浆中断、补浆不及时等都会造成孔道局部存在缺浆情况。

2.2.3 环境与养护因素影响

施工环境温度、湿度都会影响浆体的凝固性质。高温环境浆体水分蒸发快、流动性差、提前凝固堵塞孔道；低温环境浆体凝结慢、强度增长慢、易产生分层沉降。压浆后养护不到位，浆体硬化时受到温度急剧变化和外力干扰，产生收缩裂缝，孔道压浆饱满度下降。

3 预应力孔道压浆质量检测技术研究

预应力孔道埋设在混凝土梁体内部，隐蔽性较强，传统的钻孔破损检测方式检测范围小，会对桥梁主体结构造成损伤。目前工程大多采用无损检测技术，依靠物理探测原理来识别内部缺陷，主要的检测技术有冲击回波法、探地雷达法、超声波检测法等，各种技术适应不同的施工环境。

3.1 冲击回波检测法

冲击回波法是目前应用最广的压浆密实度检测技术，检测原理简单、操作方便。用硬质探头轻敲混凝土表面，产生低频应力波，应力波在混凝土、浆体、钢绞线和空洞界面处发生反射和传播，传感器采集反射波形，得到频谱信号。检测人员根据频谱峰值、波形的波动来判断孔道内压浆情况。密实饱满的孔道应力波传播稳定，主频波动范围小，存在空洞疏松的孔道波形畸变，主频明显偏移。

该技术可以用于各种箱梁、T梁预应力孔道检测，具有较强的抗干扰性，检测精度较高。检测作业时要校准仪器参数，保证探头与梁体表面垂直，匀速移动扫描，保证采集信号连续完整。采用小波分析技术对信号进行处理，可以去除环境噪声，准确地检测出微小的空洞缺陷，检测准确率可以达到95%以上。

3.2 探地雷达检测法

探地雷达法依靠高频电磁波探测原理，用雷达天线向梁体内部发射电磁波，电磁波穿透混凝土介质，在不同的介质界面产生反射。工作人员按照雷达图像颜色、波形改变来判定孔道方位，浆液填满情形和空洞散布区。浆液密实区介质均匀，雷达图像波形平滑；空洞区介质突变，图像有明显的高亮异常区。

该技术的优势是无接触检测、检测速度快、可以实现大范围连续扫描，适合于桥梁负弯矩孔道、密集排布孔道的检测。三维探地雷达可以创建出孔道内部立体模型，清楚地表现出缺陷的空间分布情况。但是检测时容易受到内部钢筋、金属构件的干扰，需要结合施工图纸剔除干扰信号来提高检测的准确性。

3.3 超声波检测法

超声波检测法是根据声波在不同介质中传播速度的不同来判断压浆质量的，超声波在密实浆体中传播速度快、衰减小，在空洞空气层中传播速度慢、衰减大。检测时将耦合剂涂在检测探头上，使探头和混凝土表面紧密接触，发射并接收穿过梁体的超声波信号，计算声时、波幅等参数，比较标准参数来判断密实等级。

该技术设备体积小、成本低，适合施工现场快速抽检。检测前要使用标准试块对仪器进行校准，控制探头移动速度，防止由于耦合不均匀而造成信号失真。该类技术对于浅层缺陷的识别效果较好，但是对于深层孔道的检测精度较低，一般用作辅助检测手段。

3.4 检测技术对比选用

根据各种检测技术的优缺点来制定适合的选择原则。常规桥梁梁体孔道批量检测以冲击回波法为主，兼顾精度和效率；复杂结构密集孔道、负弯矩隐蔽孔道用探地雷达法；小型工程简易抽检用超声波检测法。实际检测时可以将两种以上检测技术结合起来使用，互相检验检测结果，减小检测误差。

4 预应力孔道压浆饱满度控制措施

4.1 严格管控原材料质量

建立原材料进场检验制度，控制水泥、外加剂、骨料和拌合水的质量。优先选用普通硅酸盐水泥，水泥强度等级不小于四十二点五级，控制好水泥的安定性和凝结时间。采用专用压

浆外加剂，改善浆体的流动度和收缩性能，控制水胶比在合理的范围内。拌合用水采用洁净的自来水，不得使用污染源。原材料进场后分类存放，做好防潮防尘工作，过期变质的材料不得使用。拌合好的浆体要进行性能检测，保证流动度、抗压强度、凝结时间满足施工要求。

4.2 优化标准化施工工艺

4.2.1 施工前期准备

压浆施工前检查波纹管完整性，修补破损漏浆处。用高压气流清除孔道内的杂物和积水，控制孔道内湿度，保证孔道干燥、清洁。合理布置排气孔、压浆孔，孔径间距满足施工要求，保证排气畅通。提前对压浆设备进行调试，检查压力表、输送管道的运行情况，防止施工过程中设备故障导致注浆中断。

4.2.2 规范压浆施工流程

采用连续一次性压浆施工方式，严格控制压浆压力，常规直线孔道压力保持在0.5~0.7兆帕，曲线孔道适当提高压力。按从低到高的顺序进行压浆，缓慢均匀地注浆，排除孔道内的空气。待排气孔排出干净的浆液，没有气泡夹杂的时候，封闭排气孔，稳压养护三到五分钟，保证浆液密实。压浆结束后马上封堵压浆孔，防止浆液倒流。全程记录压浆压力、注浆时间、浆液用量，保存施工数据方便质量追溯。

4.2.3 后期修整处理

浆液初凝后清除梁体表面多余的浆料，修补封堵孔洞。对检测出的局部空洞缺陷用开孔补浆法进行处理，选用高强度专用浆料低压注浆，修补后再次检测，直到密实度达到要求为止。

4.3 优化施工环境与养护管理

合理安排施工工期，避开高温暴晒、低温霜冻和暴雨天气施工。环境温度高于35℃时采取遮阳降温措施，低温天气做好保温防护。压浆结束之后实施封闭式养护，保证梁体表面湿润，养护时间不得少于7天。控制养护期间外荷载的扰动，禁止使用大型设备对梁体进行碾压，防止浆体受力变形产生裂缝。定期检测浆体强度增长情况，强度达到要求后再进行后续施工工序。

4.4 完善人员与质量管理体系

组建专业施工队伍，在上岗前进行技术培训，确定施工流程、参数标准、质量控制要点，提高操作人员的专业水平。创建起三级质量检查体系，施工人员自检，班组互检，质检人员专检，全程控制施工质量。用智能监测设备连续采集压浆压力、流量、温度等参数，进而达到施工过程压浆情况动态观测和控制的目的。建立质量问责制，确定各个岗位的管控责任，防止人为操作失误造成的质量隐患。

5 工程实例应用分析

5.1 工程概况

某公路预应力连续箱梁桥，桥梁总长 426 米，单跨跨度 30 米，后张法施工工艺，梁体布设圆形金属波纹管孔道，预应力钢绞线为高强度低松弛钢绞线。项目施工期间严格按照压浆控制标准执行，完工后选择十片箱梁做为检测样本，查找压浆饱满度缺陷。

5.2 检测方案实施

本次检测以冲击回波法为主、超声波法为辅的组合检测方式，检测范围包括箱梁直线孔道、曲线弯折孔道和端部锚固孔道。检测前清理梁体检测表面，打磨平整粗糙部位，校准检测仪器参数。根据均匀布点的原则来布置检测测点，每隔五十厘米设一个测点，逐个采集波形数据，与标准频谱曲线比较判断缺陷类型。

5.3 检测结果与整改分析

本次检测共计抽取十片箱梁，涵盖直线孔道、曲线孔道、锚固端孔道多种类型，为直观呈现检测数据，整理检测结果如下表所示。

表 1 整理检测结果

检测箱梁编号	检测孔道类型	检测结果	缺陷情况	处理方式
1 至 8 号	直线、常规曲线孔道	合格	无空洞、浆体密实	无需处理
9 号	顶部曲线孔道	不合格	局部空洞，最大直径 16 毫米	低压补浆修复
10 号	弯折曲线孔道	不合格	局部空洞，最大直	低压补浆

参考文献：

- [1] 蒋保东,汪勇,段宇帆,等.桥梁预应力筋孔道压浆质量控制[J].四川水力发电,2019,38(06):84-86+98.
- [2] 何青睿,赵俊,张金河,等.预应力混凝土孔道压浆质量控制研究与应用[J].河南建材,2019,(03):322-323.
- [3] 许湘华,王华,李斌,等.公路桥梁预应力孔道压浆质量检测试验研究[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(04):127-129.
- [4] 赵立秋,辛光涛.桥梁预应力孔道压浆质量测试方法研究与应用[J].公路,2017,62(11):121-124.
- [5] 孙智荣.高速公路桥梁预应力孔道压浆质量检测与分析[J].山西建筑,2020,46(08):134-136.

检测箱梁编号	检测孔道类型	检测结果	缺陷情况	处理方式
		格	径 20 毫米	修复

综合表格数据分析，十片检测箱梁中八片箱梁孔道压浆饱满度达标，浆体密实均匀，无明显缺陷。两片箱梁局部曲线孔道顶部存在小型空洞，无大面积疏松开裂问题。分析缺陷成因，主要为曲线段排气不彻底，残留空气形成空腔。针对缺陷部位采用低压补浆工艺，开孔清理杂质后注入专用修补浆料，稳压养护完成后复检，空洞完全填充，密实度达到规范要求。

5.4 展望

目前桥梁压浆检测技术还存在着一些不足之处，对于复杂异形孔道、多层密集孔道的检测精度还不能达到要求。可以利用智能化传感技术、大数据分析手段来研发自动化检测设备，从而达到对孔道压浆质量的实时监测、智能判定的目的。不断改进压浆材料的配比，研发出低收缩、高流动性、高强度环保压浆料，满足各种复杂的施工环境。完善行业施工检测规范，统一质量评定标准，促使预应力桥梁压浆施工管控朝着标准化、智能化、精细化的方向前进，给交通基础设施建设赋予质量保证。

6 结论

预应力孔道压浆质量直接影响到桥梁结构的耐久性、安全性，原材料性能不合格、施工工艺不规范、养护管理不到位是造成压浆缺陷的主要原因。冲击回波法、探地雷达法、超声波法等无损检测技术适合桥梁压浆质量检测场景，组合检测模式可以提高检测精度，准确找到孔道空洞、疏松等隐蔽缺陷。从原材料控制、施工工艺改善、环境养护监管、质量管理体系健全四个方面创建饱满度控制方案，可以有效地削减压浆问题。工程实例证明，规范化控制模式可以大大提高孔道压浆的密实度，保证预应力传递的效果，延长桥梁的使用寿命。