

桥梁 CT 技术及其在承秦高速公路 在建桥梁质量控制中的应用

杨春东¹, 孙敏娟², 蒋 辉³

(1. 河北省承德市公路工程质量监督站, 承德 067000; 2. 河北省承德市公路工程中心试验室, 承德 067000;

3. 北京同度工程物探技术有限公司, 北京 100191)

摘 要:结合承秦高速公路的检测实践, 论述了射线正交性、射线密度、单元体数目对桥梁 CT 成像可靠性和分辨率的影响。结果表明桥梁 CT 图像直观、位置准确、结果可靠, 能满足工程质量控制要求。

关键词:桥梁声波 CT; 桥梁 CT; 结构缺陷; 桥梁质量检测; 无损检测

中图分类号:U446 **文献标识码:**B **文章编号:**1673-6052(2011)12-0039-04

近十几年来我国高速公路与铁路建设迅猛发展, 桥梁数量急剧增加, 2000 年底, 我国桥梁总数 24 万座, 2003 年底桥梁总数 31 万座, 而至 2009 年底就达到了 62 万余座, 6 年内总数翻一翻, 平均每年新增桥梁 5 万座, 超过美国现有的 57 万座, 成为世界第一桥梁大国。随着桥梁数量的增多, 桥梁病害和危桥数量也日益增多, 桥梁事故频频发生。据不完全统计, 美国的桥梁中有缺陷的桥梁 13 万座, 约占 23%。中国 2003 年的统计, 存在隐患和耐久性问题的桥梁占 50%, 其中危桥占 20% ~ 30%, 我国桥梁的健康状况令人担忧。这一问题的出现一方面与超负荷运营有关, 同时也反映出在桥梁设计和施工质量方面还存在着很多问题, 特别是施工质量的低劣造成的病害严重地降低了桥梁的承载能力和使用寿命。混凝土桥梁的设计寿命一般都为一百年, 但隐藏有病害的桥梁其使用寿命将大大缩短。2004 年, 美国、英国、瑞典、日本等 16 个国家的权威部门对混凝土桥梁的质量进行的调查表明, 大多数桥梁都没有达到预期的使用年限。

混凝土桥梁的病害源主要是混凝土的性能劣化和混凝土中钢筋的锈蚀及预应力体系的失效。混凝土在使用过程中受周围环境影响, 有害气体和水分通过孔隙渗透到内部, 发生腐蚀、冻融、开裂、碳化、溶出等作用, 从而造成混凝土性能的下降。混凝土的劣化不仅直接降低了混凝土的性能, 更主要的是它对混凝土中的钢筋失去保护作用, 导致钢筋的锈蚀失效。因此提高混凝土的密实性, 减少混凝土中的空隙, 是改善混凝土品质、提高耐久性的重要途径。

径。

为了提高桥梁的施工质量, 除了对材料、工艺和施工过程进行严格的控制之外, 还必须采用先进的检测手段, 对桥梁施工质量进行严格的监督。

目前桥梁混凝土质量检测的方法主要有回弹法、超声波法、超声波一回弹综合法、贯入法、断裂法、取芯法等。回弹法、超声波法以及综合法是属于无损检测方法, 我国已制定了相应标准, 工程中已广泛应用。但应用中发现这些方法检测的结果离散性较大, 代表性差, 多反应浅情况。需要采用更先进的、更具代表性的检测方法。

声波 CT 无疑是公认的先进技术, 近年在桥梁与桩基检测中已开始应用。赵明阶等 2001 年通过预埋的声速管对桥梁基桩缺陷进行超声波 CT 检测, 成功地发现了基桩中的低速夹泥层。何发亮等使用声波 CT 技术对泸定桥东桥台内部结构进行探测, 为桥台裂缝病因分析和治理方案提供了科学依据。张杰等对应用声波 CT 检测钢管混凝土结构密实度的可行性进行了理论分析, 得到了钢管的屏蔽作用与混凝土平均波速的关系。苏建坤等 2006 年使用北京同度工程物探技术公司开发的桥梁 CT (BCT 或 BridgeCT) 技术对大型预应力混凝土桥梁进行了病害诊断, 提供了大型箱梁顶底板、腹板混凝土的密实性和强度的分布图像, 为桥梁除险加固设计提供了科学依据, 这是国内首次将桥梁 CT 技术应用于大型桥体的病害诊断。继此之后, 桥梁 CT 技术在云南、重庆、陕西、河北、安徽、浙江、青岛等省市新桥建设和危旧桥梁病害诊断中先后得到应用。

本文结合承秦高速公路在建桥梁质量控制的检测实践,对桥梁 CT 技术的工作原理、观测布置方案的技术要求以及工程解释要点做详细介绍。应用结果表明桥梁 CT 技术能提供混凝土桥梁的整体质量图像,发现结构内部缺陷,具有图像直观,定位准确,结果可靠的特点,得到了钻孔取芯的验证。能满足工程质量控制、危旧桥诊断、治理效果评价等工程需要。

1 工程概况与桥梁 CT (BCT 或 BridgeCT) 检测的必要性

承秦高速是河北省高速公路网布局规划“五纵、六横、七条线”中的第一条,也是承德和秦皇岛两市路网规划的重要组成部分。路线全长 196km,桥梁 73 座,28981.6m,桥隧总长度 44.5km,占路线全长 48.36%。承秦高速公路主要路段位于燕山山区,冬季时间长,混凝土内外温差大,低温下水化过程缓慢,易受冻害,质量保证难度较大。为了打造百年工程,在建设中应用了桥梁 CT 检测技术,对在建桥梁的混凝土质量进行监控,抽检了 260 片梁板,对全线桥梁质量达标起到了促进作用。

2 桥梁 CT 的工作原理

桥梁 CT 的工作原理类似于医学 CT。医学 CT 是使用 X 射线穿透人体,通过 X 射线的吸收特性对人体组织成像。桥梁 CT 是使用声波穿透混凝土,通过声波速度分布对混凝土结构成像。桥梁 CT 与医学 CT 的数学基础是相同的,都是基于 Radon 变换原理,即通过区域内参量(速度、吸收系数)沿路径的积分结果的观测,重建区域内部参量的分布。桥梁 CT 是利用透射波走时和能量衰减的观测,重建混凝土内部结果的速度和吸收系数的分布,而速度和吸收系数能敏感地反应孔隙率、密实性、弹性模量等混凝土的品质。桥梁 CT 检测技术包含以下技术要点。

(1) 首先将三维梁体分解成梁板,分别对梁板进行二维 CT 成像,最后将二维梁板合成为三维梁体图像。

(2) 在梁板 CT 成像中将梁板划分成单元体,每单元体具有独立的波速,用单元体波速的组合描述梁板的结构特性。

(3) 单元体的波速通过射线路径与观测的走时相联系,即声波沿射线传播的时间是各单元体内耗时的总和。每条射线对应一个走时方程,多条射线的观测走时对应一个方程组。

$$t_i = \int_{L_{ij}} \frac{dl}{V} = \sum_{j=1}^n L_{ij} v_j^{-1}$$

方程中走时 t 是由观测得到的已知量, L_{ij} 为路径长度,由射线追踪计算得到,波速 v 为待求的结构参量。

(4) 当观测体系满足单元射线密度、射线正交性和射线数大于单元数三项指标时,可获得区内波速分布的最优解。这一解在最优的意义下是唯一的,可作为工程判断的依据。

混凝土的波速直接与弹性模量、剪切模量、密度有关。混凝土密实性好、强度高,其模量大,波速高、衰减小;疏松、空隙的混凝土波速低、衰减大。混凝土的波速主要反映混凝土的密实性,与混凝土的抗压强度有正相关关系,已有大量的理论研究和试验研究数据。弹性力学中纵波速度与弹性模量的关系如下:

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

西南地区水利水电系统关于混凝土强度与波速的实验得到如下指数回归方程。

$$R_b = 0.344 V_p^{3.146}$$

混凝土的声波速度可作为混凝土密实性和强度评价的定量指标。由于不同地区沙石骨料的差异,波速与混凝土强度的关系会有少许的差别,但总的规律不会改变。在河北地区的高速公路桥梁混凝土标号与波速的试验关系如表 1。

表 1

混凝土标号	波速(m/s)	混凝土标号	波速(m/s)
C20	2000 ~ 2500	C50	3500 ~ 4000
C30	2500 ~ 3000	C55	4000 ~ 4500
C40	3000 ~ 3500	C60	4500 ~ 5000

声波 BCT 检测技术在在建桥梁的质量控制和危旧桥梁的病害诊断中的分辨率可达到分米级。可检测混凝土桥梁结构的内部缺陷,直观地展现缺陷的部位、范围、程度,为病害整治和施工质量控制、工艺改进提供依据。

3 桥梁 CT 设备信息

选用北京同度工程物探技术有限公司生产的 64 道桥梁 CT 系统。

系统指标: 采样率 $5\mu s$, 64 道, 记录长度 120kB, 分辨率 24 位, 工作温度 $-30 \sim +80^\circ C$ 。

4 桥梁 CT 观测系统的设计原则与方案

观测方案是关系桥梁 CT 结果可靠性的关键因素,观测方案必须满足下列三项要求,否则难以保证检测结果的可靠性。

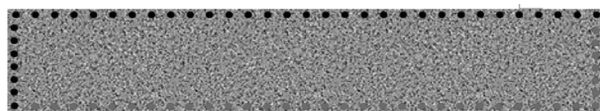
(1) 射线密度的要求: 射线密度足够大。通过每个单元体的射线数目称为射线密度, 射线密度大, 速度分析精度高, 反之精度降低。从工程应用实践角度要求射线密度数大于 40 条。

(2) 射线正交性的要求: 观测射线孔径大。通过单元体的各射线之间的最大孔径称为射线正交性, 是保证分辨率的重要指标。射线孔径大, 交角近乎垂直, 分辨率高; 射线交角小, 射线近乎平行, 横向分辨率降低。工程应用中要求通过同一单元体的射线之间的最大交角不小于 60° 。

(3) 射线数与单元体数的要求: 射线数目应大于单元数。观测系统网格划分的单元体数目决定了 CT 系统的变量数, 观测系统的射线数决定了 CT 系统可利用的独立方程数。只有在方程数大于变量数时, 走时方程为超定方程组, 存在最优解, 而且解是唯一的, 满足工程 CT 的应用目的; 如果单元数大于射线数, 走时方程就变成了欠定方程组, 此时不存在最优解, 方程具有多解性, 失去了工程可靠性, 不能应用。

根据上述三条原则, 对于长方形梁体 CT 截面, 检测系统最好设计为 L 形观测系统。将检波器布置在长方形一侧长边及相邻一短边, 成 L 形; 激发点布置在另一长边和短边, 形成另一 L 形, 两 L 形构成封闭长方形。检波器间距、激发点间距、单元网格间距相等。此观测系统效率高, 同时满足射线密度、正交性和射线条数大于单元数这三项要求。

对于常见的 30m 长、2m 高的梁板, 采用 64 道 BCT 仪器系统, 观测系统做如下设计。检波器间距、激发点间距在长边设计为 50cm, 高度方向加密为 25cm, 剖面单元划分为 $50\text{cm} \times 25\text{cm}$ (图 1)。



• 检波器 • 激发点

图 1 CT 截面观测系统布置图

5 桥梁 CT 技术在承秦高速桥梁质量控制中的应用

5.1 桥梁梁板在检测过程中的分解

在现场检测过程中, 根据桥梁 CT 技术原理的要求将不同类型的桥梁分解为不同的梁板, 在梁板内布置 CT 检测。在承秦高速中检测对象主要是 T 型梁和箱梁, 检测中 T 型桥梁分解为顶板和腹板两个面 (见 2), 箱梁分解为顶板、底板、左腹板和右腹板四个面 (见图 3)。

5.2 现场检测中的观测布置

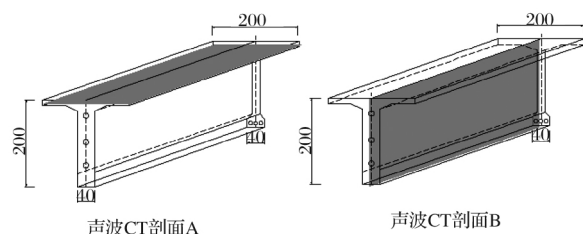


图 2 预置 T 型桥梁梁板的分解图

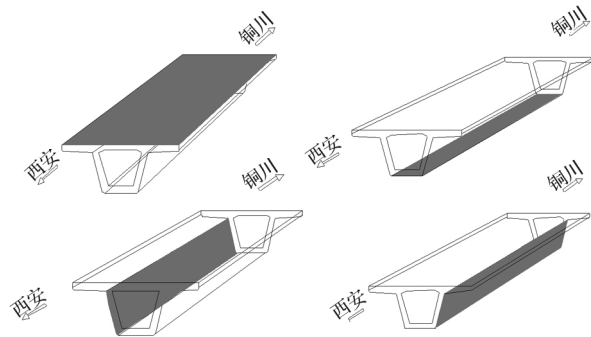


图 3 预置箱梁梁板分解图

现场检测的主要是 T 梁, 长 30m, 高 2m。观测系统布置成“L”形, 在长边和一短边布置检波器, 在另一长边和短边布置激发点, 布置传感器间距、激发点间距横向为 50cm、纵向加密为 25cm (见图 4)。

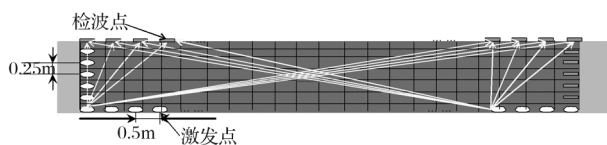


图 4 现场观测系统布置



图 5 数据采集现场

5.3 混凝土梁体检测实例

实际的检测工作自2010年9月11日起到2010年12月11日,历时三个月,分两个阶段,应用桥梁CT方法对承秦高速承德段23个合同段的260片T梁的整体浇注质量进行了检查。并将桥梁CT检测结果与传统方法回弹法、取芯法进行了对比验证,取得了很好的结果,切实地指导了现场施工,为工艺的改进、施工质量的提高提出了建议。现结合典型检测实例对结果进行介绍和分析。

图6是实际检测记录,由记录可清晰地看出最先到达的直达纵波以及后续到达的横波和Lame波。桥梁CT使用直达的纵波走时,记录到时清晰,干扰少,读取准确。

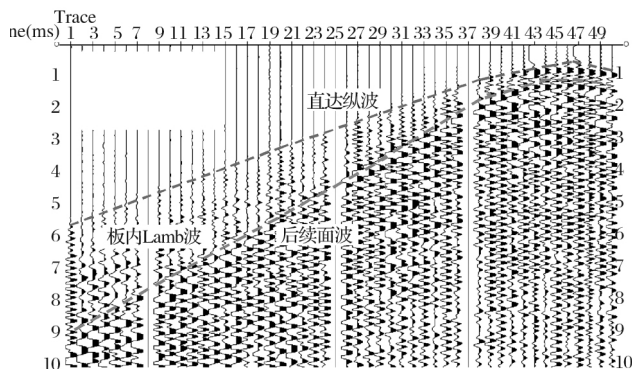


图6 CT检测典型声波纪录

(1) 1标左幅21-4T梁检测结果

图7上、下两幅图分别表示1标左幅21-4T梁顶板和腹板的波速CT图像。图中褐色、黄色区混凝土波速高于4.0km/s,表示混凝土密实、强度高,浇注质量好;绿色为中等波速区,波速在3.5~4.0km/s之间,浇注质量较好,达到了C50要求;蓝色以下为低波速区,波速小于3.5km/s,表示混凝土不够密实、浇注质量较差,强度达不到C50要求。从图像中可以看出该梁板浇注质量良好,绝大多数区域达到了设计要求,但在承德端的顶板和腹板中存在面积约1.5m²的蓝色低速区域,密实度不够,很可能是震捣不够所致。

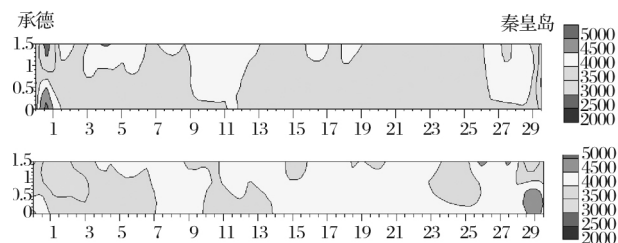


图7 1标左幅21-4T梁顶板和腹板波速CT剖面图

(2) 1标右幅27-2T梁检测结果

图8上、下两幅图分别为右幅27-2T梁顶板和腹板的波速CT结果,图像绝大部分为绿色和黄色高速区,表明梁板强度基本达到C50的设计要求,且浇注均匀性良好。但在靠距秦皇岛端有长约2m的局部蓝色低速区,总面积约4m²,密实度不足,强度低于C50,推测端部震捣不够。

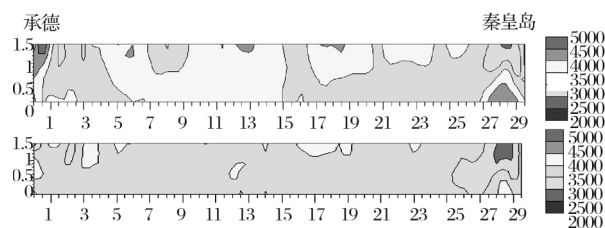


图8 1标右幅27-2T梁顶板和腹板波速CT图像

5.4 检测结果分析

从检测结果图上可以看出,桥梁CT方法能够很好地将梁板混凝土浇注的密实性与强度通过色谱图清晰、准确地展示出来,图像直观,位置准确;对缺陷的位置、范围和程度给出准确判断,便于应用。从承秦高速梁体的检测结果可以看出,多数缺陷分布在梁板两端,推测引起这种现象的原因是由于端部局部振捣不足,现场调查也证实了这一推测。通过检测结果的反馈,对施工方改进施工工艺起到了积极作用,达到了质量控制的作用。

检测过程历经3个多月,除了用桥梁CT的方法进行质量检测外,还使用了回弹仪在两个标段进行了复检。对两种方法结果不一致的区域进行了取芯验证,验证结果与CT结果一致,表明桥梁CT的检测结果更为可靠。

6 结论

承秦高速桥梁检测的实践表明,声波桥梁CT技术适合于混凝土桥梁的检测工况,技术先进,操作方便,检测效率高;能反映混凝土的内部性状,图像直观,位置准确,易于判断,便于工程应用,对于在建桥梁施工质量控制可以起到很好的保障作用,具有推广价值。

参考文献

- [1] 刘冬. 钢筋混凝土桥梁的病害处理 [J]. 中国房地信息, 2009(6): 67-69.
- [2] 刘文, 陈明国, 王代琴. 钢筋混凝土桥梁检测技术概述 [J]. 山东交通科技, 2006(3): 32-35.
- [3] 赵明阶, 徐蓉. 超声波CT成像技术及其在大型桥梁基桩无损检测中的应用 [J]. 重庆交通大学学报, 2002, 20(2): 73-77.
- [4] 何发亮, 李苍松, 谷明成. 声波CT技术在泸定桥东桥台内部结构探测中的应用 [J]. 文物保护与考古科学, 2001, 13(1): 28-32.

25m 预应力混凝土箱梁施工技术

尹 波

(辽宁省交通工程质量与安全监督局, 沈阳 110015)

摘 要:结合庄盖高速公路四标工程实例, 介绍预应力混凝土箱梁的预制施工工艺, 全面总结了从箱梁台座制做、钢筋绑扎、波纹管的定位、支模、混凝土浇注, 到预应力钢绞线的张拉、注浆、封锚等全过程施工方法及一些施工注意事项, 希望对以后的预制箱梁的施工能够起到借鉴作用。

关键词:大桥; 预应力; 箱梁预制; 混凝土配合比

中图分类号: U445 **文献标识码:** B **文章编号:** 1673-6052(2011)12-0043-03

1 工程概况

该标段共有 5 座大桥, 其中有 3 座大桥下部为柱式墩、桩基础和肋板台、桩基础, 上部采用装配式预应力混凝土箱梁, 先简支后结构连续。预制箱标准断面: 中梁预制宽度为 2.2 m, 边梁预制宽度为 2.75m, 箱梁跨中设置中横隔梁, 伸缩缝处梁端设置端横隔梁。

2 施工方法

箱梁预制施工工艺流程: 设置台座→底模钢板、梁板模板打磨→底板、腹板钢筋绑扎→支立侧模→安装端模、内模→顶板钢筋绑扎→混凝土浇注→脱模→养生→张拉→压浆→移梁

工程箱梁预制采用 C50 混凝土, 要求混凝土强度达到 100%, 龄期 14d 后进行预应力张拉作业, 施工过程中必须严格控制混凝土施工质量。下面就以下工序浅谈一下箱梁预制施工方法。

2.1 混凝土的配合比设计

施工中混凝土要求具有良好的和易性, 坍落度在 9~11cm, 保证混凝土具有良好的流动性并易于捣实。

拆模和预应力张拉对混凝土的强度和弹性模量要求很严格, 因此混凝土早期强度增长要快, 对骨料要求高。

(1) 原材料控制

细骨料要求颗粒洁净, 级配良好, 质地坚硬。本工程施工用砂从当地取得, 经过多次采样试验其含泥量、颗粒级配等各项指标均合格后, 方可采用。

粗骨料要求连续级配优质石灰岩碎石, 远运取得。

水泥采用小野田 P. O 52.5 普通硅酸盐水泥, 与骨料搭配较好。

水为当地地下水, 经试验可用。

□ 张杰, 沈霄云, 刘明贵. 钢管混凝土声波透射检测方法研究 □. NDT 无损检测, 2007, 29(9): 502-505.

□ 苏建坤, 渠文平, 孙锐. 声波 CT 技术在旧桥病害诊断中的应用 □. 物探与化探, 2009, 33(3): 354-357.

□ 丁建芳, 李苍松, 何发亮. 声波 CT 技术在桥梁病害评估中的应用 □. 声学技术, 2008, 27(4): 286-290.

□ 石鸣. 声波 CT 技术在某大桥混凝土无损检测中的应用 □. 山西建筑, 2008, 34(22): 313-314.

Bridge CT Technology and its Application in Quality Control of Bridge under Construction of Chengqin Expressway

Abstract Combined with practical test of Chengqin Expressway, influence of ray orthogonality, ray density and element number on reliability and resolution of bridge CT imaging is discussed. The result shows that bridge CT imaging is visualized with accurate position and reliable result, which could meet requirements for project quality control.

Key words Bridge sound wave CT; Bridge CT; Structure defect; Bridge quality test; Nondestructive test