

基于弹性波 CT 的大体积混凝土检测应用

王战军

(上海同济检测技术有限公司, 上海市 200092)

摘要: 现代土木工程时常涉及大体积混凝土,其施工及养护过程极易出现质量问题,因此项目实施过程中检测工作始终贯穿于各个环节。常规混凝土无损检测方法一般无法对混凝土内部大截面进行直观评判,而弹性波 CT 则一次性重构截面波速分布,经反演后直接推定剖面内缺陷存在与否以及缺陷的位置及规模。通过弹性波 CT 在大体积混凝土检测中的应用,并结合超声法等验证手段,验证了该方法分辨率高、可靠性好、图像直观等优点,为其他相关类型项目提供了有益的参考。

关键词: 弹性波 CT;桥梁;大体积混凝土;超声法;检测

中图分类号: U446.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)07-0305-03

0 引言

现代土木工程如桥梁工程、高层及大型设备基础、水利大坝等时常涉及到大体积混凝土,因其体积大且结构复杂,施工工艺及养护过程中极易出现质量问题,因此项目实施过程中检测工作始终贯穿于施工控制、病害诊断及加固评价等各个环节。

混凝土检测方法自 20 世纪 30 年代以来,得到了迅猛的发展^[1]。目前已有二十多种可行的方法,且已逐步形成完整的技术体系,例如回弹法、超声法、冲击回波法、雷达法、红外成像法、钻芯法等^[2]。这类传统检测方法通常以单测点为基础,采用抽样方式进行检测,一般无法得到对混凝土内部大截面进行整体评判的直接数据。而弹性波 CT 技术(弹性波层析成像技术)则不然,该方法利用弹性波速度与其物理力学参数的相关性^[3],在不损伤“检测对象”的情况下,利用检测剖面上的弹性波速,结合 CT 技术进行反演成像,以“图像”的方式完整地反映层析面上的内部结构特征,以实现质量检测的目的^[4-7]。

综上,弹性波 CT 在满足射线密度、射线正交性等要求的前提下^[8],可一次性重构大体积混凝土截面波速平面分布,具有分辨率高、可靠性好、图像直观等特点,已被越来越广泛地应用于大体积混凝土强度、空洞、不密实区等结构缺陷检测。

1 工程概况

某桥梁附属构筑物主要由南、北两侧现浇边墙构成,墙厚 2.0 m,长度分别为 45 m 及 49 m。因浇筑过程失误,拆模后发现南、北两侧边墙高度 1.8 m 以下存在多处蜂窝麻面等表观病害,为查明混凝土内部浇筑质量,决定选用弹性波 CT 对边墙进行检测,并通过墙体内部波速分布评价为设计提供修复建议。

2 弹性波 CT 工作原理

2.1 检测原理

弹性波 CT 的工作原理与医学 CT 类似。医学 CT 是利用 X 射线穿透人体,通过射线强度衰减的观测对人体组织成像。弹性波 CT 是利用声波穿透混凝土介质,通过声波走时和能量衰减的观测对工程结构成像。在弹性波 CT 检测中,从发射点到接受点,声波能量沿半径等于 1/4 波长的高斯射线束传播。

波速作为混凝土质量评价的定量指标是建立在理论研究和大量的实验数据基础之上的。研究和实验结果证明混凝土抗压强度与波速正相关,但是不同地区对应关系的参数有所差异,这主要是受骨料及养护环境的影响。同等抗压强度的以卵石为骨料的混凝土,比灰岩碎石骨料的高得多。因此在使用弹性波 CT 波速作混凝土质量评价时,要参考当地标准样品波速的测试结果。

弹性波在穿越混凝土时,其速度快慢与混凝土的密实度、弹性模量、剪切模量有关。密度大、强度高的混凝土其模量大,波速高、衰减小;破碎疏松的混凝土

收稿日期: 2021-03-02

作者简介: 王战军(1985—),男,硕士,工程师,从事工程物探及工程检测工作。

波速低、衰减大。如果混凝土存在缺陷或损伤,波速将表现为低速异常。

实际检测过程中,首先通过逐点敲击获取大量的首波走时数据,然后通过求解大型矩阵方程来获取测试区域速度剖面图像,根据速度剖面图像可以直观准确地判定隐患大小分布。

2.2 测线布置及网格设计

2.2.1 坐标设计

依据现场踏勘及设计图纸,对南北侧墙建立统一坐标系,并根据坐标系统布设检测剖面(边墙长度方向设定为 X 坐标,厚度方向设定为 Y 坐标),坐标系统设计见图 1。

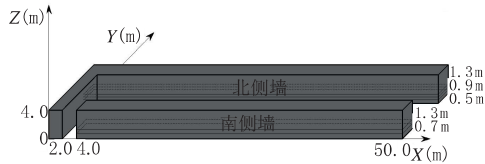


图 1 弹性波 CT 坐标系统设计图

2.2.2 检测布置

单剖面围绕墙体采用“L”型布设,激发及接收点距均为 0.5 m,通过射线对叠加形成墙体一定高度横截面检测的目的,南北边墙现场采集布置方式见图 2、图 3,现场检测见图 4。

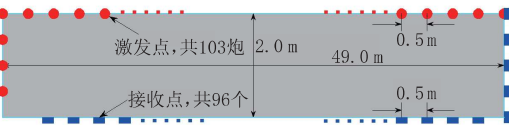


图 2 北侧墙弹性波 CT 测区现场布置图

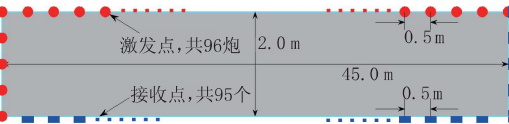


图 3 南侧墙弹性波 CT 测区现场布置图



图 4 弹性波 CT 现场检测示意图

3 检测效果

3.1 弹性波 CT 检测结果解译

由于弹性波速度与混凝土内部质量具有直接相关性,弹性波 CT 反演成果图中代表低速的颜色区域

一般对应质量不佳或存在缺陷^[9]。解译成果图中蓝色表示高波速,黄、绿色次之,红色为低波速,色标给出了颜色与波速的对应关系。

3.1.1 北侧墙检测结果

北侧墙完成 CT 剖面 3 条,分别对应墙高 0.5 m、墙高 0.9 m 及墙高 1.3 m,成果见图 5。

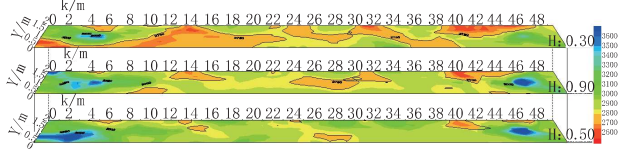


图 5 北侧墙弹性波 CT 波速等值线成果图(单位:m/s)

各剖面平均波速统计见表 1。

表 1 北侧墙剖面平均波速统计表 单位:m/s

剖面位置	墙高 0.5 m	墙高 0.9 m	墙高 1.3 m
平均波速	2 964	2 913	2 829

由图 5 可知:三剖面波速整体均匀性稍差,低速异常^[10]位于 0.5 m 高度剖面 39 ~ 42 m 及 45 ~ 47 m 处,0.9 m 高度剖面 13 ~ 15 m、31 ~ 32 m 及 39 ~ 46 m 处,1.3 m 高度剖面 12 ~ 15 m、30 ~ 32 m 及 39 ~ 47 m 处,异常区域吻合度较高,随墙体高度方向连贯性较好,推测为混凝土浇筑缺陷所致。

3.1.2 南侧墙检测结果

南侧墙完成 CT 剖面 2 条,分别对应墙高 0.7 m 及墙高 1.3 m,成果见图 6。

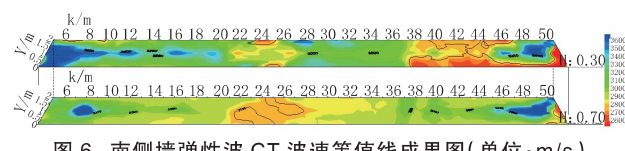


图 6 南侧墙弹性波 CT 波速等值线成果图(单位:m/s)

各剖面平均波速统计见表 2。

表 2 南侧墙剖面平均波速统计表 单位:m/s

剖面位置	0.7 m 高	1.3 m 高
平均波速	2 945	3 055

由图 6 可知:两剖面波速整体均匀性稍差,其中剖面自西向东 24 ~ 28 m 处因模板未拆除,呈现局部反演相对低速区域^[10]。1.3 m 高度剖面 37 ~ 45 m 处墙体浅表混凝土约 0.4 m 厚度范围应力波波速偏低,推测为混凝土浇筑缺陷所致。

3.2 结果验证

北侧墙 40 ~ 45 m 异常区域进行剔凿,直至混凝土完好,剔凿面积约为 1.72 m²,凿除深度 25 ~ 160 mm,见图 7。

南侧墙 36 ~ 42 m 异常区域进行剔凿,直至混凝土

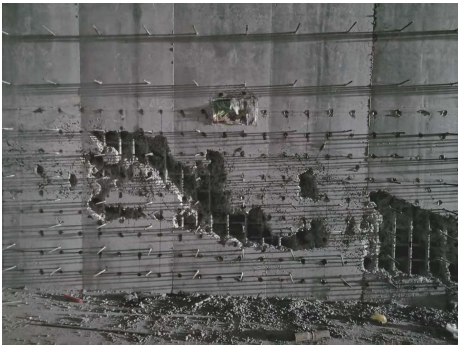


图 7 北侧墙异常区域(40~45 m)剔凿效果
土完好,剔凿面积约为 1.80 m²,凿除深度 25~140 mm,见图 8。



图 8 南侧墙异常区域(36~42 m)剔凿效果
本次弹性波 CT 测试与表面离析缺陷一致,经超声法检测波速异常位置高度契合,异常区域剔凿修复后经超声法复测不存在波速异常。

4 其他工程应用

某城际铁路 19# 墩设计宽度为 10.8 m,厚度为 4.5 m,采用 C35 混凝土建筑,拆模后发现局部存在蜂窝麻面,为对墩身浇筑质量进行诊断,采用弹性波 CT 及超声法进行综合检测,见图 9。



图 9 某城际铁路 19# 墩现场施工情况
弹性波 CT 分别于墩身距地面 0.3 m 高度及 0.8 m 高度布设水平测试剖面,检波器间距为 0.5 m,炮点间距为 0.5 m。单个剖面测试数据 2048 个,射线正交性和射线密度满足要求。
由图 10 可知:0.8 m 高度剖面平均波速为 3 580 m/s,0.3 m 高度剖面平均波速为 3 593 m/s,墩身波速总体呈现两侧大中间小特征,但并无局部异常,表明桥

墩内部无明显缺陷。依据以往工程经验,剖面中部 2.8~7.8 m 段(对应桥墩 4.5 m 等厚度段)波速相对偏低,随后于墩身中部 2.8~7.8 m 段布设超声测区,网格间距为 0.2 m,分别布置在距地面 0.2 m、0.4 m、0.6 m、0.8 m 及 1.0 m 高度处,测点共计 130 个。超声检测结果统计见表 3。

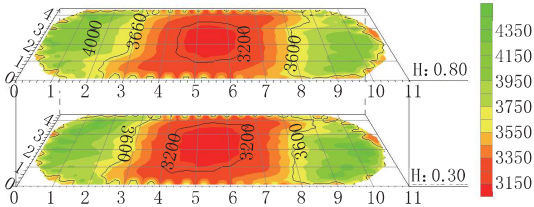


图 10 弹性波 CT 测试剖面成果图(单位:m/s)

表 3 墩身超声参数统计表

超声参数	波速/(m·s ⁻¹)	波幅/dB	频率/kHz
平均值	4 439	48.56	18.13
标准差	0.05	7.64	13.17

超声测区对应区域波速均匀,混凝土内部密实^[11]。考虑到养护期为 20 d,推测桥墩芯部混凝土龄期未到引起混凝土强度尚未达到设计强度。

5 结 语

该文通过弹性波 CT 在大体积混凝土检测中的项目应用,并结合超声法等验证手段,得出以下结论:

- (1)经多次项目实际应用,证明了弹性波 CT 检测大体积混凝土可行性,有效弥补了传统混凝土检测方法的不足之处,可供类似工程参考。
- (2)弹性波 CT 可一次性重构大体积混凝土截面波速平面分布,经反演后可以直观判定截面混凝土病害分布,具有分辨率高、可靠性好、图像直观、结构适用性强等特点。

参考文献:

[1] 吴新璇.混凝土无损检测技术手册[M].北京:人民交通出版社,2004.
[2] 张小琼,王战军.混凝土无损检测方法发展及应用[J].无损检测,2017,39(4):1-5.
[3] 王振宇,刘国华.土木工程的层析成像与广义反演研究[D].浙江杭州:浙江大学,2003.
[4] 齐曼卿,郭学彬,肖正学,等.弹性波 CT 在混凝土圆柱体冲击损伤实验中的应用[J].实验力学,2010,25(2):136-142.
[5] 中国水利电力物探科技信息网.工程物探手册[M].北京:中国水利水电出版社,2011.
[6] 顾孝同.国内工程 CT 技术的发展与应用[J].工程地球物理学报,2006,3(4):278-282.

(下转第 320 页)

表3 HDPE 防渗土工膜技术指标

项目	指标
厚度/mm	$\geq 0.3, < 0.6$
幅度/m	≥ 3.0
纵横拉伸强度/MPa	≥ 17
纵横断裂伸长率/%	≥ 450
直角撕裂强度/(N·mm)	≥ 80
搭接宽度/cm	≥ 5.0
搭接方式	热焊

(8)防撞墙钢筋预埋。待泡沫轻质土浇筑到顶部时,进行防撞墙钢筋预埋,防撞墙按照本项目挡墙防撞墙进行施工。

(9)泡沫轻质土养护。泡沫轻质土覆盖养护应超过7d,7d前严禁人员行走、堆积物品。

4 泡沫轻质土在改扩建工程中的应用优势

根据以上分析可知,泡沫轻质土具有质轻、强度高、耐久性好等诸多优势,在道路加宽扩建、路面基层及软基换填、桥台背填筑、机场道面垫层、滑坡路段填筑中均可获得较好的应用效果^[5]。与传统软基处理方法相比,泡沫轻质土的处理效果更佳。

4.1 传统软基处理存在的问题

在改扩建工程项目实施中,传统软基处理方法往往面临着以下问题:

(1)需进行新的征地。

(2)软基路堤两侧或单侧拼接加宽后,新旧路基下地基固结差异及传统拓宽填料的受荷压缩,使其极易出现沉降差异,导致路面破坏。

(3)路基拓宽施工时,软土地基处理对作业空间要求较大,且存在施工扰动情况;工期相对较长,对交通影响较大。

上述问题直接导致改扩建工程实施存在诸多限制,且征地范围的扩大、施工工期的延长,导致相应的项目成本大大增加,在经济效益方面略显不足。

4.2 泡沫轻质土运用优势

在道路改扩建工程中,应用泡沫轻质土可将拓宽处理对象从软基转变为路堤,降低了软基附加应

力,有利于简化软基施工,尤其对于路堤填筑高度较大(大于3m)或施工作业面狭窄的路段,泡沫轻质土路堤加宽方法更能体现其优越性^[6],主要优点如下:

(1)泡沫轻质土固化后,可实现垂直填筑,有利于节省用地,减少征地拆迁。

(2)泡沫轻质土质轻,可有效减少填土载荷,减少拓宽路基软基处理费用,减少新老路基差异沉降。

(3)泡沫轻质土自密实,无需振捣,可采取管道泵送施工方法,作业面相对较小,施工干扰小。

(4)泡沫轻质土施工工期短,对交通影响小。

本次改扩建施工中,K13+888~K14+025段左幅及K14+050~K14+275段右幅采用泡沫轻质土施工方法,减少了路基施工对周边的影响,保证了路基作业质量与周边安全。

5 结 语

(1)泡沫轻质土质轻、施工便利、施工工期短,在控制地基不均匀沉降、侧移方面表现优异,将其用于道路地基处理、新旧地基搭接处理具有较好效果,尤其是改扩建工程中此材料的应用具有显著优势。

(2)在工程实践中,应结合项目实际情况合理配置泡沫轻质土,控制好各项技术指标,同时规范开展各道工序作业,加强质量检验与管理,确保地基质量满足设计要求。

参考文献:

- [1] 裴友强,张留俊,尹利华.泡沫轻质土的疲劳性能及工程应用研究[J].硅酸盐通报,2019,38(4):217-224.
- [2] 张发如,张留俊,尹利华.泡沫轻质土路基的适用性研究[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(3):45-47.
- [3] 陈忠平,汪建斌,刘吉福,等.泡沫轻质土动力工程特性试验研究[J].公路,2019,64(2):82-85.
- [4] 李硕,杨军宏.泡沫轻质土在高速公路改扩建工程中的应用[J].公路交通科技,2018,35(增刊1):5-10.
- [5] 游乃安.浅谈泡沫轻质土在高速公路改扩建中的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2017(5):8-10.
- [6] 李建宇,王忠杰,杨林,等.泡沫轻质土路基应力应变现场监测及结果[J].筑路机械与施工机械化,2018,35(12):107-111.

(上接第307页)

- [7] 高远富,王仲刚,周凌,等.钢管混凝土叠合柱弹性波CT空洞与脱空缺陷检测分析[J].物探化探计算技术,2014,37(1):89-96.
- [8] 朱文仲,赵志忠.弹性波CT技术几个重要问题的研究[J].工程地球物理学报,2008,2(5):173-180.
- [9] O.Martinez,Mostafa Akhnak,Luis G,etc.Montero De

- Espinosa a small ZD ultrasonic array for NDT applications[J].NDT&E International,2003(36):57-63.
- [10] ASTM C597-97,Standard test method for pulse velocity through-concrete[S].
- [11] CECS21:2000,超声法检测混凝土缺陷技术规程[S].