

# 声波 CT 技术在泸定桥东桥台内部结构探测中的应用

何发亮 李苍松 谷明成

(铁道部科学研究院西南分院 成都 610031)

袁金泉 韦 荃

(四川文物考古研究所 成都 610041)

**摘要** 为配合国家文物局对国家首批重点文物保护单位——泸定桥病害整治工作的顺利开展,我们采用声波 CT 层析成像技术对东桥台内部结构进行了泸定桥东桥台的无损探测,为泸定桥东桥台裂缝病害原因分析提供了科学依据,并在此基础上提出了相应的病害整治措施。

**关键词** 声波 CT 技术 桥台内部结构 无损检测 应用

**中图分类号** TP391.76

位于四川省泸定县城西大渡河上的泸定桥,始建于清康熙四十五年(1706年),是川藏交通的咽喉,军事上的要津。1961年,被国务院公布为全国首批重点文物保护单位。

历经近三百年的风雨沧桑,泸定桥东、西桥台均不同程度地出现了裂缝病害,危及泸定桥的安全。但是,有关桥台内部结构、充填物及地龙桩长度等基本情况的文字记载却模糊不清或根本没有记述。对于这一全国重点文物保护单位,不能采取其他有损文物的勘探方式。为弄清桥台(特别是东桥台)裂缝病害状况及其产生的原因,并进行桥台稳定性计算和设计相应的病害整治方案提供可靠的基础资料,我们采取声波 CT 层析成像技术对东桥台的内部结构进行了无损探测。

## 1 桥台的病害现状及场地地质

桥台病害主要表现为桥台台身周围条石砌墙及落井内裂缝,东桥台裂缝展示如图 1、2 所示。

东桥台表面裂缝宽窄不一,宽者达 10cm,“能伸入拳头”,窄者仅 0.1cm;落井内靠河侧井壁顶部裂缝呈外大里小的 V 字形,上游侧壁与靠河侧壁交接处及下游侧壁与靠公路侧壁交接

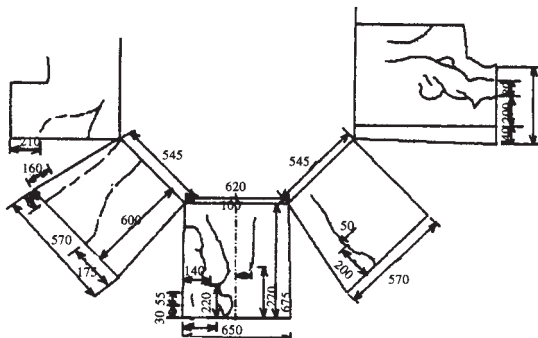


图 1 东桥台表面裂缝展示图(图中尺寸单位为 cm)  
Fig. 1 The reveal of cracks on surface of east abutment

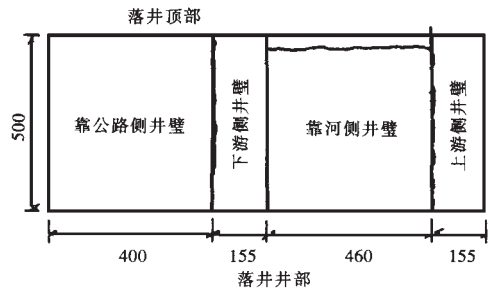


图 2 东桥台沉井内裂缝展示图(图中尺寸单位为 cm)

Fig. 2 The reveal of cracks on surface of open caisson in east abutment

处出现两条竖向裂缝 ,且明显呈下窄上宽 ,台上房内地面上虽未见裂缝痕迹 ,但靠下游侧房外地面上、下游侧台身外壁及上游侧外壁均可见裂缝。由此可见 ,落井侧壁横向裂缝有将桥台与桥台后缘分离的趋势 ,是东桥台潜在的最大隐患。

西桥台存在的表面裂缝病害与东桥台类似 ,但严重程度较东桥台低。

据钻孔资料 ,东桥台外地面以下自上而下依此为 :土灰色干 ~ 稍湿粘土和辉绿岩、花岗岩或霞石正长岩卵石混杂堆积物 ,土灰色的辉绿岩、花岗岩或霞石正长岩卵石、漂石 ,充填沙或粘土 ,饱水辉绿岩、花岗岩或霞石正长岩卵石、漂石 ,充填沙或粘土。卵石和漂石磨园度良好。东桥台所在位置为古坡积、洪积和河流冲积层 ,下覆基岩极深 ,钻孔未能揭示基岩顶面及基岩情况。

## 2 东桥台内部结构声波 CT 检测

### 2.1 CT 层析成像法探测基本原理和仪器系统

岩土及混凝土声波 CT 层析成像 (Computer Tomography ,简称 CT 成像或 CT) ,国外始于 70 年代。该方法借助医学界 X 射线断层扫描的基本手段 ,结合其物理力学性质的相关分析 ,采用射线走时和振幅来重构岩土及混凝土内部声速值及衰减系数的场分布 ,通过像素、色谱、立体网络的综合展示以期达到直观反映混凝土、岩石或土体内部结构图像之目的。

近几年来 ,在十多项工程实践基础上 ,我们将优化方法和专家系统引入声波 CT 成像 ,将专家经验与 CT 技术结合成一个有机的模糊控制系统。工程检测实践应用表明 ,声波 CT 技术在检测混凝土内部结构及岩土检测方面效果良好。

检测所用主机为铁道部科学研究院西南分院研制的 ZGS1610 智能工程检测声波仪。系统最小分辨时间 500ns ,幅度分辨 16Bit ,记录长度 32K ,最大量程 5V ,四通道。发射、同步接收、量程等参数调节、数据传输等全部由便携式计算机通过并行口对主机实施控制。

### 2.2 CT 检测剖面布置

在对东桥台内部结构实施声波 CT 检测时 ,结合现场实际条件 ,不同部位采用不同的方法进行。对台身 ,采用落井内布点锤击发射、台外侧布点接收的声波 CT 层析成像法进行检测 (共布置检测剖面 7 个 ,剖面编号为 A、B、C、D、E、F、和 G) ;对台基采用在钻孔中用电火花作发射源的声波 CT 层析成像法检测 (共布置 2 个剖面) ,桥台的上、下游侧各布置两个钻孔 ,作声测、地层勘探及加固效果检测。图 3 为声波 CT 层析成像检测剖面平面布置图。

### 2.3 桥台台身声波 CT 检测

检测采用沉井内布点锤击发射、台外侧布点接收的声波 CT 层析成像方法进行检测 , A、B、C、D、E、F 和 G 剖面水平长度分别为 11.13、11.09、10.62、8.74、9.974、8.825 和 9.81m ,落井内剖面高为 4m (9 个测点 ,测点间距 50cm) ,台外侧剖面高为 5.0m (11 个测点 ,测点间距 50cm)。

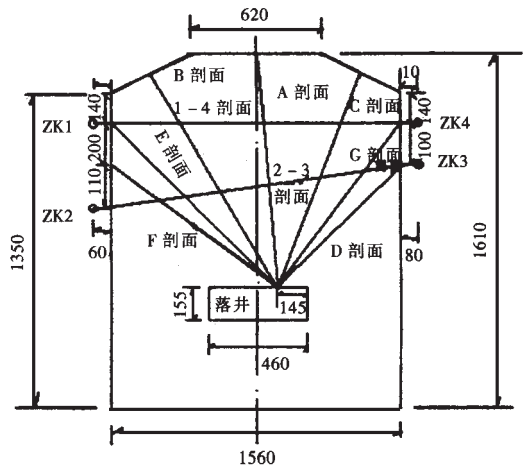


图 3 声波 CT 层析成像检测剖面平面布置图

Fig. 3 The distribution of sounding CT detect sections

图 4、5、6、7、8、9 和 10 分别为 A、B、C、D、E、F、G 剖面 CT 层析成像结果图。

### 2.4 台基声波 CT 检测

采用 ZDF—1 型电火花发射源在桥台下游侧钻孔内发射，用带前置放大的换能器在桥台上游侧钻孔内接收声波信号，以此形成声波 CT 层析成像检测剖面。

桥台基础声波 CT 层析成像检测共进行 2 个剖面测试，1—4 剖面在 ZK1 钻孔内发射、ZK4 钻孔内接收，2—3 剖面在 ZK2 钻孔内发射、ZK3 钻孔内接收。剖面具体位置见图 3。

图 11 和图 12 分别为 1—4 和 2—3 剖面 CT 层析成像图。

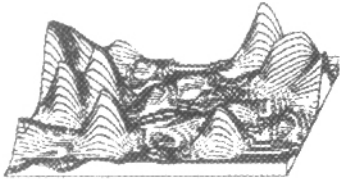


图 4 A 剖面 CT 层析成像图  
Fig. 4 Computer Tomography of section A



图 5 B 剖面 CT 层析成像图  
Fig. 5 Computer Tomography of section B

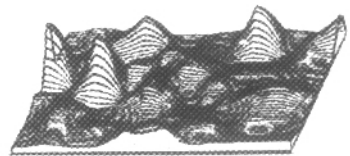


图 6 C 剖面 CT 层析成像图  
Fig. 6 Computer Tomography of section C



图 7 D 剖面 CT 层析成像图  
Fig. 7 Computer Tomography of section D

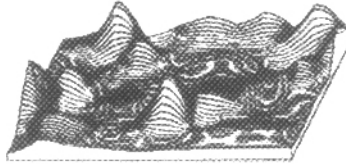


图 8 E 剖面 CT 层析成像图  
Fig. 8 Computer Tomography of section E



图 9 F 剖面 CT 层析成像图  
Fig. 9 Computer Tomography of section F



图 10 G 剖面 CT 层析成像图  
Fig. 10 Computer Tomography of section G

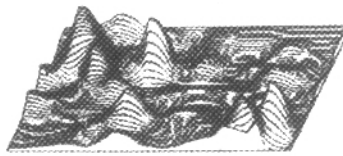


图 11 1—4 剖面 CT 层析成像图  
Fig. 11 Computer Tomography of section 1—4

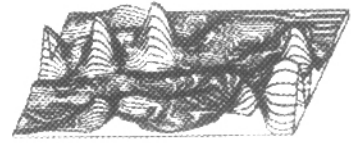


图 12 2—3 剖面 CT 层析成像图  
Fig. 12 Computer Tomography of section 2—3

### 3 声波 CT 层析成像检测结果分析

声波 CT 层析成像检测表明，实测主频均在 1200Hz 以下，高频信号衰减极为明显，这与声波信号在土石地层中的传播特性极为吻合。表 1 为 9 个剖面声波 CT 层析成像检测剖面平均速度及均匀性统计结果。

从表 1 可看出，东桥台及基础内部填充物极为不均匀。

CT 剖面反映，土石声波纵波速度分为六级：100 ~ 917m/s、917 ~ 1733m/s、1733 ~ 2550m/s、2550 ~ 3367m/s、3367 ~ 4183m/s、4183 ~ 5000m/s。

参照中国建筑工业出版社《工程地质手册》各类岩石、土与纵波速度的关系以及我们长期从事岩土物理学特性声波测试的经验，新鲜或微风化花岗岩、辉绿岩、霞石正长岩声波纵波速度  $V_p$  为 4000 ~ 5000m/s，中等风化者  $V_p$  为 3000 ~ 4000m/s，强风化者  $V_p$  为 2000 ~ 3000m/s，极强风化者  $V_p$  小于 2000m/s。结合钻孔取芯结果，可以判定东桥台除台周 0.3 ~ 0.5m 厚的砌墙外，内部填充物为松散砂土，间夹岩性为花岗岩、辉绿岩和霞石正长岩的

近园形漂石、卵石,漂石大小不一,直径为 0.2~1.5m,绝大部分漂石直径为 0.5~0.8m,风化程度各异,从极强风化至微风化或未风化(新鲜)。

表 1 剖面声波 CT 层析成像检测结果统计

Table 1 Statistical results of CT section

序号	剖面编号	剖面平均速度/ $m \cdot s^{-1}$	均匀性评价	序号	剖面编号	剖面平均速度/ $m \cdot s^{-1}$	均匀性评价
1	A	1188	极差	6	F	986	极差
2	B	959	极差	7	G	1024	极差
3	C	833	极差	8	1—4	818	极差
4	D	716	极差	9	2—3	814	极差
5	E	987	极差				

从成像图明显可见,漂石风化程度由外及里从极强风化渐变为微风化或未风化。表 2 为各剖面松散砂土、极强风化、强风化、中等风化、微风化或未风化(新鲜)花岗岩、辉绿岩、霞石正长岩漂石所占成分比较统计结果。

CT 检测结果表明,东桥台内部结构情况如图 13 所示。

表 2 东桥台各剖面内部充填物构成统计表

Table 2 Statistical internal structure components of each section in east abutment

序号	剖面编号	松嵌砂土	极强风化漂石	强风化漂石	中等风化漂石	微风化或新鲜漂石
1	A	65	11	9	7	6
2	B	58	20	9	6	5
3	C	75	12	6	4	3
4	D	80	9	5	3	3
5	E	55	21	11	7	6
6	F	60	20	8	7	5
7	G	70	11	9	5	4
8	1—4	70	13	8	5	4
9	2—3	78	9	5	5	3

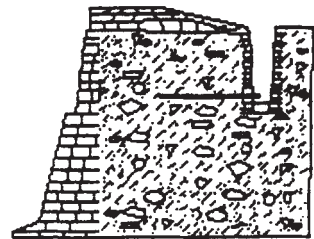


图 13 东桥台内部结构示意图

Fig. 13 The reveal of internal structure in east abutment

#### 4 结论及建议

(1) 桥台内部充填物声波 CT 探测结果和台侧钻空勘察成果的互为验证,说明采用声波 CT 层析成像探测技术进行桥台内部结构(充填物)的探测是成功的,在对文物进行无损检测中值得推广应用。

(2) 泸定桥东桥台台周为花岗岩和辉绿岩条石砌墙,台基外侧(靠河侧)为花岗岩和辉绿岩条石浆砌堡坎(衡重式下挡墙),台身及台基内部为人工填筑的松散沙土和花岗岩、辉绿岩或霞石正长岩漂、卵石,漂石直径多为 0.5~0.8m,大者达 1.5m,内部充填物极不均匀且结合极差。

(3) 为防止东桥台台身开裂病害的进一步加重,进行如下工作。

(a) 封闭台身及台基靠河侧堡坎表面裂缝(留一定数量的泄水孔),防止洪水季节河水沿裂缝进入台身和台基对台身和台基内部充填物的淘蚀;

(b) 改善桥台内部结构物的力学特性,增强桥台抗倾、滑能力。对台身和台基内部充填物进行注浆加固,提高内部充填物的完整性,并使台身和台基内部充填物与台周花岗岩条石砌

墙及下部堡坎成为一体；

(c) 改善桥台落井内地龙桩受力结构，将部分受力转移到桥台落井后及两侧的填筑土石中，减轻地龙桩上部台身承力。

(d) 对桥台进行稳定性检算，以确定桥台的加固方案。

## 参 考 文 献

- 1 尚志远编著 检测声学原理及应用 西安：西北大学出版社，1996
- 2 栗健，柯昌俊等，声波 CT 技术在普舍寨桥基础注浆加固检测中的应用。见：铁道部科学研究院西南分院建院四十周年学术论文集，1999，(2) 25~30
- 3 李苍松，栗健，何发亮。声波 CT 技术在某电站管桥底板混凝土质量无损检测中的应用。见：铁道部科学研究院西南分院建院四十周年学术论文集，1999，(2)：184~186
- 4 工程地质手册编写委员会。工程地质手册(第三版)。北京：中国建筑工业出版社，1992

## The application of acoustic computer tomography technology in sounding of internal structure in east abutment, Luding Bridge

HE Faliang, LI Cangsong, GU Mingcheng

(Southwest Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Chengdu 610031)

YUAN Jingquan, WEI Quan

(Cultural Relics and Archaeology Research Institute, Chengdu 610041)

### Abstract

Acoustic computer tomography technology was employed in sounding of abutment internal structure in east abutment, in coordination with the Calamitous treatment which made by bureau of cltural relics, the People's Republic of China in Luding bridge, one of first batch national priority cltural relics protect unit at the early time of this year. The sounding results contribute scientific basis for cause analysis of crack disaster, and appropriate calamitous treatment were offered according to sounding results. The application of acoustic computer tomography technology in sounding of internal structure in east abutment, Luding bridge will be expounded in this paper.

**Key Words** Acoustic computer tomography technology, Internal structure east abutment, Measurement of non - damage, Applications.

2000 - 09 - 06 收到