

# Application of Seismic CT Technology in Disease Detection of Bainijing Tunnel

Oulong Huang<sup>1</sup>, Min Zhu<sup>2</sup>, Wanbao Li<sup>3</sup>

<sup>1</sup>The Second Engineering Institute of Scientific Research and Engineering Design of Ground Force in South Military Area, Kunming Yunnan

<sup>2</sup>The Headquarters of Heping Village, Beijing

<sup>3</sup>Yunnan Geophysical Exploration of Aerospace Engineering Co. Ltd., Kunming Yunnan

Email: karonhol@163.com

Received: Jun. 2<sup>nd</sup>, 2018; accepted: Jun. 15<sup>th</sup>, 2018; published: Jun. 22<sup>nd</sup>, 2018

---

## Abstract

The seismic CT technology can intuitively display the internal structure of the geology, and it has high resolution, reliability, and intuitive images. So it is therefore widely used in engineering geological exploration and disease diagnosis. This paper first introduces the basic principles of seismic CT, then describes the disease conditions encountered in construction of Bainijing tunnel, and finally uses the seismic CT technology to detect Bainijing tunnel and analyzes the causes of tunnel diseases. Then the geological environment of the area is verified to prove the accuracy of the detection results. Combined with the analysis results, a corresponding disposal proposal is proposed to provide the basis for construction of the tunnel.

## Keywords

Seismic CT, Bainijing Tunnel, Tunnel Disease, Velocity Scanning

---

# 地震CT技术在白泥井隧道病害探测中的应用

黄欧龙<sup>1</sup>, 诸民<sup>2</sup>, 李万宝<sup>3</sup>

<sup>1</sup>南部战区陆军第二工程科研设计所, 云南 昆明

<sup>2</sup>和平村指挥部, 北京

<sup>3</sup>云南航天工程物探检测股份有限公司, 云南 昆明

Email: karonhol@163.com

收稿日期: 2018年6月2日; 录用日期: 2018年6月15日; 发布日期: 2018年6月22日

## 摘要

地震CT技术可将地质体内部结构进行直观的显示,具有分辨率高、可靠性好、图像直观等特点,因此广泛应用于工程地质勘察和病害诊断中。本文首先对地震CT的基本原理进行介绍,然后对白泥井隧道施工中遇到的病害情况进行描述,最后利用地震CT技术对白泥井隧道进行探测,分析其造成隧道病害的原因。通过与隧址区地质环境进行验证,证明地震CT技术探测结果的准确性,同时结合分析结果,提出相应的处置建议方案,为隧道施工建设提供依据。

## 关键词

地震CT, 白泥井隧道, 隧道病害, 速度扫描

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来,随着国家一带一路战略的发展,我国高速公路迎来了新的建设高潮,尤其在我国西南地区,以云南为例,“十三五”期间,计划高速公路通车里程约6000公里。由于云南省位于我国西南地区,地形起伏较大,地质环境复杂,因此在高速公路建设中不免要进行隧道、桥梁建设;同时,由于云南地区岩溶发育、地质构造活动较大,在隧道建设中将经常遇到各种隧道病害,如何查明开挖隧道前地质情况,如何对已发生病害隧道进行探测,以获取更为准确的地质信息就十分重要[1][2][3][4][5]。本文重点介绍地震CT技术在云南某高速公路白泥井隧道病害发生后进行探测处置的情况。

## 2. 地震CT原理介绍

目前国内外地震CT探测的主要方法是地震反射法,属于地球物理领域的一种勘探方法。由于隧道为全空间模型,围岩各个方向都有可能发生反射波,因此将为数据识别、提取和处理增加很大的难度。同时在隧道内进行地质探测时,观测系统的布置也受到场地条件限制,基于地震反射法的地震CT技术具有很大的局限性[6][7]。

本文地震CT的探测方法采用的是地震透射法。它可以准确可靠的利用地震波射线对地质体进行扫描,通过对地震波走时和能量衰减进行观测,从而得到该部分岩体介质的速度分布,再通过计算机重建地质体以反演计算对探测区地质体内部结构进行成像,为隧道工程建设提供有效措施。该方法测线数量与激发点和接收点的测点数量有关,因此其具有图像信息量大、分辨率高、可靠性好等特点,可直观反映出探测区域内岩体结构特性[7][8]。

地震CT是在地表布置激发点和接收点,组成观测系统,由激发点产生的地震波经地下地质结构的透射等过程,达到接收点,利用接收点记录的信息,进行地质体内部重建,从而反映地质体的真实状况。该方法地震CT原理示意图如图1所示。

地震波穿透岩土介质时,其速度快慢与岩土介质的弹性模量、剪切模量、密度有关,根据地震波走时或地震波场观测数据对介质进行反演,获取探测区域内部介质的波速、慢度、密度或衰减速系数等,

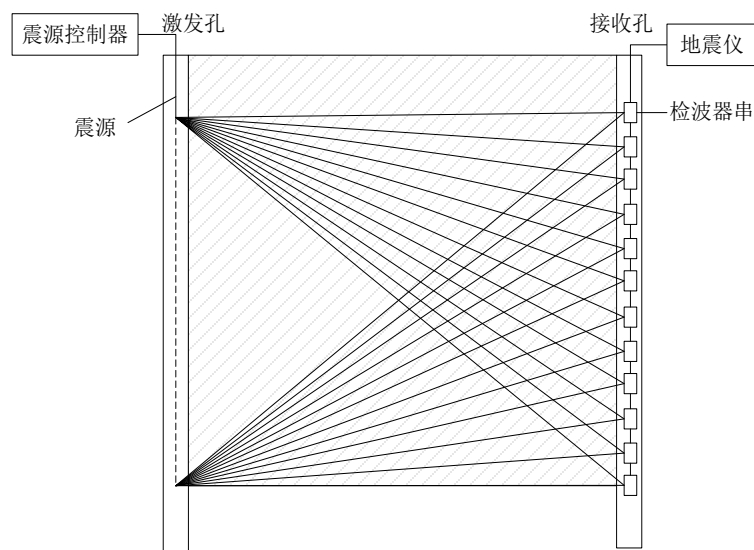


Figure 1. Earthquake CT Working Principle Diagram  
图 1. 地震 CT 的工作原理示意图

从而识别探测区域内部的结构。密度大、强度高的岩石模量大，波速高，走时短，反之亦然。完整坚硬的岩体波速高，吸收弱，破碎岩体和松散的土体波速低，吸收强。孔隙度小的密实岩体地震波的能量衰减减小，破碎的岩体和松散的土体能量衰减大。因而地震 CT 图像能可靠地反映各类岩土体的分布界线及岩体的破碎程度和分布[9] [10] [11] [12]，从而为隧道围岩病害诊治提供详实的理论依据。

### 3. 工程概况

某高速公路白泥井 3 号隧道为单洞双车道对向行车隧道(图 2)，隧道里程为 K83+580~K84+555 之间，隧道全长为 975 m，最大埋深 100.7 m。隧道出口端 K84+500~K84+555 端位于某古滑坡体上，在施工前已对古滑坡体进行处理，施工中在对出口端正洞进行开挖过程中出现基础下沉，下沉量达 40~60cm，拱顶变形，侧壁位移，衬砌破坏等现象。

### 4. 工程地质条件

隧道区域属构造侵蚀中高山地貌。出口端为页岩夹泥质粉砂岩，围岩属软质岩层，岩体力学性质较差，围岩较不稳定，易产生拱部坍塌和侧壁位移变形，且位于古滑坡段隧道易产生整体位移变形。同时受构造影响，隧道区域内次级构造发育，围岩破碎，节理裂隙发育，风化严重，强风化层最厚处达到 70 m。

隧道所属区域地势较高，气候垂直变化显著，干湿两季分明，冬季寒冷干燥。区内无河流，地下水主要为基岩裂隙水，含水层主要为页岩夹泥质粉砂岩的强风化层。隧道轴线位于地下水位线以下，受地下水浸润，隧道出口端的页岩、泥质粉砂岩软化，岩体力学强度较低。

### 5. 探测方法

为获取隧道出口端的地质病害具体原因，详细查清隧道病害段地质条件情况，保障隧道安全有效施工，同时也为隧道变更设计提供有效依据。特对隧道出口端利用地震 CT 技术进行探测。在隧道出口段布置三条地震 CT 勘探剖面，如图 3 所示。



**Figure 2.** The exit of Baihejing tunnel  
**图 2.** 白泥井隧道出口端



**Figure 3.** Seismic CT exploration section layout  
**图 3.** 地震 CT 勘探剖面布置示意图

I 剖面布置在 K84+457 处，剖面近直立，垂直于隧道轴向。针对该剖面布置两组观测系统，第一观测系统为在山上布置激发点，隧道内沿拱圈和仰拱布置 48 个接收点，接收检波器的频率为 100Hz，激发点和接收点布置在与隧道轴线正交的垂直平面内。炮点排列长 250 m，炮间距 2 m，共 126 炮。第二观测系统为接收点和激发点都布置在山坡第一组观测系统的炮点排列上，检波器间距 2 m，炮点设置在山坡上部，检波点设置在山坡下部，共激发了 24 炮。

II、III 剖面为纵向倾斜剖面，炮点排列沿平行隧道轴向方向布置在线路右侧山上的 K84+440~+818 段，炮点排列距隧道 400~450 m，炮间距 2 m。接收排列沿平行隧道轴向方向，分别布置在线路左侧山下的 K84+445~+539 和 K84+449~+538 段，两排列高程相差 10 m，分别距隧道约 100 m 和 120 m，道间距 2 m。接收检波器的频率为 100Hz，两条剖面各激发了 161 炮。

## 6. 探测结果分析

### 6.1. I 剖面探测结果

图 4 显示为 K84+457 段横断面位置隧道围岩波速分布情况。从图中可看出，隧道右侧约 20 m 发育断裂破碎带，破碎带围岩波速小于 1.5 km/s，为松散体和强风化岩体，破碎带上宽下窄，在地面出露宽度从老公路右侧开始向下约 30 m 左右。隧道洞身周围岩体波速大于 1.5 km/s，为中等风化岩，隧道基础围岩的波速大于 2.0 km/s，为较完整的岩体，这说明隧道的基础是稳定的。

### 6.2. II 剖面探测结果

图 5 显示为 K84+412~550 段隧道洞身周围围岩波速分布情况。此剖面为隧道洞身附近的一条纵剖面，围岩整体的波速大于 2.0 km/s，为较完整的山体，局部有中等风化岩体存在。该剖面围岩的波速呈高低相间分布，低速区的走向与隧道轴向垂直，这说明有垂直于隧道轴向的构造存在。

### 6.3. III 剖面探测结果

图 6 显示为 K84+400~550 段隧道基础围岩波速分布情况。此剖面为隧道基础的一条纵剖面，围岩的整体波速大于 2.0 km/s，为较完整的山体，局部有中等风化岩体存在。该剖面围岩的波速呈高低相间分布，高速区和低速区的走向与隧道轴向垂直，这说明有垂直于隧道轴向的构造存在，这一结果于 II 剖面的结果互为印证。

由得到的 I、II、III 三条剖面的地震 CT 速度扫描图像可以看出，隧道出口段围岩波速偏低，微风化和未风化等完整性较好的岩体波速为 2.0~3.0 km/s，中等风化岩的波速为 1.5~2.0 km/s，强风化岩体的波速为 1.0~1.5 km/s，地表松散层的厚度为 5~10 m，波速小于 1.0 km/s。隧道洞身从中等风化岩体的围岩中穿过，在洞身右侧约 20 m 发育有上宽下窄的断裂破碎带。

### 6.4. 现场踏勘结果

通过现场踏勘，在隧道右侧发现有断裂带出露，经现场测量得出：断裂带走向为北西 325°，倾角为 81°，倾向 60°。断裂带左侧岩层产状为 10°，倾角为 18°；断裂带右侧岩层产状为 250°，倾角为 25°，图 7、图 8 为现场踏勘结果。

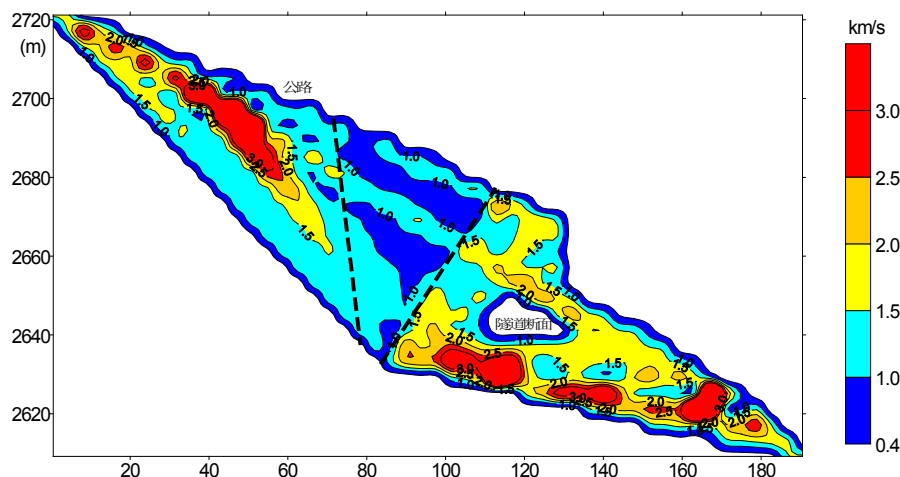


Figure 4. The image of Section I seismic CT speed scanning

图 4. I 剖面地震 CT 速度扫描图

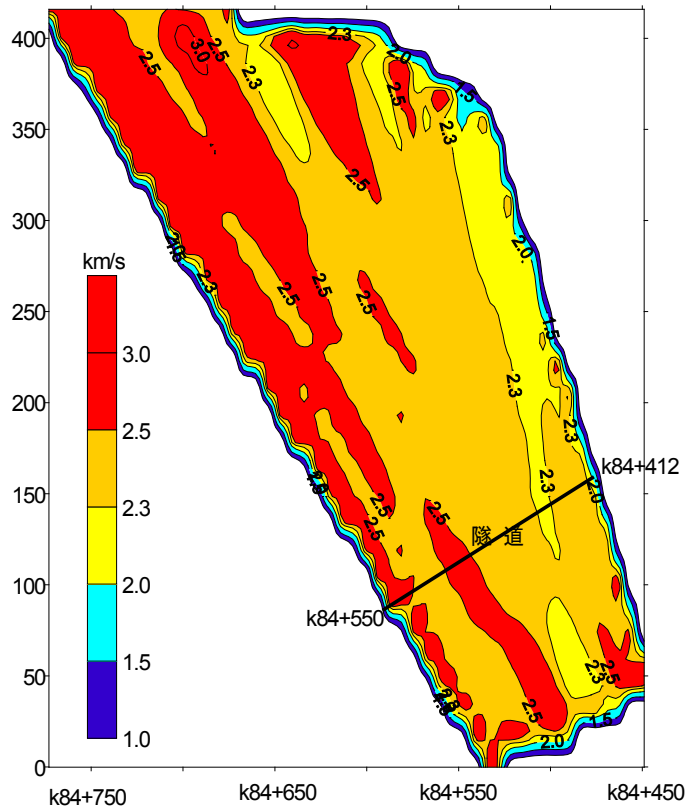


Figure 5. The image of Section II seismic CT speed scanning  
图 5. II 剖面地震 CT 速度扫描图

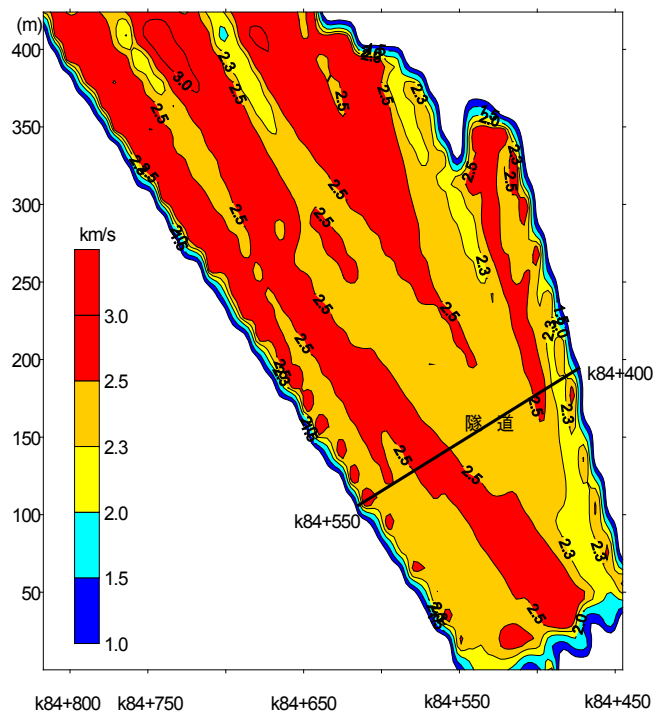


Figure 6. The image of Section III seismic CT speed scanning  
图 6. III 剖面地震 CT 速度扫描图



**Figure 7.** The picture of breakage fracture zone  
**图 7.** 断裂面位置图

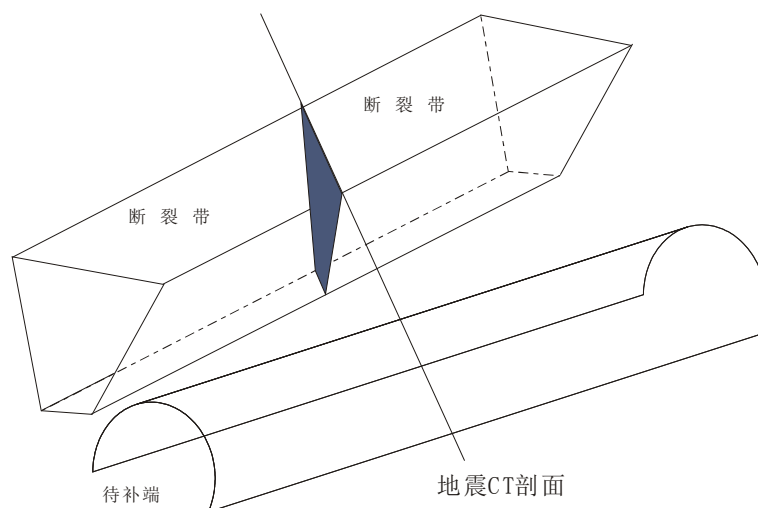


**Figure 8.** The left Rock Formation of breakage fracture zone  
**图 8.** 断裂带左侧岩层产状图

## 6.5. 结果分析

综合上述结果分析，对白泥井 3 号隧道可得出以下几点结论：

- 1) 隧道出口段围岩波速多分布在 1.5 km/s~2.0 km/s 之间，围岩以中 - 强风化岩体为主，多属 II 类围岩，局部有 III 类围岩存在，隧道基础围岩是稳定的。
- 2) 隧道围岩中发育有两组构造，一组构造为北东向，另一组为近北西向。北东向构造与出口段隧道走向正交，对隧道的稳定性影响不大；近北西向构造岩层产状为  $10^\circ$ ，倾角为  $18^\circ$ ；隧道右侧山体 20 m 左右，为一上宽下窄的断裂破碎带，山坡上从公路边开始，出露宽度约为 30 m。该探测结果和现场探勘结果吻合。
- 3) 隧道右侧北西向的断裂带与隧道走向呈小角度相交，对隧道出口段右侧稳定有一定影响，隧道出口端基础下沉和出口外部的滑坡有较大可能是该断裂带的延伸部位。
- 4) 综上可推断隧道附近围岩地质情况如图 9 所示。



**Figure 9.** The diagram of geological conditions of the surrounding rock in tunnel exit

**图 9.** 隧道出口段围岩地质情况示意图

## 7. 结论

本文通过对白泥井隧道出口段进行地震 CT 探测, 得出白泥井隧道出口段围岩分布情况, 在隧道右侧存在一个北西向断裂带与其呈小角度相交, 对隧道出口段衬砌有一定影响, 同时根据地震 CT 探测结果, 隧道出口段基础围岩是稳定的。建议对隧道出口段断裂带附近增大二衬和仰拱的厚度, 并对该段隧道右侧围岩及拱顶进行喷锚注浆, 增大隧道整体强度, 同时也使隧道侧向稳定性得到增强。

## 参考文献

- [1] 柏松平. 云南复杂地质环境公路地质病害诱发机理及其对策研究[D]: [博士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
- [2] 李敏. 小曼萨河公路隧道衬砌裂损机制与加固措施研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [3] 赵永国, 王华牢, 韩常领, 王万平. 公路隧道病害的分类特征与成因分析[J]. 公路, 2008(7): 227-232.
- [4] 吴梦军, 张永兴, 刘新荣. 公路隧道病害处治技术研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007(5): 967-971.
- [5] 赖金星, 谢永利, 赵严峰. 公路隧道衬砌裂损病害检测与治理对策[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2007(1): 37-41.
- [6] 赵永贵, 王超凡, 陈燕民, 郭鸿, 靳洪晓, 任汉章, 卢建全. 地震CT及其地质解释[J]. 地质科学, 1997(1): 96-102.
- [7] 肖宽怀. 隧道超前预报地球物理方法及应用研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [8] 苏鹏. 综合物探在岩溶区铁路路基与隧道病害探测中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [9] 李志厚, 刘庭金, 朱合华. 某偏压连拱隧道地质病害地震 CT 探测及病害处理[J]. 现代隧道技术, 2003(4): 63-67, 73.
- [10] 王超凡, 赵永贵, 靳洪晓, 郭鸿, 李勤. 地震 CT 及其在采空区探测中的应用[J]. 地球物理学报, 1998(S1): 367-375.
- [11] 王书文, 徐圣集, 蓝航, 潘俊锋, 陈法兵. 地震 CT 技术在采煤工作面的应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(7): 24-27, 84.
- [12] 邱庆程, 李伟和. 跨孔地震 CT 层析成像在岩溶勘察中的应用[J]. 物探与化探, 2001(3): 236-240.



**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-3967，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)