

隧道超前预报的 TSP3D 技术

曾国东¹, 刘 鑫², 洪宝宁^{2,3}

(1. 佛山市公路桥梁工程监测站, 广东 佛山 528042; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要:将隧道超前预报的 TSP3D 技术与现有的 TSP203 技术进行了对比, 并对广梧高速公路五指山隧道进行了超前预报。研究表明: TSP203 技术基于地震波的时距曲线, TSP3D 技术基于地震波传播过程中的能量损失, 二者基本理论有较大的差别; 二者现场参数采集的差别主要体现在空间布点的量的差异; TSP3D 技术能更全面、立体、直观地反映工程实际情况。
关键词:TSP203; TSP3D; 超前预报技术; Poline 极化分离; 隧洞
中图分类号:TV672⁺.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-7647(2014)S2-0025-04

近年来我国的国民经济飞速发展, 基础建设中的隧道工程越来越多, 施工安全与进度控制已成为评价隧道建设成功与否的重要指标。为了避免出现工程意外事故, 减少由安全事故带来的经济损失, 提高隧道超前预报水平和技术已成为共识^[1-4]。在隧道地震波超前预报成像和参数识辨方面, 20 世纪 90 年代初国内开始研究地震反射负视速度法和 HSP 法, 90 年代中期瑞士出现 TSP 系列超前预报技术, 随后又出现了 TGP206、TRT 和 TST 等隧道超前预报技术^[5-9]。这些超前预报技术通过对预开挖介质体进行二维成像获取信息, 对隧道开挖面的岩土体三维结构形式并没有很好的预报, 虽然对一些构造形式简单围岩体的隧道施工能起到较好的指导作用, 但面临复杂地质层构造时就显得信息量不够。本文在评估现有隧道超前预报 TSP203 技术的基础上, 提出利用地震波提取三维成像信息的 TSP3D 技术, 并以此对广梧高速公路五指山隧道的超前预报进行研究。

1 TSP3D 技术与 TSP203 技术对比

1.1 TSP3D 技术原理

TSP203 技术主要利用 24 个震源钻孔激发地震波, 通过一个检波器对岩土介质反射波进行接收, 运用双曲线 Radon 变换将记录的反射波数据进行横、纵波的分离, 建立横、纵波的时距曲线^[10-12]。本文在 TSP203 技术原理的基础上, 对其进行改进: 钻进

48 个震源钻孔, 分 2 次激发地震波, 在掌子面上分别用 2 个检波器记录反射波数据, 采用 Poline 极化分离的方法对地震波反射数据进行横、纵波的分离, 建立横、纵波的速度模型^[13-14]。Poline 极化分离结果的数学表达式为

$$v_p(t) = X_p \cos\alpha_p + Y_p(t) \cos\beta_p + Z_p(t) \cos\gamma_p \tag{1}$$

$$v_{sh}(t) = X_{sh} \cos\alpha_{sh} + Y_{sh}(t) \cos\beta_{sh} + Z_{sh}(t) \cos\gamma_{sh} \tag{2}$$

$$v_{sv}(t) = X_{sv} \cos\alpha_{sv} + Y_{sv}(t) \cos\beta_{sv} + Z_{sv}(t) \cos\gamma_{sv} \tag{3}$$

式中: $v_p(t)$ 为纵波波速; $v_{sh}(t)$ 为 SH 横波波速; $v_{sv}(t)$ 为 SV 横波波速; $X、Y、Z$ 分别为时间序列(时窗)在 $x、y、z$ 坐标系中的分量; $\alpha、\beta、\gamma$ 分别为协方差矩阵的特征向量与 $x、y、z$ 坐标轴的夹角。

1.2 地震波记录数据处理对比

TSP203 技术主要是基于地震波的时距曲线。该曲线主要描述隧道地震波在震源与检波器间传播的时间与距离的关系。时距曲线从运动学角度描述了地震波在传播过程中的时空关系, 与介质速度大小、界面埋藏深度、空间产状等要素有直接关系。由此可见对地震波记录数据采用双曲线 Radon 变换分离横、纵波是可行的, 只需要提取地震波在传播过程中速度的变化, 确定二维状态下的反射界面与掌子面的距离, 以及反射界面间地震波速度的大小。与

TSP203 技术不同,TSP3D 技术主要是以地震波在传播过程中的能量损失过程来反映岩土介质信息,通过建立横、纵波的速度模型,对反射界面进行深度偏移和空间椭球体的立体偏移,最终根据反射界面的波动方程确定反射界面的空间坐标。本文提出的 TSP3D 技术与 TSP203 技术在处理地震波记录数据方面的差别在于:

a. 横、纵波分离技术对比。TSP3D 技术不能用仅反映地震波速度的双曲线 Radon 变换来分离横、纵波,若要建立横、纵波在传播过程中的速度模型,反映横、纵波在不同界面上的能量损失,需要用 Poline 极化分离来反演横、纵波在岩土介质中的传播。

b. 成像处理技术不对比。TSP203 技术在处理地震波反射数据时过于简单,仅仅利用地震波的时距曲线来反演不同反射界面;而 TSP3D 技术通过建立横、纵波在岩土介质传播时的速度模型,对反射界面进行深度偏移和空间椭球体的立体偏移,根据反射界面处的波动方程确定反射界面的空间坐标的方法来构建岩土介质的三维图像。

TSP3D 技术基于 TSP203 技术而提出,在对不同反射界面之间岩土参数辨识的处理方法上,TSP3D 技术依赖于 TSP203 技术所取得的工程经验,这些经验均通过横波与纵波的波速变化情况来反演。因此,在这一方面,TSP203 技术所取得的宝贵经验对于 TSP3D 技术是一个很好的支持。

1.3 现场参数采集与处理对比

a. 数据量对比。TSP3D 技术的震源钻孔工作量是 TSP203 技术的 2 倍,TSP3D 技术的检波器接收地震波反射数据量是 TSP203 的 4 倍。TSP203 技术主要利用 24 个震源钻孔激发地震波,通过一个检波器对岩土介质反射波进行接收;TSP3D 技术通过 48 个震源钻孔分 2 次激发地震波,在掌子面上分别用 2 个检波器记录反射波数据。

b. 数据处理时间对比。TSP203 技术在现场的布置时间约为 3h 左右,可以推断 TSP3D 技术现场布置时间可以控制在半天以内,并不影响施工的整体进度。

TSP203 技术在利用计算机处理反射波数据的时间一般在 5h 以内,虽然 TSP3D 技术利用计算机处理数据的工作量是 TSP203 技术的 4 倍,但随着计算机处理技术的革新,可以对 4 组数据同时进行处理,由此可以推断 TSP3D 技术的数据处理时间应当可以控制在 7h 以内。因此 TSP3D 技术也可以像 TSP203 技术一样,在现场采集数据的第二天就可以生成隧道预开挖岩体的三维图像报告,TSP3D 技术与 TSP203 技术一样,不会影响隧道施工进度。

2 工程实例分析

由于目前隧道超前预报手段中,并没有相关三维成像技术的开发,因此,没有相应的工程实际来具体说明 TSP 隧道地震波三维成像超前预报技术(TSP3D)相比于 TSP203 技术的改进,但是可以通过分析 TSP203 技术现场采集数据的不足,以及 TSP3D 技术对这些不足之处的补充,来说明 TSP3D 的优势。通过利用同一隧道不同方位的两次 TSP203 技术勘测,分析进行隧道在 2D 成像技术条件下,一些未曾发现的地质问题等等,而这些不良地质问题都可以通过三维成像来识别。

广梧高速公路五指山隧道建设期间,利用 TSP203 超前预报技术对五指山隧道区段进行勘测。为模拟 TSP3D 技术,隧道在开挖时,对隧道前后两侧分别进行了地震波超前预报。结合前后勘测结果,进行隧道成像组合分析,说明隧道地震波三维成像超前预报技术的优势。

2.1 工程概况

五指山隧道穿越山地丘陵地貌区,地面标高为 50~230 m,相对高差 180 m。隧道最大埋深 142 m,最小埋深 14 m。地层岩性:广州端洞身由强风化砾岩、弱风化砾岩组成;苍梧端洞身由弱风化白云岩、微风化灰岩、白云质灰岩、白云岩组成。

2.2 TSP203 技术预报结果

隧道开挖施工过程中,第 1 次对五指山隧道右侧开挖断面进行隧道地震波超前预报。图 1 为广梧

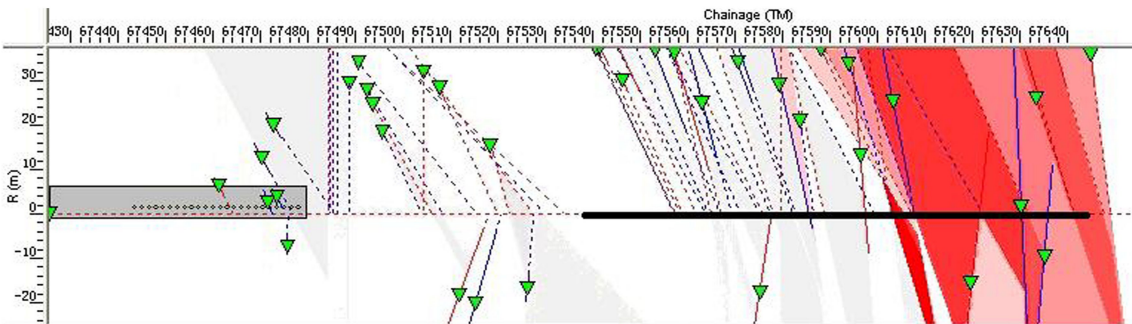


图 1 RK67+450—RK67+650 探测段 TSP 技术预报 2D 结果

高速五指山隧道 RK67+450—RK67+650 探测段 TSP203 技术超前预报 2D 结果图。该探测段主要为强风化~弱风化砾岩、微风化砾岩,不良地质现象主要为节理裂隙发育、岩石破碎,含裂隙水。

经过对采集数据的处理, RK67+450—RK67+650 探测段围岩纵波速度为 1 492 ~ 3 443 m/s,泊松比为 0. 25 ~ 0. 33,密度为 2. 00 ~ 2. 31 g/cm³,表 1 为该探测段地质资料超前预报结果。

表 1 RK67+450—RK67+650 探测段地质资料超前预报结果

里 程	推 断 结 果	设计围岩级别	推断围岩级别
RK67+450—RK67+577	强~弱风化砾岩,围岩完整、稳定性较差裂隙发育,含裂隙水	IV	IV
RK67+577—RK67+607	弱风化砾岩,围岩较完整、稳定,其中 RK67+603—RK67+605 裂隙发育,含裂隙水	V	Ⅲ~IV
RK67+607—RK67+650	微风化砾岩与粉砂岩,围岩完整、稳定性较好,岩石较坚硬,节理裂隙发育、含裂隙水	V	Ⅱ~Ⅲ

第 2 次对五指山隧道左侧开挖断面进行隧道地震波超前预报。图 2 为广梧高速五指山隧道 LK67+543—LK67+685 探测段 TSP203 技术超前预报 2D 结果图。该探测段主要为全风化~强风化砾岩与粉砂岩,不良地质现象主要为节理裂隙发育、岩石破碎,含裂隙水。

经过对采集数据的处理, LK67+543—LK67+685 探测段围岩纵波速度为 1848 ~ 4 043 m/s,泊松比为 0. 28 ~ 0. 35,密度为 2. 31 ~ 2. 76 g/cm³,表 2 为该探测段地质资料超前预报结果。

两次 TSP 技术超前预报共同的探测区域在 K67+540—K67+650 区段,图 1、图 2 中均用黑色粗线条指示出来。

2.3 TSP3D 技术预测结果

对同一隧道不同方位的两次 TSP203 技术预报结果进行组合式分析,可以近似等效于对隧道的三

表 2 LK67+543—LK67+685 探测段地质资料超前预报结果

里 程	推 断 结 果	设计围岩级别	推断围岩级别
LK67+543—LK67+578	强风化砾岩,岩体较破碎,稳定性较差	IV	IV
LK67+578—LK67+613	全风化~强风化砾岩,岩体破碎,稳定性差其中 LK67+578—LK67+580 含水,软弱	V	V
LK67+613—LK67+622	强风化砾岩,岩石较硬,裂隙发育,含裂隙水,推测为 F5 断层	V	IV~V
LK67+622—LK67+646	强风化砾岩,岩体较破碎,裂隙发育,含裂隙水	V	IV~V
LK67+646—LK67+685	强风化砾岩与粉砂岩,局部裂隙发育,岩体破碎、稳定性较差	IV	IV~V

维预报,得出如下几点结论:

a. 三维裂隙发育情况。在 K67+540—K67+650 探测段内,将两次 TSP203 预报结果组合来看,必然存在空间裂隙发育带,将两次预报结果联系到空间实际,连接裂隙的外侧包络线,可以看出该裂隙与隧道东西向成 60°~75°的夹角,裂隙在 K67+540—K67+650 探测段发育较完全。从现场隧道施工的情况来看,隧道整体施工段的裂隙的发育都很明显,在 K67+540—K67+650 探测段岩石完整性较差,破碎程度较高,裂隙的走向与前文描述基本一致,由此可见通过组合判别隧道预开挖岩体的裂隙发育是可行的,同时也从侧面说明,利用 TSP3D 技术预测岩土介质裂隙发育带,反映发育带的空间走向分布、发育情况等具有很好的效果。

b. 三维地下水分布情况。在 K67+540—K67+650 探测段内,两次 TSP203 技术预测岩土介质泊松比变化情况是一致的,从 K67+540 往 K67+650 方向,岩土介质的泊松比不断变大,横波的波速不断减小,这反映了在 K67+540—K67+650 探测段内地下水分布较广,并且越往 K67+650 方向,地下水含量越高,岩石破碎程度越高。泊松比的增大也反映了岩石破碎情况和含水率情况,从空间的角度来说,

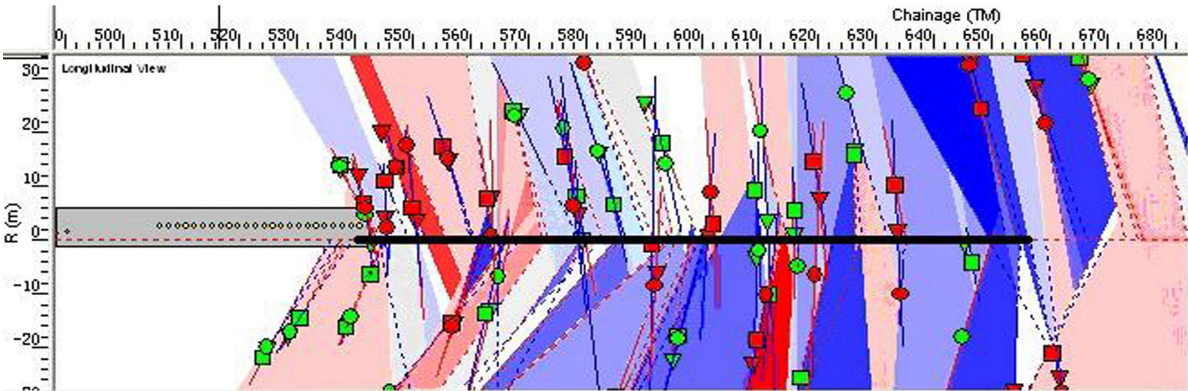


图 2 LK67+543—LK67+685 探测段 TSP 技术预报 2D 结果

K67+540—K67+650 区段围岩等级较低,在施工时应当注意地下水和围岩强度对施工的影响。从现场隧道施工的情况来看,隧道开挖过程中介质含水率较高,围岩强度较低,比较符合分析的情况。

2.4 两种技术对比分析

由 TSP203 技术的处理数据可以看出,2D 仪器主要能预测岩土体介质的泊松比、二维状态下裂隙发育状况以及介质含水率等粗浅的地质情况,对空间裂隙发展走向、裂隙分布大小、含水率具体分布以及开挖面外是否有潜在的承压水层等都不能直接显示出来,而这些都是影响隧道安全与进度的不利因素。由此可见在 K67+540—K67+650 探测段内,存在空间裂隙发育带,但是从 2D 成像图像上来看,看不出空间裂隙发育带的走向以及空间发育情况。从理论上讲,TSP3D 技术可以提供隧道预开挖岩体的三维空间介质信息,让施工技术人员了解隧道围岩强度等级和破碎情况,介质含水量的分布,裂隙发育状况,可以有效地指导工程施工,避免工程事故。

从以上分析可知,隧道 2D 地震波勘探只能显示隧道预开挖段的岩土介质情况,并不能直观地反映隧道开挖面地下水空间分布情况和裂隙空间发育情况;只能通过围岩裂隙的发育情况来判别围岩等级,并不能了解围岩真实的物理力学参数,这些在工程施工过程中具有一定的盲目性。另外,2D 成像不能反应隧道开挖范围内地下水的分布情况,在开挖过程中易造成隧道施工过程中的地下水突涌,对隧道建设不利。还有诸如围岩裂隙的空间发展分布,是仅仅对隧道施工带来不便,还是可以忽略裂隙对支护结构的影响等等,这些都不能从 2D 图像中反应过来,而隧道地震波三维成像就可以全面、具体、系统地展现岩土介质的整体情况,能更好地指导工程实际。

3 结 论

- a. TSP3D 技术通过 48 个震源钻孔分 2 次激发地震波,在掌子面上分别用 2 个检波器记录反射波数据,采用 Poline 极化分离的方法对地震波反射数据进行横纵波的分离,建立横、纵波的速度模型。
- b. TSP203 技术基于地震波的时距曲线,TSP3D 技术基于地震波传播过程中的能量损失,二者基本理论有较大的差别,现场参数采集的差别主要体现在空间布点的量的差异。
- c. 基于 TSP203 技术对五指山隧道的预报结果,分析了 TSP203 技术的缺陷以及 TSP3D 技术的优势,间接说明 TSP3D 技术能更全面、立体、直观地反映工程实际情况。

参考文献:

[1] 赵永贵. 国内外隧道超前预报技术评析与推介[J]. 地球物理学进展,2007,22(4): 1344-1352.

[2] 宋先海,顾汉明,肖柏勋. 我国隧道地质超前预报技术述评[J]. 地球物理学进展,2006,21(2): 605-613.

[3] 何继善,柳建新. 隧道超前探测方法技术与应用研究[J]. 工程地球物理学报,2006,1(4): 293-298.

[4] 钟宏伟,赵凌. 我国隧道工程超前预报技术现状分析[J]. 人民长江,2004,35(9): 15-17.

[5] 张勇,张子新. TSP 超前地质预报在公路隧道中的应用[J]. 东北公路,2001,24(2): 77-79.

[6] 李忠,汪琦. 新保纳隧道地质超前预报中 TSP-202 探测系统搜索角研究[J]. 铁道工程学报,2001(1): 89-91.

[7] 刘志刚. 隧道地震勘探(TSP)在工程中的应用[J]. 铁道建筑技术,2009(5): 1-3.

[8] 戴前伟,何刚,冯德山. TSP-203 在隧道超前预报中的应用[J]. 地球物理学进展,2005,20(2): 460-464.

[9] 刘志刚,刘秀峰. TSP(隧道地震勘探)在隧道隧洞超前预报中的应用与发展[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(8): 1399-1402.

[10] 陈见伟. 用高分辨率双曲线 Radon 变换实现波场分离[D]. 西安: 长安大学,2005.

[11] 张保卫. Radon 变换及其在地震数据处理中的应用[D]. 西安: 长安大学,2007.

[12] 王立歆,黄广潭,张彬彬,等. 局域双曲线 Radon 变换压制散射波研究与应用[J]. CT 理论与应用研究,2014,23(1): 27-36.

[13] 肖梅. 三分量地震极化滤波与波场分离方法研究[D]. 西安: 长安大学,2005.

[14] 马见青. 多分量地震自适应极化滤波方法研究[D]. 西安: 长安大学,2012.

(收稿日期:2014-09-28 编辑:周红梅)

