

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.04.030

跨孔地震 CT 在类岩溶地层中的应用效果分析

柏建利,董晓宏,余栋成

(四川省蜀通岩土工程公司,四川 成都 610000)

摘要:类岩溶地层的溶蚀结构十分复杂,对岩体的稳定性、强度等均有不良影响,探明类岩溶的溶蚀结构对工程建筑安全十分必要。以我国西南某拦河闸的右岸交通桥勘察为例,对比分析跨孔地震 CT 与传统钻探勘察方法在钙质砾岩中应用效果的差异性。研究表明跨孔地震 CT 虽在精细岩溶探测方面还存在一定不足,但能够较清晰的显示类岩溶地层岩壁、基覆界线等边界轮廓,在总体地质条件探测、优化勘探工作量、节省投资、加快工期等方面具有一定优势。研究成果可对跨孔地震 CT 在类岩溶的应用效果及应用价值提供依据和参考。

关键词:类岩溶;钙质砾岩;溶蚀;跨孔地震 CT;应用效果

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)04-0154-06

Application Effect Analysis of Cross-hole Seismic CT in Karst-like Strata

BAI Jianli, DONG Xiaohong, SHE Dongcheng

(Sichuan Shutong Geotechnical Engineering Company, Chengdu, Sichuan 610000, China)

Abstract: The karst-like strata has very complex dissolution structures, which could have adverse effects on the stability and strength of the rock mass, therefore it's necessary to locate corrosion structure of karst-like for engineering safety reasons. In this paper a right-hand traffic bridge at a river sluice in southwestern China was taken as an example to illustrate the different application effects of cross-hole seismic CT and conventional drilling method. The investigation results show that the cross-hole seismic CT clearly imaged the boundary wall of rock and soil, and has great advantages on general geological detection, optimization of exploration workload, overall investment and construction duration. However, it may have limitations on the detection of micro karst conditions. The research results can provide useful references for the application of cross-hole seismic CT in karst-like areas.

Keywords: karst-like; calcirudite; corrosion; cross-hole seismic CT; application effect

岩溶地层是我国普遍存在的一种地层,岩性一般以灰岩为主,溶洞等不良地质条件发育,地质条件较复杂,对构筑物地基造成极大的不利影响。在某些钙质岩地区,岩石中的钙质碎屑胶结物在地下水的长期作用下发生溶蚀,形成类似溶洞的空洞(槽),这与碳酸岩溶蚀后的岩溶现象相似,被称为类岩溶现象^[1]。张强^[2]对钙质砾岩的发育特征及渗透稳定性方面做了较为深入研究,贾龙等^[3]对我国红层岩溶的特征进行了一定的研究,王锦国等^[4-6]对钙质

砾岩溶蚀规律及机理进行了研究,孙瑜等^[7]分析了钙质砾岩对水库的渗漏影响。目前工程中常见类岩溶地层的主要溶蚀类型有钙质砂岩溶蚀、钙质砾岩溶蚀,由于钙质岩中 Ca^{2+} 分布受成岩环境及外界环境影响,分布不均匀,形成的溶蚀程度各不相同,且规律性较差,局部溶洞中存在溶蚀残留物,有时物探手段难以清晰分辨溶洞轮廓,且钻探手段仅能以点带面,使类岩溶地层溶洞(槽)的探测具有模糊性,但其对工程的危害程度较岩溶地层并不低,应在工

收稿日期:2018-03-20

修稿日期:2018-04-16

作者简介:柏建利(1961—),男,陕西长安人,高级工程师,主要从事工程地质、岩土工程勘察设计工作。E-mail: 726434309@qq.com

通讯作者:董晓宏(1985—),男,陕西延安人,硕士,工程师,主要从事地质、岩土、水利等行业的勘察设计工作。E-mail: 329408589@qq.com

程中引起足够的重视。

类岩溶地区地质条件复杂,构造形态多变,缺乏规律性,对勘察工作带来较大难度。传统的勘察手段一般以钻探为基础,结合高密度电法、瞬变电磁等常规物探手段探测,但传统钻探手段揭露的范围十分有限,只能根据孔与孔之间推测连线,加之类岩溶地区溶蚀的不规律性,推测出的溶洞(槽)和地质界线与实际情况相差甚远;且传统物探手段仅在地表进行探测,物探精度较差,对溶洞的探测效果难以满足工程需要,小型溶洞(槽)更是难以探测,导致探测结果的指导性较差。

近年来我国对岩溶的探测采用了多种手段,胡让全等^[8]和李文文等^[9]在实际工程中采用了高密度电法、地震波 CT、电磁波 CT 和孔内雷达等综合物探手段进行探测,均取得了良好的效果。周醒驭等^[10]将单片机辅助的探地雷达采样方法运用到了岩溶探测中,发现该方法可更加方便准确的通过探地雷达定位地下岩溶位置。跨孔地震 CT 技术是一种近年来逐渐兴起的一种高新探测技术,在灰岩岩溶地层溶洞探测中得到了广泛的应用,取得了良好的效果^[11-17]。韦斯等^[18]将地震 CT 技术运用到了坝址河床隐伏断层的探测,效果良好。毛承英等^[19]从三维角度初步探求了基于 GOCAD 的地震 CT 技术在岩溶探测中的运用。但目前跨孔地震 CT 在类岩溶地层中的应用相对较少,尚无系统的研究成果,由于类岩溶地层的特殊性,其探测效果还需进一步对比验证。本文结合我国西南某拦河闸右岸交通桥基础的类岩溶地层勘察成果,结合高精度钻孔对比分析跨孔地震 CT 在钙质砾岩中探测效果,并探求其应用价值。

1 工程概况及工程地质条件

该交通桥工程位于岷江干流的主河道中,共包括 7 个桥墩,分别为 12、14、16、18、20、21、22 号桥墩,桥墩轴线长度 20 m,12、14、16、18、20 号桥墩间距为 29.0 m,20、21、22 号桥墩间距为 17.5 m。根据设计单位提供的基础方案,桥墩初步拟采用桩基础,重点需要查明桩基岩溶发育情况,为桩基布置位置提供依据。

根据钻探揭露情况,右岸桥位区地质条件十分复杂。基岩主要分布在 12~16 号桥墩,岩性为砾岩,钙质和硅质胶结,基岩面起伏剧烈,局部呈隐伏

笋芽状或蜂窝状,溶槽(洞)发育,槽(洞)壁凹凸起伏,边界极不规则,槽壁处溶蚀现象明显,溶蚀空腔发育,基岩破碎一较破碎。溶槽内物质以含卵石粉质黏土、含砾粉质黏土为主,夹含泥细砂、含砾细砂等透镜体,溶蚀凹腔及溶洞内以软塑或流塑状粉质黏土(钻杆掉落或自行缓降)、含泥砾石为主。综合钻探成果分析,该地区溶蚀结构一般处于溶槽侧壁附近,大部分相互连通,呈半封闭状态。

2 跨孔地震 CT 基本原理及技术方法

钻孔地震波层析成像(CT)是在两孔间采用一发多收的扇形观测系统(一孔激发,另一孔多道接收),组成密集交叉的射线网络,然后根据射线的疏密程度及成像精度划分规则的成像单元,运用弯曲射线追踪理论,采用最小走时反演算法计算出各成像单元的地震纵波速度值,从而形成被测区域的波速图像(以等值线的形态来表示),根据波速差异来划分岩体的质量,确定地质构造及软弱岩带的空间分布,钻孔地震波 CT 观测方式示意图如图 1 所示。

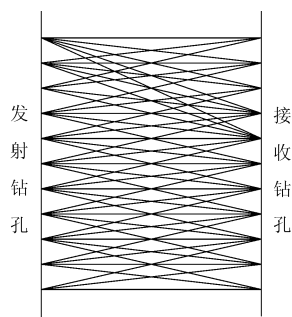


图 1 钻孔地震波 CT 观测方式示意图

该工程的探测野外工作方法采用一发多收扇形观测系统,一钻孔激发,另一钻孔接收。数据采集仪器为国产 HX-DZ-02A 型地震仪,钻孔成像检波器为国产压电式井中检波器串;钻孔间成像震源为电火花震源,激发电压一般为 5 000 伏~6 000 伏、激震能源约为 1.2 万焦耳,钻孔检波器间距和炮点距均为 1.0 m。

将获得的地震透射有效记录读取初至走时,并与相应的激发及接收点坐标形成数据文件。采用 SeisCT 地震透射层析成像数据处理系统,将各成像区域划分成 1 m×1 m 的成像单元,首先进行 5 次直线迭代,建立初始模型,再进行 6 次最小走时射线追踪,将其结果加权平滑形成地震波速图像。以级差 500 m/s 绘制地震纵波速度等值线,最终形成地震波

层析成像波速图。

3 右岸桥基跨孔地震 CT 布置思路及方法

本次勘察主要在桥轴线钻探的基础上,利用桥墩两端钻孔进行地震 CT 测试,然后对钻探结果和地震 CT 成果进行对比分析,验证地震 CT 效果,为桥墩两侧及其他桥墩的地震 CT 成果分析提供参考,从而节省钻探工作量和工期。

12 号、14 号、16 号桥墩轴线长度为 20.4 m。其中 12 号桥墩共布置 7 个钻孔,间距为 1.6 m~4.1 m,钻孔深度 63.0 m~75.5 m;14 号桥墩共布置 6 个钻孔,间距为 2.4 m~4.1 m,钻孔深度 61.3 m~75.5 m;其中 16 号桥墩共布置 5 个钻孔,间距均为 4.1 m~6.5 m,钻孔深度 61.0 m~75.9 m。根据钻探初步成果,基岩主要集中在 12 号、14 号、16 号桥墩。跨孔地震 CT 剖面线布置如图 2 所示。为防止测试期间在震源作用下垮孔,试验采用 PE 管置于孔内进行护壁。

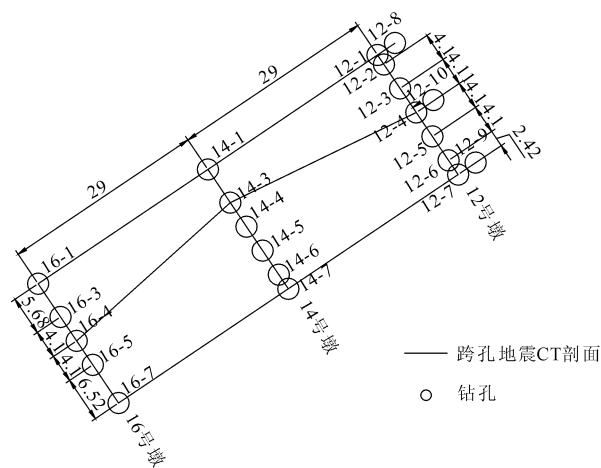


图 2 跨孔地震 CT 剖面布置图

4 跨孔地震 CT 成果和钻探成果对比研究

地震 CT 根据地震波在不同的介质中传递的速度结合钻探成果来判断地质情况。一般来说,中风化基岩的波速高于强风化基岩,强风化基岩高于覆盖层,覆盖层也根据成分不同波速有一定不同,根据相对关系可以圈出波速较低的非基岩区和波速较高的基岩区,结合钻探成果综合判断不良地质区。

图 3 为 16 号桥墩轴线跨孔地震 CT 成果剖面与不同精度钻探地质剖面的对比图。

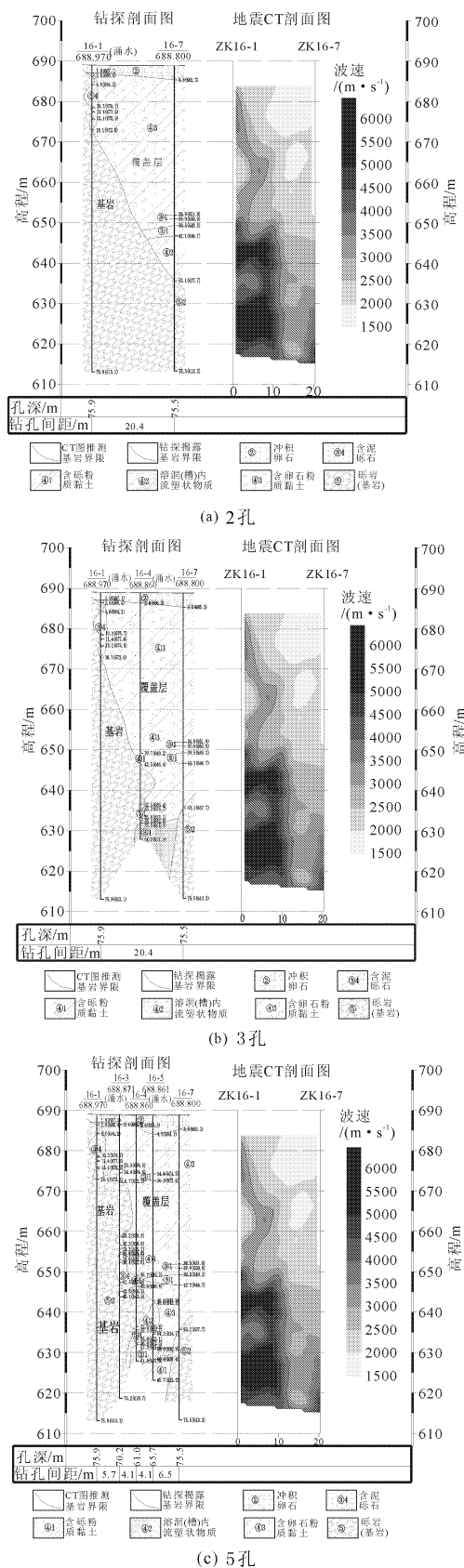


图 3 16 号桥墩地震 CT 剖面与不同精度的钻探地质剖面对比图

从图 3(a)中可知,钻探剖面仅布置 16-1 和 16-7 两个钻孔,两个钻孔揭露的信息十分有限,对于

两孔之间的地质信息只能粗略推测,精度不能满足工程需要;而地震 CT 剖面图能较清楚反映剖面之间存在的高波速区和低波速区,尤其是下游的深槽和上游的低速异常区揭露较明显,推测为溶槽、溶洞,其揭露地质信息的完整性远高于只有两个钻孔的情况;在图 3(b)中,钻探剖面在中间增加了 16-4 孔,在钻探精度提高后,可以明显看出地震 CT 所揭露的溶槽壁在 16-4 有所揭露,溶槽壁的整体轮廓也与 CT 图基本吻合,虽然细部结构探测存在不足,但进一步证明了 CT 成果图所反映信息的可靠性;在图 3(c)中,钻孔进一步加密至 5 个钻孔后,可以看出,钻探剖面揭露的溶槽和覆盖层在地震 CT 图上均显示为低波速区,且基覆界线两侧波速有明显的差异,地震 CT 图上揭露的深溶槽的位置、上下游溶槽壁基岩的凹凸轮廓与钻探剖面总体吻合。从图 3 可知,16 号桥墩区域至少需要 3 个钻孔探测才能初步确认溶槽的存在,但对其位置、形态尚无法确认;补充至 5 个钻孔才基本明确了溶槽的位置和局部槽壁边界形态,但对孔间地质情况尚需推测;而跨孔地震 CT 仅需要在两个端部打两个孔即可较为精确探明整个桥墩的地质情况,发现钻孔未揭露的地质异常,既能节约投资,又能加快施工进度。

图 4 为 14 号桥墩高精度钻孔剖面与地震 CT 剖面对比图。从图 4 中可知,14 号墩位于溶槽边缘,地震 CT 图中显示桥墩下游在 625.0 m ~ 645.0 m、665 m 以上为相对低速区,该区域在钻孔中均揭露了覆盖层或溶蚀凹槽,除了局部凹凸起伏形态和钻探揭露稍有差别外,溶槽壁基岩轮廓与钻孔揭露的情况基本吻合,说明地震 CT 方法在该工程中反映的地质情况在钻孔中基本得到了有效验证,效果良好。

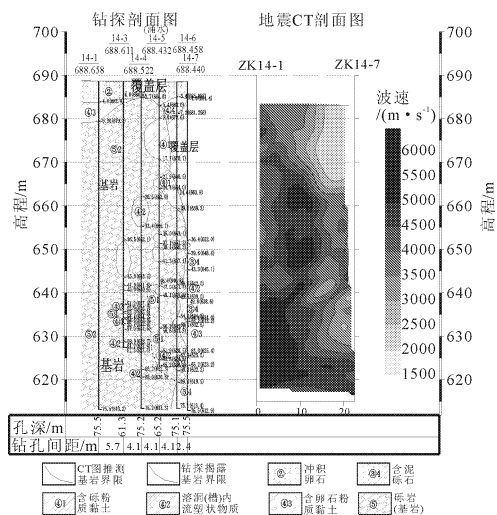


图 4 14 号桥墩 CT 剖面与最终钻探地质剖面对比图

从图 3(c)和图 4 的 CT 图上可以看出:首先,所有波速带均为连续分布,即不同的地层即使物理性质差异很大,波速带显示也呈连续过渡状态,在地质界线附近并未真实反映地层特征波速,仅可能表现为一种波速的趋势变化,这就导致靠近基岩部分的覆盖层表现为相对高波速区,或者说靠近覆盖层的基岩表现为相对较低波速,基覆界线存在一定容差性;如图 3(c)中 16 号墩 650 m 高程以上的基岩部分由于范围较小,在 CT 图中表现为波速明显增高,虽未达到基岩的特征波速,但仍可以体现波速趋势的变化,需要在成果解译中结合实际情况判别。其次在 16-1 孔 673.0 m ~ 688.0 m 段、14-6 孔和 14-7 孔在 625 m 高程以下段揭露含砾砾石均靠近基岩,属于强风化基岩和含砾粉质黏土之间的过渡形态,在波速上表现与强风化基岩接近,尤其当砾石含砾量较高时,其波速表现与强风化基岩的差别并不明显。

存在的不足方面:首先,图 3(c)在 16-1 孔 655.0 m ~ 670.0 m 段、633.0 m ~ 637.0 m 段地震 CT 影像图上显示有低波速区,可以判断在此区域存在溶洞(槽),但钻孔并未揭露,说明 CT 图中揭露的溶洞位置和实际稍有偏差,溶洞位于钻孔周边,即地震 CT 的精度在该区域存在一定不足。其次,图 4 中 14 号墩的 14-3、14-4、14-5 孔揭露的狭窄串珠状溶洞(槽)在 CT 图中并未显示,说明在周边岩石均较完整的情况下,虽然波速带分布均一性较差能说明一定问题,但局部出现的溶洞并不能有效的反映出来,CT 成果在揭露该类溶蚀结构方面还存在不足,究其原因,主要是因为钙质砾岩中钙质溶蚀后部分溶洞内有残留母岩颗粒,溶洞(槽)周边的砾岩受钙质胶结的影响,岩体较破碎,边界及形状不规则,呈过渡相,且形状一般为不规则窄槽,而 CT 图的波速带逐级过渡显示特性使得砾岩内部的溶洞在两侧都是高波速的砾岩影响下难以表现出来。最后,在两图中钻孔揭露的溶槽壁凹凸起伏较频繁,但 CT 图中对该类细部结构的揭示效果还有所欠缺,说明在精细岩溶的揭露方面也存在一定不足。

综上,本区强风化砾岩的地震波速一般在 3 000 m/s ~ 4 500 m/s,中风化砾岩的地震波速一般在 4 500 m/s ~ 6 000 m/s,覆盖层一般地震波速在 1 500 m/s ~ 3 500 m/s。根据本工程实际应用,地震 CT 对类岩溶地层中的应用效果虽然存在一定不足,但基覆界线的整体轮廓、开放性深溶槽的揭露效果较好,相比传统钻孔探测具有省时、节约以及高效的优点,

特别在宏观地质方面具有较高的工程应用价值。

5 跨孔地震 CT 成果应用

根据地震 CT 在类岩溶地层中的应用效果,可以对本工程优化提供一定的指导意义。本工程如果采用全部钻探的方式对桥墩轴线和两侧进行探明,则需要布置大量钻孔,既不经济,工期也不允许。跨孔地震 CT 在勘察中可以作为重要手段加以应用。

首先,可以对桥墩轴线地质条件进行初判后优化勘探工作。跨孔地震 CT 方法可以在初期施工时采用少量的地震 CT 钻孔对桥墩轴线进行探测,初步判断地质情况,为轴线补充钻孔布置提供有效依据。如图 5 所示,12 号桥墩在 12-1 和 12-7 的 CT 成果图初步显示,高程 660 m 以下基岩均一性较好,波速均在 4 500 m/s 以上,未发现明显不良地质体,可初步判断为基岩;高程 660 m 以上基岩完整性较差,分布有溶蚀凹槽及低波速的覆盖层。根据 CT 图所解析的地质剖面,可初步了解该墩轴线以基岩为主,完整性较好,具备作为端承桩的初步条件。在工期等条件允许的情况下,可根据该成果减少钻孔数量或深度,重点放在桥墩两侧地质条件。

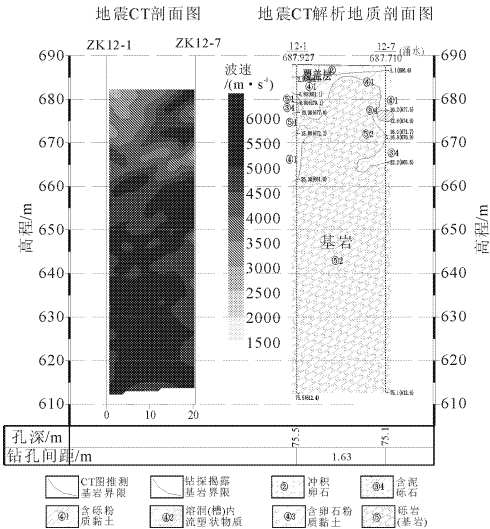


图 5 12 号桥墩地震 CT 剖面及其解析地质剖面图

其次,跨孔地震 CT 方法可以修正地质剖面。如图 6 所示,16 号桥墩主要靠 5 个钻孔揭露,但类岩溶地质条件复杂,规律性差,地震 CT 剖面可以对钻孔之间的基覆界线形态和钻孔之间未揭露的溶洞(槽)进行补充修正。如在 16-1 孔 655.0 m~670.0 m 段、633.0 m~637.0 m 段地震 CT 影像图上显示有低波速区,可以判断在此区域存在溶洞(槽)或强风化带,但钻孔未揭露,可以判断该异常区存在于 16

-1 和 16-3 之间;中深部溶槽边界形态也可以根据 CT 图进一步修正。二者结合可以使地质剖面更加接近实际情况。

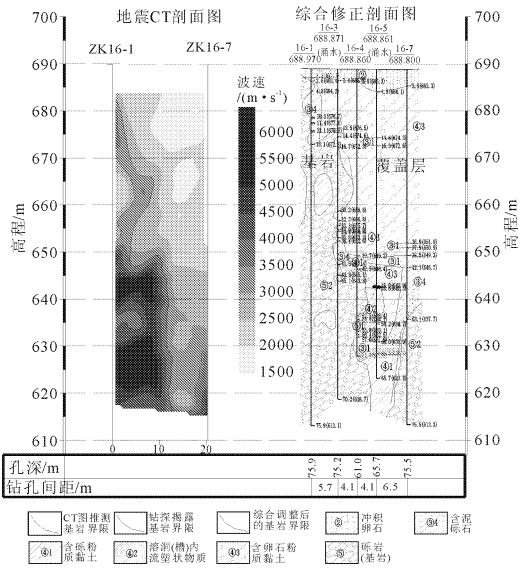


图 6 4 号桥墩 CT 剖面与综合修正剖面图对比图

最后,跨孔地震 CT 方法可以对桥墩两侧地质条件进行初步探查,为补充钻孔的必要性和位置提供依据。如图 7 所示,12-4—14-3 之间均为基岩,仅局部发现少了相对低波速区,未发现较明显的大型溶蚀结构,即 12-4 右侧和 14-3 左侧均为较完整基岩,无明显不良地质条件,无需补充钻探;在 14-3 右侧有较清晰的基岩边界,其距离 14 号墩轴线约 7 m~8 m,故该处桩基均处于基岩上,且留有足够的安全距离,无需补充钻探;16-4 左侧在 640 m 高程以下才可能揭露完整基岩,以上均为覆盖层。通过桥墩两侧的地震 CT 成果,可以揭露桥墩两侧初步地质条件,并为进一步优化钻孔布置提供依据。

6 结 语

通过对桥墩的跨孔地震 CT 的应用效果对比研究,发现该方法能够较清晰的显示岩壁、基覆界线轮廓等,实际应用中具有较突出的优势。相对于传统钻探,跨孔地震 CT 对类岩溶地层在总体地质条件探测、优化勘探工作量、节省投资、加快工期等方面具有较高的应用价值。由于类岩溶地层溶蚀结构复杂多变,在精细类岩溶探测还存在一定不足,在复杂的地质条件下,CT 图具有多解性,故合理的数据解析至关重要,需要在以后的工作中进一步在技术和数据解析方面进行完善和改进,为类岩溶地层中的地震 CT 效果和应用价值积累经验。

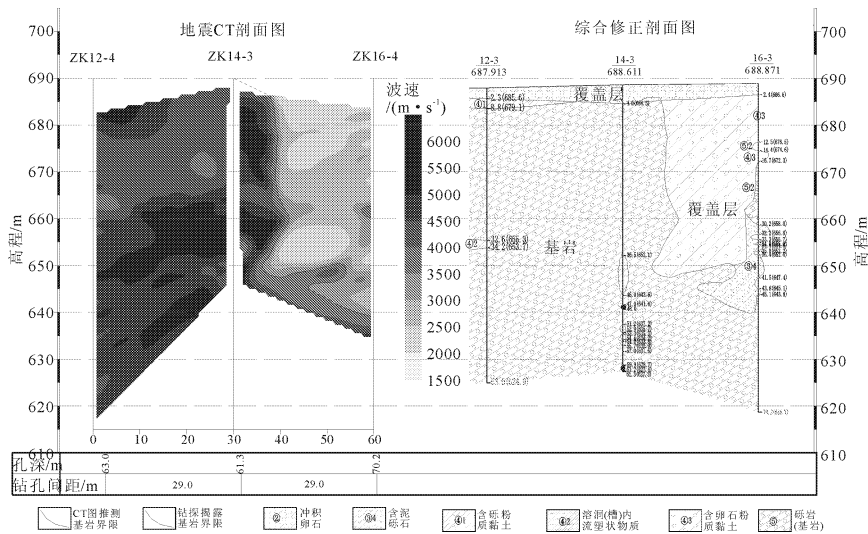


图 7 12~16 号桥墩地震波 CT 及综合修正剖面成果

参考文献:

[1] 亚森·赛买提. 水库坝址区类岩溶发育特征及溶蚀试验研究[J]. 水利科技与经济, 2015, 21(9): 38-40.

[2] 张 强. 金沙江观音岩电站红层钙质砂岩类岩溶发育特征及渗透稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010: 48-55.

[3] 贾 龙, 吴远斌, 潘宗源, 等. 我国红层岩溶与红层岩溶塌陷刍议[J]. 中国岩溶, 2016, 35(1): 67-73.

[4] 王锦国, 周志芳, 卢 刚. 某水电站坝址区钙质砂砾岩溶蚀发育规律研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(6): 828-832.

[5] 王锦国, 周志芳, 陈松峰. 观音岩水电站坝址区右岸岩体溶蚀发育机理研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(3): 409-416.

[6] 孙浩森. 黔中水利枢纽平寨水库左岸岩溶溶蚀分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(3): 76-79.

[7] 孙 瑜, 覃秀玲. 某水库库区侏罗系钙质砾岩对水库渗漏的影响[J]. 地质学报, 2009, 29(1): 74-77.

[8] 胡让全, 黄健民. 综合物探方法在广州市金沙洲岩溶地面塌陷、地面沉降地质灾害调查中的应用[J]. 物探与化探, 2014, 38(3): 610-615.

[9] 李文文, 李广场. 综合物探在城市轨道交通岩溶探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(1): 104-111.

[10] 周醒驭, 周荣官. 单片机辅助的探地雷达采样方法在岩溶探测中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(3): 89-92.

[11] 张连伟. 井间地震 CT 技术及其在铁路岩溶勘察中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2013: 48-55.

[12] 彭 涛, 李耀刚, 武 威, 等. 岩溶探测中的井地震 CT 测试技术[J]. 工程勘察, 2008(S2): 136-139.

[13] 张树风, 谢晓锋, 温振统, 等. 跨孔地震 CT 技术在地下岩溶等目标探测中的开发应用研究[J]. 广东土木与建筑, 2013(12): 61-64.

[14] 邹炳举. 跨孔地震 CT 在铁路桥梁基础地下岩溶勘察中的应用[J]. 铁道勘察, 2014, 40(3): 45-47.

[15] 谈顺佳, 张 华, 王瑞雪. 井间地震 CT 技术在岩溶勘察中的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2013, 22(3): 439-445.

[16] 俞仁泉, 李法滨, 何文勇. 地震 CT 在大型溶洞勘察中的应用[J]. 贵州地质, 2013, 30(1): 46-48.

[17] 陈 焯, 胡树林, 张光耀, 等. 钻孔地震 CT 技术在岩溶精细探测中的应用[J]. 工程勘察, 2014, 42(2): 86-91.

[18] 韦 斯. 地震 CT 技术在坝址河床隐伏断层勘察中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2013, 41(9): 25-27.

[19] 毛承英, 李 海, 杨先杰. 基于 GOCAD 的岩溶探测地震 CT 波速参数三维可视化的实现[J]. 西部交通科技, 2017(1): 104-110.