地震波 CT 技术在隧道岩溶探测中的应用

赵清先
四川省兴冶岩土工程检测有限责任公司，四川 成都 610000

[摘要]地震波 CT 根据声波对岩土结构断面进行扫描，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原状地层，评价岩土工程结构，如隧道、大坝、地基等的内部声速情况，通过像素、色谱、立体网络等方式的综合展示，直观反映其内部结构图像。文中根据在隧道钻孔内测得的波速反演地质体，结合区域地质特征及地下溶洞三维空间形态模型，对地下溶洞区（包括溶洞充填区）、溶蚀区、微溶蚀孔隙区以及非溶蚀区四种地质体的形态、分布做出分析，取得了良好的应用效果。

[关键词]地震波 CT；隧道；声波；地质体
DOI：10.33142/ec.v5i12.7271　　中图分类号：U459.1　　文献标识码：A

Application of Seismic Wave CT technology in Tunnel Karst Detection

ZHAO Qingxian
Sichuan Xingye Geotechnical Engineering Detecting Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract: Seismic wave CT scans the section of the geotechnical structure according to the acoustic wave. Combined with the relevant analysis of its physical and mechanical properties, it uses the ray travel time and amplitude to reconstruct the undisturbed strata, evaluate the internal sound velocity of the geotechnical engineering structures, such as tunnels, dams, foundations, etc., and intuitively reflect the internal structure image through the comprehensive display of pixels, chromatography, three-dimensional network, etc. Based on the wave velocity inversion geological body measured in the tunnel borehole, combined with the regional geological characteristics and the three-dimensional spatial shape model of the underground karst cave, the paper analyzes the shape and distribution of four geological bodies in the underground karst cave area (including the karst cave filling area), the karst area, the micro karst pore area and the non karst area, and obtains good application results.

Keywords: seismic wave CT; tunnel; acoustic wave; geological body

引言

目前，地震波 CT 技术运用于研究各类地层、构造、岩体、土体的分布界线及其力学性状；在工程地质勘查中常用来探查断裂带、密集节理带、含水带、空洞、风化带等不良地质体的位置、形状及力学强度等。麻窝隧道挖建过程中；在隧道左洞 ZK67+619～ZK67+641 段与右洞 K67+613～K67+642 段均发现溶洞；现场勘察揭示为同一溶洞。为确保隧道的施工质量及安全；需要运用有效的地球物理勘探方法探测地下溶洞发育情况；对隧道横穿溶洞带来的地质风险做出评估。

1 地震波 CT 基本原理

地震波 CT 的探测方法也称地震波层析成像方法，其原理为：利用地震波射线对地质体(结构)进行透视，通过地震波走时和能量衰减的观测对地质体(结构)成像。地震波 CT 技术是利用地震波在不同介质中传播速度的差异，确定一个沿路径积分的图像函数[1-7]

$$d = \int f(x, y)\, dl \qquad (1)$$

即 Radon 变化，地震波在检测的物体中传播时，纵波的走时是速度（x，y）和几何路径的函数，对于第 i 条射线，假设射线的走时为 t，则有如下积分式。

$$t_i = \int_{R_i} \frac{1}{v(x, y)} d_s, \quad i = 1, 2, \ldots, n \qquad (2)$$

式中，n 为射线的总条数，R_i为第 i 条射线的路径，将隧道断面的被检测区域离散成若干个规划的网格单元[1-7]。其中重要的是记录每条射线穿过的单元和统计每个网格单元穿过的射线数目。采用打靶法，由震源位置和接收点位置得到出射角，不考虑速度，从震源按直线路径追踪到接收点，记录下射线所穿过的单元。

根据地震波信号初至时间数据的变化，利用计算机通过这种重建的测试区域地震波速度场的分布特征，由此获得地震波走时数据，并进行速度(x，y)分布反演来推断地质构造的位置、形态和分布状况。

地下溶洞地震波 CT 层析成像定位探测的工作方式如图 1 所示，在两钻孔间布置 CT 探测剖面，系统在计算机控制下由发射仪激发高频率声波穿过孔间地层到达接收孔，高灵敏度接收传感器拾取信号送入接收机，扫描全部区域后经计算分析确定溶洞位置。

Copyright © 2022 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

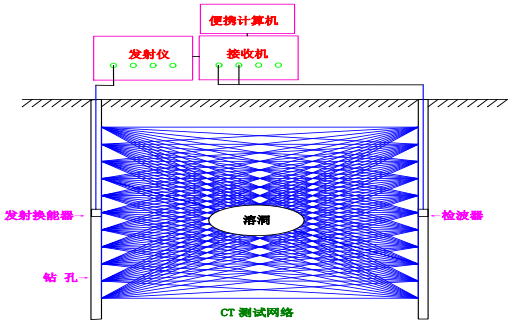


图 1　地震波 CT 层析成像探测系统布置及工作方式

2 工区概况

麻窝隧道位于贵州省遵义市东北部江津（渝黔界）经习水至古蔺（黔川界）在建高速公路，距离遵义市区 200km。麻窝隧道周边为地势较高的中低山，属峰丛洼地地貌，地形切割较浅，相对高差小于 500m，峰丛之间，岩溶洼地、漏斗、落水洞很发育，常形成峰丛洼地或峰丛漏斗的组合形态。

麻窝隧道挖建过程中，在隧道左洞 ZK67+619～ZK67+641 段与右洞 K67+613～K67+642 段均发现溶洞，现场勘察揭示为同一溶洞。经量测溶洞长度约 50m，最大宽度约 120m，高度约 40m，溶洞向左前方且向下发育，断面逐渐缩小。顶板整体稳定性较好，局部不时有塌块坠落，底板为溶蚀塌陷物所覆盖，塌陷物主要为灰岩石块，块体间多有粘土充填，无胶结，结构松散，地下水不发育。前期发现溶洞现在已经碎石弃渣及石方回填，麻窝隧道 ZK67+619～ZK67+641 段、K67+613～K67+642 段横穿溶洞，其溶洞向左前方斜向下发育，但是溶洞正下方是否仍然发育其他溶洞，地质简图见图 2 所示。

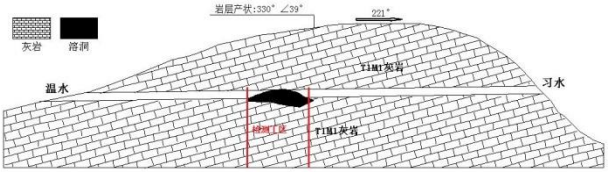


图 2　麻窝隧道溶洞段工区地质简图

3 地震波 CT 数据分析处理

地震波 CT 运用的是井中激发与接收的采集方式，因此得到的反演地质资料深度更为准确，运用地质体的速度随深度的变化特征来描述地质体异常区域。

通过对该区资料的分析，总体上分为溶洞区（包括溶洞充填区）、溶蚀区、微溶蚀孔隙区以及非溶蚀区四种地质体，对应的地质解释为溶洞、溶蚀灰岩、微溶蚀孔隙灰岩以及微分化灰岩，它们的速度分布如下表所示。

表 1　不同地质体速度分布情况

类 型	溶洞	溶蚀区	微溶蚀孔隙区	非溶蚀区
速度（m/s）	1900～2700	2000～2900	2700～3900	>3900

从钻孔资料来看，下部发育充填溶洞和空溶洞，结合地下溶洞发育规律以及工区地震资料来分析，该区溶洞多为充填物在溶洞底部疏松堆积的半充填溶洞类型，不含岩溶水，取芯资料显示，溶蚀段岩芯破碎严重，孔隙十分发育，并见高角度裂缝。

①ZK1～ZK3 剖面

如图 3 所示，整体上看，剖面上、中、下均发育低速异常区，其基本形态呈串珠状，结合钻孔资料，判定为溶洞。在剖面顶部（8～32m，0～16m）范围内存在一相对低速异常区，结合隧道现场资料及其回填区地震响应特征，解释为麻窝隧道挖遇的溶洞对应的回填区，其开口较大、向下逐渐变小，与下部溶洞呈串珠状连接；在（32～41m，20～32m）区域，低速达到 2200m/s 左右，为典型的溶洞响应特征，且 ZK3 井钻孔资料显示在 23.1～24.1m 处钻遇空洞，与反演结果相吻合；此外，在（30～41m，60～72m）区域见明显低速异常区，其地震响应特征与上部异常体类似，推测为溶洞，该处钻孔资料显示，在 65.8～70.4m 处钻遇溶洞，岩心见褐黄色粉质粘土。图中 26～50m 之间存在明显高低阻分界面，解释为溶蚀底面，反映当时地下水或地表水对围岩的侵蚀现象较普遍，上部部分岩体形成溶洞、溶蚀区，大部分岩体经地下水改造形成微溶蚀孔隙灰岩，与下部相对高速岩体相区别。下部岩体相对完整、速度高，解释为微风化灰岩。

②ZK1～ZK4 剖面

如图 4 所示，整体上看，剖面上存在四个明显的低速异常带，斜向下呈串珠状分布。上部低速异常带，与剖面 ZK1～ZK3 对应位置相比，声速略高，可能由于充填物不均匀压实有关，且受回填区注浆处理质量的影响，表现出不同的声速响应，但整体上低速异常趋势明显，解释为回填区；从反演结果来看，下部溶洞、溶蚀程度严重，见三个明显低速异常区，结合钻孔资料分析，均判定为溶洞。30～46m 之间存在明显低速异常区域，中间可能有小溶洞或溶蚀性灰岩存在，向外方向溶蚀程度逐渐变弱，可以形成微溶孔隙灰岩。走势上来看，ZK3 井、ZK4 井钻遇的溶洞可能相互连通，且向 ZK3 方向上逐渐加深。

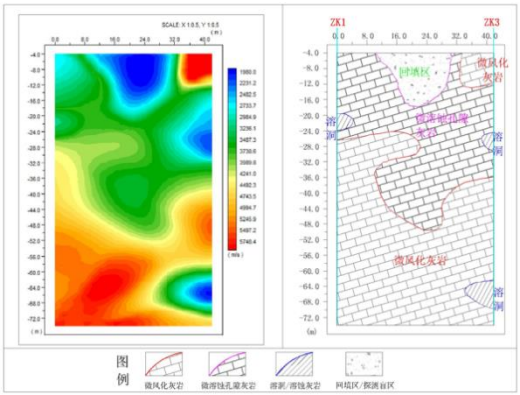


图 3　ZK1～ZK3 剖面解释成果图

Copyright © 2022 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

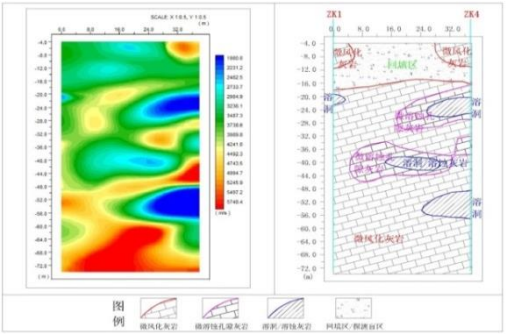


图 4　ZK1～ZK4 剖面解释成果图

③ZK2～ZK3 剖面

如图 5 所示，其反演结果与 ZK1～ZK3、ZK1～ZK4 结果相吻合，比较而言，上部溶洞回填区深度在 0～14m 之间。ZK2 井溶洞不发育，取芯资料显示个别地方岩心较破碎，中等风化岩石，溶蚀孔隙发育，反演资料显示岩体 ZK2 井岩体声速大于 3500m/s，为中高速岩体，相对较稳定，剖面上溶洞周围岩体溶蚀相对较严重，34～50m 之间声波速度异常，与 ZK1～ZK4 剖面中部溶蚀性灰岩相对应，岩性解释为微溶蚀孔隙灰岩。

④ZK2～ZK4 剖面

如图 6 所示，其反演结果与 ZK1～ZK3、ZK1～ZK4、ZK2～ZK3 结果相吻合，剖面上的溶洞和上面叙述的溶洞相关联。上部溶洞变浅，与 ZK2～ZK3 形态相似，下部溶洞与井资料吻合性也较好。整体上，井与井之间的岩体，特别是在溶洞周边，溶蚀较严重。岩性上，中高速岩体解释为微风化灰岩，中低速岩体解释为溶蚀孔隙灰岩、微溶蚀孔隙灰岩，低速岩体解释为溶洞。

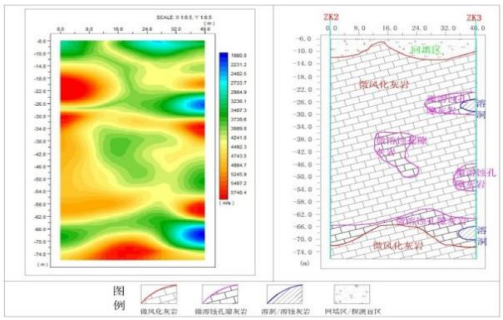


图 5　ZK2～ZK3 剖面解释成果图

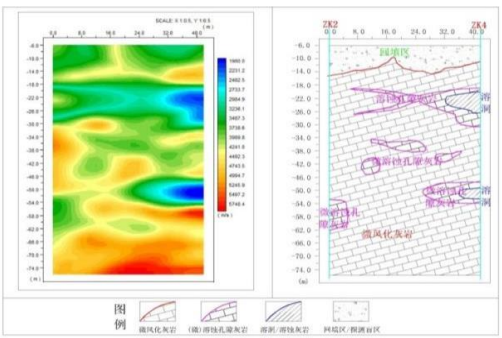


图 6　ZK2～ZK4 剖面解释成果图

⑤ZK5～ZK7 剖面

如图 7 所示，从反演成果来看，下部岩石相对较完整，但局部溶蚀现象普遍存在。上部中间区域 0～15m 范围内岩体，呈低速特征，而剖面 ZK5～ZK8 低速范围在 0～30m 之间，可能与充填物不均匀压实有关，且受回填区注浆处理质量的影响，表现出声速的局部异常。此外，ZK5 井 14～18m、28～31m、38～42m，ZK7 井 10～30m、34～46m 均存在低、中低速异常特征，反映溶洞、溶蚀带、风化带等岩体响应特征，ZK5、ZK7 井钻井取芯岩石破碎，呈短柱状、块状，岩芯见风化岩石、溶蚀空洞，与地震反演结果相吻合。

⑥ZK5～ZK8 剖面

如图 8 所示，整体上看，剖面上 44m 以下岩体相对完整，但局部溶蚀严重。上部低速异常特征明显，溶洞、溶蚀带、风化带非常发育，剖面上呈串珠分布，与 ZK5～ZK7 剖面反演的低速异常在空间上相对应，并且在该剖面方向上，溶洞特征更为明显。走势上来看，ZK7、ZK8 井钻遇的溶洞，向 ZK8 方向上走势逐渐加深。

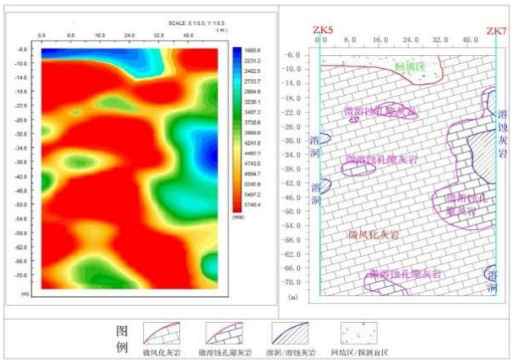


图 7　ZK5～ZK7 剖面解释成果图

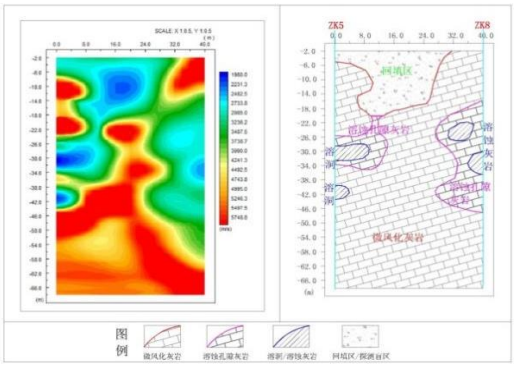


图 8　ZK5～ZK8 剖面解释成果图

⑦ZK6～ZK7 剖面

如图 9 所示，岩体上部回填区并未见到低速异常区，并且速度均匀变化，这与 ZK6 井上部资料缺失相关，反演结果为下部地震数据插值得到。反演结果来看，54～62m 岩体存在一明显速度分界面，下部岩体未见明显低速异常带，推测下部岩体发育完整，溶洞不发育，解释为原状地层灰岩，孔隙不发育；以上岩体，溶蚀现象十分普遍，形成溶蚀带，

Copyright © 2022 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

岩性上解释为溶蚀性灰岩，孔隙十分发育、相互联通，取心破碎严重、呈块状，部分岩体形成溶洞，ZK7 井 12～28m 发育低速异常带，结合钻孔资料分析，解释为溶洞。

⑧ZK6～ZK8 剖面

如图 10 所示，整体上，与剖面 ZK6～ZK8 具有相似的地球物理响应特征，剖面 36～42m 以下岩体呈中～高速特征，局部溶蚀现象发育，岩体呈中速特征。30～36m 之间岩体，呈明显低速异常带，结合钻孔资料分析，该段岩体溶洞、溶蚀孔隙十分发育、连通性好，岩性上解释为溶蚀孔隙灰岩。ZK8 井钻孔资料显示，在 11.8～12.2m、13.9～16.4m 钻遇溶洞，25.1～31.8m、33.2～34.9m、36～39.3m 溶蚀十分发育，在反演剖面上对应低速异常区，与钻井结果相吻合，岩性综合解释为溶蚀灰岩。结合 ZK5～ZK8 剖面分析，ZK7、ZK8 井钻遇的溶洞可能相互连通，且向 ZK8 方向上有逐步加深的趋势，开口逐渐变小，但周边岩体溶蚀现象更为强烈。

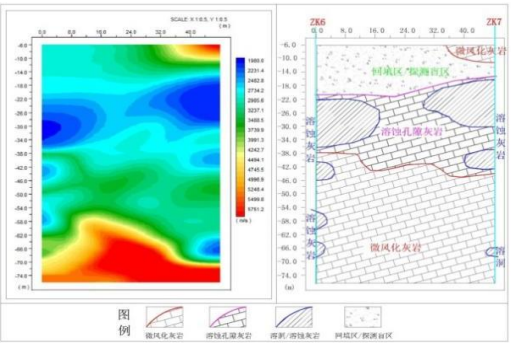


图 9　ZK6～ZK7 剖面解释成果图

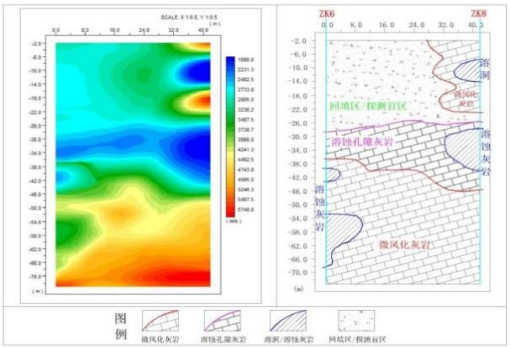
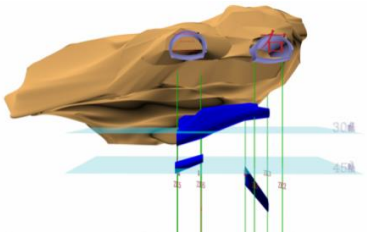


图 10　ZK6～ZK8 剖面解释成果图

4 三维空间模型

结合地震波 CT 资料、钻孔资料、地质资料以及工程资料，建立麻窝隧道地下溶洞三维空间形态，如下图所示。



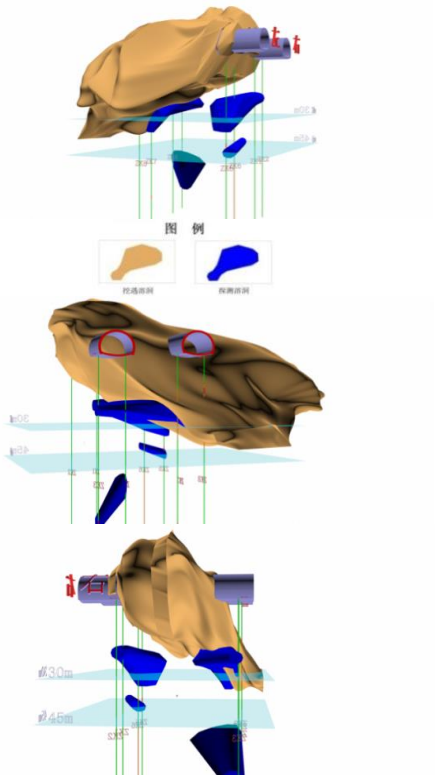


图 11　麻窝隧道溶洞段 3D 建模

麻窝隧道溶洞在 3D 建模图中能够清晰的辨别出来，溶洞（已回填）主体向两个方向发育，一是从右侧隧道到左侧隧道呈逐渐加深趋势；二是溶洞向 ZK8 井方向深部延伸。

5 结语

麻窝隧道溶洞回填区下部岩体，发育多组低速异常带，溶洞、溶蚀现象普遍发育，相互之间的关系复杂，主体上共有四个溶洞发育：

①30m 以上岩体，除已挖遇的溶洞外，仍有两个溶洞发育，横向上分别表示为 ZK1-ZK6-ZK5 与 ZK3-ZK4-ZK7-ZK8，走向与上部回填溶洞大体一致，从右到左逐渐加深，其中 ZK3-ZK4-ZK7-ZK8 走向溶洞与上部已挖遇的回填溶洞相贯通。两溶洞之间的岩体声速较低，可见当时地下水在该区域较活跃，形成区域溶蚀带，多发育溶蚀性孔隙灰岩，局部地方溶蚀严重可形成小溶洞。

②30～45m 岩体，在 ZK6-ZK5 走向上见溶洞，形态、走向与上部探测溶洞类似；钻孔之间的岩体，溶洞、溶蚀区多为上部同种类型地质异常体在纵向上的延伸（垂直渗流或裂隙溶蚀作用），上部仍为溶蚀带，局部发育溶洞、溶蚀区，岩体多为溶蚀性孔洞灰岩、微溶蚀孔隙灰岩，下部岩体中、高速特征连续均匀分布，反映岩体逐渐稳定，岩性上多为微～中等风化灰岩。

③45m 以下岩体，工区内 ZK4-ZK3 走向上见一溶洞发育，其走向与上部溶洞差别较大，呈“∧”分布特征，推测该区岩体受共轭剪切作用力后剪切破裂，地表水顺着裂

Copyright © 2022 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

缝往下渗透形成了工区内岩体目前所见的溶洞形态。总体来看，45m 以下岩体，高速特征连续分布，岩性为原状地层灰岩、微风化灰岩，孔隙不发育。

通过地质资料与处理成果的综合分析发现，溶洞的延伸方向与岩体的走向不一致，初步确定溶洞、溶蚀的发育可能与裂缝系统的产状相关，地表水沿着裂缝系统渗流，进而产生溶洞、溶蚀带等。

需要注意的是，运用二维地震资料对地下溶洞进行三维空间展布情况进行分析仍然存在较多的不确定性，需对工区布置三维地震测线，采集三维地震体，才能对地下溶洞的空间展布进行较为准确的描述。尽管如此，仍可以确定的是，麻窝隧道挖遇的溶洞回填区下方，仍发育溶洞，溶蚀现象较普遍，局部溶蚀程度较严重。

[参考文献]

[1]赵爱华,张美根,丁志峰.横向各向同性介质中地震波走时模拟[J].地球物理学报,2006,49(6):1762-1769.
[2]王建军,廖全涛,曹建伟,等.应用井间地震 CT 探测某桥墩基础断裂[J].物探与化探,2006,30(2):186-188.
[3]段心标,金维浚.井间地震层析成像初始速度模型[J].地球物理学进展,2007,22(6):1831-1835.
[4]肖宽怀,刘浩,孙宇,等.地震 CT 勘探在昆石公路隧道病害诊断中的应用[J].地球物理学进展,2003,18(3):472-476.
[5]李丹,李川,赵永贵.地震 CT 与 FBG 传感器技术在隧道结构诊断中的应用[J].工程地质学报,2008,16(6):839-843.
[6]贾莹,孟刚,荣宁,等.地震 CT 在箱型梁桥检测中的应用[J].山东理工大学学报(自然科学版),2008,22(4):71-75.
[7]张奂欧,胡玉瑞,赵永贵.地震 CT 在芭蕉箐隧道地质灾害诊断中的应用[J].CT 理论与应用研究,2009,18(4):53-60.

作者简介：赵清先（1990.5-），男，成都理工大学，地球探测与信息技术，四川省兴冶岩土工程检测有限责任公司，技术员，工程师。

Copyright © 2022 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.