

地铁施工扰动区探测及注浆效果评价

陈宁¹, 柳超²

(1. 中铁十九局集团轨道交通工程有限公司, 北京 100125; 2. 北京同度工程物探技术有限公司, 北京 102209)

摘要: 地铁施工引起土体疏松、松散和空洞, 进而影响地铁运营和地铁周边建筑物的安全。为探索地铁施工扰动区探测及注浆效果评价的有效手段, 介绍了 SSP 技术的原理和特点, 并结合 SSP 技术在北京地铁 14 号线甜水园中街区段的应用实例, 说明了该技术在地铁施工引起的土体扰动探测及注浆效果评价中的应用效果。结果表明: 注浆区在 SSP 的波速图像中表现为高速异常, 扰动区表现为低速异常, 根据 SSP 波速图像中高、低速异常的分布可判定注浆区与地铁施工扰动区的位置与形态。该技术还具有抗干扰能力强、探测深度大和分辨率高等特点, 是城市地铁施工与环境影响探测与评价的有效手段。

关键词: 地铁; 施工扰动区; 注浆加固; SSP 地震散射技术

DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2014.11.006

中图分类号: U 455.46

文献标志码: A

文章编号: 1672-741X(2014)11-1049-06

Exploration of Zones Disturbed by Metro Construction and Estimation of Grouting Reinforcement Effect

CHEN Ning¹, LIU Chao²

(1. Track Traffic Engineering Co., Ltd., China Railway 19th Bureau Group, Beijing 100125, China;

2. Beijing Tongdu Engineering Geophysics Ltd., Corp., Beijing 102209, China)

Abstract: Zones disturbed by Metro construction may affect the safety of Metro operation and surrounding buildings. In the paper, the principle and characteristics of SSP seismic scattering technology are presented, so as to find an effective method to explore the zones disturbed by Metro construction and to estimate the effect of grouting reinforcement. The application of SSP technology in Tianshuiyuan Middle Street Section of Line 14 of Beijing Metro is illustrated, which verifies the effectiveness of SSP technology in the exploration of zones disturbed by Metro construction and in the estimation of the effect of grouting reinforcement. Conclusions drawn are as follows: 1) The grouting zones in the SSP image take the form of high velocity anomalies, while the disturbed zones in the SSP image take the form of low velocity anomalies; 2) The locations and patterns of the disturbed zones and grouting reinforcement zones can be determined on basis of the distribution of the high velocity anomalies and low velocity anomalies in the SSP image; 3) SSP technology, which has such advantages as strong interference resistance, deep exploration depth and high resolution, is suitable for exploring disturbed zones and estimating grouting reinforcing effect.

Key words: Metro; zone disturbed by Metro construction; grouting reinforcement; SSP(seismic scattering profile)

0 引言

地铁施工会引起土体疏松、松散和空洞^[1](这类地铁施工引起的土体缺陷行业内并无统一学名, 本文将这 3 种缺陷统称为地铁施工扰动区), 这些扰动缺陷进一步发展可能会导致路面塌陷和建筑物开裂等问题^[2]。为消除隐患, 常对上覆地层注浆加固处理^[3], 处理后需检测、评估处理效果, 以防有遗漏的扰动区。近年来, 众多城市修建地铁, 由于地铁施工造成的路面

塌陷增多, 地铁施工扰动区探测及注浆效果评价变得越来越重要。

地铁施工形成的扰动区及注浆区深度大且分散孤立, 单个扰动区和注浆区大小有限且其地质情况复杂, 因而地铁施工扰动区探测及注浆效果评价是一个疑难问题。地质雷达常用于探测与地铁施工扰动区类似的路面脱空以及浅埋管道引起的土体扰动, 并用于评价注浆效果。文献[4-5]研究了地质雷达在路面脱空

收稿日期: 2014-05-09; 修回日期: 2014-10-21

作者简介: 陈宁(1985—), 男, 辽宁辽阳人, 2008 年毕业于东北财经大学, 土木工程专业, 本科, 助理工程师, 目前主要从事地铁施工技术管理工作。

探测及其注浆效果评价方面的应用,王德咏等^[6]对地质雷达探测顶管施工所引起的土层扰动做了研究。然而地质雷达探测深度有限,即使使用 100 MHz 天线,在城市电磁干扰背景下,其探测深度亦不超过 5 m。地质雷达只能探测深度较小范围内的土体脱空,然而从地表到隧道顶面的整个范围内都可能存在土体扰动,且由于新修建地铁埋深越来越大,大量地铁施工扰动区与注浆区埋深大于 10 m,地质雷达无法有效探测。再考虑反射地震、面波、瞬变电磁和高密度电法等物探方法^[7],由于城市环境、硬质路面等因素影响,使得这些方法难以应用。总的来说,目前未见到地铁施工扰动区探测及注浆效果评价的适当解决方法,需要探索新的探测技术。

SSP 地震散射技术是一种地震勘探新方法,该技术以速度分析的方式获得地层地震波速分布并以此为依据进行地质解释。不同于传统地震勘探方法的理论基础、地质模型、数据处理方式和硬件设备,使得 SSP 补充了其他方法在地铁施工扰动区探测及注浆效果评价方面的不足,具有对注浆体和扰动区反映直观、分辨率高、探测深度大、不损坏路面和工作效率高等优点。

文章在分析介绍 SSP 原理和特点的基础上,详细介绍了 SSP 技术在北京地铁 14 号线甜水园中街区段地铁施工扰动区探测及注浆效果评价中的应用实例,证明了 SSP 技术是城市干扰环境下道路隐患探测的有效手段。

1 SSP 地震散射技术简介

SSP 地震散射技术(Seismic Scattering Profile)是一种基于地震散射理论的地震勘探新技术^[8],激发地震波在地下传播,地震波在传播过程中如遇到空洞、松散之类的波阻抗变化界面会发生散射和反射,通过接收到的反射和散射波,对地下结构成像^[9](如图 1 所示)。

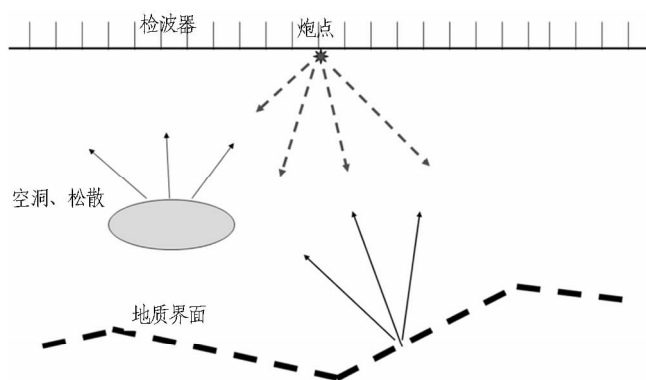


图 1 SSP 技术原理示意

Fig. 1 Schematic diagram of seismic scattering technology

SSP 技术是在对地震反射方法改进的基础上发展起来的。反射地震方法是基于分层均匀的地质模

型^[10],对于层状结构勘探效果很好,但对纵向和横向均剧烈变化的非层状结构勘探效果不佳。SSP 技术基于非均匀地质模型,适应地质结构剧烈变化的场合。地铁施工扰动区、注浆体等都属于地质结构剧烈变化的地质体,从地质模型角度考虑,SSP 更适合探测地铁施工扰动区及其注浆效果。反射地震勘探主要提供时域偏移剖面,而 SSP 技术同时提供空间域地质结构偏移图像和纵波波速分布图像。波速能清晰、直接地反映岩土介质的力学性状,更符合岩土工程的需要。依据低速与高速异常的分布,可对地铁施工扰动区、注浆区可靠地解释。

SSP 的数据处理包含如下 3 项核心技术:

1) 波场分离与方向滤波。由于城市交通及环境干扰严重,地震记录中面波和声波等干扰成分的能量强,而地铁施工扰动区、注浆体等产生的散射波和反射波能量较弱。为获得地下结构图像,必须滤除各种干扰,提取出地下异常体的散射信号。SSP 通过基于 $F-K$ 、 $\tau-P$ 变换的技术实现波场分离,根据视速度的差异,滤除地表传播的视速度大的直达波、面波、声波以及行人、车辆振动干扰,提取来自地下的散射波。经过滤波处理后大大提高了散射波的信噪比。

2) 岩土介质的速度分析。波速是反映岩土介质力学性状的定量指标,也是将地震散射波走时转换为界面深度的重要依据。波速是随水平位置与深度变化的分布函数,是注浆效果评估以及寻找隐伏扰动区的重要指标。SSP 技术采用双曲 Radon 积分变换来实现速度分析^[11],获得地下介质纵波速的分布。双曲 Radon 积分变换是对共炮点记录沿双曲线路径进行积分变换,如积分路径与反射波的走时曲线一致,积分取得极大值。通过 Radon 变换将时间域地震信号转换到深度(双程时)一速度域,其能量极值点直观反映了炮点位置界面的深度和平均波速。联合所有炮点得到地下二维或三维地震波速结构。

3) 合成孔径偏移成像。SSP 技术采用几何偏移成像技术中的合成孔径成像技术重建地质结构,获取界面形态和位置信息,以及界面两侧波阻抗变化的定性信息。合成孔径技术与反射地震的 CMP 叠加相比,可以使用更多的地震数据,以获得空间域的更高分辨和更高信噪比的地质图像。

SSP 技术主频比传统地震勘探方法高,SSP 所使用检波器拖缆的频带为 0 ~ 16 000 Hz,信号主频为 1 000 ~ 4 000 Hz,仪器采样率最高可达 1.25 MHz/道,可采用锤击震源或电磁震源作为震源,探测深度超过 30 m。若接收检波器道间距 0.25 m,激发间距 0.5 m,探测的垂直和水平分辨率可达 30 cm。

从理论基础、地质模型、数据处理及硬件角度考

虑, SSP 技术具有分辨率高、探测深度大和图像直观等特点, 适合城市道路工程的勘察与隐患探测。

2 工程与地质概况

北京地铁 14 号线 18 标经过甜水园中街, 全长 2 007.750 m。标内由 1 站(朝阳公园站)2 区间(红庙站—甜水园站区间和甜水园站—朝阳公园站区间)组成。该区段内地铁 14 号线为单洞双线隧道, 跨径 10.22 m, 采用 PBA 法施工^[12](如图 2 所示)。标内地铁 6 号线联络线与其并行, 隧道跨径 6 m。

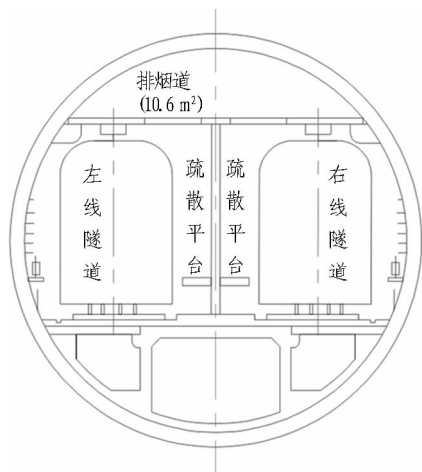


图 2 地铁 14 号线断面图^[12]

Fig. 2 Cross-section of tunnel of Line 14 of Beijing Metro

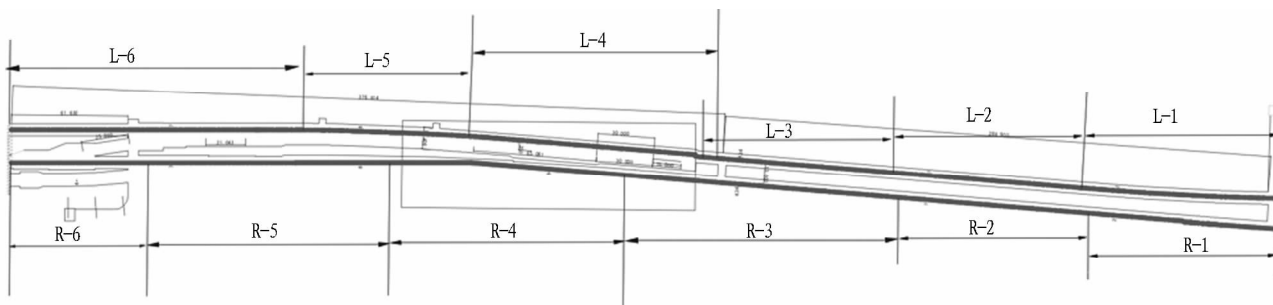


图 3 测线和剖面布置示意

Fig. 3 Locations of lines and profiles

工作中使用 16 通道仪器主机记录, 锤击震源激发。使用检波拖缆接收, 不损坏路面, 施工高效, 不中断交通。仪器如图 4 和图 5 所示。



图 4 SSP 高分辨率地震仪

Fig. 4 SSP high resolution seismic instrument



图 5 地震接收拖缆

Fig. 5 Seismic streamer

根据工程地质勘察报告, 测区内地层从上至下分为人工堆积层、全新世冲洪积层和晚更新世冲洪积层。地铁埋深 14 ~ 21 m, 位于第四系冲洪积层之内, 黏性土、粉土、砂类土、卵石组成冲洪积层交互沉积。土质松散, 遇水不稳定, 成拱条件差。地下水位较高, 透镜体发育, 透水性不均。总体来说, 工程地质与水文地质条件较差, 隧道跨径大, 施工难度大。为减小地铁对地下管网、地面沉降及建筑物的影响, 施工中从隧道内外对土层注浆加固。为了解注浆加固的效果, 寻找遗漏的地铁施工扰动区以进行进一步的治理, 采用 SSP 技术进行探测。

3 探测工程布置与仪器设备

沿甜水园中街布置左、右 2 条测线, 左线沿 14 号线隧道轴线布置, 右线沿 6 号线联络线隧道轴线布置, 分别探测 14 号线和 6 号线联络线的施工扰动区及其注浆效果。2 测线长度均为 670 m, 左线和右线各分 6 个剖面(分别为 L-1 ~ L-6 和 R-1 ~ R-6)。测线布置如图 3 所示。左线中部 200 m 的范围内建筑比较集中, 定为重点探测区域。探测中在重点探测区域, 检波器间距为 0.25 m, 敲击点间距 0.5 m。其他区域检波器间距 0.5 m, 敲击点间距 1.0 m。

4 解释原理与探测结果

4.1 解释原理

地下工程施工扰动引起土体疏松,导致土体波速降低^[13]。注浆可使土体密实性提高,弹性模量增高,导致波速提高。波速提高幅度越大,注浆加固效果越明显。因而,低波速异常是判定扰动区的依据,高速异常是识别注浆区的依据。

以波速高低判定土体疏松程度和注浆密实性是一个新课题,目前还没有形成可遵循的统一标准。根据波速与动弹性模量的关系,同场地原位正常波速比较,土体波速降低小于 10%,其动弹性模量降低幅度小于 20%,划为Ⅰ类土体;波速降低 10%~20%,动弹性模量降低 20%~40%,划为Ⅱ类土体;波速降低 20%~40%,动弹性模量降低 40%~60%,划为Ⅲ类土体;波速降低超过 40%的划为Ⅳ类土体,其动弹性模量降低超过 60%。若波速降低超过 30%,动弹性模量降低超过 50%,对此类缺陷应加固处理。而若波速增高 20%以上,动弹性模量升高幅度超过 40%,可以判定注浆加固效果较好。

甜水园中街地层的正常波速分布特征为:表层

(路基层)的波速为 900~1 000 m/s,其下 20 m 深度内冲洪积层的波速为 800~900 m/s,20 m 以下波速增至 900~1 100 m/s。对于深度 14 m 以内的区域,根据各类土体的速度指标可知:波速高于 750 m/s 的区域为Ⅰ类土体;在 650 m/s< v_p <750 m/s 范围的区域为Ⅱ类土体;在 500 m/s< v_p <650 m/s 范围的区域为Ⅲ类土体;波速低于 500 m/s 的区域为Ⅳ类土体;波速高于 1 200 m/s 的区域判定为注浆加固效果较好的区域,且波速越高注浆加固效果越好。

4.2 探测结果

本次探测深度超过 30 m,根据探测需要,选取深度 15 m 以内的资料进行成图。由于篇幅的限制,本文仅对 L-2 和 R-6 2 条剖面的探测结果进行介绍。

4.2.1 L-2 剖面探测结果

L-2 剖面的地层波速见图 6。图中红、黄 2 种颜色表示高波速区,浅蓝、深蓝 2 种颜色表示低波速区,绿色表示中等波速区,为原位地层背景。图中显示地层背景波速在 900 m/s 左右,地层较密实。剖面内波速大小变化剧烈,说明地铁施工对土层的扰动大、注浆效果明显。

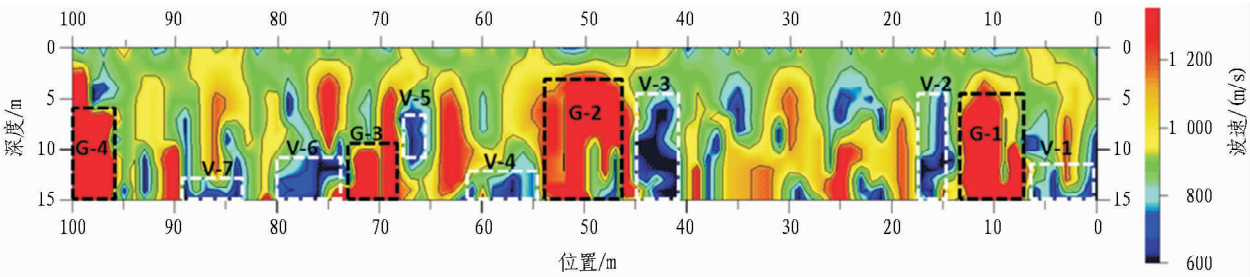


图 6 L-2 剖面地层波速与扰动区、注浆区分布

Fig. 6 Wave velocity of Profile L-2 and distribution of disturbed zone and grouting zone

地层波速图(见图 6)中标注了高速异常区和低速异常区。其中柱状的红色高速异常区为注浆形成的加固体,剖面中发现 4 处柱状高速异常体,土体波速越高,注浆效果越好,注浆体的位置规模见表 1。蓝色的低速异常体为地铁施工扰动区,剖面内共发现 7 处扰动区,这些扰动区的尺度不大,但是松散程度高,特别是在注浆高速体附近出现的扰动区,很可能包含空洞,建议对这些低速区逐个注浆处理,以消除隐患。地铁施工扰动区的位置、规模见表 2。

表 1 L-2 剖面注浆加固区位置

Table 1 Locations of grouting reinforcement zones in Profile L-2

注浆加固区编号	位置范围/m	埋深/m
G-1	7~13	4~15
G-2	47~53	3~15
G-3	68~73	11~15
G-4	97~100	6~15

表 2 L-2 剖面地铁施工扰动区位置

Table 2 Locations of disturbed zones in Profile L-2

扰动区编号	位置范围/m	埋深/m
V-1	0~6	12~15
V-2	15~17	4~15
V-3	40~45	4~15
V-4	55~61	13~15
V-5	66~67	7~11
V-6	73~80	11~15
V-7	83~89	13~15

低速异常区发育的部位与形态表明,低速区的成因可分为 2 类。一类靠近隧道顶部发育,形态圆润,这是由于隧道超挖引起的;另一类分布在注浆孔周围,形态孤立、呈鸡窝状,它们伴随注浆体产生,这是由于注浆引起的土体液化形成的,如 V-5。

4.2.2 R-6 剖面探测结果

R-6 剖面的地层波速和地铁施工扰动区分布见图 7。图中显示地层正常波速在 900 m/s 左右,地层密实、稳定。剖面内浅部波速较高,地层稳定,未见注浆加固痕迹,此段内没有注浆处理。深度大于 7 m 的范围内扰动区较发育。这些扰动区靠近隧道发育,形

态圆润,是由于超挖引起的。剖面中低速区尺度不大,长度多在 5 m 左右,其位置、规模见表 3。

探测完成后,通过对比发现探测得到的注浆加固体位置与注浆孔位置一致。对各剖面规模较大的地铁施工扰动区注浆加固,注浆的结果表明注浆位置和注浆量与 SSP 探测得到的扰动区位置和规模基本对应。

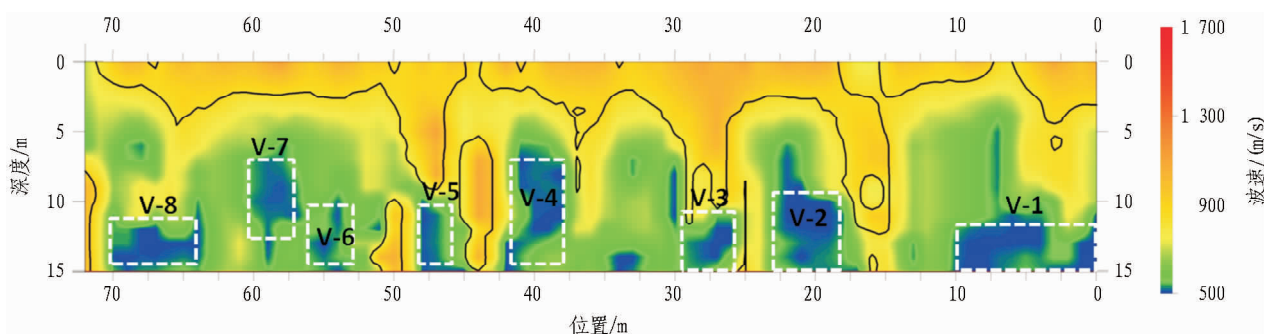


图 7 R-6 剖面地层波速与地铁施工扰动区分布

Fig. 7 Wave velocity and disturbed zone distribution of Profile R-6

表 3 R-6 剖面扰动区位置

Table 3 Locations of disturbed zones in Profile R-6

扰动区编号	位置范围/m	埋深/m
V-1	0 ~ 10	12 ~ 14
V-2	18 ~ 22	10 ~ 14
V-3	26 ~ 29	12 ~ 14
V-4	39 ~ 42	7 ~ 14
V-5	46 ~ 48	10 ~ 14
V-6	53 ~ 56	10 ~ 14
V-7	58 ~ 61	7 ~ 12
V-8	64 ~ 70	11 ~ 14

5 结论和建议

SSP 地震散射技术探测得到的速度图像对地铁施工扰动区和注浆体反映直观,且该方法具有分辨率高、探测深度大、不损坏路面和工作效率高等优点,能适应城市交通干扰,是地铁施工扰动区探测及注浆效果评价的有效手段。实际应用中,SSP 技术能评估注浆加固的效果,确定注浆加固体以及隐伏扰动区的位置和规模,为进一步加固处理提供建议。

地铁施工扰动区是引起路面坍塌和地面沉降的隐患,其情况复杂、隐藏较深,需要细致勘查、认真处理。目前 SSP 技术在地铁施工扰动区探测及其注浆效果评价中取得了好的应用效果,然而波速与土体强度(结构)间的定量对应关系还不清楚,应在这方面做深入研究。可选取地铁工程重点区段,在施工前后、注浆处理前后使用 SSP 技术探测,对比探测结果、钻芯验证并测量芯样波速。

参考文献(References):

- [1] 苏洁,张顶立,牛晓凯.北京地铁隧道暗挖法施工地层变形规律研究[J].隧道与地下工程,2010,28(5): 82-85. (SU Jie, ZHANG Dingli, NIU Xiaokai. Study on ground deformation discipline of tunnel excavation in Beijing subway construction [J]. Tunnel & Underground Engineering, 2010,28(5): 82-85. (in Chinese))
- [2] 闫鑫,叶阳升,张梅,等.地铁隧道下穿既有铁路桥施工影响分析[J].铁道建筑,2012(6): 84-85. (YAN Xin, YE Yangsheng, ZHANG Mei, et al. Analysis on influence of construction of Metro tunnel crossing underneath existing railway bridge [J]. Railway Engineering, 2012(6): 84-85. (in Chinese))
- [3] 吕波.地铁工程地层预加固技术综合分析[J].施工技术,2012,41(S1): 68-71. (LV Bo. Comprehensive analysis on stratum pre-reinforcement techniques for subway engineering[J]. Construction Techniques, 2012,41(S1): 68-71. (in Chinese))
- [4] 林尤聪,黄伟义,葛如冰,等.透地雷达检测路面脱空与灌浆加固的应用效果[J].物探与化探,2001,25(3): 231-235. (LIN Youcong, HUANG Weiye, GE Rubing, et al. The effects of applying ground-penetrating radar to detecting road surface vacancy and conducting grouting strengthening and consolidation [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2001,25(3): 231-235. (in Chinese))
- [5] 王雯珊,向开阳,熊潮波.地质雷达在路面脱空检测中的应用[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2012,31(4): 811-814. (WANG Wenshan, XIANG Kaiyang, XIONG Chaobo. Application of ground penetrating radar on detecting voids of pavement [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2012,31(4): 811-814.

- (in Chinese))
- [6] 王德咏, 罗先启, 李宏阶. 探地雷达在顶管施工中的应用[J]. 勘察科学技术, 2009(2): 62-64. (WANG Deyong, LUO Xianqi, LI Hongjie. Application of GPR to detection of jacking pipe construction[J]. Site Investigation Science and Technology, 2009(2): 62-64. (in Chinese))
- [7] 潘瑞林. 采空区物探方法新探[J]. 铁道勘察, 2010(6): 23-26. (PAN Ruilin. New approaches of geophysical exploration for mining zone[J]. Railway Investigation and Surveying, 2010(6): 23-26. (in Chinese))
- [8] 李斌, 石大为. SSP技术在采空区探查中的应用[J]. 煤矿安全, 2012, 43(9): 155-158. (LI Bin, SHI Dawei. The application of SSP technology in gob exploration[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(9): 155-158. (in Chinese))
- [9] 虞立, 王国群, 袁忠明, 等. 散射波地震勘探技术在浅表层精细结构勘查中的应用研究[J]. 石油物探, 2013, 52(1): 43-48. (YU Li, WANG Guoqun, YUAN Zhongming, et al. Application of seismic scattering profile technique in the shallow fine exploration[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(1): 43-48. (in Chinese))
- [10] 董敏煜. 地震勘探[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000: 22-26. (DONG Minyu. Seismic prospecting [M]. Dongying: China University of Petroleum Publishing House, 2000: 22-26. (in Chinese))
- [11] 李远钦, 杜友福. 双曲 Radon 变换及其在地震资料处理中的应用[J]. 江汉石油学院学报, 1990, 12(2): 16-20. (LI Yuanqin, DU Youfu. Transform of hyperbolic Radon and it's application in seismic signal processing [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1990, 12(2): 16-20. (in Chinese))
- [12] 王梦恕. 中国盾构和掘进机隧道技术现状、存在的问题及发展思路[J]. 隧道建设, 2014, 34(3): 179-187. (WANG Mengshu. Tunneling by TBM/shield in China: State-of-art, problems an proposals[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(3): 179-187. (in Chinese))
- [13] 张成平, 张项立. 城市隧道施工诱发的地面塌陷灾变机制及其控制[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 303-309. (ZHANG Chengping, ZHANG Dingli. Catastrophe mechanism and control technology of ground collapse induced by urban tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 303-309. (in Chinese))

淤泥快速固结技术填补世界空白

在船闸工程建设中, 确保滩涂淤泥基坑开挖 10 m 深时, 边坡不坍塌、不进水是一项世界性技术难题。目前, 淤泥快速固结新技术破解了这项难题, 填补了国内乃至国际技术领域内的空白。通过加入少量催化剂, 快速固结淤泥, 固结强度快速提升至原来的 4 倍。

位于浙江象山港北侧的奉化阳光海湾正加紧建设打造成宁波的“滨海客厅”。建成后, 这片区域将成为市民滨海观光的乐园。阳光海湾船闸项目地处海湾滩涂上, 淤泥深、强度低, 同时, 深港段风浪大、水流急。船闸的基础座落在海平面以下近 10 m 处, 解决船闸基坑近 10 m 厚滩涂淤泥的开挖而使边坡不坍塌、不进水, 是船闸施工的关键所在。而传统的搅拌桩、灌注桩处理造价高且无法在滩涂上施工。

淤泥快速固结技术是以原位淤泥为主体, 加入少量的催化剂, 使淤泥快速固结, 固结强度由原来的 1~2 t 快速提升至 7~8 t。目前, 这项技术已成功应用到了江苏和浙江的多个项目上。

(摘自 隧道网 <http://www.stec.net/sites/suidao/ConPg.aspx?InfId=0428e12d-7f61-4a7e-b792-14b73f6c1ea3&CtgId=d0faad2d-fcfl-435f-ace9-358da57ba4b1> 2014-11-12)

飞岛建设研发出利用盾构泥水填充地下空洞技术

2014 年 10 月 28 日, 飞岛建设向媒体公开了利用盾构泥水填充地下空洞技术的验证试验装置。该试验装置宽 60 cm、高 30 cm、长 10 m, 位于千叶县野田市的飞岛建设技术研究所。新技术既能够降低盾构工程污泥废弃物的处理费用, 又能够削减空洞填充工程的成本。

日本全国约有 1 万处褐炭废洞、采石场、防空洞等无用的地下空洞, 其中下沉危险性高的有 1 200 处, 长期松软的地层造成下沉事故不断发生。飞岛建设研发出了地下空洞填充工法, 以实现地层稳定为目的, 通过从地表钻孔注入填充材料堵塞地下空洞。该公司的施工业绩在过去 20 年间约达到了 35 万 m³。褐炭废洞在东海地区分布较多, 目前飞岛建设正在推动其中 5 处的填充工程。

原来的填充材料主要使用采石场的副产物脱水泥饼。飞岛建设通过本次试验对比了原来的填充材料和以盾构泥水为主的填充材料的性能, 结果表明二者在流动距离、抗压强度等方面几乎相同, 证明了可以把盾构泥水作为填充材料加以利用。

(摘自 中铁工程装备集团有限公司网站 <http://www.crectbm.com/tabid/1918/InfoID/56555/frtid/1918/Default.aspx> 2014-10-31)