

重力式码头水下抛石体加固技术及检测研究

Technique for reinforcement of the underwater riprap of gravity-type piers and researches on its effectiveness detection

刘红军, 单红仙, 郑建国, 薛新华
(中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266003)

摘要: 介绍了采用水下不分散水泥砂浆对码头水下抛石体进行高压注浆加固的方法。为了检测高压注浆加固效果, 采用探地雷达、弹性波 CT 无损检测方法, 配合所取岩芯的波速测试及点荷载强度试验, 对码头水下高压注浆效果进行综合检测。研究结果表明, 采用一定配合比及加有一定量的水下不分散剂的水泥砂浆加固水下抛石体, 方法可靠, 效果良好。弹性波 CT、探地雷达用于水下高压注浆加固效果检测, 检测结果直观、可靠, 可用于其它用途的高压注浆效果检测。

关键词: 水下抛石体; 不分散水泥砂浆; 弹性波 CT; 探地雷达; 无损检测

中图分类号: TU 472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2004)03-0344-05

作者简介: 刘红军(1966-), 男, 江苏靖江人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程设计、检测及海洋岩土工程的教学与科研工作。

LIU Hong-jun, SHAN Hong-xian, ZHENG Jianguo, XUE Xin-hua

(Institute of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: This article deals with the reinforcement method of pouring high pressure non-dispersive mortar into the underwater riprap of piers as well as the research on the comprehensive effectiveness detection of the method. Non-destructive examination methods are used such as ground penetrating radar, elastic wave CT, wave velocity and point loading strength of the rock core specimens. It is seen from the research results that it is a reliable and effective method to reinforce underwater riprap by pouring into the underwater riprap a certain quantity of high pressure grout, which is blended in the proper ratio of sand and cement with a certain quantity of underwater non-disperser, and that elastic wave CT and ground penetrating radar can be employed in the effectiveness detection of the reinforcement by underwater high pressure grouting. In addition, these detecting methods can also be applied to the effectiveness detection of the high pressure grouting in other usages.

Key words: underwater riprap stone; non-dispersive underwater mortar; elastic wave CT; ground penetrating radar; non-destructive examination

0 前言*

青岛港务局八号码头 51、52 泊位长 240 m, 为重力式码头。码头自上而下由胸墙、卸荷板、三层混凝土空心方块、二层混凝土实心方块组成, 见图 1。每个混凝土空心方块是双孔连体结构形式, 长 5.0 m, 宽 5.0 m, 高 2.2 m, 四周壁厚 1.2 m, 在空心方块中抛填粒径 15~20 cm 的花岗岩石块。该码头为集装箱专用码头。其上有门机一台, 自重 670 t, 轮压 27.5 t, 在这样的荷载情况下, 完整码头地基承载力能满足要求, 但由于码头空心方块目前破坏严重, 有很多贯穿裂缝, 局部错位、破碎(见图 2), 码头边缘向海方向的位移最大达 11 cm, 严重影响码头的正常使用。为此, 确定了一套水下修补加固方案, 为了检测修复加固效果, 经多种方案比较, 最后采用探地雷达、弹性波 CT 及对所取岩芯做点荷载强度试验等方法进行综合检测, 取得了很好的效果。

1 码头水下加固技术

经多种方案比较及现场试验, 最终采用垂直注浆加固方案, 用钻机在码头面板上打垂直孔, 每个混凝土

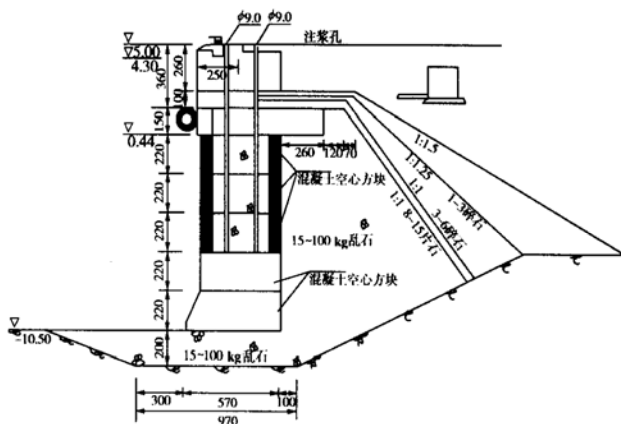


图 1 码头结构示意图

Fig. 1 Structure of the piers

空心方块钻 2 个孔, 孔距为 1.8 m, 每孔深度为 12 m, 孔径为 9~12 cm(见图 1)。通过高压泵自下而上将水下不分散砂浆灌注进抛石的孔隙中, 经多次室内模型

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40104004)

收稿日期: 2003-06-18

试验及现场灌注试验研究,注浆材试验料最终采用水下不分散水泥砂浆,该砂浆配置为 525[#] 普通硅酸盐水泥加 3% 的水下不分散剂(SCR 聚合剂和 UWB 絮凝剂)及其他的外加剂使砂浆的稠度为 8~10 cm,砂浆配合比为: $w/c = 0.45$, $c/s = 1:1.5$,砂最大粒径小于 5 mm。通过布孔位置设计、调整材料配方、注浆压力和注浆速度,将空心方块空腔中抛石体间胶结、抛石体与上层卸荷板间空隙注浆,修复原先破碎的空心混凝土壁。注浆过程中,海水没发现浑浊现象,经潜水观察,水下码头壁裂缝中有黏稠状砂浆混凝土挤出,但不扩散,用手可以刮平。高压注浆修复后,不但使原先空心块增加了壁厚,同时也增加了码头重量及空心块之间的接触面积,使原来的抛石体及其与卸荷板间点接触变成面接触,从而提高码头的承载力和稳定性。

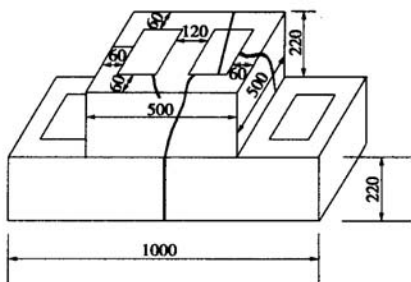


图2 空心混凝土方块破坏示意图(单位: cm)

Fig. 2 Destructive condition of the hollow concrete blocks

2 加固效果检测

高压注浆抛石混凝土加固效果检测的常规方法主要有钻探取芯和地球物理方法。为了检测码头高压注浆加固处理效果,评价码头工程状况,并且根据空心方块的排列方式及码头周围的环境条件,经大量现场试验后,我们采用了探地雷达、弹性波 CT 技术、单孔及跨孔声波测试、声波 CT 技术及岩芯波速测试等手段进行综合检测。此外,还取砂浆混凝土岩样做了强度测试,从强度方面进一步评价了码头注浆后的承载力情况。经比较,探地雷达和弹性波 CT 技术检测效果较好,配合以取岩芯做波速及强度测试,对码头高压注浆效果进行检测,取得了很好的检测效果。

2.1 检测原理

(1) 弹性波 CT 检测

“弹性波 CT 技术”又称“弹性波层析成像技术”,与医学上的 CT 属同一种技术,是利用弹性波在不同介质中传播速度的差异,通过井间弹性波走时的数据采集和在计算机上通过不同的数学处理方法(迭代反演)重建介质速度的二维图像^[1,2],从而推断井间介质的岩性、应力状态及精细结构。实践证明,该方法是一

种高精度、高分辨率的精细探测方法,以其成像的直观性和无损检测等优点受到越来越多的地球物理工作者的青睐,在工程地质勘探^[3]、库坝及灌浆效果检测^[4]、探矿、煤矿等岩土工程领域有其独特的效果^[5,6]。

其工作方法是利用一扇形探测系统,即在发射孔通过电火花产生震源,在接收孔采用检波器串(12道,间距 0.5 m)接收地震信号,形成弹性波在不同介质中传播的若干射线束,见图 3,在探测范围内构成切面,根据切面上每一条穿过探测区的地震波信号初始值 t ,通过数学计算方法重建探测区内弹性波速度场的分布,可反演出地质结构构造图像,达到解决工程问题的目的。重建图象的方法较多,有代数重建法、趋势面分析法和弯曲射线法^[1,2]。本论文采用弯曲射线法。

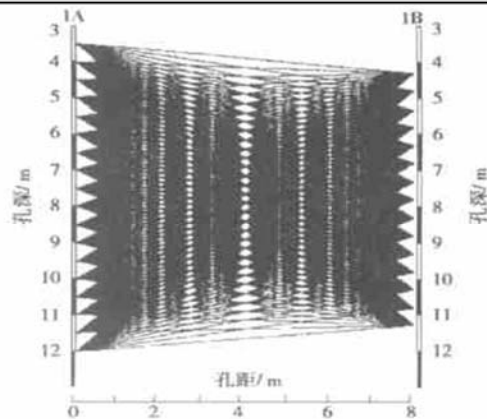


图3 1A1B剖面观测系统

Fig. 3 Surveillance system of 1A1B section

(2) 探地雷达检测

探地雷达是近几年发展起来的先进探测手段,该系统由计算机、中央控制器、发射机、接收机和天线组成,将高频电磁波以宽频带、短脉冲形式由地面通过发射天线传入地下,经地下电磁波异常体反射后返回地面,为另一天线所接收。通过脉冲波行程时间的精确测定(精度达 10^{-9} s),可准确求出地下反射体深度。通过逐点探测,地下目的体的形态、空间分布就会在计算机屏幕上显示。雷达图像是以脉冲反射波的形式记录,波形的正、负峰分别以黑、白色表示,或以彩色、灰阶表示,这样,同相轴或灰度等色线即可形象表征出地下反射界面。由于抛石体或砂浆混凝土和海水的介电常数差异明显,这为探地雷达检测创造了良好的工作条件。因此利用探地雷达就可以探明由于注浆不密实导致的介质的电磁差异地段。探地雷达在管道泄漏探测^[7]、岩土工程勘察^[8,9]、地下空洞探测^[10]、混凝土构件无损检测等领域的应用已十分广泛。

2.2 现场探测

(1) 弹性波 CT 检测

本次弹性波 CT 检测利用了四组共 12 个钻孔, 每组 3 个孔, 孔间距从 5.1 m 到 7.9 m 不等, 见图 4, 采用一发多收的扇形观测系统, 即在一孔中激发, 在另一孔中布设一串接收器接收, 在被测区域组成密集交叉的射线网络(见图 3)。由于成像精度在很大程度上取决于被测区域射线间的约束条件的好坏, 故在工作中尽量增加被测区域射线的密集度以及使射线能以大角度相交。

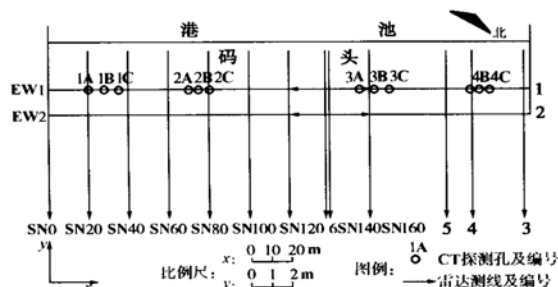


图 4 雷达测线和 CT 检测孔平面布置图

Fig. 4 Layout of radar surveying lines and CT detecting holes

实际探测时, 将电火花震源置于每组孔的中间孔即 B 孔中, 接收器分别放在 A 孔中接收 AB 切面数据集, 放在 C 孔中接收 BC 切面数据集, AB 和 BC 数据层析结果为 AB 和 BC 剖面。因此, 四组钻孔共得到 8 条速度分布剖面图。

(2) 地质雷达探测

雷达探测所用仪器为加拿大生产的 pulse EKKO 100 型探地雷达, 天线频率: 100 MHz, 天线间距: 1 m, 移动步长: 0.2 m。

该码头雷达探测采用 CDP 方法, 共布置了 17 条地质雷达探测剖面, 见图 4。1 号、2 号测线及 EW1、EW2 测线平行码头边缘, 分别距码头边缘 2.6 m、4.0 m, 且方向相对, 部分重迭。3 号、4 号、5 号及 6 号测线垂直码头边缘, 分别位于 1 号测线的 3, 29, 41, 8, 102 m 处。SN0、SN20、SN40、SN60、SN80、SN100、SN120、SN140、SN160 号测线垂直于码头边缘, 分别位于 EW1 和 EW2 测线的 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 m 处, 起点距码头边缘 0.5 m, CT 探测孔 1A、1B、1C 及 2A、2B、2C 位于 EW1 号测线上, CT 探测孔 3A、3B、3C 及 4A、4B、4C 位于 1 号测线上。

2.3 检测资料分析

(1) 弹性波 CT 检测资料分析

从 8 条 CT 剖面中选 2 个代表性的剖面进行分析, 1A-1B 钻孔弹性波 CT 探测观测系统图见图 4。由该图可知, 穿透介质的射线密度是比较高的, 这可确保 CT 成像结果的可靠性和精确性。

1A-1B 钻孔间距为 7.9 m, 1A 号钻孔位于距码头

的西南端 20 m 处, 弹性波 CT 探测观测系统见图 3。CT 探测波速等值线图见图 5, 从图中看出, 5 m 以上波速较高为 3000~3300 m/s, 与卸荷板实心混凝土相对应; 5 m 以下至 11.5 m 波速相对较低, 为 2600~2900 m/s, 与混凝土空心方块的抛石注浆体相对应, 波速等值线较稀疏, 反映波速较均匀, 表明注浆体与抛石胶结良好。卸荷板与抛石层间的空隙已完全充填, 注浆效果良好, 在距 1A 孔 1.6 m 至 4 m 位置, 11.5 m 深度处出现一低速带(2400~2500 m/s), 说明该范围内注浆效果不好, 经钻孔验证该深度范围内混凝土砂浆与抛石胶结较差, 所取岩芯主要为抛石, 而没有发现砂浆混凝土。

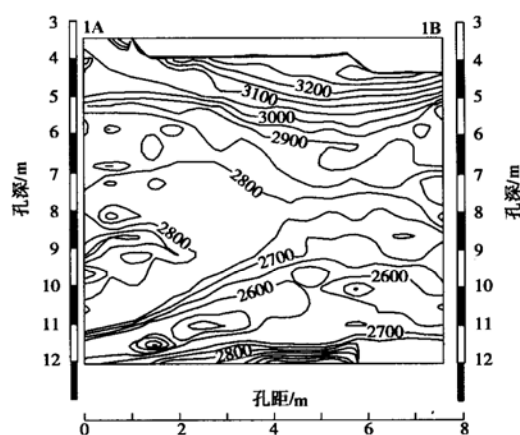


图 5 1A1B 剖面波速等值线

Fig. 5 Velocity isolines across 1A1B section

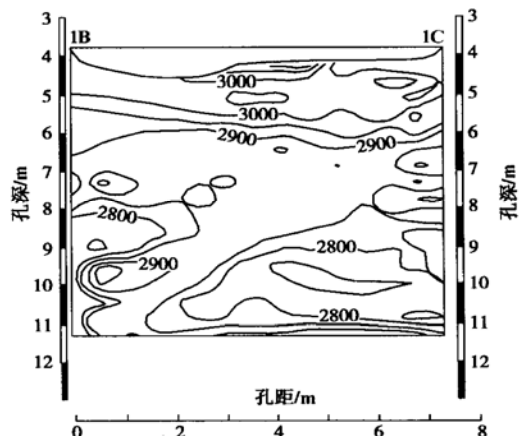


图 6 1B1C 剖面波速等值线

Fig. 6 Velocity isolines across 1B1C section

1B-1C 钻孔间距 7.3 m, CT 探测成果波速等值线图见图 6。从图中可以看出, 5.0 m 以上波速较高, 大于 3000 m/s, 5 m 以下波速相对较低, 为 2750~2900 m/s, 且波速等值线较稀疏。该结果表明, 该区段 5 m 以上为卸荷板实心混凝土, 5 m 以下为混凝土空心方块的抛石注浆体, 波速较均匀, 注浆体与抛石胶结良

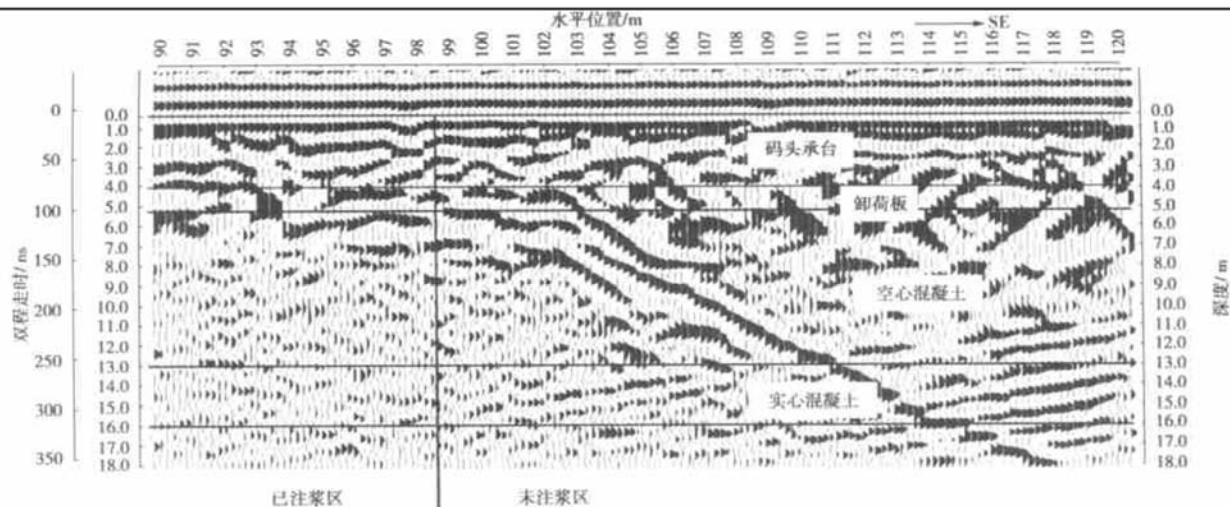


图7 1号测线雷达剖面图(部分)

Fig. 7 Profile of radar-surveying line No. 1 (partial)

好,5 m深度没发现低速带,说明卸荷板与抛石层间的空隙已完全充填,注浆效果良好。

综合四组孔的井间层析成像结果可以看出,所有这些剖面的速度分布很有规律,总体来说可以将井间介质在垂直方向上分成2层,第1层在5 m以上,表现为波速为3000~3200 m/s的相对高速度层,第2层为5 m以下,速度为2600~2900 m/s的速度略小于第一层的相对低速度层。二层的介质都比较均匀。

第一层为卸荷板预制混凝土,是均匀的介质,通过做等深度跨孔透射实验,得混凝土速度值在3000 m/s左右,因此,层析成像结果与实际符合。第二层为空心方块中抛石高压灌浆后形成的抛石混凝土,波速度值要比预制混凝土低一些。从CT探测结果可知,其速度值为2600~2900 m/s,从各组孔CT成像的波速等值线比较稀疏可知,该介质较均匀,从波速值也可验证,灌浆后的介质密实,高压灌浆的总体效果良好。

(2) 地质雷达探测资料分析

从17条地质雷达剖面中选出2个具有代表性的剖面加以分析。

1号雷达测线平行码头边缘线,距码头边缘2.6 m,全长120.6 m,其中90~120 m段雷达剖面见图7。该测线90~98 m位置,5 m深度以上,雷达波形反射较强,且连续性较好,表明该段位于码头承台实心混凝土范围,5 m深度以下,即卸荷板以下的雷达波形较强,连续性较好,但下部至12 m深度,雷达波形反射较弱,表明灌浆后,空心方块内的碎石与下部的实心混凝土差异较小。测线98~120 m位置,雷达波形反射较强,且较杂乱,存在多次反射,表明该范围空心方块内的碎石未胶结或胶结程度差,实际上该范围是未注浆区,剖面中斜交的同相轴为码头上的门吊影响所致。

4号雷达测线位于1号测线的29 m处,垂直码头边缘,起点距码头边缘0.5 m,长9.2 m,见图8。雷达图象总体上看,5 m以上,即卸荷载深度以上反射较强,且连续性较好,5 m以下雷达图象波形反射较弱,至11.7 m深度无明显的反射界面。表明注浆后,空心方块内的碎石与下部的实心混凝土差异较小,说明注浆效果较好,达到加固目的。

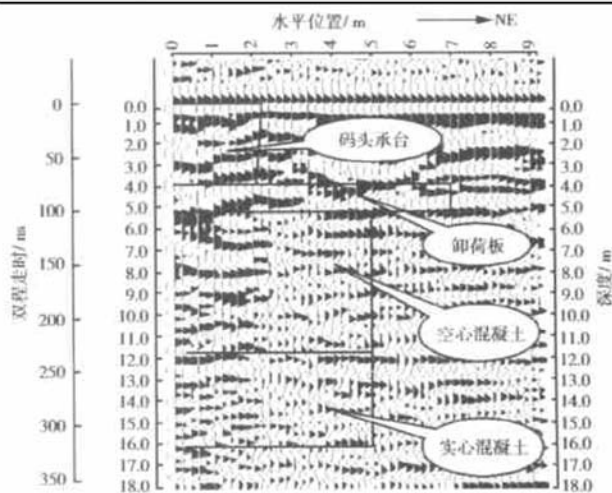


图8 4号测线雷达剖面图

Fig. 8 Profile of radar-surveying line No. 4

综合17条测线的雷达探测结果,在平行码头方向的雷达测线上,加固处理前后的雷达波形有一定的差异,在加固处理前的区段(1、2号测线的98~120 m),雷达波形上反映在卸荷板下有明显的空洞(隙),且在未加固的空心方块深度内(5~11 m),雷达波形反射较强,较杂乱。而加固后所有雷达测线表明:在卸荷板下方有明显的改善,雷达波形连续性大大增强,表明卸荷板下方的空洞(隙)都已基本上得到充填,此外,加固处

理后的所有雷达测线显示 11.6 m 深度处不存在明显的强反射,表明混凝土空心方块内的抛石体注浆效果良好,与下部的实心混凝土差异较小。

2.4 岩芯声波测试及强度结果分析

码头水下抛石体高压注浆加固处理 2 个月后,在准备弹性波 CT 检测钻孔的同时,取了一些岩芯,包括:抛石体(花岗岩)、砂浆体、砂浆与抛石胶结体,对其做了声波测试和点荷载强度测试。

测试结果表明,混凝土砂浆平均波速为 3492 m/s,平均单轴抗压强度为 25.46 MPa,完全达到 C20 的设计要求,抛石(花岗岩)的波速为 4562.5 m/s,平均单轴抗压强度为 129 MPa,砂浆体与抛石胶结体的平均波速为 3698 m/s,平均单轴抗压强度为 22.76 MPa。可以发现砂浆与抛石的胶结体波速与混凝土砂浆的波速相接近,甚至还高,说明胶结程度良好,砂浆与抛石的胶结体的抗压强度较混凝土砂浆低,是由于试样沿胶结面产生破坏,胶结面的强度较混凝土砂浆低。岩芯声波测试表明,混凝土砂浆波速及砂浆与抛石胶结体波速较弹性波 CT 波速高,可能是现场测试时有微裂隙存在,这和岩芯样波速较岩体波速高相类似。

3 结 论

(1) 采用加入适量的不分散剂(SCR 聚合剂和 UWB 絮凝剂)的混凝土砂浆加固水下抛石体,极大提高混凝土砂浆的水下抗分散性,在一定注浆压力作用下,能有效充填水下抛石体的空隙及混凝土空心方块的裂缝,增强了码头的稳定性,提高了码头的承载能力。该方法在水下混凝土浇注及水下混凝土构件修复方面,应用前景广阔。

(2) 岩芯点荷载强度试验结果表明,混凝土砂浆的饱和单轴抗压强度平均值为 25.46 MPa,声波波速为 3492 m/s,而混凝土砂浆与抛石胶结体的饱和单轴抗

压强度平均值为 22.76 MPa,声波波速为 3698 m/s,两者较接近,说明混凝土砂浆与抛石体胶结程度高,注浆效果好,达到了 C20 的混凝土设计标准。

(3) 采用弹性波 CT 检测及探地雷达检测方法对码头水下抛石体高压注浆加固效果进行综合检测,结合所取混凝土砂浆岩芯、混凝土砂浆与抛石胶结体岩芯的波速测试及点荷载试验,取得了良好的检测效果,探测成果具有高精度和高分辨率的特点,结果直观准确,检测效果可靠,具有单孔检测无法比拟的优点,应用前景广阔,可适合其他目的的高压注浆效果检测。

参考文献:

[1] 朱介寿,等.地震学中的计算方法[M].北京:地震出版社,1988.

[2] 杨文采.地球物理反演和地震层析成像[M].北京:地震出版社,1989.

[3] 李 玮,等.物探新技术在山地采空洞穴探查中的应用[J].勘察科学与技术,1998,(2):59-62.

[4] 段世超,等.小浪底大坝混凝土防渗墙质量检查[J].西部探矿工程,2000,(5):36-38.

[5] 王文德,等.弹性波 CT 技术及应用[J].煤田地质与勘探,1996,(5):57-61.

[6] 程久龙.岩体破坏弹性波 CT 动态探测试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(5):565-568.

[7] Liu Guanqun, Jia Younggang, Liu Hongjun, et al. A Case Study To Detect the Leakage of Underground Pressureless Cement Sewage Pipe Using GPR, Electrical, and Chemical Data[J]. Environment Science & Thecnology, 2002, 36(5): 1077-1085.

[8] 刘红军,贾永刚.探地雷达在采空区勘察中的应用[J].工程勘察,1999,10(9):73-76.

[9] Zhou Hui, Sato. Application of Vertical Radar Profiling Technique to Sendai Castle[J]. Geophysical, 2000, 65(2): 533-539.

[10] 刘传孝,等.探地雷达空洞探测机理及应用事例分析[J].岩石力学与工程学报,2000,19(2):238-241.

2004 年第 2 期勘误表

位置	错误	正确
p. 162 图 2 中	荷重传感器	进气孔
	压力头	荷重传感器
p. 164 图 5 中	荷重传感器	进气孔
	压力头	荷重传感器