

潮间带爆破挤淤法地基处理长期效果研究

肖广锋¹, 杨善翩², 秦伟^{2*}, 王军², 陈文斌¹

(1. 浙江交工集团股份有限公司, 浙江 杭州 310012;

2. 温州大学 浙江省软弱土地基与海涂围垦工程技术重点实验室, 浙江 温州 325035)

摘要: 爆破挤淤法作为一种高效率的软土地基处理方法, 被广泛应用于淤泥等软土地基处理中。该方法中抛填石的落底深度是评判其地基处理效果的重要指标, 而与其他探测技术相比, 地质雷达能够适应复杂的工程环境, 具有探测效率高、操作简便、图像分辨率高、对目标无损性和较强的抗干扰能力等优点。以福建宁德某潮间带爆破挤淤法地基处理为例, 采用了地质雷达探测技术对现场爆破挤淤法处理后的软土地基进行抛填石落底深度探测分析, 而在地质雷达的实际探测应用中, 存在着雷达波形图判断困难、主观经验依赖性强等问题, 故采集该路段长期雷达检测图像, 结合实地钻孔取芯的数据, 辅以路基沉降, 分析地基处理效果。证明了采用低频天线可用于探测深厚淤泥层, 且地质雷达探测技术能在少量钻探资料的支持下, 完成对地基处理效果的评价。

关键词: 爆破挤淤; 抛石; 地质雷达探测; 路基沉降; 钻孔取芯

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)04-0332-07

Study on long-term effect of ground treatment by explosive replacement method in intertidal zone

XIAO Guang-feng¹, YANG Shan-pian², QIN Wei^{2*}, WANG Jun², CHEN Wen-bin¹

(1. Zhejiang Communications Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310012, Zhejiang, China;

2. Key Laboratory of Engineering and Technology for Soft Soil Foundation and Tideland Reclamation of Zhejiang Province, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, China)

Abstract: As a high-efficiency soft soil foundation treatment method, the explosive replacement method is widely used in the treatment of soft soil such as silt. In this method, the bottom depth of rock dumping is an important index for judging the effect of ground treatment. Compared with other detection techniques, ground penetrating radar (GPR) can adapt to complex engineering environments, and has the advantages of high detection efficiency, simple operation, high image resolution, nondestructive to the target and strong anti-interference ability. In this work, taking the foundation treatment of an intertidal zone in Ningde, Fujian Province, as an example, the GPR detection technology was used to detect and analyze the depth of rock-filling on the soft soil foundation treated by the on-site explosive replacement method. However, in the actual detection application of GPR, there are problems such as the difficulty in judging the radar waveform diagram and the strong dependence on subjective experience. Therefore, the long-term radar detection images of this road section were collected, combined with the data of field drilling and coring, supplemented by subgrade settlement, and the effect of foundation treatment was finally analyzed. It is proved that the low-frequency antenna can be used to detect the deep silt layer, and the geological radar detection technology can complete the evaluation of the foundation treatment effect with the support of a small amount of drilling data.

Key words: explosive replacement method; riprap; ground penetrating radar (GPR); subgrade settlement; drilling cores

收稿日期: 2022-11-07

基金项目: 浙江省公益技术应用研究项目 (LGF22E080011); 温州市基础性科研项目 (S20210005); 浙江省教育厅一般项目 (Y202044146); 浙江省教育厅专项项目 (Y202146757, Y202248922); 温州大学硕士研究生创新基金项目 (No.316202002070)。

作者简介: 肖广锋 (1978—), 男, 湖南长沙人, 工程师, 主要从事公路工程研究工作。E-mail: 1057736468@qq.com。

*通信作者: 秦伟 (1988—), 男, 安徽安庆人, 博士, 副教授, 主要从事深水基础、地基加固处理等方面的研究工作。E-mail: wei.qin@wzu.edu.cn。

0 引言

在我国沿海地区大量分布着易受潮水位涨落影响的滩涂软土地基,随着近年来海涂围垦及近海工程的不断推进,有大量的工程项目需要建设在这类软土地基之上,而潮间带淤泥具有含水量高、透水性差、压缩性强、承载能力差、后期易发生不均匀沉降等工程特性^[1]。为保证建筑物在施工和后期使用过程中的安全与稳定性,实质性地提高其抗剪强度和承重能力,避免出现地基沉降过大的情况,并且达到工程建设的要求,必须对其进行地基处理。

而传统的地基处理办法如排水预压等^[2],所耗费的工期较长,并且经过处理后的地基承载力有限且施工成本高,无法进行大规模的推广,所以如何处理该类软土地基成为掣肘潮间带工程建设的重要技术难题。而采用爆破挤淤法施工相较于其他地基处理办法见效快、所需成本低且工程后期地基沉降小,对于潮间带软土地基不失为一种经济合理的处理办法。因此爆破挤淤法作为一项高效实用、经济可靠的地基处理技术受到越来越多工程项目的青睐^[3-4]。

爆破挤淤法的基本操作方法是在需要抛填石加固淤泥层的一定深度中埋置炸药,引爆后释放的巨大能量将周围的淤泥挤开形成爆坑,并抛填石块等加固材料,上方的抛填石体在受到自身重力和爆破后引起的空腔负压的共同作用下向下滑落至爆坑内^[5],淤泥土层也会受爆炸扰动导致土体的抗剪强度显著降低,爆破后随着再次抛填使得上方抛填石的重量不断增加,填石不断滑落下沉,重复多次作业直至抛石充分落底,达到新的土体平衡状态^[6-7]。评价该方法地基处理效果的主要要素就是抛填石落入深度最深能否达到持力层,主要评价指标为落底深度,若落底深度达到持力层则效果较好,若落底深度没有达到持力层则可能会引起后期地基的不稳定。

因为抛填石的落底深度直接决定了爆破挤淤法的地基处理效果,所以有必要对落底深度进行检测。工程上一般采用钻孔取芯法及地质雷达探测法等,钻孔取芯法能直观地反映出地基深层情况,检测结果比较准确;地质雷达因其检测速度快、对检测目标无损且连续性好等优点,选用合适的天线频率和雷达参数,能在较短时间内完成对现场实地的检测,在众多的实际工程中得到充分应用。刘传孝等^[8]通过地质雷达探测结果和被探测目标的实

际揭露情况比较得出,雷达剖面图像的解释结果与被探测目标的实际剖面形态相类似。鄢油纤等^[9]基于地质雷达探测法可以有效地探测地面沉降。邓世坤^[10]在深圳湾软基处理的过程中使用地质雷达探测法成功地分辨出块石铺盖层、淤泥层以及块石墩三者之间的物性差异和结构差异。张成方等^[11]对舟山某堤坝进行了雷达探测,依据抛石层和淤泥质黏土层之间的电学性质存在着较大差异,探测出大坝抛石层的范围和厚度。朱瑞虎等^[12]结合所在连云港的围堰工程,采用地质雷达探测法评价围堰工程爆破挤淤法的处理效果。但是直接使用钻孔检测法存在着检测周期长、检测成本高、数据不连续等局限性,故无法胜任较大区域的检测任务;单独凭借地质雷达探测法主观经验性较强,且容易受地下介质影响,需要结合地勘资料才能准确地获取地下土层厚度及构造等相关数据。

为进一步研究爆破挤淤是否完全、抛填石落底是否充分的问题,本文依托福建宁德某潮间带爆破挤淤法地基处理项目实例进行研究,采用地质雷达搭配 40 MHz 天线,获取了该路段长期雷达检测图像,结合实地钻孔取芯的数据,辅以路基沉降进行综合评价。探明了抛填石落底深度,说明地质雷达能在少量钻孔数据的支持下直观检测出软土地基的处理效果,充分说明了在爆破挤淤法地基处理中采用地质雷达探测技术的优越性,对于评价地基处理效果的研究尤为重要。

1 项目概况

研究所依托的工程项目位于我国福建宁德某潮间带,项目东侧为大海,西侧为滩涂,多为滩涂及水产养殖区,按二级公路标准进行设计,设计速度采用 60 km/h,路基宽度为 8.5 m。该路段主要分布有淤泥及淤泥质黏土,但由于这类软土主要是由陆相和海相沉积旋回的沉积物组成,具有高压缩性、渗透性差、含水量大、地基抗剪强度低等土体特性,于施工前 2014 年 12 月在桩号 K17+864 进行钻孔初勘,具体地勘资料见表 1,钻孔点位如图 1 所示。由表 1 可知软基厚度达到 14 m 左右,针对这类深厚淤泥层不良地质容易造成地基不均匀沉降等影响工程施工进程的问题,故在该项目 K17+335~K18+300 段软基采用爆破挤淤法进行处理,根据设计要求,爆破挤淤的界线为路堤坡脚外 3.5 m,应对处理范围内全部深度范围的软土进行换填,在填石层底面和下卧粉质黏土层顶面之间的泥

石混合层,其厚度应小于 2.0 m。为了检验施工段内的爆破挤淤处理效果,选取试验段进行地质雷达探测,探测填石落底深度及泥石混合层厚度。

表 1 工程地质分布及特征

Table 1 Distribution and characteristics of engineering geology

土层名称	土层颜色	各土层厚度/m	固结快剪 c/kPa	固结快剪 $\phi/(\circ)$
淤泥	深灰色	0~14.20	16.2	13.1
粉质黏土	杂色	14.20~17.10	25.0	12.0
全风化花岗岩	灰黄色	17.10~18.05	25.0	16.0

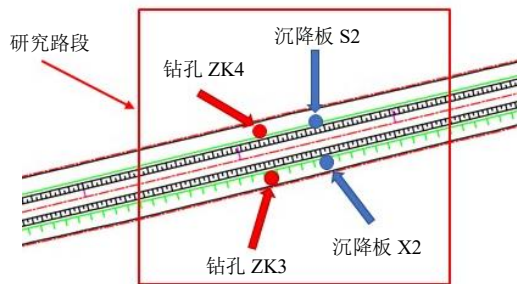


图 1 现场点位分布图

Fig. 1 Site location distribution map

2 探测方法基本原理与应用

2.1 地质雷达的基本原理

地质雷达探测系统主要是由发射天线、接收天线及雷达主机组成,其探测的基本原理^[13]是发射天线通过向地下发射脉冲形式的高频电磁波,凭借电磁波在不同介质中传播时,其强度会因介质的不同而发生变化的特性,经过地下地层反射后返回地面,被接收天线所接收,再将信号传递给雷达主机,根据信号波形、强度、时间等参数进行进一步处理,从而得到被测目标的探测信息,地质雷达的基本工作原理如图 2 所示^[14]。

与其他探测技术相比,地质雷达能够适应复杂的工程环境,具有探测效率高、操作简便、图像分辨率高、对目标无损和较强的抗干扰能力等优点^[15]。在现场实际的应用过程中,地质雷达沿着预定的测线匀速移动,其发射天线和接收天线的距离是相对固定的,所采集到的反射信号将会组成直观的雷达图像,以连续扫描图形和波形记录显示,遇异常可直观反映出异常体的深度、形态和范围,其横坐标代表天线在测线方向移动的水平距离,纵坐标代表所能探明的深度。又因为在施工现场充斥着大量的信号噪声和干扰波长,对天线采集雷达信号造成了一定的影响,针对地质雷达探测中无法避免的干扰信

号,可以通过采取一定的数字处理技术进行抑制,比如对于绕射波可采取信号压制技术进行处理等,有针对性地提高信噪比,使得雷达图像质量得以提高,方便雷达波形图的识别^[16]。因此,接收到的信号必须经过处理,才能获得正确的信号波形,以便于准确探明被测目标的介质分布情况。

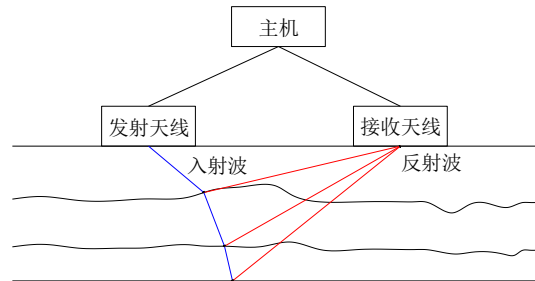


图 2 地质雷达信号发射与数据采集原理图^[14]

Fig. 2 Schematic diagram of ground penetrating radar signal transmission and data acquisition

2.2 地质雷达的应用

地质雷达探测中,系统噪声、地面耦合、地下介质局部不均匀、外部电磁波干扰等都会在不同程度上对雷达探测结果产生影响,所以在布置地质雷达测线时,需要尽量避开可能引起干扰的因素^[17]。地质雷达选用美国 GSSI 系列 SIR-3000 型主机,发射功率为 12 kHz,考虑到目标探测深度,在保证分辨率的前提下,搭配 40 MHz 低频组合天线进行现场检测^[18],测量过程中始终控制发射和接收天线之间的间距在 2 m 以内,以 20~30 cm 的距离进行移动,现场检测如图 3 所示。为了减少地面干扰信号对最后雷达图像生成的影响,天线在测量过程中始终保持与地面贴合,为了准确地识别地下介质分布情况,本次采用连续点测方式,且多次叠加最终得到探地雷达剖面图像。但由于雷达反射电磁波信号衰减快,对现场所采集到的雷达数据无法直接进行解释和分析,必须使用专业处理软件 RADAN7 进行后期数据的读取和处理,具体的数据处理步骤包括:去除雪花、背景降噪、雷达信号增益处理、带通滤波和属性设置,经过这一系列处理后的数据图像,结合现场钻探资料和地层结构,可推断被测地段地下不同岩土体的位置和分布特征。

地质雷达的运用是基于被测目标与周围介质之间存在显著的电性差异,而介质的导电性越高,电磁波在传播过程中的能量损失越大,就本次雷达检测而言,抛石层、海水和淤泥层之间的介电常数以及电磁波在各介质中的传播速度都存在一定的差异,电磁波在这些介质中传播时,其强度、频率和波形也会随着所穿过介质的物理性质而发生变

化,根据接收到的电磁波双程走时、波幅、频率和同相轴等波形变化资料,可以推断介质的内部结构以及目标的深度、形状等,具有利用该办法检测的物理前提^[19]。

本次所依托的工程抛填石材料主要来源于附近山体所开采到的块石,虽然与周围介质的介电常数差异较大,符合地质雷达探测的基本物理前提,但由于块石之间存在着空隙,不同深度和不同位置的土层难免存在着不同的孔隙度、含水量和含淤泥量,所以必须针对不同位置和深度的雷达波形图进行详细分析。



图3 地质雷达现场测试图

Fig. 3 Geological radar field test

2.3 钻孔取芯基本原理及应用

假如只单独使用地质雷达探测,由于不同介质之间介电常数的差异,其对电磁波的反射和吸收情况也不相同,而本次依托项目位于潮间带区域,地基深层的海水吸收电磁波信号,导致雷达图像与实际情况存在差异,无法准确判断淤泥层厚度,而钻孔取芯法作为一种直观获取被测土层厚度的方法,能够为分析雷达图像时提供实质性参考,所以在分析地质雷达探测图时需要进一步结合钻探资料才能达到正确分析爆破挤淤法地基处理效果的要求,故于2022年6月19日和2022年7月7日分别在桩号K17+810道路两侧,共计两个点位进行钻孔取芯,为了保证在取芯过程中的抗扰动性,采用钻头直径为16 cm,将钻孔取芯的结果整理后见表2。由表2可知,尽管ZK3和ZK4位于该项目路基的同一横断面,但两者结果存在一些偏差,说明路基不同位置的地质情况也不尽相同,且与表1施工前钻孔初勘结果进行对比,经过爆破挤淤法施工后,上方堆填了25 m以上的填石,该路段的原有淤泥层厚度也大幅减小,处理后该段路基剩余0.8~1.5 m的泥石混合层,符合填石底面和下卧粉质黏土层之间的混合层厚度应小于2.0 m的要求,说明了采用爆破挤淤法施工的有效性。

表2 各钻孔点的取芯情况

Table 2 Coring situation of each drilling point

钻孔 编号	填石 层/m	含砾 中砂/m	淤泥含 碎石/m	粉质 黏土/m
ZK3	0~25.5	—	25.5~26.3	26.3~31.8
ZK4	0~26.0	26.0~27.5	—	27.5~33.3

3 探测结果与分析

对依托的工程项目进行长期的地质雷达探测,选取其中的重合路段的雷达探测图进行对比,图1红色区域内为选取对比路段,地质雷达探测波形图如图4~5所示,图5蓝色框内为雷达探测重合段,并且将雷达探测图与钻孔取芯的结果进行对比,依据钻孔的资料,可大概推断出被测路段的地下介质分布情况。由图4雷达波形图可知,雷达波形图上方反射电磁波波幅变化剧烈,同相轴波动较大,呈明显锯齿状排列,电磁波在抛石体的反射特征非常清晰,且不同位置的抛石层深度不同,说明抛填石落底不充分,后期容易出现地基沉降等问题。由图5雷达波形图可知,落底深度发生明显变化,经过半年多地基固结沉降,上方的抛填石全部或大部分落在残余淤泥层上,且经过长期沉降后上层同相轴基本呈水平状态,杂波减少,且连续性较好,从雷达探测图中可以看出淤泥与抛石层的分界,淤泥被有效排出,且残余混合层厚度小于2.0 m,符合施工要求,说明本次爆破挤淤法达到了预期的排淤效果,施工处理效果好,但地基深层爆破挤淤效果难以控制,排淤量不足,仍存在一定厚度的混合层。

由于本次配合40 MHz低频组合天线所能探测的深度为30 m,但低频天线的垂直分辨率较低,并且淤泥层电阻率低,海水对电磁波也有较强的吸收作用,这些外界因素都影响着雷达波形图的生成,导致图5地下8~26 m反射波信号能量小,雷达波振幅和同相轴近乎水平,据此判断抛填石之间可能存在着少量淤泥影响了电磁波的反射,说明仅凭雷达探测难以判明淤泥层和混合层厚度。因为两次雷达探测都靠近ZK4路基一侧,故与ZK4钻孔取芯结果进行对比,虽然图4~5中出现雷达探测结果与相应钻孔取芯存在误差的问题,但其中图5因为与钻孔时间接近,两者结果的重合度更高,在结合钻孔取芯数据的基础上,地质雷达可满足探测精度。

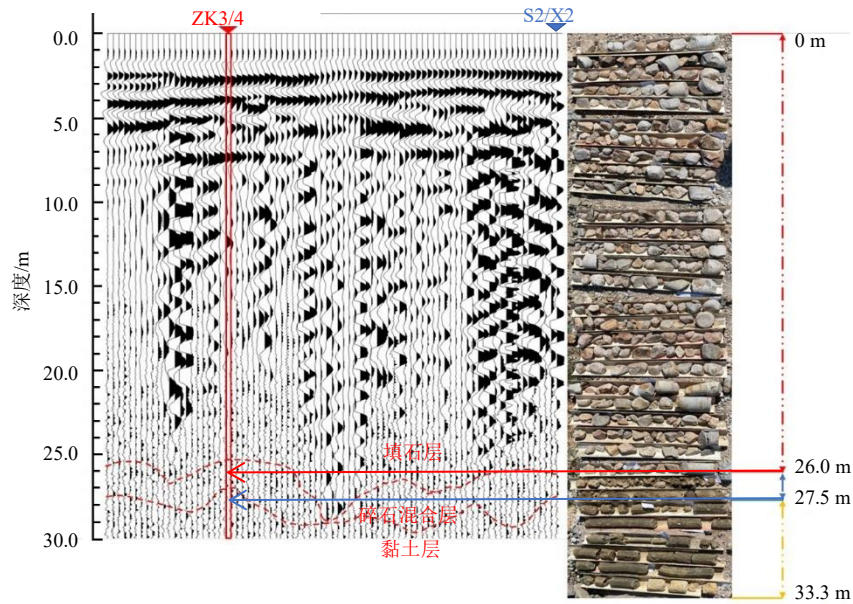


图4 2021年11月22日K17+804~K17+835地质雷达波形图与2022年7月7日钻孔ZK4对比
Fig. 4 Comparison of K17+804-K17+835 GPR waveform map on November 22, 2021 and drilling ZK4 on July 7, 2022

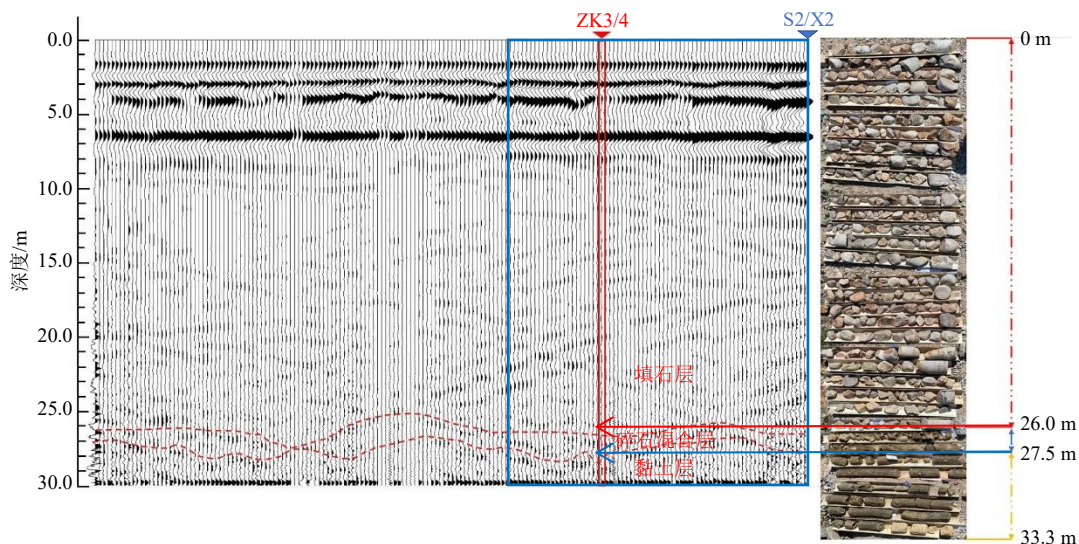


图5 2022年6月26日K17+750~K17+838地质雷达波形图与2022年7月7日钻孔ZK4对比
Fig. 5 Comparison of K17+750-K17+838 GPR waveform map on June 26, 2022 and drilling ZK4 on July 7, 2022

将地质雷达探测法和钻孔取芯法相结合,虽然能够完成对抛石层落底深度的探测,但无法反映路基沉降量的长期性问题,沉降板作为一种现场常用的沉降观测设备,配合水准仪能够开展长期的沉降检测,沉降板分为底板与测杆两个部分,其底板一般是由混凝土底板或钢板组成,又因为钢管测杆强度高、重量轻、不容易压缩变形的特性而采用钢管测杆,保证整体构件具有足够刚度,测杆顶部的相对高程变化与沉降板保持一致,提前选定好沉降板所要埋置的位置,沉降板埋置完成后立即采用水准仪搭配水准尺测量顶部高程,尽可能保证测量的准确性,将其设定为初始高程,而在之后的监测期内将每次测得的高程都与初始高程进行差值计算,所

得到的结果即为该沉降板在这段观测期间所发生的路基沉降量^[20]。

沉降板水平对称埋设在桩号K17+840两边,且要求离路基边2 m附近,共埋设4块,点位如图1所示。挖除路基上方80 cm左右,底面铺设3 cm厚的砂层,将底面四周整平再埋入沉降板,使其紧贴原地面,测杆、套筒依次旋转接入,回填原位土并夯实,并用水准仪及时测定杆头标高为沉降板初始高程,选取与雷达探测时间相近的沉降数据,绘制沉降量随时间的变化如图6所示,2021年11月22日—2022年4月18日期间因路基超载加压导致沉降量大幅度增加。由图6可知在两次雷达探测间隔内路基平均沉降量为 $142\text{ mm}-23\text{ mm}=119\text{ mm}$,而

雷达探测波形图(图4~5)也显示经过较长时间后,抛石层落底情况发生变化,在沉降板S2、X2附近位置两张雷达图显示抛石层下降,但具体下降深度依赖于钻孔取芯数据,说明路基沉降观测的数据基本能和地质雷达探测结果相互验证,且路基沉降与抛填石落底深度变化有关。

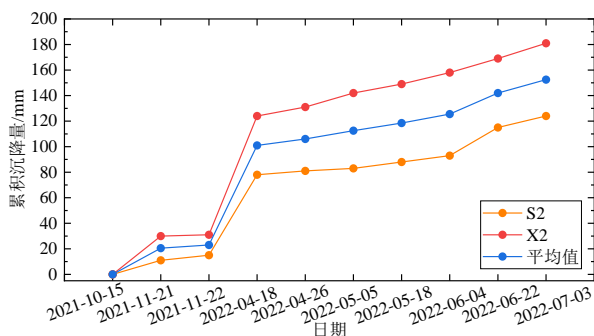


图6 各沉降板沉降量随时间的变化

Fig. 6 Variation of the settlement of each settlement plate with time

4 结 论

(1) 针对本工程深厚淤泥地基处理的爆破挤淤效果评价问题,发现40 MHz低频组合天线可探测到抛石层30 m左右的深度,达到了预期的检测深度,但具体淤泥层和抛石层厚度需要与钻探资料结合分析才能满足探测的精度要求。

(2) 经过长期的地质雷达探测研究,雷达图显示该项目地基的抛填石落底深度发生明显变化,说明爆破挤淤法施工后的一段时间内仍存在落底不完全的情况,有长期监测的必要;路基沉降也印证这一观点,随着时间的流逝,沉降量逐渐趋于稳定。

(3) 将雷达波形图与钻探资料进行结合对比,发现地质雷达能在少量钻孔数据的支持下完成对地基处理效果的探测,点面结合使其更加科学和可靠,在一定程度上突破了深厚抛石层地质雷达检测技术的局限性,但仍需要进一步进行研究,积累更多的工程实际经验,不断提高探测结果的精确性。

参考文献

[1] 杨勇,桑登峰. 潮间带水下真空预压技术优化及应用[J]. 水运工程, 2018(2): 175-180.
YANG Yong, SANG Deng-feng. Optimization of underwater vacuum preloading technology and its application in intertidal zone[J]. Port & Waterway Engineering, 2018(2): 175-180.

[2] 贾守福, 王晓华, 陶润礼, 等. 原位固化技术处理潮间带滩涂淤泥软基工艺分析[J]. 港工技术, 2019, 56(4): 104-108.
JIA Shou-fu, WANG Xiao-hua, TAO Run-li, et al. Application of in-situ consolidation technology in soft base improvement of intertidal zone[J]. Port Engineering Technology, 2019, 56(4): 104-108.

[3] 张敏, 林玉葵, 李晓杰. 深水区厚淤泥层回填石渣爆破挤淤技术[J]. 工程爆破, 2021, 27(3): 51-58.
ZHANG Min, LIN Yu-kui, LI Xiao-jie. Blasting squeezing silt technology for replacing thick-silt with fragmental rock in deep water[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(3): 51-58.

[4] 曾山. 控制加载扰动爆炸挤淤置换法在深厚软基处理施工中的应用[J]. 福建建设科技, 2018(4): 43-45.
ZENG Shan. Application of controlled load disturbance explosive squeezing replacement method in deep soft foundation treatment construction[J]. Fujian Construction Science & Technology, 2018(4): 43-45.

[5] 莫鏊, 郑世武. 基于爆破挤淤填石法的抛石堤地基处理施工技术与应用[J]. 珠江水运, 2020(24): 86-87.
MO Wu, ZHENG Shi-wu. Construction technology and application of riprap embankment foundation treatment based on blasting compaction and rock filling method[J]. Pearl River Water Transport, 2020(24): 86-87.

[6] 邓志勇, 张翠兵, 杨岸英. 厚层淤泥中的爆炸定向滑移法原理及工程实例[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1677-1681.
DENG Zhi-yong, ZHANG Cui-bing, YANG An-ying. Case study on thick silt replacement by blasting directional slippage method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1677-1681.

[7] 马文镇. 山区高速公路沟谷软基处理技术研究[J]. 低碳世界, 2017(14): 213-214.
MA Wen-zhen. Study on soft foundation treatment technology of mountain highway gully[J]. Low Carbon World, 2017(14): 213-214.

[8] 刘传孝, 蒋金泉, 杨永杰. 地质雷达应用于探测拱桥、空洞的效果验证[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 106-108.
LIU Chuan-xiao, JIANG Jin-quan, YANG Yong-jie. Effects of the ground penetrating radar in probing arch bridge and cavity[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1): 106-108.

[9] 鄢油纤, 丛沛桐, 侯剑山. 地质雷达在地面沉降探测中的应用[J]. 陕西水利, 2021(1): 22-24.

- YAN You-xian, CONG Pei-tong, HOU Jian-shan. Application of geological radar in ground subsidence detection[J]. Shaanxi Water Resources, 2021(1): 22-24.
- [10] 邓世坤. 探地雷达用于深圳湾软基处理工程中的质量检测[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 133-135.
- DENG Shi-kun. Application of ground penetrating radar to the quality supervision of soft soil improvement at Shen Zhen Wan[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 133-135.
- [11] 张成方, 肖异智, 陈华. 探地雷达在舟山某围垦堤坝建设中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2008, 36(1): 161-162.
- ZHANG Cheng-fang, XIAO Yi-zhi, CHEN Hua. Application of ground penetrating radar in the construction of a reclamation dam in Zhoushan[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2008, 36(1): 161-162.
- [12] 朱瑞虎, 郑金海, 杨永清. 地质雷达在海堤围堰爆破挤淤施工效果检测中的应用[J]. 水运工程, 2015(11): 30-32, 51.
- ZHU Rui-hu, ZHENG Jin-hai, YANG Yong-qing. Application of ground penetrating radar in construction effect detection of blasting toe-shooting[J]. Port & Waterway Engineering, 2015(11): 30-32, 51.
- [13] 王强, 于雷. 地质雷达在软土地区基坑监测中的应用[J]. 建筑技术开发, 2019, 46(2): 153-154.
- WANG Qiang, YU Lei. Application of ground penetrating radar on monitoring of foundation pit in soft clay region[J]. Building Technology Development, 2019, 46(2): 153-154.
- [14] 刘波, 吕玉增. 地质雷达在国内的应用现状及发展[J]. 煤炭技术, 2020, 39(6): 60-63.
- LIU Bo, LV Yu-zeng. Application status and development of ground penetrating radar in China[J]. Coal Technology, 2020, 39(6): 60-63.
- [15] 刘强, 张盛行, 王承强, 等. 探地雷达探测围堰抛石层厚的正演模拟与工程应用[J]. 水运工程, 2022(4): 8-13, 36.
- LIU Qiang, ZHANG Sheng-xing, WANG Cheng-qiang, et al. Forward modeling and engineering application of ground penetrating radar in detecting riprap layer thickness of cofferdam[J]. Port & Waterway Engineering, 2022(4): 8-13, 36.
- [16] 李靖翔, 赵明, 赖皓, 等. 基于探地雷达法的变电站地下管线探测与识别技术研究[J]. 电工技术, 2020(20): 34-36.
- LI Jing-xiang, ZHAO Ming, LAI Hao, et al. Research on detection and identification technology of underground pipelines in substations based on ground penetrating radar method[J]. Electric Engineering, 2020(20): 34-36.
- [17] 王晨光. 基于地质雷达探测地铁富水地层处理研究[J]. 路基工程, 2022(6): 232-237.
- WANG Chen-guang. Study on treatment of watery strata at subway based on geological prediction with geological radar[J]. Subgrade Engineering, 2022(6): 232-237.
- [18] 李剑, 李冬冬, 马鑫, 等. 地质雷达技术在公路建设中的应用[J]. 工程与建设, 2020, 34(4): 728-729.
- LI Jian, LI Dong-dong, MA Xin, et al. Application of GPR technology in highway construction[J]. Engineering and Construction, 2020, 34(4): 728-729.
- [19] 陈功翔. 地质雷达探测水下抛石的试验研究[J]. 黑龙江水利科技, 2020, 48(10): 32-33, 78.
- CHEN Gong-xiang. Experimental study on detection of underwater riprap by geological radar[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2020, 48(10): 32-33, 78.
- [20] 王鹏旋. 公路路基地质雷达探测及病害模拟分析[J]. 交通世界, 2022(35): 76-78.
- WANG Peng-xuan. Ground penetrating radar detection and disease simulation analysis of highway subgrade[J]. TranspoWorld, 2022(35): 76-78.