

# 多道瞬态瑞雷波和探地雷达技术 综合评价柔性复合地基加固质量

陈昌彦<sup>1</sup>, 白朝旭<sup>1</sup>, 黄昌乾<sup>2</sup>, 谢昭晖<sup>1</sup>, 陈义军<sup>1</sup>

(1. 北京市勘察设计研究院, 北京 100038; 2. 中航勘察设计研究院, 北京 100037)

**摘要:**以夯扩挤密桩柔性复合地基为例,应用多道瞬态瑞雷波和探地雷达技术的优势互补,辅以少量载荷试验方法综合评价柔性复合地基加固效果及均匀性的可行性,并与传统的检测方法进行综合对比。研究表明,以2种技术并辅以少量载荷试验方法可以快速有效地半定量-定量评价柔性复合地基加固效果及其均匀性,反映地基加固效果变化的连续性和加固范围,在许多方面比传统的检测方法更加快速、经济、有效、客观。

**关键词:**多道瞬态瑞雷波;探地雷达;综合检测和评价;柔性复合地基质量

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

文章编号:1000-8918(2006)04-0361-05

复合地基质量检测内容总体上可以分为加固前后地基承载力的改善状况和加固地基的均匀性。然而实际工程检测中大都着重地基承载力的检测,很难定量评价地基的均匀性,事实上地基均匀性对建筑物地基变形具有重要影响。

目前常规的检测方法,如载荷试验、动力触探等方法<sup>[1-2]</sup>只能提供少数的离散点信息,难以经济有效地评价地基的均匀性。而且载荷试验方法具有明显的尺寸效应和有限的检测深度;小应变方法只能有效检测刚性桩体完整性,而无法检测和评价柔性桩、散体桩的桩身质量。这些常规的检测方法都不能非常有效地评价柔性复合地基加固效果及其均匀性,评价地基强度特性在水平方向和垂向上的改善情况,以及地基有效加固范围和影响深度等。目前落后的检测技术已越来越明显地成为柔性桩复合地基技术发展和推广应用的瓶颈。

因此地基检测专业急需一种对柔性桩复合地基加固有效检测评价的技术。近年来逐渐发展起来的多道瞬态瑞雷波和探地雷达等无损测试技术为复合地基质量的综合检测和评价开辟了新的途径。笔者探讨了综合应用这2项技术并辅以少量的静载荷试验方法综合评价柔性复合地基加固效果以及均匀性的可行性及其检测方法。

## 1 技术方法和原则

多道瞬态瑞雷波技术主要依据瑞雷波在不均匀

层状介质中传播时的频散特性、相速度与地层力学特性的变化,尤其是地层刚度特性变化。同一波长瑞雷波的传播特性反映了传播介质水平方向力学性质的变化;不同波长瑞雷波的传播特性反映了不同深度范围内岩土体力学特性的总体变化,利用瑞雷波的相速度 $v_R$ 及计算的剪切波速度 $v_s$ 可以定量评价岩土体的力学特性,尤其地基加固体的力学特性的改善、地基加固的影响范围等,同时辅以静载荷试验等方法评价加固地基的承载力及其改善情况。有关瑞雷波勘探技术的基本原理详见文献<sup>[3-5]</sup>。

瑞雷波的测试结果主要以点线结合的形式反映检波器排列长度范围内地层力学特性的综合变化,因此在现场测试时要求测线范围内地下土体组成和结构应尽可能是均匀的,同时瑞雷波方法并不能快速有效地反映地下介质结构的水平变化情况。

探地雷达技术则是利用传播介质的电性特征变化来探测地下结构的均匀性、物质组成及物理性质的变化,尤其地基土中含水量、介质结构等变化以及空洞、埋藏物的分布变化等异常现象。该方法可以准确、高效地评价地下介质组成和结构信息的2维连续变化情况<sup>[5-6]</sup>。

探地雷达技术能够弥补瑞雷波法的不足,它可有效地评价介质结构的均匀性,但不能有效表征介质的力学特性变化。运用探地雷达方法进行地基检测主要是通过对加固区范围内、外或加固前后地基土体的雷达剖面图像的对比分析,根据雷达波特征

① 陈昌彦. 瑞雷波及高频电磁波技术在北京地区基础工程及工程勘察中的应用研究. 北京市勘察设计研究院, 2002.

收稿日期: 2005-10-09

基金项目: 北京市科学技术委员会重点资助项目(953301500)

的变化评价地基处理的影响深度及其变化情况。

由于地基加固机理的差别,经过加固处理的地基土体有时力学特性变化比较显著,在有些情况下,其物理性质和结构特性的变化比较明显。对于地基处理区总体可分为地基加固体与未加固体,二者具有较明显的物理力学特性差异,这些都是利用瑞雷波和探地雷达技术进行综合检测和评价的前提,可以利用二者的特有优势进行取长补短,有效地评价地基加固的力学特性和结构均匀性的变化状况。有关测线的布设方法和现场数据采集参数的设置应根据地基加固方法和类型、地基土特征及检测目的等进行综合设计,测线剖面可以设计为网状形式,也可以设计为线状测试系统,具体情况根据场地的地基条件和场地规模而定。

为了提高数据采集质量和分析精度,在现场测试过程中首先对场地进行探地雷达测试并根据实时采集的数据图像初步判断场地地基的均匀性,然后据此布设瑞雷波测线,尽可能地将瑞雷波测线布设在相对均匀的剖面上。

探地雷达测线可布设在桩间土内以及桩体排列上,以便评价桩间土加固效果的均匀性,检测桩体几何特征,而瑞雷波测线则尽量布设在桩间土之间,检测复合地基力学特性变化以及加固影响范围。

## 2 夯扩挤密桩复合地基技术及工程场地的地质条件

夯扩挤密桩复合地基的加固主要通过桩间土的挤密作用和桩土相互作用等机制提高地基土的承载力和结构特性,从而满足建筑物对地基承载力和变

形的要求。

拟建场地地基持力层为新近沉积的黏质粉土、砂质粉土②层,承载力标准值为90 kPa,设计要求建筑物地基承载力应达200 kPa,采用钻孔夯扩挤密桩法进行地基加固处理。有关复合地基的设计情况为:桩径500 mm,施工桩长4.4 m(桩端地层主要为细中砂③层),桩间距约1.35 m×1.35 m,正方形布置,桩身强度等级相当于7.5 MPa。

拟建场地的地基土根据成因年代及岩土组成性质自上向下依次为:

(1)素填土①层:厚度一般为1.20~1.90 m,主要为黏质粉土、粉质黏土素填土。

(2)新近沉积层:厚度一般约为1.30~2.10 m,主要为黏质粉土②层(可塑,中压缩性)和黏质粉土、粉质黏土②1层(可塑—软塑,中高—高压缩性),呈互层状。

(3)第四纪沉积层。埋深3.20~3.50 m为砂质粉土③1层,其下(埋深3.70~4.30 m)为细、中砂③层(中密、饱和);深5.70~9.00 m为黏土④层,粉质黏土、黏质粉土④2层(主要分布在场地的南部,可塑,中压缩性)。

勘察期间的 $N_{10}$ 或 $N_{63.5}$ 值变化情况表明,在埋深4.30~4.50 m的细、中砂③层以上, $N_{10}$ 或 $N_{63.5}$ 值总体上随深度逐渐增加的趋势。

为评价复合地基加固质量,本次采用多道瞬态瑞雷波技术与探地雷达技术进行综合测试并辅以一定的静载荷试验和钎探方法。其中瑞雷波和探地雷达测线分别布设在加固地基范围内、外,加固范围以外的结果被视为地基未处理前的地层特征(图1)。

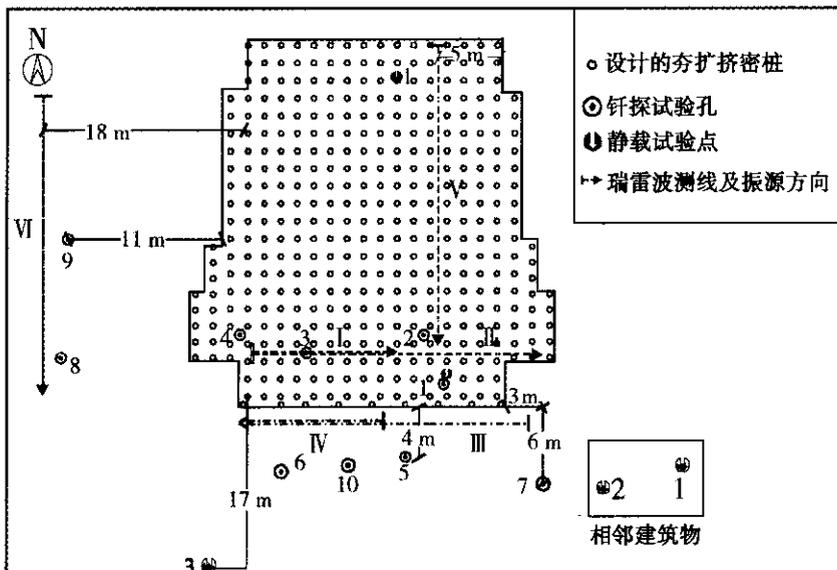


图1 各类测试方法点位平面布置

表 1 夯扩挤密桩复合地基和天然地基的静载荷试验结果

地基类型	位置	试验点号	压板面积/m <sup>2</sup>	最大试验加荷值/kPa	最大沉降量/mm	承载力基本值/kPa	备注
复合地基	拟建场地	1	1.5	380	5.97	≥200	地基土都未发生破坏
		2		380	8.37	≥200	
	相邻场地	1		380	7.51	≥200	
		2		380	15.74	≥200	
未加固地基	附近场地		1.5	180	26.35	80	据 $p-Lg(s)$ , $Lg(p)-Lg(s)$ , $p-\Delta s/\Delta p$ 等方法确定
	相邻场地			180	28.46	72	
				180	26.55	72	
加固地基的平均值/变异系数				7.283/0.136			
未加固地基平均值/变异系数				27.12/0.035		75 /0.051	

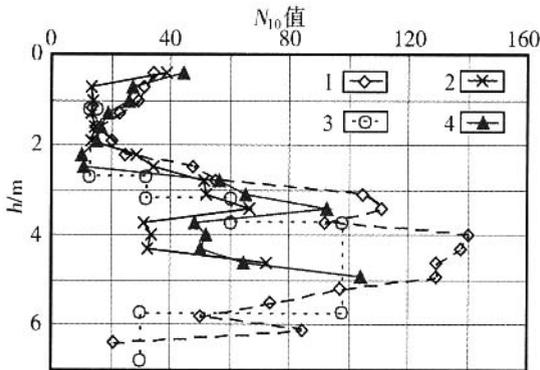
### 3 检测结果及分析

#### 3.1 静载荷试验结果分析

在地基加固区及其外围共进行了 7 个静载荷试验点(图 1),有关地基加固前后的静载荷试验结果总结如表 1。试验结果表明,经过处理后地基承载力从原来的 70~80 kPa 提高到 200 kPa 以上,加固效果是明显的。

#### 3.2 $N_{10}$ 、 $N_{63.5}$ 检测结果及其有效性

为了研究桩间土的夯扩挤密效果和影响深度,在加固区内、外布设了轻型动力触探( $N_{10}$ )原位测试点(见图 1)。图 2 为加固前后  $N_{10}$  值的综合统计结果。结果表明,复合地基各层的  $N_{10}$  值较天然地基均有所提高,尤其在 2.5 m 以下提高的程度比较明显。 $N_{10}$  值的变化表明地基加固影响深度大于其设计桩长 4.4 m,但未超过 5.5 m,夯扩挤密效应对桩底部的粉、细砂具有一定的挤密作用。但由于 5 m 以下地层主要为饱和的砂类土,含水量较高,较大影响了轻型动力触探( $N_{10}$ )方法的应用和检测效果。



1—已加固地基的曲线 2—东西向未加固地基的曲线 3—南北向未加固地基的曲线 4—勘察期间的曲线

图 2 地基加固前后  $N_{10}$  平均值与深度变化统计曲线

#### 3.3 探地雷达技术检测复合地基均匀性

夯扩挤密桩复合地基由于桩体和地基土之间材料具有明显的差别,必然会使加固前后的地基土的

电性特征产生较大的差别,这是成功运用探地雷达方法进行检测的基本依据。同时此类地基的桩体虽为柔性材料,但是明显破坏了原始地层的连续性,因此探地雷达可以有效地反映桩身几何尺寸,而目前常规的检测方法都不能对这类柔性桩体和散体桩进行桩身质量检测。

本次在加固地基范围内、外分别布置了数条探地雷达测线,对比测试地基处理前后的工程物理特性的改变以及加固深度、均匀性和桩身的轮廓等。图 3 和图 4 是其典型测试结果,测线的间距 3.0~4.0 m,可视为地层条件基本一致。

图 3 反映了位于瑞雷波测线 IV 附近未经处理的场地地层探地雷达剖面的情况,采用 100 MHz 频率天线的有效测试深度可达到 10 m。天然地层界面清楚,而且不同层位雷达影像具有明显的差别,参考钻探资料可以很好地识别出桩端持力层及其上下地层的分布情况。在水平方向上地层整体分布比较均匀,适宜布设瑞雷波测线。

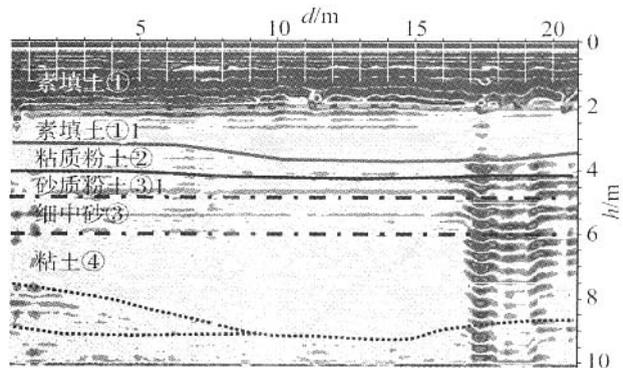


图 3 场地处理前的瑞雷波 IV 面的探地雷达影像

图 4 是在经过加固处理后的瑞雷波测线 II 附近的测试结果,测线跨越桩与桩间土。

图 3 和图 4 表明,雷达影像可清楚地反映出桩身的轮廓和桩长变化,以及地层因桩体的“切割”而表现为间断的影像特征,同时反映桩底深度一般为 4.5 m 左右,与设计桩长基本相符。探地雷达影像结果表明经加固处理的地基整体是比较均匀的。

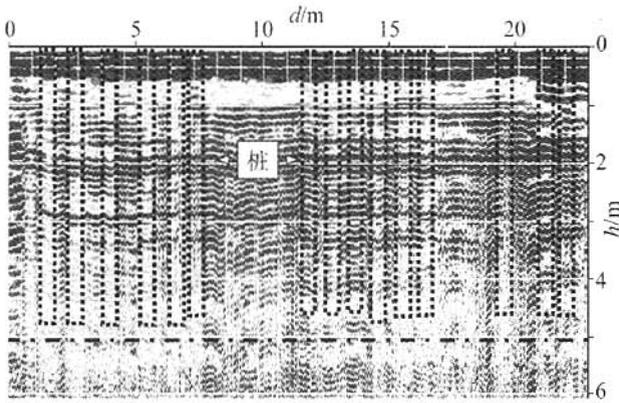
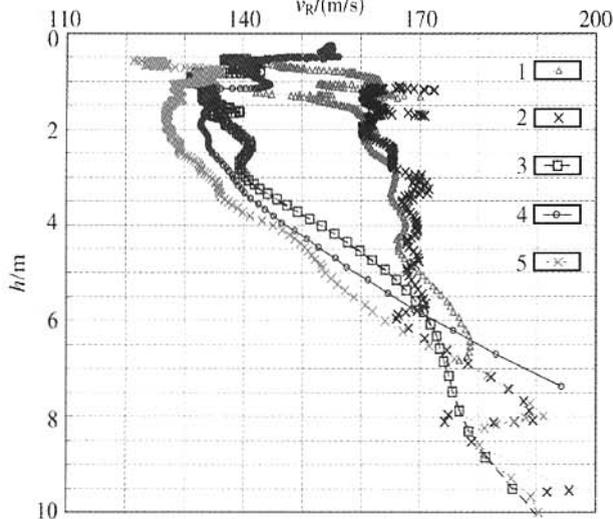
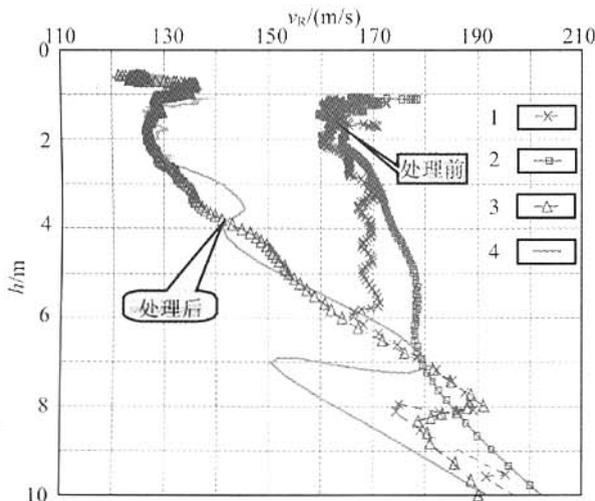


图4 处理后复合地基瑞雷波II剖面的探地雷达影像



1—I剖面频散曲线,道间距0.5m 2—II剖面频散曲线,道间距1m 3—III剖面频散曲线,道间距1m 4—IV剖面频散曲线,道间距0.5m 5—VI剖面频散曲线,道间距1m

图5 东西向测试剖面的瑞雷波频散曲线



1—II剖面频散曲线,道间距1m 2—V剖面频散曲线,道间距1m 3—VI剖面频散曲线,道间距1m 4—VI剖面北段频散曲线,道间距1m

图6 南北向测试剖面瑞雷波频散曲线  
万方数据

### 3.4 瞬态瑞雷波法检测复合地基的力学特性

测试采用24道多道瞬态瑞雷波进行,道间距分别采用1.0 m和0.5 m,图5、图6是在地基处理前、后地层瑞雷波的频散曲线。

瑞雷波频散曲线变化特征表明,在6.0~6.5 m层段加固处理场地的瑞雷波相速度显著提高约33%,而在6.0以下地层加固前、后的频散曲线基本重合。这些反映了在6.0~6.5 m深度范围内经加固处理的地基力学特性有明显的改善,加固处理的影响深度约为6.0~6.5 m,其中显著影响深度约为5.5~6.0 m,其下地层的力学特性没有发生明显改善。

频散曲线的变化特性还表明,在加固影响深度内,地基瑞雷波相速度整体提高约25%~35%。加固段地层,垂向上总体较为均匀,但是在平面上,地基加固具有一定不均匀性,这与土体组成变化密切相关。I、II测试剖面的东区较西区的地基力学特性好,尤其在浅部1.0~1.5 m深度。在地基加固范围内的I、II测试剖面与V测试剖面的瑞雷波频散曲线的变化趋势基本一致,而III、IV测试剖面与VI测试剖面的频散曲线相比,1.5 m以上层段的瑞雷波相速度  $v_{RVI} > v_{RIII,IV}$ ,1.5~4.0 m地层的  $v_{RVI} < v_{RIII,IV}$ ,其下地层的瑞雷波波速变化相似。这种现象与上述地层的  $N_{10}$ 、 $N_{63.5}-h$  的变化现象具有很好的—致。

上述瑞雷波频散曲线的变化趋势与利用钎探方法检测的结果具有较好的对应性。瑞雷波测试结果由于反映的是桩、土的综合情况,除了被挤密的桩间土以外,桩身材料同样作为弹性波传播介质的组成部分,尤其在置换率较高的情况下,其对波速的影响也会起到一定的作用,因此瑞雷波方法比钎探方法更能可靠地反映地基力学特性的连续性变化及局部不均匀性的变化,另外由于受地层含水量及岩性影响,本场地的钎探检测有效深度只有4~4.5 m,当被处理的土层为杂填土或饱和时,钎探检测结果的可靠性将更低,而瑞雷波方法则受此影响轻微,表现了较好的检测效果。

### 4 结论

(1)综合多道瞬态瑞雷波及探地雷达等无损探测技术的优势及互补性特点,再辅以少量的静载荷试验可以有效地检测和评价柔性复合地基力学特性的改善和均匀性,以及评价地基加固影响范围等地基检测的整体内容。这种综合技术能够全面、精确、高效地检测复合地基中可能存在的隐患,确保工程

质量,在许多方面比传统的检测方法有着诸多明显的优越性。

(2)瑞雷波相速度变化是瑞雷波方法的直接结果,但其值及其变化量与承载力及其变化之间目前还没有确切的定量关系,这是阻碍瑞雷波方法进行地基检测的问题之一,深入研究瑞雷波技术定量评价地基承载力的关系是未来工程应用的关键。

(3)探地雷达技术可以有效地评价处理前、后地基在垂直及水平方向上的均匀性及其变化,检测桩的长度等,其结果明显优于其他方法,尤其对于柔性桩复合地基,其他方法无法有效检测桩的施工长度。但是合理选择探地雷达天线的发射频率及其组合以及测试参数等对能否成功地检测桩体的几何特征是非常重要的,必须结合场地地基条件以及复合地基的处理目的设计检测方案。

(4)就工程常规检测,常常以完成3个静载荷试验点并辅以其他方法为原则,现场工作至少需要7~8d,然后至少需要2d的数据处理时间,最终只能得到有限的检测点数据,而笔者提出的方法技术采用网状形式布置检测工作,现场测试工作最多需

要2d时间,然后需要3d时间进行数据处理和分析,就可得出场地的地基承载力和均匀性的检测结论,而且检测数据信息量丰富可靠,更重要的是虽然增加了现场工作量但大大缩短场地检测工作周期,为工程建设合理安排相关工序提供了有力支持,因此瞬态瑞雷波及探地雷达技术是一种值得推广的简便有效的地基检测技术。

#### 参考文献:

- [1] J220-2002. 建筑地基处理技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [2] J256-2003. 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [3] Matthews M C, Hope V S, Clayton C R. The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles[A]. Proc Inst Civ Eng[C]. Geotechnical Eng, 1996, 119: 84.
- [4] Zhang Shuang X, Chan Lung S, Chen Chang Y, et al. Apparent phase velocities and fundamental mode phase velocities of Rayleigh waves[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003(6).
- [5] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京:地质出版社,1994.
- [6] 王水强,万明浩,谢雄耀,等. 不同地质雷达测量参数对数据采集效果的影响[J]. 物探与化探,1999,23(3): 211.

## THE APPLICATION OF MULTI-CHANNEL TRANSIENT RAYLEIGH WAVE AND GROUND-PROBING RADAR TECHNIQUE TO THE INTEGRATED APPRAISAL OF THE QUALITY OF FLEXIBLE COMPOUND FOUNDATION REINFORCEMENT

CHEN Chang-yan<sup>1</sup>, BAI Chao-xu<sup>1</sup>, HUANG Chang-qian<sup>2</sup>, XIE Zhao-hui<sup>1</sup>, CHEN Yi-jun<sup>1</sup>

(1. Beijing Geotechnical Institute Beijing 100038 China; 2. Investigation and Designing Institute, China Aviation Corporation, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Exemplified by the densification flexible compound foundation, this paper deals with the feasibility of the application of multi-channel transient Rayleigh wave and ground-probing radar technique assisted by a few loading tests to the integrated appraisal of the effect and uniformity of flexible compound foundation reinforcement, with a comparison with the traditional test methods such as loading test. The results show that this method can rapidly and effectively make semi-quantitative and quantitative appraisal of the effect and uniformity of flexible compound foundation reinforcement and reflect the continuation and range of the variation of foundation reinforcement effect, thus more rapid, effective, economical and objective than the traditional test methods in many aspects.

**Key words:** multi-channel transient Rayleigh wave technique; ground-probing radar technique; flexible compound foundation; effect of reinforcement; quality test

作者简介:陈昌彦(1968-),男,1997年毕业于中国科学院地质研究所,获工程地质学博士学位,现工作于北京市勘察设计研究院,教授级高工,院副总工程师。主要开展岩土体工程地质、岩土工程、地基检测、计算机在岩土体工程中应用、地质灾害勘察治理等方面研究和技术管理工作,公开发表学术论文数篇。