

多道瞬态面波法在强夯处理地基检测中的应用

何立军¹ 水伟厚¹ 陈国民¹ 夏学礼²

(1 上海申元岩土工程有限公司, 上海 200011; 2 安徽第一水文队)

摘要: 多道瞬态面波法对强夯地基进行大面积普查, 既能降低成本、扩大检测面, 又能提高检测速度和精度。本文总结了多道瞬态面波法在地基处理检测的定性和定量评价中取得的成果, 介绍了该方法在广西、辽宁两个国家重点工程项目中的应用, 并通过强夯前后瑞雷波检测结果与静载试验等的对比分析, 得到了应用多道瞬态面波法在沿海地区开山填海碎石土地基的相关结论等, 所得结论可指导多道瞬态面波法在复合地基中的检测工作。

关键词: 多道瞬态面波法; 强夯; 地基处理; 检测

一、概述

强夯法是一种经济高效的地基处理方法。强夯法加固地基的原理见图 1, 即反复将 80~400kN 的锤(最重的达 2000kN)起吊到 8~25m 高处(最高的达 40m), 而后自由落下, 其动能能在土体中转化成很大的冲击波和高应力, 从而提高地基强度, 降低压缩性, 消除湿陷性, 改善其抵抗振(震)动液化的能力等。同时, 强夯法可提高土层的均匀性, 减少工后差异沉降^[1]。在沿海地区的填海工程和低丘整平地基处理中, 大量采用高落距重锤动力夯实地基的强夯法。

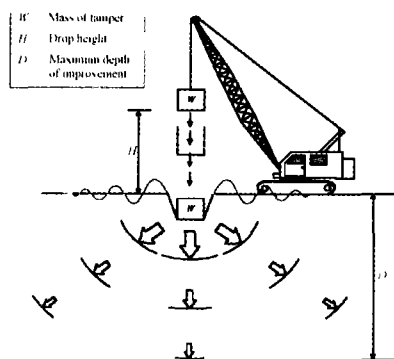


图 1 强夯加固原理

强夯加固前后地基的检测是目前研究的一个热点问题, 常用的检测方法是在地表做一些平板载荷试验来确定地基的承载力, 用钻探、标贯或动力触探试验来确定其深层的加固程度和加固深度。文[2]归纳了常用的四类 13 种强夯地基检测方法, 各种方法均有其优缺点和适用性, 静载试验和动探方法在抽查数量较少时易漏掉薄弱部位, 抽查数量较大时费时费钱, 特别是针对大厚度开山碎石回填地基, 多道瞬态面波法有其突出的优点。

近年国内外围海造田和开山造陆工程的大量开展, 更凸现了多道瞬态面波法效率高、速度快、精度高等的优点。

作者简介: 何立军 (1972-), 男, 1997 年毕业于中国地质大学, 现主要从事岩土工程检测、工程物探等工作。

基金项目: 国家建设部科研攻关基金资助项目: 高能级强夯地基加固机理工法研究与专用机械研制 (04-2-016);

上海现代建筑设计集团基金资助项目: 高能级强夯与预处理动力固结法研究 (2004-结-地-03)。

二、多道瞬态地震面波检测原理和方法

试验表明,瑞雷波某一波长的波速,主要与深度小于该波长一半的地层物性有关,这就是用一定波长的瑞雷波速度来表征一定深度地层物性的实验基础。

瑞雷波勘测通常是用距震源一定距离(称之为偏移距)以4~24道等间距、呈线状排列的多道检波器来接收面波的垂直分量,记录点就设在整个检测排列的中点处。瑞雷波测试分析示意图图2。

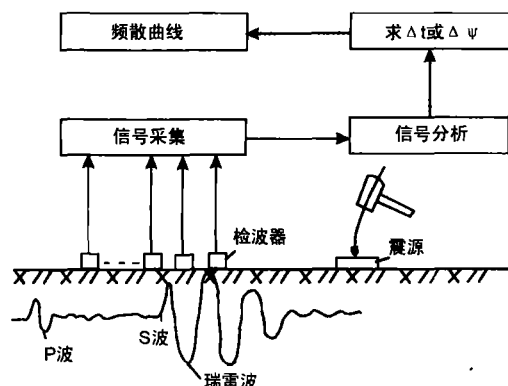


图2 面波检测工作示意图

瞬态瑞雷波测试所获得的结果是整个检测排列下方地质体信息的综合反映,因此为了保证震源所激发出的波动频率成分能够满足特定勘察深度范围的需要(即满足最佳面波接收窗口和最佳探测深度)就必须选择适当的排列方式,主要包括道间距和偏移距两个方面。

根据“瑞雷波半波长理论”,当检波器数量一定时小道间距(即小排列)主要反映浅部地层的的信息,大道间距(即大排列)主要反映深部地质体的信息,且排列长度与测试深度相当。故此在浅层地震勘探时除满足勘探深度的同时应尽量采用较小的道间距。

三、多道瞬态面波对强夯地基的评价

3.1 定量评价

目前将面波波速大量应用于强夯地基的定量评价中。定量评价是利用面波波速计算承载力,采用面波波速与同一点位平板载荷试验所得到结果,通过回归计算出 $f_{ak} \sim V_R$ 、 $E \sim V_R$ 关系式,利用这些关系式,通过实测的面波波速可计算分析强夯前后的力学参数。

目前常用的 $f_{ak} \sim V_R$ 、 $E \sim V_R$ 关系式形式如下:

$$f_{ak} = A \times V_R^B, E_0 = C \times V_R^D$$

其中: f_{ak} : 地基承载力特征值 (kPa);

V_R : 面波波速 (m/s);

E_0 : 变形模量 (MPa);

A, B, C, D 为常参数,随土质情况不同。

上述公式中,不同地区常参数不同,部分地区经验公式中采用的常参数见表1。

由于不同地区地基土的差异性,以及同一地区不同场地地基土性也存在差异,要使计算出来的承载力与实际地基承载力相吻合,在利用面波波速对强夯场地地基承载力进行计算时要有一定量的面波测试点及与之对应的静载试验点(这些静载试验宜加载至地基土破坏)。

表1 我国部分地区 $f_{ak} \sim V_R$ 、 $E \sim V_R$ 关系式参数

	A	B	C	D
珠三角地区、南昌	2.777	0.796	9.43×10^{-5}	2.284
山东淄博	2.646×10^{-5}	3.076		
福建漳州	4.4558	7.28×10^{-1}	1.06×10^{-11}	5.058
广西钦州	4.055×10^{-1}	1.258		
辽宁葫芦岛	1.98×10^{-2}	1.701	3.1×10^{-3}	1.622

3.2 定性评价

在没有经验公式可以参考，也无可供对比的静载试验，可以通过普测方法，将获得的波速绘制成等值线，从波速等值线可以定性判断强夯地基的加固效果和深度，初步确定整个场地的相对“软”和“硬”区域及程度，从而达到定性评价地基加固均匀性的目的。

四、广西某开山回填土地基加固工程

该工程位于广西壮族自治区钦州市起步工业区内，拟建芳烃罐区原始地貌为海岸丘陵，地形起伏很大，总体呈西高东低，地面标高在 7.5~5.0m 左右，中部有一大约呈南北走向、深度 8~9m、宽约 60~110 m 的冲沟。现场地经人工挖方回填平整，地形平坦，场地标高在 8m 左右。回填土由风化程度不同（全风化、中风化、微风化）的泥岩、砂岩、页岩等构成，成分复杂；同时，颗粒粒径大小不一，粒径小者不足 1cm，大者近 1m，极不均匀；此外，受原始地形控制，回填土厚度在 3~11m 左右。

本场地拟建 14 座 5000m³ 芳烃浮顶罐（包括预留的 6 座预留罐）、消防道路及管廊架。罐体直径 21m，高约 15m。本次针对场地不同土层分布情况，分别进行 10000kNm 强夯、10000kNm 强夯置换、6000kNm 强夯、2000kNm 强夯等施工工艺，部分区域因原为挖方区不做地基处理。

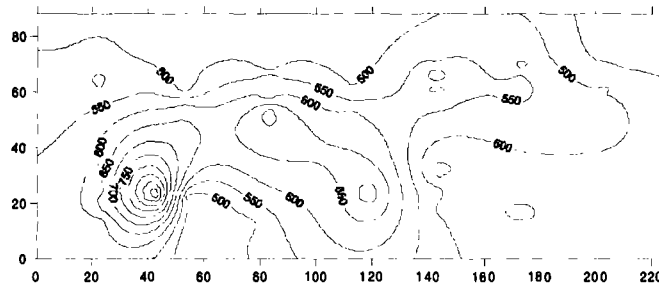


图3 地基承载力标准值等值线

表2 地基承载力特征值计算与实测值对比表

测点编号	计算值 (kPa)	实测值 (kPa)	误差
1#	489.1	700	-0.30
2#	454.2	650	-0.30
3#	582.4	650	-0.10
4#	500.0	600	-0.17
5#	604.2	420	0.44
6#	631.5	445	0.42
7#	479.1	650	-0.26
53#	377.3	225	0.68
58#	299.5	275	0.09

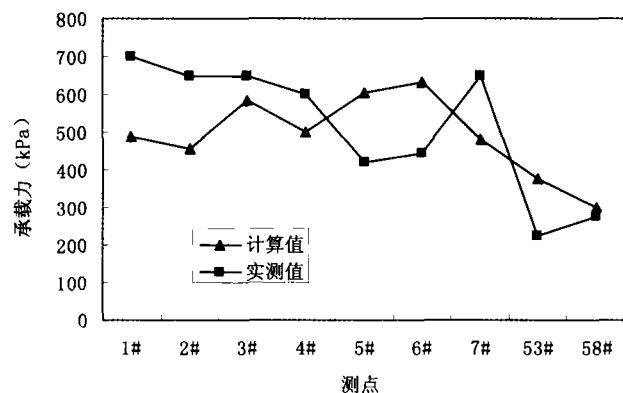


图4 地基承载力实测值与计算值对比

在强夯前后进行面波检测，强夯前（53#、58#）场地0~4m等效横波波速在200m/s左右；整个场地强夯后0~4m深度等效横波波速在300m/s左右，场地基本均匀。将0~4m等效横波波速与对应的静载试验成果进行对比，回归出波速—地基承载力关系（见表1）。

使用回归公式计算出整个区域的0~4m地基承载力特征值，绘制出地基承载力特征值等值线（见图3）。将计算的地基土承载力特征值与实测值进行汇总（见表2、图4）。

从以上结果可以看出，整个场地强夯后地基承载力特征值基本上在500kPa以上，加固效果良好、场地均匀。

对比计算和实测地基承载力（表2、图4），两者仍有一定差异，两者差异大部分在30%左右，其中个别点差异较大，但基本上反映了波速与承载力的相关关系。

五、辽宁某炸山填海地基工程

该工程船体加工区和部件装焊区浅部分布6~9m厚的填土，其主要由块石、碎石、砂及粘性土构成，粒径、成份不匀，块石粒径大者1m以上。填土堆填时间以分布位置而有所不同。西段该层土堆填时间在5年以上，东段为新近堆填，该层下断续分布厚约0.5~1m的淤泥混砂（①2）层。

根据本场地土层条件，采用主夯能级为6000kN.m和8000kN.m的高能级强夯进行处理，部分区域的柱基下采用6000kN.m强夯置换进行预处理。

强夯后进行面波检测，在静载试验前，根据本地区经验和以往测试数据和波速关系，回归出波速—地基承载力关系（见表1）。

计算出面波测点的地基承载力特征值后绘制等值线（见图5）。

表3 地基承载力特征值计算值与实测值对比表

测点编号	计算值 (kPa)	实测值 (kPa)	误差
2#	550	>550	0
3#	550	>550	0
4#	675	>500	0.35
5#	675	>500	0.35
6#	325	>400	-0.19
7#	500	800	-0.38
8#	375	>417	-0.10
9#	275	469	-0.41

由于本场地静载试验均未加载至地基土破坏，所以实测地基承载力特征值大多偏小（见表3）。

从图5可以看出，整个场地西侧有一承载力较低区域（200kPa~300kPa），东侧地基承载力在500kPa~800kPa。东西差异较大，整个场地东侧加固效果明显好于西侧。

从表3可以看出，地基承载力特征值计算和实测值差异在30%左右。

由于本工程地基承载力计算值是在静载试验测试之前完成,具有事前预测性,从计算值与实测值基本一致(表3、图6),说明波速与地基承载力特征值之间存在很好的正相关关系。

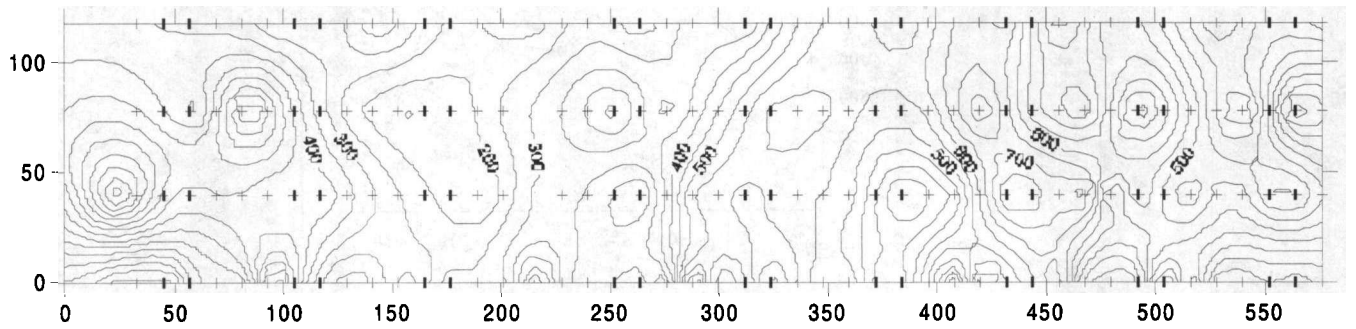


图5 船体加工区和部件装焊区0~4m地基承载力特征值等值线

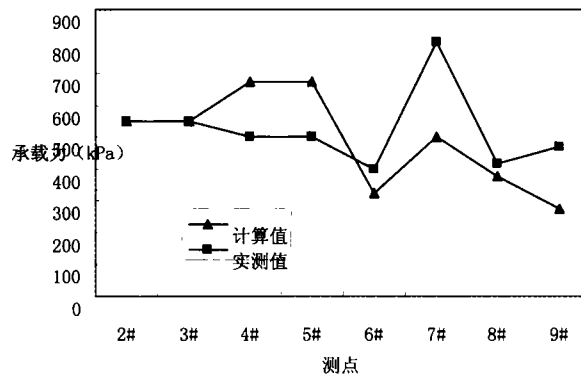


图6 船体加工区和部件装焊区地基承载力特征值
计算与实测值对比图

五、结语

多道瞬态面波是近年发展很快的一种物探方法,其具有快捷、高效、低成本和广普性不断得到重视和应用。在沿海地区开山填海碎石强夯地基检测中得到广泛地应用:

(1)通过对场地强夯前后的面波测试对比,可以对强夯加固深度、地基承载力和加固后的均匀性进行定性评价。

(2)通过将测试面波波速进行反演,得到分层横波波速,将一定深度的等效横波波速与其对应点的静载试验地基承载力特征值进行对比,回归横波波速—地基承载力特征值之间相关关系,并计算整个场地地基承载力,并绘制等值线,从而可以定量评价整个地基加固效果。

(3)本文通过两个实例工程的检测实践发现,面波测试方法在强夯地基检测中进行地基承载力计算时,由于地基土的差异性,计算值与实测仍有一定的差异,但能基本上反映地基承载力分布趋势。

(4)在使用面波法进行强夯地基评价中,目前如何提高地基承载力的计算值与实测值吻合程度、如何在强夯地基均匀性评价方面找到一种定量指标等问题仍值得探讨。

应用多道瞬态面波进行复合地基的检测不能奢望能与静载试验及动力触探吻合很好,因为承载力问题是土力学及岩土工程的一个基本问题,有很多东西还在探索中,况且静载试验等也有很多局限性。从工程应用的需要出发,我们期望以快速、便宜、可大面积普测的、与静载试验基本吻合的多道瞬态面波法,来一定程度上减少静载试验的数量,节约人力物力,为设计提供较完整较形象的地基状况图。

我们采用多道瞬态面波法对广西、广东、辽宁、山东等地的开山炸石、黄土等复合地基进行了

检测, 并逐渐积累了一些认识和看法以供探讨。

参 考 文 献

- [1] 水伟厚. 冲击应力与 10000kN.m 高能级强夯系列试验研究[D], 同济大学博士论文, 2004.
- [2] 中国建筑科学研究院, 建筑地基处理技术规范 (JGJ79—2002), 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [3] 中华人民共和国行业标准, 多道瞬态面波勘察技术规程 (JGJ/T143-2004), 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [4] 杨成林, 瑞雷波勘探, 地质出版社, 1993.
- [5] 吴福良等, 瑞雷波在地基强夯检测中的应用, 西安交通大学学报, 2003.
- [6] 张瑾等, 瑞雷波法在强夯地基质量检测中的应用, 物探与化探, 2005.
- [7] 水伟厚, 王铁宏, 王亚凌. 瑞雷波检测 10000kN.m 高能级强夯地基, 建筑结构, 2005, 35 (7), 46-48.
- [8] 蔡宗文, 瑞雷面波在填海造地强夯检测工程中的应用, 华北地质, 2002. 12 .

Abstract: The Multi-channel transient vibration Rayleigh Wave method is applied to test the Dynamic Compaction, not only decrease cost and spread testing area but also improve testing rate and precision. The text sum up effect in the Ground treatment using Multi-channel transient vibration Rayleigh wave about determine the nature and fix quantify, and introduce the application in two national importance engineering in Guangxi and Liaoning province. Through the contrast of Rayleigh wave and static load test before and after the treatment of dynamic compaction, we gain some resolutions of multi-channel Rayleigh test about gravel and soil subgrate alongshore area. The resolutions can be used to guideline the Multi-channel transient vibration Rayleigh testing work application in compound ground.

Key Words: Muti-channel transient vibration Rayleigh wave technique, Dynamic Compaction; Ground Treatment, Testing