

# 瞬态面波法检测抛石挤淤填海地基强夯加固效果

刘发祥<sup>1</sup>, 唐升贵<sup>2</sup>

(1. 中国石油天然气华东勘察设计研究院, 山东 青岛 266071; 2. 贵州有色地质工程勘察公司, 贵州 贵阳 550005)

**摘要:**以青岛新建某厂抛石挤淤填海地基强夯加固效果检测为例, 剖析瞬态面波法检测大面积碎石回填地基强夯加固效果的原理、方法及该方法的可靠性。通过该工程实例, 说明瞬态面波法与其它传统方法结合, 能经济、快速、可靠地对碎石回填强夯地基进行大面积检测。

**关键词:**瞬态面波; 检测; 抛石挤淤; 填海地基; 强夯加固

## 1 测试背景

青岛新建某厂场地为近期开山碎石回填海滩造陆, 一次性巨厚层回填, 地基处理采用强夯加固法。为了取得强夯设计参数, 指导大面积施工作业, 设计在回填区选择了能量级分别为 2000kN·m 和 6000kN·m 的两块试夯区进行试夯, 并要求通过检测来验证试夯设计参数和方法的合理性。设计要求: 测定试夯后地基承载力、地基变形模量, 评价强夯地基的整体均匀性、强夯的有效加固深度、强夯后的抛石挤淤效果。

测定地基承载力、地基变形模量, 采用大压板载荷试验; 检验强夯有效加固深度及强夯后抛石挤淤效果, 采用传统的钻探和动力触探直接测试手段。但是, 无论静力载荷试验或是钻探和动力触探都难以大面积地对回填地基强夯加固后的整体均匀性进行评价, 而瞬态面波是近几年发展起来的一种迅速、成本低廉的间接检测技术, 利用它可以测定岩土层的面波波速并通过一定的经验关系换算出岩土层的剪切波速, 从而根据剪切波速对地基土整体均匀性和地基强度进行评价, 同时还可同部分钻探和动力触探测试成果比较, 对强夯地基有效加固深度和挤淤效果进行判定。本项目检测中, 完成了载荷试验点 4 个、瑞利波试验 79 点、动力触探试验 7 点、钻探 1 点。

## 2 强夯前工程地质条件简介

2000kN·m 试夯区上部约 3.4~5.6m 深度为开山回填碎石土, 下部为强风化花岗岩; 6000kN·m 试夯区上部约 9.5~10.0m 深度为开山回填碎石土, 9.7~11.0m 深度为淤泥质粉质粘土, 下部为强风化或中风化花岗岩。各测区试夯前的波速测试结果如表 1。

## 3 瞬态面波检测的原理及方法

瞬态面波检测的主要原理是根据测试所得的各分层波速值, 结合试夯前的波速测试结果来评价强夯加固后回填土的整体均匀性和力学性质, 并通过与其它直接手段比较来对强夯的有效加固深度和底部淤泥层的排挤情况等判定。

现场测试时, 以测点为中心, 对称地布置 12 只速度型检波器, 并与地震大线相连接, 布置的方向应尽量沿着同类地层。然后将地震大线与 SE2404EP 型综合工程探测仪相连, 以一定的偏移距锤击激振地面, 利用 SE2404EP 型综合工程探测仪的瞬态面波采集系统采集振动信号, 经初步分析认为信号满意后存盘以供后续资料处理。

瞬态面波数据处理采用频谱分析法, 它是由震源产生一定频带宽度的脉冲信号, 通过观测系统采集面波数据, 根据记录曲线的同相轴来识别面波, 利用相干函数和功率谱、相位谱等理论, 从而得出不同频率的面波相速度, 同时得出该点的频散曲线, 由频散曲线可以用 Hasbell 矩阵反演地层的分层厚度和剪切波速。当理论频散曲线与实测频散曲线差异较大时, 可改变地层模型, 采用阻尼最小二乘法达到最好拟合。

表 1 试夯前剪切波速测试成果表

区域	测点	深度(m)	剪切波速(m/s)
2000kN·m 试夯区	C3-6	2.5	105.0
		5.0	160.0
		10.2	555.0
	L4-4	4.7	167.5
		7.7	587.5
		3.6	176.3
6000kN·m 试夯区	L4-5	6.9	782.5
		3.9	112.5
		8.2	176.2
	L5-2	9.5	125.0
		14.2	567.5
		6.4	116.2
L6-1	10.0	155.0	
	11.5	111.2	
	16.1	502.5	

## 4 瞬态面波实测资料解译结果与评价

为了直观地对地基的整体均匀性和力学性质等进行评价, 将每条测线各测点沿深度的剪切波速值利用 SURFER 软件绘制成“剪切波速等值线断面图”, 从剪切波速等值线断面图上可清楚地反映强夯加固后回填碎石土的整体均匀性、有效加固深度、地基强度的空间变化以及挤淤效果。

2000kN·m 区 L4 测线: 0~1.3m, 剪切波速为 87.5~175m/s, 一般在 140m/s 左右, 但离散性较大; 1.3~6.0m, 剪切波速为 156.2~331.2m/s, 一般在 250m/s 左右; 6.0~9.0m, 剪切波速为 275.0~462.5m/s, 一般在 300m/s 左右。结合强夯前勘探点波速测试资料可看出, 强夯后该区回填碎石土的剪切波

速明显提高, 尤其在上部 0~6.0m 深度范围内, 剪切波速提高较大; 同时还可看出回填碎石土强夯后松散部位的波速提高较大, 而较为密实部位的波速提高较小。由此说明强夯加固后回填碎石土的整体均匀性增强、密实度明显提高、地基强度明显改善, 且强夯有效加固深度达到 6.0m。

6000kN·m 区 L2 测线: 0~4.8m, 剪切波速为 143.8~307.5m/s 一般在 220m/s 左右; 4.8~10.7m, 除 L2-3、L2-5 测点波速变化较大外, 剪切波速为 140~343.8m/s, 一般在 200m/s 左右, 但该段各测点的波速离散性较大, 说明该段回填碎石土的均匀性较差; 该测线下未发现低速层淤泥带, 说明碎石回填后挤淤效果较好; 底部受基岩风化程度变化的影响, 波速变化较大。经与强夯前的勘探点波速测试结果比较, 0~10.7m 深度范围内, 剪切波速值明显提高, 地基强度明显改善。

### 5 瞬态面波检测可靠性验证

瞬态面波作为一种间接的测试手段, 它具有高效、面广(即测试点多)、经济等优点, 但直接利用波速对地基质量进行评价, 仍处于探索阶段, 还需要其它直接手段对其可靠性进行验证。本项目中进行了静力载荷试验、钻孔、动力触探三项直接测试手段。

#### 5.1 静力载荷试验结果

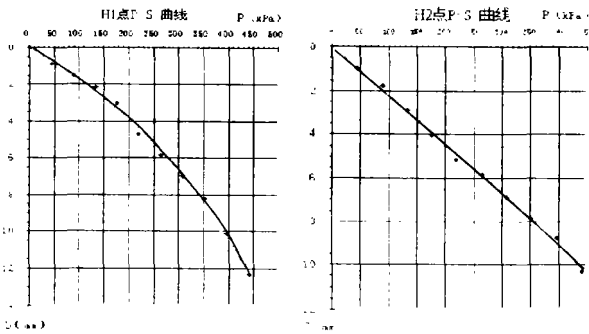


图 1 静力载荷试验曲线

图 1 是 2 个静力载荷试验点的 P-S 关系曲线, 其中 H1、H2 点位于 2000kN·m 试夯区, 各点的试验最大荷载均为 440.0kPa, 采用的圆形荷载板面积均为 1.46m<sup>2</sup>。从试验结果看: 回填碎石土在所施加的最大荷载作用下未出现破坏迹象, 且沉降量最大仅为 15.6mm, 各点试验曲线的变化趋势极为相近。所以, 经强夯处理后, 回填碎石地基土承载力特征值远超过设计要求的 220.0kPa, 地基均匀性较好、强度明显提高, 这与面波测试的解译结论基本一致。

#### 5.2 钻孔结果

在 6000kN·m 试夯区进行了一个钻孔, 结果如下: 第①层素填土(以碎石、块石为主); 夯后填土层(包括夯坑填土)整体密实程度大为提高且密实程度较为均匀, 以中密—密实状态为主, 沿深度方向上地基土的强度有明显增加, 但下部原有埋覆的大块石依然存在; 第②层淤泥质粉质粘土夯后呈碎石、块石混淤泥质粉质粘土状, 碎石、块石与淤泥质粉质粘土混杂, 淤泥质粉质粘土无规律充填于碎石、块石空隙中。工程力学性质有明显增强, 总体呈松散—稍密状态。说明了高能级强夯对试夯区场地深部不均匀分布的淤泥质粉质粘土抛石挤淤残留体加固效果较明显, 强夯影响深度达到 11.0m。这一结果与面波测试的解译结论

非常吻合。

#### 5.3 动力触探结果

在 2000kN·m 试夯区完成了 3 个动力触探试验; 在 6000kN·m 试夯区完成了 4 个动力触探试验。

2000kN·m 试夯区动力触探结果表明: 经强夯加固后回填碎石土的密实度得以明显提高, 达到稍密—中密状态且以中密状态为主, 密实度整体均匀性较好, 强夯影响深度可达到 5.50m; 6000kN·m 试夯区动力触探结果表明: 经强夯加固后回填碎石土的密实度得以明显提高, 达到稍密—密实状态且以中密—密实状态为主, 0~5.0m 深度范围密实度的整体均匀性很好且以中密—密实状态为主, 而 5.0~11.0m 深度范围内碎石土的整体均匀性和密实度较上部稍差且以稍密—中密状态为主, 强夯影响深度达到 11.0m。因此, 两测区的动力触探结果与面波测试结论十分吻合。

### 6 结论

(1) 通过可靠的静载试验、动力触探、钻探结果验证, 瞬态面波法检测回填碎石土地基强夯加固效果经济、可行。

(2) 瞬态面波法作为一种新兴的间接测试手段, 经济快捷, 可对地基进行大面积检测, 但需与其它可靠手段进行相互对比验证。

(上接第 34 页)

均匀混合, 采取混合土样进行颗分试验, 当一个标贯位于粉土与粉质粘土界限时, 应在外业进行标示, 并在液化判别计算时综合考虑其对判别结果的影响。

#### 3.3 应进行综合判定

液化判别时, 应对不少于 6 个液化判别点分别计算, 综合判定; 对于薄层有时会出现一层点数不够的情况, 出现该情况时应采用静力触探或补充工作量来增加判别点数量, 不宜轻易下结论; 特别是对于出现一层仅有两个点且液化判别结论不同的情况, 更应补充工作量来增加判别点数量。

#### 3.4 合理舍弃异常点

在液化判别时, 若出现异常点, 应分析原因, 若为人为因素造成的数值异常, 应给予舍弃。

### 4 正确判别液化的现实意义

正确判别液化对降低工程造价具有重要的现实意义, 以新乡某职业技术学院新建住宅小区工程为例, 选择比较常用的地基处理方法, 若为严重液化, 需采用碎石桩进行部分消除液化沉降, 处理后持力层地基承载力由 100kPa 提高至 120kPa, 由于碎石桩处理不能完全消除液化, 处理后仍需采取基础和上部结构措施; 若为中等液化, 只需采取基础和上部结构措施; 根据设计图纸, 单体建筑尺寸为 72.0m×12.0m, 碎石桩处理面积为需大于基础尺寸, 约为 80m×20m, 有效桩长按 8.5m 考虑, 碎石桩总长度约为 9454m, 单栋建筑消除严重液化费用约为 28.4 万元, 拟建小区有 14 栋建筑, 消除严重液化总费用约为 397.6 万元, 液化判别错误对工程造价的影响可见一斑。

参考文献:

[1] 建筑抗震设计规范(GB50011-2001)[S].

[2] 岩土工程勘察规范(GB50007-2001)[S].