

文章编号: 1000-7598-(2004) 05-839-04

动刚度和动力触探在强夯地基检测中的应用

王祎望¹, 王仁刚², 闫韶兵³

(1. 天津大学 管理学院, 天津 300072; 2. 中国海洋大学, 山东 青岛 266033; 3. 青岛市勘察测绘研究院, 山东 青岛 266033)

摘 要: 通过平板静力载荷试验与动力触探、地基动刚度测试的对比, 提出了应用动力触探、地基动刚度测试两种手段对碎石土强夯地基进行联合检测的新思路, 建立了相关经验公式, 工程实践验证了公式的可行性。应用表明, 两种方法的结合能够快速而准确的进行承载力的检测。

关 键 词: 强夯地基检测; 动力触探; 动刚度

中图分类号: TU 413 文献标识码: A

Application of dynamic rigidity and dynamic penetration to consolidated foundation test

WANG Yi-wang¹, WANG Ren-gang², YAN Shao-bing³

(1. School of Management, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

3. Qingdao Geotechnical Investigation and Survering Research Institute, Qingdao 266033, China)

Abstract: On the basis of comparing the plate static loading test with dynamic penetration and dynamic rigidity, a new idea of combined measurement is put forward to test consolidated foundations and a correlation empirical formula is established. The empirical formula can be tried in practical project to quickly test the loading capacity.

Key words: consolidated foundation test; dynamic penetration; dynamic rigidity

1 前 言

强夯法^[1]是法国 Menard 技术公司于 1969 年首创的一种地基加固方法。它是通过用 8~30 t 的重锤和 8~20 m 的落距对地基土施加很大的冲击能, 利用该冲击能在地基土中所形成的冲击波和动应力, 来提高地基土的强度、降低土的压缩性, 同时, 提高地基土的均匀程度, 减少可能出现的差异沉降。

工程中经常会遇到地基地质条件、承载力不符合设计要求的情况, 需要对场地进行整平、回填改造, 而回填材料一般采用开山劈石所产生的废料, 即碎石素填土或岩石风化碎屑。该回填材料并无固定级配, 若以粒径为 20~200 mm 的块石为主料, 大于 200 mm 及小于 20 mm 粒径的材料为辅料, 则为碎石素填土; 若以小于 20 mm 粒径的材料为主料, 则称为岩石风化碎屑。该材料经强夯加固后地

基承载力可达 250~400 kPa, 并可与砂土地基、粘性土地基、岩石地基联合使用。因此, 强夯加固法不失为一种经济、安全、高效的地基处理办法^[2]。随着社会经济和基础设施建设的飞速发展, 碎石素填土强夯地基已越来越广泛的应用于厂房、办公楼、住宅小区、码头、物流中心等建设, 而且, 其使用的环境地质条件也越来越复杂。如何对碎石土强夯地基进行快速有效地检测, 并提供其准确的强度及变形参数, 是值得研究且具有重要的经济及安全意义的。

2 传统检测方法的优劣

目前传统的碎石土强夯地基的检测主要依靠平板静力载荷试验、重型(或超重型)动力触探试验、土工试验等方法, 这些方法均有各自的优点及局限性, 如表 1 示。

表 1 三种检测方法的比较

Table 1 Comparison among three test measurements

检测方法	检测原理	优点	局限
平板静力载荷试验	对载荷板分级加荷, 维持载荷相对稳定, 观测沉降量及稳定时间, 直至地基压坏。	1. 得到承载力标准值、变形模量等参数; 2. 结果准确可靠, 接近实际建筑物运营时的地基变形情况。	1. 试验周期长, 速度慢, 设备笨重, 不适于大面积检测; 2. 影响深度有限, 一般小于 $2.5 d$ (d 为载荷板直径)。
动力触探试验	通过对圆锥探头的连续贯入, 依靠其锤击数反映地基土的密实程度及均匀程度。	1. 测试深度大, 速度快; 2. 数据连续, 能直观地反映地基土密实程度及均匀性的变化。	1. 不能直接得到 f_k, E_0 等力学指标, 经验性较强; 2. 测试点间距较大, 易漏测地基薄弱部位; 3. 填料块度大时难以进尺。
土工试验	现场取样, 试验室获取其物理指标, 从而判断其密实程度。	一般作为其它检测手段的辅助手段。	1. 不能直接得到 f_k, E_0 ; 2. 取样较困难, 取样误差较大; 3. 无法对下部地基土进行取样。

3 新兴检测方法的优点及其缺陷

近年来, 基于机械阻抗法测桩原理, 人们提出了地基动刚度测试方法来对强夯地基进行检测, 该方法仍处于探索阶段, 优缺点见表 2。中国海洋大学与勘察单位合作对其进行了大量的理论与实践工作, 取得了初步成果。

表 2 动刚度法的优点和局限

Table 2 Advantage and limitation of dynamic rigidity

检测方法	优点	局限
动刚度法	1. 能够提供地基土的动、静刚度; 2. 在提供承载力的同时, 能够预估沉降; 3. 设备先进, 检测速度快。	1. 影响深度同载荷试验, 一般小于 $2.5 d$; 2. 受板下介质的影响, 系统误差较大。

该方法的检测原理是: 把一定直径的圆形钢板置于整平后的待测地基土上, 其下以石膏 (或其它介质) 将钢板与基土紧密相连, 钢板上安置速度传感器, 采用迫振方式, 迫振锤上安置瞬态激振力传感器。当对钢板进行迫振时, 可采集到板下地基振动速度时域曲线, 经 FFT 转换得到振速频域曲线; 同时采集到瞬态力传感器提供的力波时域信号, 经 FFT 转换得到力波的振幅谱, 两者相除得到 $V/F-f$ 曲线, 即导纳频谱特性曲线。当板下地基土小位移动时, 其振动可视为刚体运动并以质弹体系表之, 由典型导纳曲线的直线段斜率的倒数可表示地基土的动刚度 K_d (kPa/mm), 进而计算得到某一容许沉降值下的地基承载力标准值^[3]。

4 碎石土强夯地基检测新思路

平板静力载荷试验是确定地基土强度、变形参数最可靠的手段, 但由于其试验周期长, 一般需

(4~5) d , 速度慢, 需重量达数 10 t 的配重, 不适于大面积检测; 此外, 试验影响深度有限, 一般小于 $2.5 d$, 在地基土厚度大于 3.0 m 时, 不易测得下部地基土的强度和变形参数。基于此, 本文提出了一种深浅结合、点面兼顾的碎石土强夯地基检测思路, 该思路的基本检测手段是重型 (或超重型) 动力触探、地基动刚度测试, 其检测原理: 用平板静力载荷试验结果确定地基土力学指标是最直接有效的手段。在研究中, 首先在夯区中选择几个填料成分差异较大的区段, 通过几个平板静力载荷试验, 确定该类地基土不同深度段的承载力标准值, 计算出变形模量。然后在载荷试验位置作重型 (或超重型) 动力触探试验及大量动刚度试验, 经过与载荷试验结果对照, 建立起相关数学模型。由于动刚度检测速度快, 可大大地减少动力触探点的数目, 因此, 最终以动力触探和地基动刚度测试两者有机结合作为大面积检测的基本手段。其优点是深浅结合, 点面兼顾, 同时避免了单一检测手段的不确定性, 三者相互验证, 相互配合, 达到了在安全、经济、合理、快捷的原则下对强夯地基进行评价的目的。

5 相关数学模型

基于以上思路, 经过对数万平方米及近百个单体建筑物碎石土强夯地基检测的探索^[4~7], 得到平板静力载荷试验结果与动力触探击数及动刚度测试结果的数学模型表达式, 选取其中两组数据分别见表 3、4 和图 1、2。

表 3 地基承载力标准值与超重型动力触探击数对应关系

Table 3 Corresponding relations between normal loading capacity and amounts of over-heavy dynamic penetration

项目序号	f_k / kPa	N_{120} / 击	项目序号	f_k / kPa	N_{120} / 击
1	400	6.4	7	257	4.1
2	333	6.1	8	328	5.8
3	410	7.0	9	200	3.4
4	240	3.9	10	148	2.5
5	405	6.2	11	450	7.4
6	272	5.1	12	188	3.2

相关系数 $r = 0.9779$

表 4 地基承载力标准值与重型动力触探击数对应关系

Table 4 Corresponding relations between normal loading capacity and amounts of heavy dynamic penetration

项目序号	f_k / kPa	$N_{63.5}$ / 击	项目序号	f_k / kPa	$N_{63.5}$ / 击
1	258	6.5	6	200	5.9
2	300	9.1	7	168	4.8
3	330	9.0	8	489	12.0
4	360	9.5	9	233	6.4
5	412	11.6	10	180	4.6

相关系数 $r = 0.9779$

由图1得

$$f_k = 61.46 N_{120} - 10.95 \quad (1)$$

式(1)适用范围 $2 \leq N_{120} \leq 10$ 。式中, f_k 为平板载荷实验实测地基承载力标准值 (kPa); N_{120} 为超重型动力触探实测击数平均值, 该值经过杆长及侧壁摩擦修正。

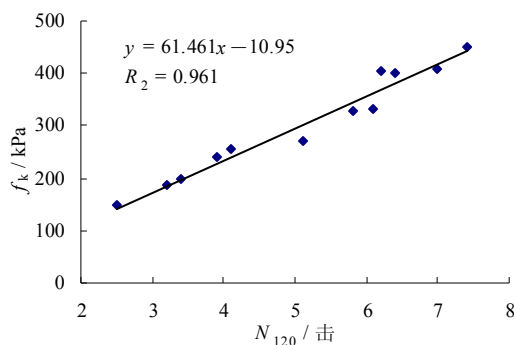


图1 地基承载力标准值与超重型动力触探击数关系曲线
Fig.1 Relations between normal loading capacity and amounts of over-heavy dynamic penetration

由图2得

$$f_k = 38.59 N_{63.5} - 13.44 \quad (2)$$

式(2)适用范围 $3 \leq N_{63.5} \leq 15$ 。式中, f_k 为平板载荷实验实测地基承载力标准值 (kPa); $N_{63.5}$ 为重型动力触探实测击数平均值, 该值经过杆长修正。

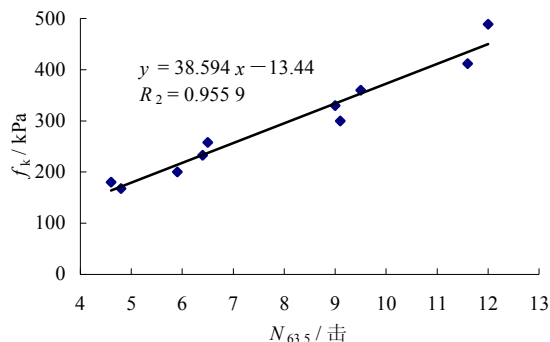


图2 地基承载力标准值与重型动力触探击数关系
Fig.2 Relations between normal loading capacity and amounts of heavy dynamic penetration

根据平板载荷试验结果及动力触探结果, 变形模量 E_0 与地基承载力标准值 f_k 可建立以下关系:

$$E_0 = (1/16.8) f_k \quad (3)$$

式(3)适用于以风化碎屑为主要成分的地基土。

$$E_0 = (1/6.8) f_k \quad (4)$$

式(4)适用于以碎石为主要成分的地基土。

在动刚度的测试过程中, 由于存在一定干扰因素, 板下介质和表层效应都对结果有削弱作用, 因此, 导致利用动刚度所求得的地基承载力标准值总是低于实测值, 各因素对最终结果的削弱系数目前尚无法得出, 但在工程应用精度范围内可以用一个常数对测试结果进行修正。经过对数百个动刚度测试结果的对比分析、筛选统计、修正系统误差后可得以下经验公式:

$$f_k = f_{kd} + 75.8 \quad (5)$$

式中 f_{kd} 为用动刚度计算而得的地基承载力标准值 (kPa) (预估容许沉降 5 mm)。

将上述检测思路及所得的 5 个公式应用于碎石土强夯地基检测中, 大大提高了检测结果的精确度及检测速度, 节省了投入资金, 缩短了工期。

6 工程实践

在房地产开发项目、李村河污水处理厂、白沙河抽水工程等建筑物强夯地基处理工程实践中, 笔者对这一检测思路以及经验公式进行了验证, 效果较理想。现以浮山后 4, 6 小区六层住宅建设项目为例, 对近百座楼的碎石土强夯地基进行了检测。根据上述检测思路, 选择了 2 个填料较为典型的地段进行了表层及 2 m 以下平板静力载荷试验, 后用超重型动力触探和动刚度测试两种手段展开大面积检测, 每一楼座的每一单元布置 1 个动力触探点、2 个动刚度测试点, 对检测结果用上述的 5 个公式分别进行了计算。结果表明, 利用各种手段所得的检测结果吻合很好, 不但将地基土力学指标提高 (最高达到 500 kPa), 而且, 在剖面上对地基土层进行了力学分层, 检测出了一定比例的不合格地基, 将 7 工作日/建筑物的传统检测工期缩短到 2 工作日/建筑物, 节省了大量基础投资, 缩短了工期。

设计单位在地基设计中使用了笔者提供的力学指标 (一般 $f_k = 200 \sim 350$ kPa)。为了检验测试结果的可靠性, 笔者选取了 17 个地基土厚度较大、最易产生不均匀沉降的建筑物进行了沉降观测^[8], 建筑物平面尺寸约为 12 m × 50 m, 对称布置了 6~8 个观测点, 从结构施工到二层以上开始定期观测, 观测频率 1 层/次, 主体封顶后 90 天/次, 直至投入使用后 180 d。最终沉降观测结果表明, 各建筑物平均沉降值为 0.677~3.021 mm, 最大沉降量为 7.225 mm, 相邻观测点最大差异沉降为 5.109 mm。主体封顶后, 沉降就已基本稳定, 建筑物运营状况良好, 从工程实践角度验证了上述检测思路及公式的准确性。

7 结 语

一种新的检测思路或检测手段需要经过不断的探索和实践,才能逐步得到完善和推广。动力触探应用于地基强度和变形参数检测已经被人们所熟知,而动刚度应用于地基承载力检测刚刚开始,虽然,尚有诸多问题需要从理论和实践上进一步丰富,但随着研究程度的不断地深入,动刚度也必然将成为一种成熟的地基检测手段,其与动力触探联合应用于碎石土强夯地基检测这一新思路随着应用的展开,也将走向成熟并逐步推广到其它类型地基土的测试中。

参 考 文 献

[1] 叶书麟,叶观宝.地基处理与托换技术[M].北京:中

国建筑工业出版社,1994.

- [2] 陈仲颐,叶书麟.基础工程学[M].北京:中国建筑工业出版社,1993.
- [3] 楼梦麟.求解地基动力柔度系数的近似方法[J].岩土工程学报,1995,17(1):73—78.
- [4] John P Wolf. Dynamic Soil-Structure Interaction[M]. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 1985.
- [5] 青岛市勘察测绘研究院.浮山小区检测报告[R].青岛:青岛市勘察测绘研究院,1998.
- [6] 青岛市勘察测绘研究院.黄岛油库检测报告[R].青岛:青岛市勘察测绘研究院,1999.
- [7] 青岛市勘察测绘研究院.福岭花园检测报告[R].青岛:青岛市勘察测绘研究院,2001.
- [8] 青岛市勘察测绘研究院.浮山小区沉降观测报告[R].青岛:青岛市勘察测绘研究院,2002.

《岩土力学》全球华人中青年学者岩土力学与工程论坛专集 EI 收录论文 (37 篇)

序号	题名	作者	页码
1	润扬长江公路大桥北锚碇基础施工变形的智能预测——工程实录研究	孙 钧, 赵其华, 熊孝波等	1—7
2	含裂隙组岩体的稳定问题	周维垣, 刘元高, 吴 浩等	13—16
3	孔隙水压力对岩石裂纹扩展影响的数值模拟	唐春安, 杨天鸿, 李连崇等	17—20
4	黄河大柳树坝址岩体松动机制动力数值模拟研究	王勇智, 戚 炜, 门玉明等	29—34
5	裂隙岩体中污染物运移过程的数值模拟	薛 强, 梁 冰, 刘建军	35—38
6	软土盾构施工地表变形的小样本进化神经网络预测	安红刚, 胡向东, 赵永辉	43—47
7	基于进化神经网络的冲击地压非线性动力系统建模	高 玮, 冯夏庭	48—52
8	运用 ANSYS 对板桩墙支护模型的计算分析	俞 晓, 杨泰华	57—60
9	基于 EBE 方法的三维有限元并行计算	刘耀儒, 周维垣, 陈 欣等	69—72
10	低渗岩石非线性渗流机理讨论	王恩志, 韩小妹, 黄远智	120—124
11	矿井开采中的非线性动力学特性	代高飞, 尹光志, 皮文丽等	133—137
12	基于梯度塑性理论的岩样拉压剪破坏统一失稳判据	王学滨, 张智慧, 潘一山	138—142
13	钙质砂中锚定板的极限抗拔力计算	朱长歧, 初晓峰	153—158
14	打桩挤土的现场试验研究及土体位移的计算公式	王兴龙, 陈 磊, 窦丹若	175—179
15	拉西瓦双曲拱坝整体稳定分析	黄岩松, 周维垣, 陈 欣等	235—238
16	预应力锚索抗滑桩治理滑坡应用研究	桂树强, 殷坤龙, 罗 平	239—243
17	小湾电站高边坡系统锚固与排水的优化设计方法	张发明, 陈祖煜, 汪小刚等	249—253
18	喷锚网支护基坑监测及变形特性分析	肖国峰, 陈从新	275—278
19	高速公路失稳高边坡动态设计	沈 强, 陈从新	283—286
20	饱水岩体边坡抗滑稳定系数计算	刘玉梅, 杨振凯	329—331
21	水域沉管隧道基础处理方法的对比分析	张庆贺, 高卫平	349—352
22	盾构隧道壁后注浆效果的雷达探测研究	黄宏伟, 刘通剑, 谢雄耀	353—356
23	土体注浆堵水的可靠性设计	郝 哲, 王国民, 刘 斌	379—383
24	对不同轴式下部钻具组合动态特性的初探与思考	赵金海, 李子丰, 张桂林等	392—394
25	既有土坝可溶岩坝帷幕灌浆施工中几个问题探讨	罗长军	399—402
26	单桩极限承载力的静力触探估算法研究	赵春风, 蒋东海, 崔海勇	408—410
27	软土路基沉降与软土层厚度及填土高度的关系分析	王良民, 朱长歧, 阎 钊	431—434
28	ZWICK-100 高频试验机在岩石力学性能研究中的应用	单一峰, 罗仁安, 宋喜艳等	458—460
29	桩基完整性检测与面向对象编程	艾东海, 邓中华, 仲伟亚等	461—464
30	带负摩阻力桩基的设计与检测	夏力农, 王星华	491—494
31	铁路岩溶路基注浆材料试验研究	王曰国, 王星华, 杨秀竹	495—498
32	薄层褥垫刚性桩复合地基的研究	黄生根	509—513
33	支盘桩抗压和抗拔特性的研究	钱德玲	517—520
34	筏板基础与地基的共同作用计算分析	胡 恒, 郑先昌, 贾立宏	521—525
35	粉喷桩单桩复合地基承载特性的有限元分析	雷学文, 谭峰屹	526—528
36	钢管混凝土结构在桩基工程中的应用探讨	黄明奎, 汪 稔, 李 斌等	550—552
37	基于基岩裂缝分布的地震影响场分析	朱庆杰, 苏幼坡	589—592