



15 000 kN·m 能级强夯置换 处理软弱地基效果分析*

付志华

(中铁十九局集团第一工程有限公司, 辽宁 辽阳 111000)

摘要: 依托广西钦州港区某地基处理工程, 基于夯前夯后多道瞬态面波测试和夯后动力触探试验、置换墩着底检测及静载荷试验, 对 15 000 kN·m 能级强夯置换法处理软弱地基效果进行了检测。检测结果表明: 强夯置换后, 地基承载力明显提高, 复合地基承载力大于 200 kPa, 压缩模量大于 20 MPa; 15 000 kN·m 能级强夯置换有效加固深度 7.0~10.0 m, 平均有效加固深度 9.0 m 左右; 强夯置换后, 置换墩体与墩间土间、强夯置换区与周边的强夯区间均存在明显的不均匀性, 设计时应充分考虑到强夯置换后地基土的不均匀性。

关键词: 软弱地基土; 强夯置换; 15 000 kN·m 能级; 处理效果

中图分类号: TU 472; U 655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)01-0169-08

Treatment effect analysis of 15 000 kN·m energy-level dynamic replacement method on soft foundation

FU Zhi-hua

(China Railway 19th Bureau Group First Engineering Co., Ltd., Liaoyang 111000, China)

Abstract: Depending on the one foundation treatment engineering in Qinzhou port, we detected the treatment effect of 15000 kN·m energy-level dynamic compaction replacement method on soft foundation based on some tests. The tests are multi-channel transient surface wave test before and after dynamic replacement, dynamic penetration test and bottom condition of replacement piers and static load test after dynamic replacement. Some conclusions have been drawn. Firstly, the bearing capacity of foundation was improved after dynamic replacement. The bearing capacity was larger than 200 kPa with compression modulus larger than 20 MPa. Secondly, the effective reinforcement depth of 15 000 kN·m energy-level dynamic replacement was about 7.0 m to 10.0 m and average effective reinforcement depth was about 9.0 m. Finally, after dynamic replacement, there existed non-uniformity between replacement piers and soil among piers. And there existed non-uniformity between dynamic replacement zone and surrounding compaction zone. Therefore, non-uniformity of foundation soil after dynamic replacement should be fully considered during building design.

Keywords: soft soil foundation; dynamic replacement method; 15 000 kN·m energy-level; treatment effect

强夯置换法(dynamic replacement method)是由强夯法(dynamic compaction method)改进,并于20世纪80年代首先由法国Menard公司采用的软

弱土处理工艺,是一种经济、快速的地基处理方式。具体实施过程是利用重锤下落的夯击能将粒状骨料(碎石等)挤压入可压缩软土中,通过“填

收稿日期: 2016-04-24

*基金项目: 中国石油工程建设公司科学研究与技术开发项目(CPECC2011KJ22)

作者简介: 付志华(1972—),男,高级工程师,从事隧道及地下工程施工。

料-数次夯击-再填料”的工艺流程,形成大直径墩加固土体。与强夯置换法相关联的研究内容主要集中在动力固结原理、置换深度、复合地基承载机制以及强度时效性等方面,一般认为:在强夯置换过程中,动力挤密、置换成墩、排水固结等机制相辅相成,形成复杂的整体加固效果。近年来,国内不少学者对强夯置换法进行了广泛研究,代表性成果主要有:徐东升等^[1]针对某海相淤泥软土的处理工程,选取了一强夯砂桩置换试验区,监测强夯置换过程中夯坑及其周围土体的变形,超孔隙水压力的增长和消散情况以及深层土体水平位移;王宏祥等^[2]针对海满高速公路实际工程,结合有限元分析,对该方法处理湿地软基的加固机制进行了深入研究;白冰等^[3]在实测资料和理论分析的基础上,对强夯置换法加固松软土地基的若干问题进行研究;张彧等^[4]对强夯置换复合地基加固盐渍土效果进行了原位测试与研究;水伟厚^[5]对强夯置换概念的探讨和置换墩长度进行了实测研究;郑凌透等^[6]将碎石分为个体分散接触进行建模,对单次夯击和连续多次夯击过程中碎石体的变形成墩过程进行数值模拟;郑凌透等^[7]设计了一种有关置换墩形成机制的模型试验方法,研究强夯冲击下填料、软土与夯锤之间的相互作用过程;刘红军等^[8]基于孔压监测对比分析了强夯置换和砂井-强夯处理饱和软土地基;此外,还有一部分关于强夯置换方面的研究,如张成光^[9]分析总结了抛石挤淤及强夯置换处理软基的施工设计方案;谢仁追^[10]通过实际工程试验、检测和使用控制的工程实例,对强夯置换关键技术问题作有益的探索。综上所述,目前对强夯置换方法的研究主要是针对现场试验或者测试方面。

1 场地工程地质条件

本文依托广西钦州港区某大型工程地基处理实践,该工程场区原始地貌为海岸丘陵地貌,南部为回填区,北部为挖方区。下伏基岩为早志留

系连滩组第二段(S112)互层分布的泥质细砂岩、含粉砂泥岩与页岩,夹少量含砾砂岩。其底部与古墓组整合接触,顶部与合浦组为整合接触,砂页岩具有底冲刷面,印模及鲍马序列发育的浊流沉积为主,砂岩中水平层理、斜层理发育,显示底层倒转特征,泥岩、页岩的条带、条纹构造发育。场地地层自上而下依次为:①回填土;②有机质粉质黏土,呈可塑—软塑、低—中压缩状;③全风化页岩夹泥岩,组织结构完全破坏,土状;④强风化页岩夹泥岩,裂隙发育;⑤中风化页岩夹泥岩;⑥全风化砂岩;⑦中风化砂岩;⑧中风化砂岩。上述软弱土层处理对工程正常与安全运营产生显著影响,处理方案的选取和优化亦影响项目的投资和工程进度,因此,场地软弱土层处理已成为工程建设的关键问题。

2 强夯置换参数设计

2.1 强夯置换参数与施工概况

15 000 kN·m 能级强夯置换施工参数如下:第1、2遍夯击能为15 000 kN·m 点夯,点夯间距10.0 m,呈正方形布置。夯点夯击次数经现场的试夯确定为8~20击,夯点的收锤标准以最后两击的平均沉降量小于200 mm 控制;第3遍为点夯,夯点夯击次数经现场的试夯确定为9~20击,夯点的收锤标准以最后两击的平均沉降量小于200 mm 控制;最后采用2 000 kN·m 夯击能满夯2遍,每夯点夯击3击,满夯均要求锤底面积彼此搭接1/3。设计要求加固处理后的地基承载力特征值 $f_{ak} \geq 200$ kPa,压缩模量 $E_s \geq 20$ MPa。强夯置换不同工序施工情况见表1。

表1 强夯置换不同工序施工情况

| 遍数 | 能级/ (kN·m) | 锤质量/ t | 落距/ m | 开始 时间 | 结束 时刻 |
|-----|---------------|-----------|----------|----------|----------|
| 点夯1 | 15 000 | 46.60 | 32.20 | 11:02 | 11:15 |
| 点夯2 | 15 000 | 49.22 | 30.50 | 11:08 | 11:18 |
| 点夯3 | 8 000 | 39.48 | 20.30 | 11:12 | 11:22 |
| 满夯1 | 2 000 | 20.98 | 9.53 | 11:20 | 11:27 |
| 满夯2 | 2 000 | 15.32 | 13.05 | 11:23 | 11:29 |

2.2 测试内容及布置方式

强夯置换前只进行了多道瞬态面波测试, 布置方式见图 1a); 强夯置换后测试项目包括多道瞬态面波测试、置换墩着底检测 (动力触探和钻探)、动力触探及静载荷试验, 测试布置方式见图 1b)。

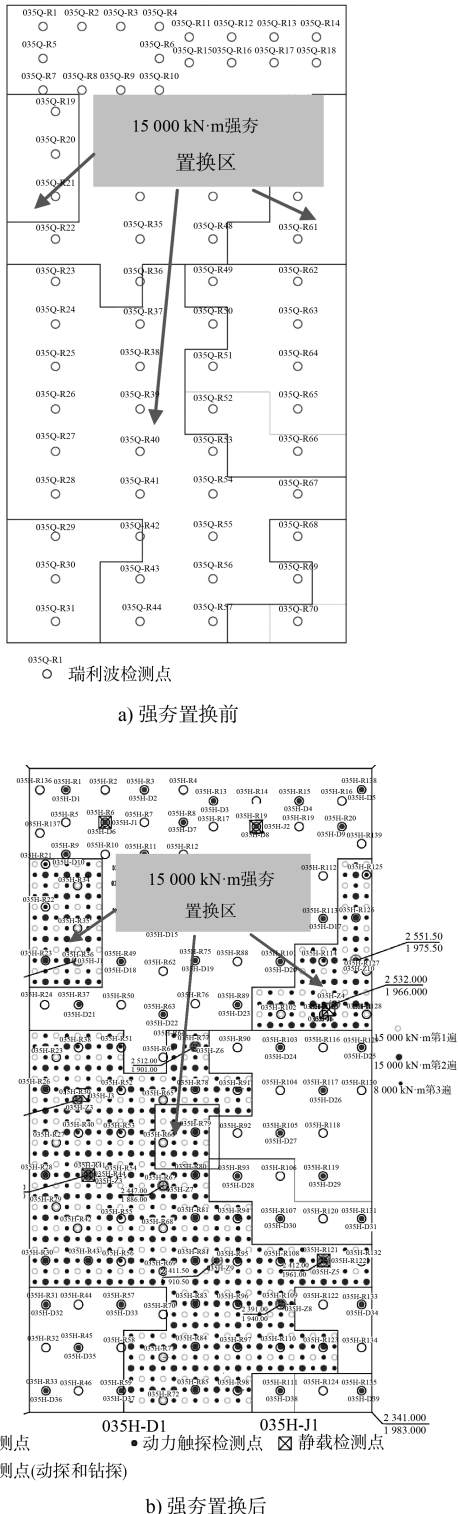


图 1 强夯置换前后检测布置

3 强夯置换处理效果分析

3.1 置换墩着底检测

为查明置换墩着底情况, 判定强夯置换实际深度和加固影响深度, 采用钻探与多道瞬态面波测试相结合的方法, 对置换墩着底情况进行检测。选取 035H-Z1(第 3 遍点)、035H-Z2(第 1 遍点)、035H-Z3、Z4、Z5(第 2 遍点)共 5 个置换墩体, 采用特殊钻探工艺及专用钻探器具进行钻孔检验, 钻进同时采用重型动力触探检测墩体及墩底以下土层的密实度及均匀性。5 个置换墩的现场检测结果揭示置换墩墩底埋深较浅。为排除钻孔未在置换墩中心的可能性, 辅助完成了 035H-Z9 和 Z10(第 2 遍点)钻孔检验。图 2 为典型置换墩钻孔柱状图。

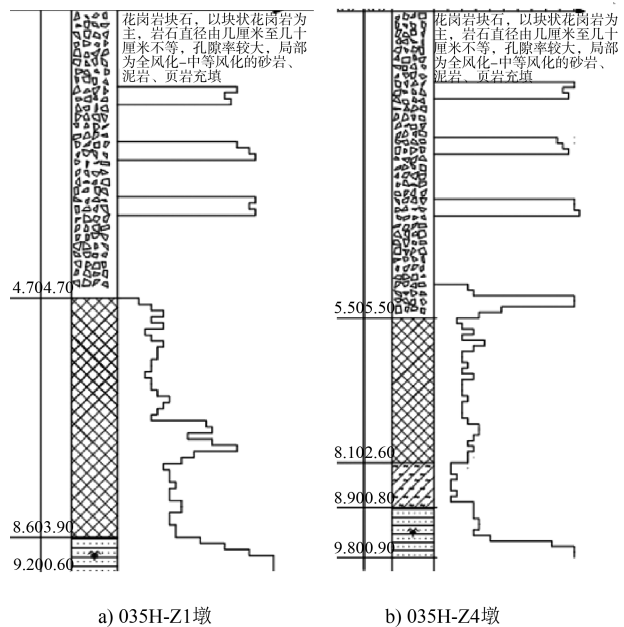


图 2 置换墩典型钻孔柱状图 (单位: m)

置换墩钻孔检验结果揭示: 第 1 遍、第 2 遍点(主夯点)墩体墩底埋深在 4.7~6.4 m, 第 3 遍点(加强夯)墩体墩底埋深为 4.7 m。

3.2 多道瞬态瑞利波测试

3.2.1 钻孔与瑞利波比较分析

共完成 26 个点的强夯置换前多道瞬态瑞利波检测和 60 个点的置换墩墩体瑞利波检测(其中 26 个点与夯前检测点对应)。

通过对置换墩体强夯置换前后瑞利波频散曲线对比分析(图3),第1遍、第2遍点(主夯点)墩体底部埋深范围为4.0~8.0 m,第3遍点(加强夯)墩体底部埋深范围为3.7~5.2 m。第1遍、第2遍点强夯置换处理效果明显好于第3遍点。7个钻孔点通过钻孔测出的置换墩墩底埋深分别为4.7、5.0、4.7、5.5、5.0、6.4、5.1 m,通过瑞利波推断的埋深分别为4.5、5.2、5.0、5.2、4.8、6.3、6.4、5.0 m,两种方法偏差在0.1~0.3 m,表明瑞利波检测出的置换墩深度与钻孔检测结果基本一致。根据瑞利波频散曲线推断出的置换墩墩底埋深,绘制了主夯点的置换墩墩底埋深等值线(图4)。

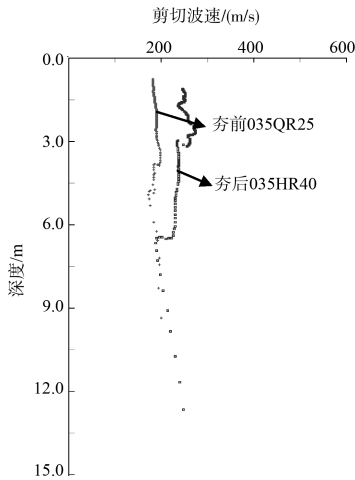


图3 典型频散对比曲线

根据瑞利波测值可换算出平均等效剪切波,由强夯前后对应的26个瑞利波测点测试结果,得出的强夯前后地基土分层等效剪切波速列于表2中,由强夯置换后60个瑞利波测点测试结果,得出的强夯置换后分层等效剪切波速等值线见图5。

表2 地基土分层等效剪切波速强夯置换前后对比

| 深度范围/m | 分层波速范围/(m/s) | | 平均值/(m/s) | | 提高率/% |
|-----------|--------------|---------|-----------|-----|-------|
| | 夯前 | 夯后 | 夯前 | 夯后 | |
| 0.0~1.0 | 160~276 | 228~295 | 219 | 261 | 19 |
| 1.0~2.0 | 167~280 | 225~290 | 221 | 261 | 18 |
| 2.0~3.0 | 153~272 | 213~302 | 215 | 259 | 21 |
| 3.0~4.0 | 153~268 | 213~292 | 214 | 259 | 21 |
| 4.0~5.0 | 164~268 | 195~328 | 217 | 249 | 14 |
| 5.0~6.0 | 165~267 | 192~328 | 218 | 249 | 14 |
| 6.0~7.0 | 176~269 | 206~330 | 223 | 252 | 13 |
| 7.0~8.0 | 175~272 | 202~330 | 224 | 253 | 13 |
| 8.0~9.0 | 186~374 | 223~369 | 264 | 288 | 9 |
| 9.0~10.0 | 186~375 | 221~369 | 265 | 284 | 7 |
| 10~11.0 | 187~378 | 213~372 | 267 | 274 | 3 |
| 11.0~12.0 | 187~377 | 211~373 | 267 | 275 | 3 |
| 12.0~13.0 | 187~413 | 215~431 | 288 | 293 | 2 |
| 13.0~14.0 | 192~413 | 217~431 | 288 | 293 | 2 |
| 14.0~15.0 | 205~421 | 213~438 | 292 | 295 | 1 |

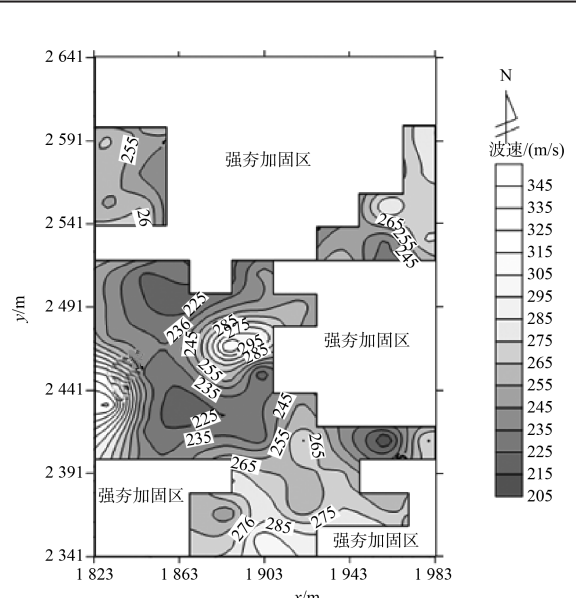
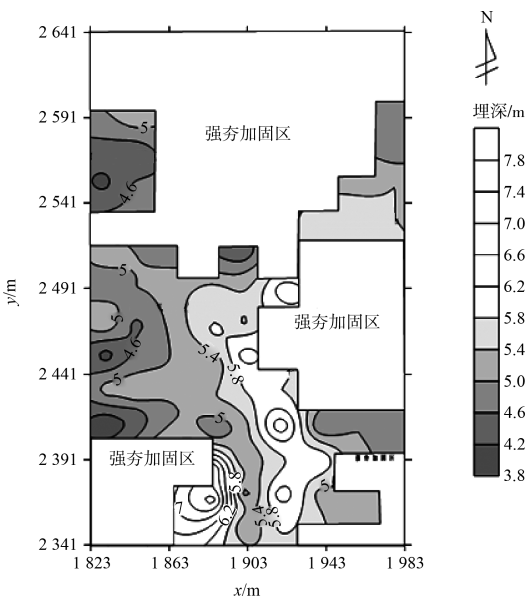


图4 主夯点置换墩墩底埋深等值线

a) 0~6 m

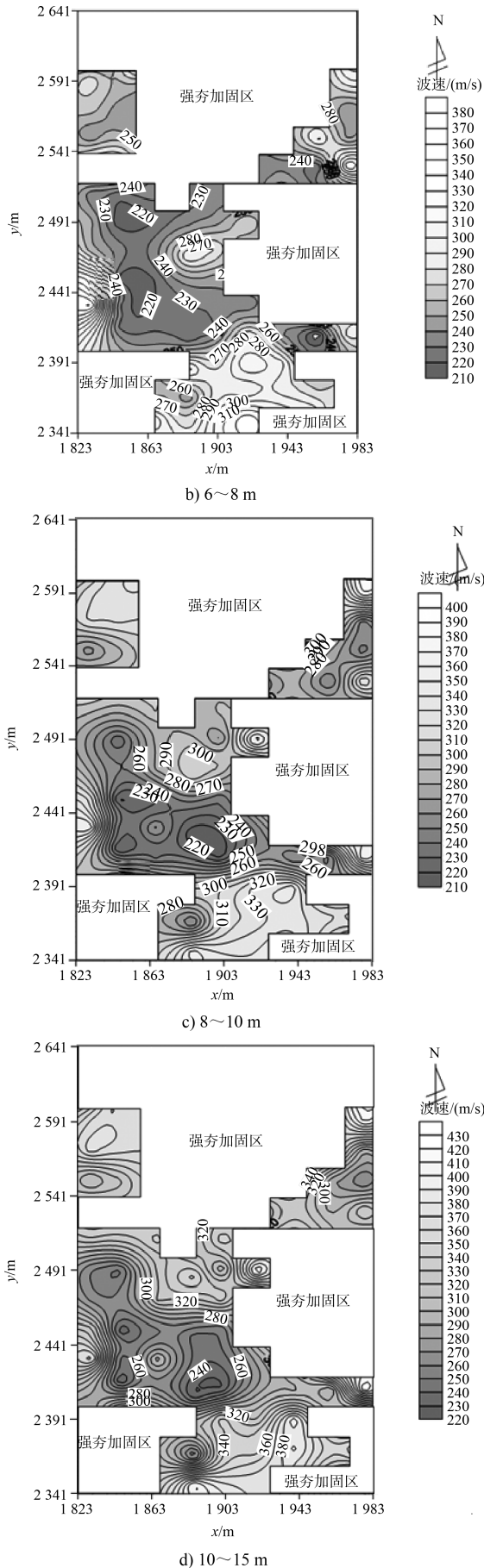


图 5 分层等效剪切波等值线

由强夯置换前后分层等效剪切波速分层结果和夯后分层等效剪切波速等值线图分析得出: 0~6.0 m 深度范围的强夯置换加固效果显著, 夯后波速较高, 分层平均等效剪切波速范围为 249~261 m/s, 夯后等效剪切波速较夯前提高 14%~21%, 波速比较均匀, 均匀性较好, 属于强夯置换层; 6.0~8.0 m 深度范围强夯置换加固效果较好, 分层平均等效剪切波速约为 250 m/s, 夯后等效剪切波速较夯前提高 13%, 均匀性一般, 属于强加固层。8.0~10.0 m 深度范围夯前分层等效剪切波均较高, 夯后分层平均等效剪切波速为 280 m/s 左右, 提高了 7%~9%, 加固效果稍差, 均匀性较差, 属于软加固层。10.0 m 以下深度范围夯后分层平均等效剪切波速较夯前提高率为 1%~3%, 为加固影响深度以下的土层。结合瑞利波频散对比曲线及波速深度映像剖面图, 综合判定 15 000 kN·m 能级强夯置换有效加固深度为 7.0~10.0 m, 图 6 为强夯置换有效加固深度等值线。

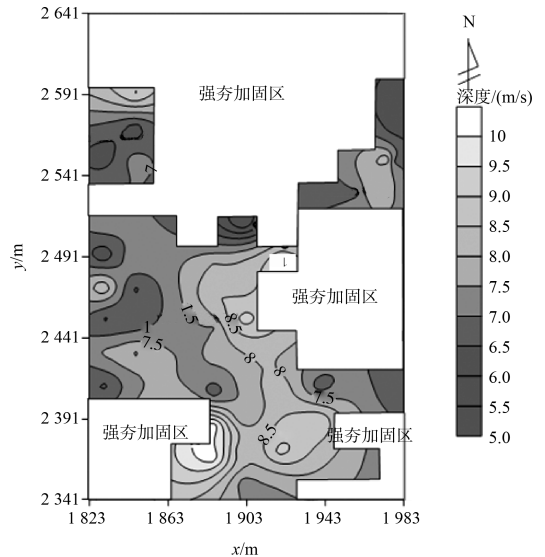


图 6 强夯置换有效加固深度等值线

3.3 夯后超重型动力触探

为确定强夯置换墩墩体的扩径大小及墩间土的情况, 选取 035H-Z1~Z8 共 8 个置换墩, 在每个置换墩周边各布置 5 处重型动力触探检测点 (置换墩边垂直方向 2 个动力触探检测点, 内、外侧各 1 个测点, 墩间土上布置 1 个测点), 布置方式

见图7。典型重型动力触探试验曲线见图8。

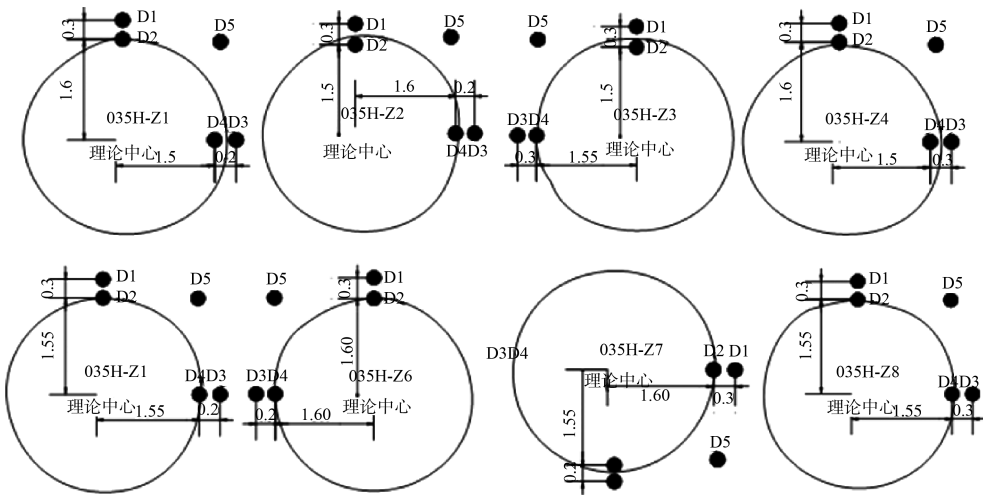


图7 置换墩重型动力触探测点布置方式

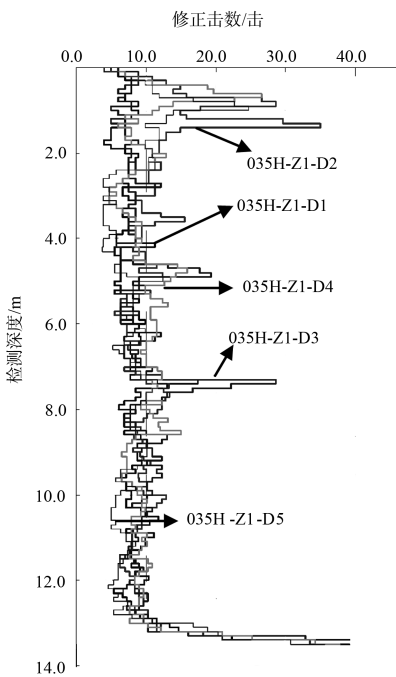


图8 典型重型动力触探曲线

动力触探在墩间土能够连续贯入，击数一般相对变化不大；但遇到块石时，动探击数会在局部深度异常偏高，甚至难以贯入，据此现象可推测动探击数异常偏高位置为置换墩墩体边缘，墩体在击数偏高深度范围内扩径。通过各置换墩动探曲线形态分析，并结合置换墩与夯间土动探击数对比，判定出各墩体扩径深度、扩径大小与墩径大小，具体结果见表3。

表3 置换墩重型动力触探检测结果

| 置换墩编号 | 检测点编号 | 距墩体中心/m | 扩径点深度/m | 估测墩径/m |
|---------|------------|---------|---------|--------|
| 035H-Z1 | 035H-Z1-D2 | 1.60 | 1.4 | 3.10 |
| | 035H-Z1-D4 | 1.50 | 2.2 | |
| 035H-Z2 | 035H-Z2-D2 | 1.50 | 1.4 | 3.25 |
| | 035H-Z2-D3 | 1.70 | 1.9 | |
| 035H-Z3 | 035H-Z3-D2 | 1.50 | 2.8 | 3.05 |
| | 035H-Z3-D4 | 1.55 | 2.1 | |
| 035H-Z4 | 035H-Z4-D2 | 1.60 | 1.3 | 3.15 |
| | 035H-Z4-D4 | 1.60 | 3.3 | |
| | 035H-Z4-D4 | 1.50 | 2.0 | |
| 035H-Z5 | 035H-Z5-D3 | 1.75 | 0.9 | 3.15 |
| | 035H-Z5-D4 | 1.55 | 1.3 | |
| 035H-Z6 | 035H-Z6-D2 | 1.60 | 3.3 | 3.20 |
| | 035H-Z6-D4 | 1.60 | 3.0 | |
| 035H-Z7 | 035H-Z7-D2 | 1.60 | 1.4 | 3.15 |
| | 035H-Z7-D4 | 1.55 | 3.4 | |
| 035H-Z8 | 035H-Z8-D2 | 1.55 | 1.4 | 3.10 |
| | 035H-Z8-D4 | 1.55 | 3.6 | |
| 035H-Z8 | 035H-Z8-D4 | 1.55 | 1.6 | 3.10 |
| | 035H-Z8-D4 | 1.55 | 2.5 | |

综合重型动力触探检测结果，根据修正后动探贯入击数划分的置换墩墩体及墩体边缘、墩间土的密实度情况列于表4中。由表4可知：1) 置换

墩墩体为高强度花岗岩块(碎)石,强夯置换墩体呈中密—密实状,墩体强度高,墩底以下 2.0~3.0 m 范围内填土强夯挤密效果好,动力触探击数较高;2)墩体边缘地基土强夯挤密效果显著,强度提高明显,动力触探击数较高;3)墩间土地基土强夯挤密效果较好,强度提高明显,动力触探击数较强夯置换前显著提高。综合置换墩、

墩体边缘及墩间土动力触探检测结果,判断出强夯置换有效加固深度在 8~10 m,动力触探揭示的墩底埋深及有效加固深度均与瑞利波测试估算结果基本一致。置换墩墩体、墩体边缘地基土及墩间地基土的承载力特征值及压缩模量均能满足设计要求(地基承载力特征值 ≥ 200 kPa,压缩模量 ≥ 20 MPa)。

表 4 置换墩墩体及墩体边缘、墩间土密实度检测结果

| 深度范围/m | 墩体 | | | 墩体边缘 | | | 墩间土 | | | 说明 |
|--------|------|----------------------|-----------------|------|----------------------|-----------------|------|----------------------|-----------------|-------|
| | 平均击数 | 承载力特征值 f_{ak} /kPa | 压缩模量 E_s /MPa | 平均击数 | 承载力特征值 f_{ak} /kPa | 压缩模量 E_s /MPa | 平均击数 | 承载力特征值 f_{ak} /kPa | 压缩模量 E_s /MPa | |
| 0~6 | 26.5 | 400 | 35 | 12.0 | 280 | 25 | 7.8 | 210 | 20 | 置换层 |
| 6~8 | 11.9 | 300 | 25 | 10.1 | 260 | 23 | 8.9 | 240 | 21 | 有效加固层 |
| 8~10 | 10.2 | 260 | 23 | 9.9 | 250 | 22 | 8.5 | 230 | 20 | 加固影响层 |

3.4 静载荷试验

静载荷试验包括置换墩体上的 2 组“4 倍地基承载力特征值”静荷载试验(试验点编号分别为 035H-J4 和 035H-J5)和置换墩间土上进行的 2 组破坏性静载荷试验(试验点编号分别为 035H-J3 和 035H-J6)。根据静载试验实测结果,绘制荷载-沉降曲线(图 9),4 组静载试验结果见表 5。

035H-J4 和 035H-J5 试验点荷载试验结果显示,置换墩体地基承载力特征值 ≥ 400 kPa,加固效果好;置换墩间土进行的 2 组破坏性静载荷试验,试验点 035H-J3 在加至 500 kPa 时,沉降 96.34 mm,大于 84.84 mm(对应承压板边长 $d = 1.414$ m 的 0.06 倍),终止加荷,置换墩间土地基

承载力极限值 450 kPa,地基承载力特征值 165 kPa。试验点 035H-J6 在加至 500 kPa 时,沉降 90.69 mm,大于 84.84 mm,终止加荷,置换墩间土地基承载力极限值 450 kPa,地基承载力特征值 225 kPa。

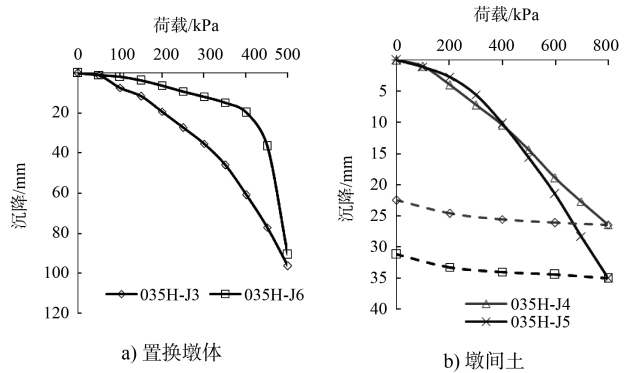


图 9 置换墩体和墩间土静载试验曲线

表 5 15 000 kN·m 能级强夯置换静载试验结果

| 检测位置 | 试验点号 | 最大试验荷载 | | 地基承载力特征值 | | 压缩模量估算值/MPa | 承压板深度/m |
|------|---------|--------|----------|----------|----------|-------------|---------|
| | | 荷载/kPa | 对应沉降量/mm | 荷载/kPa | 对应沉降量/mm | | |
| 墩间土 | 035H-J3 | 500 | 96.34 | 165 | 14.10 | 15.0 | 0.4 |
| | 035H-J6 | 500 | 90.69 | 225 | 7.55 | 29.0 | 0.4 |
| 墩体 | 035H-J4 | 800 | 26.40 | 400 | 10.41 | 35.0 | 0.4 |
| | 035H-J5 | 800 | 35.05 | 400 | 10.15 | 35.0 | 0.4 |

根据静载试验结果,墩间土承载力特征值为 165~225 kPa,墩体承载力特征不小于 400 kPa。强夯置换区按复合地基计算,地基承载力特征值 ≥ 200 kPa,压缩模量 ≥ 20 MPa。

3.5 强夯置换区加固效果综合评价

综合钻孔检测、瑞利波测试及重型动力触探结果,置换墩墩底埋深范围为 4.0~8 m,置换墩径范围为 3.05~3.25 m;15 000 kN·m 能级强夯置

换有效加固深度 7.0~10.0 m, 其平均有效加固深度 9.0 m 左右。场地强夯置换后风化岩以上复合地基的地基承载力特征值和压缩模量建议值见表 6。

表 6 强夯置换区地基承载力特征值和压缩模量建议值

| 分层深度/m | 墩体 | | 墩间土 | | 加固后地基承载力建议值 | |
|----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|
| | f_{ak}/kPa | E_s/MPa | f_{ak}/kPa | E_s/MPa | f_{ak}/kPa | E_s/MPa |
| 0~4.0 | 400 | 35 | 210 | 19 | 260 | 23 |
| 4.0~6.0 | 400 | 35 | 210 | 19 | 240 | 21 |
| 6.0~8.0 | 300 | 25 | 240 | 21 | 240 | 21 |
| 8.0~10.0 | 250 | 22 | 210 | 19 | 220 | 20 |

4 结语

1) 该场地强夯置换加固处理后, 置换墩边缘及墩间土挤密效果良好, 地基强度有明显提高。15 000 kN·m 能级强夯置换墩墩底埋深 4.6~8.0 m, 置换墩径范围为 3.05~3.25 m, 15 000 kN·m 能级强夯置换有效加固深度 7~10 m, 平均有效加固深度约为 9.0 m。

2) 该场地在强夯有效加固深度范围内, 强夯置换复合地基承载力特征值>200 kPa, 压缩模量>20.0 MPa, 满足设计要求。

3) 墩体边缘动探曲线特征及现场开挖结果显示置换墩体形态极不规则, 大体呈椭圆状, 平均直径约为 3.1 m。

4) 采用强夯置换法对地基进行处理, 置换墩体与墩间土之间存在显著的不均匀性, 由于回填料的差异, 强夯置换区和周边普通强夯区之间也

存在显著的差异, 因此设计时应充分考虑到强夯后地基土的不均匀性。

参考文献:

- [1] 徐东升, 汪稔, 孟庆山, 等.海相淤泥软土地基强夯置换砂桩试验分析[J].岩土力学, 2009, 30(12): 3 831-3 836.
- [2] 王宏祥, 闫澍旺, 冯守中.强夯置换墩法处理公路软基的机制研究[J].岩土力学, 2009, 30(12): 3 753-3 758.
- [3] 白冰, 徐华轩, 刘海波, 等.强夯置换法处理松软土地基若干问题研究[J].岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 3 001-3 006.
- [4] 张彧, 房建宏, 刘建坤, 等.强夯置换复合地基加固盐渍土效果的试验研究[J].岩土工程学报, 2011, 33(S1): 258-261.
- [5] 水伟厚.对强夯置换概念的探讨和置换墩长度的实测研究[J].岩土力学, 2011, 32(S2): 502-506.
- [6] 郑凌透, 周风华, 谢新宇.强夯置换中碎石运动机制和成墩过程的数值模拟[J].岩土工程学报, 2013, 35(11): 2 068-2 075.
- [7] 郑凌透, 周风华.强夯置换软土中碎石墩形成过程的试验研究[J].岩土力学, 2014, 35(1): 90-97.
- [8] 刘红军, 吴腾, 马江, 等.基于孔压监测的强夯置换和砂井-强夯处理饱和软土地基试验研究[J].中国海洋大学学报: 自然科学版, 2015, 45(2): 109-114.
- [9] 张成光.抛石挤淤及强夯置换在软基处理中的应用[J].水运工程, 2015(2): 165-169.
- [10] 谢仁追.强夯置换法应用关键技术[J].水运工程, 2009(5): 128-132.

(本文编辑 武亚庆)

《水运工程》杂志微信公众号开通

《水运工程》杂志微信公众号于 2017 年 1 月 1 日起正式开通运营。

此公众号专属《水运工程》杂志, 旨在宣传水运工程的科技成果, 报道相关学科的新技术、新材料、新设备和新工艺, 以及《水运工程》理事会的最新动态。愿《水运工程》微信公众号成为您与我们沟通的新平台。

