

不同土质条件下高能级强夯加固效果测试与对比分析

年廷凯¹, 李鸿江², 杨庆¹, 陈允进³, 王玉立⁴

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室/岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024; 2. 中化岩土工程有限公司, 北京 102600;

3. 中交水运规划设计院, 北京 100007; 4. 辽宁水文地质工程地质勘察院, 辽宁 大连 116037)

摘 要: 为了探讨山谷型与滨海型两种不同土质条件下碎石回填地基的强夯加固效果, 开展了 8000 kN·m 能级的现场强夯对比试验; 同时考虑滨海大型工程建设地基处理施工的需要, 在沿海地区实施了 10000, 15000 kN·m 高能级强夯的现场试验。通过对各场地不同能级试夯前后地基动力触探与静力载荷试验结果的分析与对比研究, 得出如下结论:

①采用 8000 kN·m 夯击能处理山谷型厚层碎石回填地基, 其有效加固深度可达 10.0~11.5 m; 处理滨海型下卧软弱夹层且存在地下水的碎石回填地基, 其有效加固深度为 8.5~9.0 m; ②采用 10000 kN·m 夯击能处理滨海山前厚层碎石回填地基, 其有效加固深度为 12~12.5 m; ③采用 15000 kN·m 夯击能处理滨海型下卧软弱夹层且存在地下水的碎石回填地基, 其有效加固深度为 11.5 m; ④若采用梅纳公式的修正形式预估强夯的有效加固深度, 其修正系数取值范围建议为 0.29~0.40; 对于软弱下卧层浅、高地下水等不利情况应取低值, 对于回填碎石层厚、且级配较好时可取高值。

关键词: 高能级强夯; 碎石回填地基; 软弱下卧夹层; 动力触探测试; 有效加固深度; 山谷与滨海地区

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)01-0139-06

作者简介: 年廷凯(1971-), 男, 辽宁庄河人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程教学及边(滑)坡工程、软基处理与桩基工程等方面研究。E-mail: tknian@163.com。

Improvement effect of high energy dynamic compaction under complicated geological conditions

NIAN Ting-kai¹, LI Hong-jiang², YANG Qing¹, CHEN Yun-jin³, WANG Yu-li⁴

(1. Branch of Geotechnical Engineering, State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology,

Dalian 116024, China; 2. China Zhonghua Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 102600, China; 3. China Communications Planning

& Design Institute for Water Transportation, Beijing 100007, China; 4. Investigation Institute of Hydrogeology and Engineering Geology

of Liaoning Province, Dalian 116037, China)

Abstract: A series of experiments of high energy dynamic compaction (HEDC) with 8000, 10000, 15000 kN·m are conducted on rubble fill sites underlain by thin soft clay layers in coastal areas and in mountain valleys, respectively. The results of cone dynamic penetration test (DPT) and plate loading test (PLT) for several sites are systematically analyzed and compared with those before HEDC. Some conclusions concerning the effective depth of improvement (EDI) on the rubble fill sites in mountain valleys or those underlain by thin soft layers in coastal areas under various HEDC are drawn. It is recommended that the EDI should be pre-estimated by the revised Menard Formulation, with the revised coefficient within 0.29~0.40. Especially, the low value should be used under the condition of the thin soft strata and shallow groundwater levels.

Key words: high energy dynamic compaction; foundation on rubble fill site; thin soft stratum; dynamic penetration test; effective depth of improvement; mountain valley or coastal area

0 引 言

强夯加固效果的影响因素比较复杂, 可分为外因与内因两类^[1]。对于外因, 主要是施工工艺因素, 包括锤重、锤形、锤底面积、落距、夯点布置、夯点击数、夯击遍数(单位面积夯击能)、单点夯击能、间歇时间、夯坑填料等; 对于内因, 主要是与地基土有关的因素, 包括土的物理力学性质、不同土层的厚度

与埋藏顺序、地下水位等。目前现场试验研究多集中于强夯施工工艺与现场检测方面^[2-4], 而对不同土层的厚度与埋藏顺序, 特别是存在软弱下卧夹层与地下水

基金项目: 海岸和近海工程国家重点实验室基金项目(LP0608); 辽宁省博士启动基金项目(20071084)

收稿日期: 2007-08-14

等复杂条件的碎石回填地基强夯研究还很少开展,而这些是滨海碎石回填地区强夯设计与施工亟待解决的突出问题。为此,针对两个不同土质条件的碎石回填地基开展了8000 kN·m能级的现场强夯对比试验,同时对滨海碎石回填地基与下卧软弱夹层的碎石回填地基分别实施了10000 kN·m与15000 kN·m高能级强夯的现场试验。通过对强夯前后地基动力触探与静力载荷试验结果的综合分析,确定了相应地质条件下各能级强夯的有效加固深度,为现行地基处理技术规范^[5]中有关强夯部分的修订和发展提供实用参数,从而更有效地指导今后高能级强夯工程实践。

1 不同土质 8000 kN·m 强夯对比试验

1.1 山谷型碎石回填地基

(1) 工程地质概况

试验区位于山间沟谷中,先将原沟谷内薄层残积土清除至强风化岩面后回填2~3 m碎石素填土进行第一层强夯处理,而后再回填厚度约为10 m的碎石素填土进行第二层强夯处理。钻孔揭示试验区地层自上而下:①素填土,黄褐色,中密—密实,主要由石英岩碎石、板岩碎石及少量黏性土组成,碎块含量为50%~75%,平均粒径为0.6~12 cm,个别粒径大于20 cm,由室内颗粒分析试验确定其不均匀系数为12.0,曲率系数为1.7;②强风化辉绿岩,灰绿色,岩体具散体—碎裂结构,岩芯呈碎石土状,无地下水。

(2) 强夯试验方案

试验区内强夯布点形式为8.0 m×8.0 m的四方形,三遍点夯、一遍满夯的施工工艺,见图1。点夯第一遍、第二遍夯击能为8000 kN·m,第三遍夯击能为3000 kN·m,满夯夯击能为2000 kN·m,且遍夯采取连续夯击。第一层回填土(基岩面以上、埋深10 m以下)采用3000 kN·m夯击能进行处理;加固后,素填土的地基承载力特征值为300 kPa,下伏强风化岩的地基承载力特征值为340 kPa,详见表1中D1测点的结果。

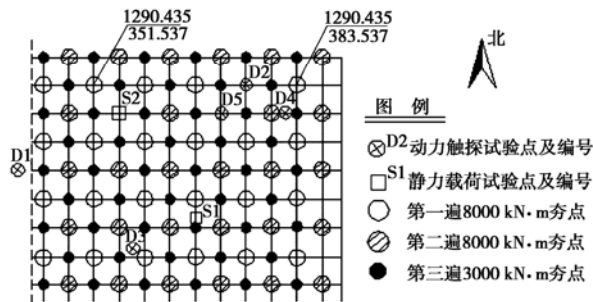


图1 试验区测试点平面位置示意图

Fig. 1 The arrangement of measuring points in test zone

(3) 动力触探与静力载荷试验及其结果分析

试夯结束后在试验区内布置2个静力载荷试验点与5个动力触探测试点(图1)。其中静载点S1位于夯间, S2位于夯点;动探点D1位于试夯区外, D2与D5位于夯点, D3与D4位于夯间。

现将5个动力触探测试孔DPT测试统计结果及各孔不同深度土层的地基承载力特征值列于表1。由表1夯前与夯后各孔对比可见,试验区经第二次强夯加固处理后10 m以上各层土的地基承载力特征值均不小于280 kPa,比夯前160 kPa提高显著,满足地基承载力特征值不小于270 kPa的设计要求;10 m以下素填土④地基承载力特征值为320 kPa,强风化岩地基承载力为340~360 kPa,比第一层加固处理后的地基承载力略有提高,但不显著。综合分析,8000 kN·m强夯的影响深度可达13 m,有效加固深度为10.0~11.5 m。

表1 试验区各动探孔不同深度土层 DPT 统计结果

Table 1 DPT results for different depth boreholes in test zone				
检测 点位	土层 分类	测试深度 /m	修正击 数/击	地基承载力 f_{ak}/kPa
D1 (试夯 区外)	素填土①	0~10.0	4	160
	素填土④	10.0~11.0	7	300
	强风化岩	11.0~11.5	8	340
D2 (夯点)	素填土①	0~6.0	9	360
	素填土②	6.0~8.1	8	320
	素填土③	8.1~10.0	7	280
	素填土④	10.0~12.0	8	320
D3 (夯间)	素填土①	0~6.0	9	360
	素填土②	6.0~8.0	8	320
	素填土③	8.0~10.0	7	280
	素填土④	10.0~11.5	8	320
	强风化岩	11.5~12.2	8	340
D4 (夯间)	素填土①	0~6.0	9	360
	素填土②	6.0~8.2	8	320
	素填土③	8.2~10.0	7	300
	素填土④	10.0~12.9	8	320
	强风化岩	12.9~13.5	9	360
D5 (夯点)	素填土①	0~6.0	10	400
	素填土②	6.0~8.0	8	340
	素填土③	8.1~10.0	7	300
	素填土④	10.0~13.1	8	320
	强风化岩	13.1~13.8	9	360

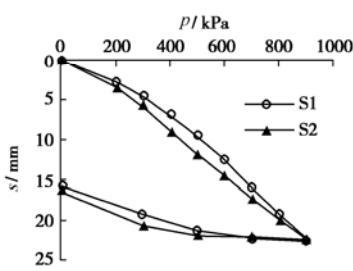


图2 2个静载点实测载荷—沉降关系曲线

Fig. 2 The curves of static load tests for two measuring points

静力载荷试验采用面积为2.25 m²的方形承压板,根据设计要求试验荷载调整为300 kPa的3倍量进行

加载并完成回弹试验, 获得的两个静载点载荷—沉降关系曲线见图 2。由图可见, 加载曲线基本上为直线关系, 未出现拐点或陡降段, 且沉降量较小, 由此表明在载荷试验影响深度范围内, 地基承载力特征值不小于 300 kPa; 结合有关规范, 得出 2 个静载点变形模量与回弹模量均高于 30 MPa, 强夯加固效果理想。

1.2 滨海型下卧软弱夹层的碎石回填地基

(1) 工程地质概况

场地处于陆域低山丘陵与海域水下岸坡之间, 且已通过人工回填方式形成陆域, 回填料为素填土, 含较多碎块石, 最大粒径在 40 cm 左右。填土成分不均匀, 填土表面略有起伏, 厚度变化较大, 平均在 8.0 m 左右, 最大回填厚度为 14.0 m。地下水位受海潮影响, 在地面以下 3.0~5.0 m 波动。根据试验区夯前钻孔揭露, 场地地层自上而下划分为 5 层: ①素填土, 黄褐色, 稍湿—湿, 松散—稍密, 主要由石英岩、辉绿岩与板岩碎块及少量黏性土组成, 碎块含量 60% 左右, 土的颗粒级配较差, 承载力较低; ②粉细砂或含砾粉细砂, 灰黑色, 饱和, 松散—稍密, 含少量石英质砾石及贝壳碎片, 分布较连续, 层厚在 0.5~3.5 m 不等, 为海相成因, 工程地质性质较差, 局部存在可液化点; ③粉质黏土, 灰黄色, 饱和, 软塑—可塑, 局部可塑—硬塑, 含少量砂和砾, 分布连续, 层厚在 0.8~3.0 m 不等, 为海陆交互相成因, 其工程地质性质较差, 承载力偏低, 为一下卧软弱层; ④碎砾石, 黄褐色, 饱和, 稍密—中密, 碎石以石英质为主, 次棱角状, 粒径为 2~4 cm, 碎砾石含量为 50%~60%, 孔隙间充填黏性土及少量砂, 分布连续, 层厚在 0.5~5.0 m, 工程地质性质较好; ⑤强—中风化板岩。灰黄褐色, 岩芯呈碎块状, 用手可折断, 具散体结构, 岩体基本质量等级为 V 级。

(2) 强夯试验方案

强夯试验采用 8.0 m×8.0 m 四方形布点形式, 三遍点夯、一遍满夯施工工艺, 两遍夯击之间的时间间隔为 2 周; 其中点夯第一、二遍夯击能为 8000 kN·m, 第三遍为 4000 kN·m, 满夯为 2000 kN·m, 如图 3 示。设计要求处理后各土层地基承载力特征值不小于以下数值: 素填土 270 kPa, 粉细砂 170 kPa, 粉质黏土 180 kPa。

(3) 动力触探与静力载荷试验及其结果分析

强夯结束时在试夯区外布置 1 个动力触探测试点 (编号为 D5), 区内布置 3 个动力触探测试点与 2 个取样钻孔 (编号为 Z2 与 Z6, 取原状土样 6 组) 及 2 个静力载荷试验点, 各测试点均位于夯间, 如图 3 所示; 为进一步考查下卧软黏土夹层由孔压消散所引起的地基固结程度及强度变化状况, 试夯结束 20 d 后又

在试验区布置 4 个取样钻孔 (编号为 Z7—Z10, 如图 3), 取原状样 7 组。现将 4 个动力触探测试孔 DPT 与 SPT 测试统计结果及 6 个取样钻孔室内土工试验所获得的地基承载力特征值列于表 2。其中动力触探与标贯试验确定地基承载力特征值依据文献[6], 以下同。

表 2 动力触探与标准贯入试验及钻孔取样土工试验结果

Table 2 The results for DPT, SPT and soil tests				
检测 点位	土层 分类	测试深度 /m	修正击数 /击	地基承载力 f_{ak} /kPa
D5 (试验 区外)	素填土	0~8.3	3	120
	粉细砂	8.3~9.4	10	140
	粉质黏土	9.4~10.5	4	125*
	碎砾石	10.5~11.4	8	320
	强风化岩	11.4~12.3	13	500
D1 (夯间)	素填土	0~7.7	8	320
	粉细砂	7.7~8.9	14	172
	粉质黏土	8.9~10.4	4	125*
	碎砾石	10.4~11.6	8	320
	强风化岩	11.6~12.7	13	500
D3 (夯间)	素填土	0~7.4	8	320
	粉细砂	7.4~8.5	14	172
	粉质黏土	8.5~10.2	4	125*
	碎砾石	10.2~11.1	8	320
	强风化岩	11.1~12.0	13	500
D4 (夯间)	素填土	0~7.6	8	320
	粉细砂	7.6~8.6	14	172
	粉质黏土	8.6~9.8	4	125*
	碎砾石	9.8~10.9	8	320
	强风化岩	10.9~11.7	13	500
Z2 (夯间)	粉质黏土	8.7~10.1	4	125*
Z6 (夯间)	粉质黏土	8.5~9.9	4	125*
Z7-Z10 (夯间)	粉质黏土	8.4~9.9	4	125*

注: 表中带“*”数值为利用现场标准贯入试验并结合室内土工实验获得。

由表 2 可见, 经强夯处理后表层素填土的地基承载力提高显著, 粉细砂层的地基承载力也有一定改善, 但下卧的软弱黏土层及其下的碎砾石层改善不明显; 由此说明 8000 kN·m 夯击能处理下卧软弱黏性土且存在地下水的碎石回填地基, 其冲击波未能穿透粉细砂与黏性土层, 或被二者部分吸收所致, 不能达到预期效果。此外, 对试夯结束时从 Z2 与 Z6 钻孔、20 d 后从 Z7~Z10 钻孔所提取的原状土样进行了室内常规土工实验。通过对两次试验所获得的孔隙比、液性指数、压缩系数、压缩模量、固结系数与渗透系数等的对比分析, 认为地基土的强度与承载力没有发生明显改善, 由此进一步说明强夯对下卧软黏土层影响较小。综合以上分析认为, 强夯的有效加固深度为 8.5~9.0 m。

静力载荷试验采用面积为 4.0 m² 的方形承压板, 以地基承载力特征值 270 kPa 的 2 倍进行加载, 获得的 2 个静载点的实测载荷—沉降关系曲线如图 4 所示。由图可见, 曲线基本上为直线, 无明显拐点或陡降段,

且沉降量不大,由此表明在静力载荷试验影响深度范围内,地基土的承载力特征值不小于 270 kPa;结合有关规范得出 2 个静载点的变形模量均大于 25.0 MPa。

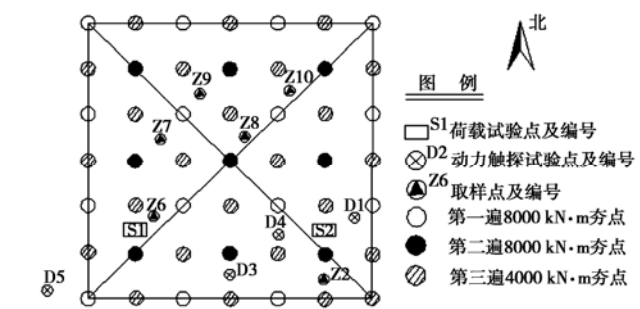


图 3 试验区夯点及测试点平面布置示意图

Fig. 3 The drop points and measuring points in test zone

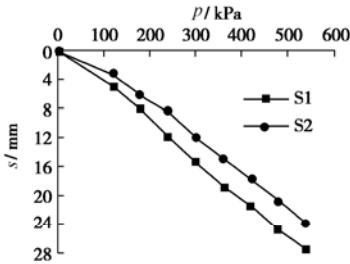


图 4 2 个静载点实测载荷 - 沉降关系曲线

Fig. 4 The curves of static load tests for two points

2 滨海山前碎石地基 10000 kN·m 强夯试验

2.1 工程地质概况及强夯试验方案

试验区位于滨海山前缓坡地带,在原有全 - 强风化岩或含碎石黏土的基础上采用开山混合碎石土进行回填,钻孔揭示地层自上而下:①素填土,黄褐色,中密,稍湿一湿,主要由石英岩碎块、板岩碎块及少量黏性土等组成,碎块含量在60%左右,粒径为4~30 cm,大者大于35 cm;②含碎石黏土,黄褐色,稍湿,可塑,碎石含量在30%左右,碎石粒径1~6 cm;③强风化板岩,黄褐色,稍湿,岩体具散体结构,岩芯呈碎块状,碎石土状。

强夯试验采用10 m×10 m的正方形布点形式,三遍点夯、一遍满夯的施工工艺;遍夯采取连续夯击方式,其中第一遍、二遍夯击能为10000 kN·m,第三遍夯击能为4000 kN·m,满夯夯击能为2000 kN·m,夯点布置如图5所示。设计要求强夯处理后地基土承载力特征值不小于250 kPa,压缩模量不小于12 MPa。

2.2 动力触探测试及结果分析

试夯结束后在场地内布设 3 个动力触探测试孔(编号为 D1~D3)与 1 个取样孔(编号为 Z4),其中 D1 号孔位于第二遍 10000 kN·m 夯点, D2、D3

与 Z4 号孔位于夯间。现将 3 个动力触探孔测试统计结果及相应的地基承载力特征值列于表 3,取样孔 Z4 确定地下水位埋深为 4.0 m,其碎石土的平均含水量在地下水位以上为 6.5%,水位以下为 14.1%。

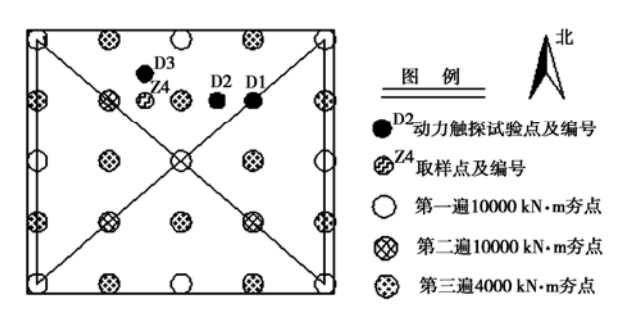


图 5 试验区夯点及测试点平面布置示意图

Fig. 5 The drop points and measuring points in test zone

由表 3 可见,强夯后素填土的地基承载力特征值为 320~360 kPa,含碎石黏土的地基承载力特征值为 240 kPa,强风化板岩的地基承载力特征值为 360~400 kPa;通过与该区夯前地勘报告比对, D3 号孔下部含碎石黏土层与强风化岩层地基承载力没有变化,而上部素填土层地基承载力增加显著。综合分析认为,10000 kN·m 强夯的有效加固深度可达 12~12.5 m。

表 3 试验区各动探孔不同深度土层 DPT 统计结果

Table 3 DPT results for different depth boreholes in test zone

检测点位	土层分类	测试深度 /m	修正击数/击	地基承载力 f_{ak} /kPa
D1 (夯点)	素填土	0.2~8.9	9	360
	强风化岩	8.9~9.6	10	400
D2 (夯间)	素填土	0.2~9.5	9	360
	强风化岩	9.5~10.1	10	400
D3 (夯间)	素填土	0.2~12.5	8	320
	含碎石黏土	12.5~13.4	6	240
	强风化岩	13.4~14.2	9	360

3 滨海下卧软弱层地基 15000 kN·m 强夯

3.1 工程地质概况与强夯试验方案

15000 kN·m能级强夯试验场地,其地质条件与1.2节中滨海型下卧软弱夹层的碎石回填地基8000kN·m强夯试验条件相似,处于同一地质地貌单元。强夯主机采用最新研制的CGE-1800系列强夯机,自动遥控装置系统;夯锤选用直径为2.5 m、重量达45 t的铸钢锤,夯锤落距为33.3 m。强夯试验布点方案如图6所示,15000 kN·m能级第一遍、第二遍夯点间距为10 m×10 m,停夯标准为最后两击的平均夯沉量不大于20 cm,夯击次数约为25击,中间适时采用开山碎石土回填夯坑再强夯;然后在第一、二遍相邻两个主夯点中间插点,采用8000 kN·m能级第三遍强夯;满夯采用

3000 kN·m能级, 每点夯击数为2击, 要求夯印彼此搭接1/3。两遍夯击之间的时间间隔为2周。设计要求经强夯处理后的地基承载力特征值同1.2节中的(2)。

3.2 强夯地基动力触探测试及结果分析

15000 kN·m强夯试验区夯前布置动力触探测试孔3个(其中1个孔兼取样), 夯后布置动力触探孔2个, 取样孔1个, 如图6所示。现将Zk2、Zk3孔夯前与夯后动力触探测试结果列于表4, 夯前Zk1孔、夯后Zk4孔(夯后3个月)室内土工实验结果列于表5。其中粉细砂、粉质黏土层采用标准贯入试验测试。

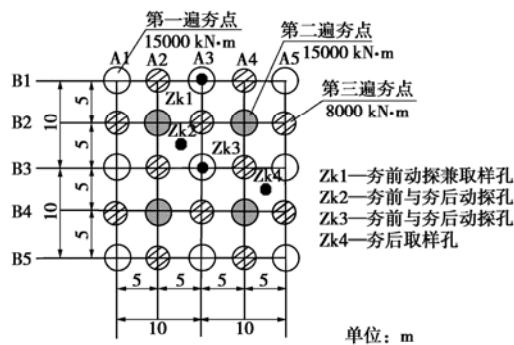


图6 15000 kN·m 试验区夯点布置及监测与检测点布置
Fig. 6 The arrangement of monitoring and measuring points in the 15000 kN·m test zone

由表4位于夯点的Zk3孔夯前与夯后动力触探测试结果分析可见, 强夯后厚层素填土的地基承载力特征值提高近3倍, 粉质黏土提高50%, 粉细砂与碎砾石也均有20%以上的增幅; 位于夯间的Zk2孔其地基

承载力特征值也有明显提高, 但幅度稍小。由表5夯前Zk1孔与夯后Zk4孔土工试验结果的对比分析可见, 夯后粉质黏土的孔隙比、液性指数、压缩系数均有明显改善, 其对应300~400 kPa压力时的压缩模量提高了80%以上。由表4、5的综合分析认为, 本次试验场地强夯的影响深度已达到碎砾石层, 其有效加固深度为11.5 m左右。

4 不同土质条件各能级加固深度讨论

规范^[5]采用表6.2.1预估强夯地基的有效加固深度, 但其单击夯击能范围为1000~8000 kN·m, 不能满足当前更高能级地基处理施工的需要, 而且也未考虑互层土或软弱夹层有地下水等复杂地质条件。为此建议采用梅纳公式修正形式预估强夯的有效加固深度

$$h = \alpha \sqrt{MH} \quad (1)$$

式中, h 为有效加固深度(m), M 为锤重(t), H 为落距(m), α 为小于1的修正系数, 与土质条件有关。根据已有研究^[1, 5], 对于中低能级强夯, 其修正系数的取值范围大致为0.34~0.80^[5]或0.3~0.8^[1]。对于高能级强夯, 根据本次对比试验研究, 表6列出了不同土质条件下各能级强夯的有效加固深度参考数值及相应的梅纳公式修正系数范围。分析表6可见, 下卧软弱夹层、地下水等不良地质条件对碎石回填地基的有效加固深度影响是显著的, 当采用梅纳公式预估强夯的有效加固深度时其修正系数取值范围建议为0.29~

表4 试验区夯前与夯后各土层动力触探测试结果对比

Table 4 Comparison of the DPT values of Zk2 and Zk3 boreholes before and after dynamic compaction of 15000 kN·m

测试孔号	土层分类	测试深度/m		修正击数/击		地基承载力特征值 f_{ak} /kPa		
		夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后	增幅/%
Zk2 (夯间点)	素填土	0~8.6	0.4~8.0	3	8	120	320	167
	粉细砂	8.6~10.9	8.0~9.7	10	14	140	172	23
	粉质黏土	10.9~12.7	9.7~11.2	4	7	125	190	52
	碎砾石	12.7~13.4	11.2~11.7	8	9	320	360	13
Zk3 (15000kN·m 夯点)	素填土	0~8.3	0.4~8.5	3	11	120	440	275
	粉细砂	8.3~10.2	8.5~9.8	10	14	140	172	23
	粉质黏土	10.2~11.8	9.8~10.9	4	7	125	190	52
	碎砾石	11.8~12.4	10.9~11.5	8	10	320	400	25
			11.5~12.5	8	8	320	320	0

注: 表中粉质黏土含少量砂和砾, 其夯后地基承载力特征值由现场标贯试验并参考强夯结束3个月后钻孔取样室内土工试验结果综合给出。

表5 粉质黏土夯前与夯后物理力学性质差异

Table 5 Differences between physical and mechanical behaviors of silty clay before and after dynamic compaction of 15000 kN·m

孔号	取土深度/m	土的基本物理性质								固结特性		承载力特征值 f_{ak} /kPa
		w /%	ρ_o /(g·cm ⁻³)	e_o	S_r /%	w_L /%	w_p /%	I_p	I_L	a_{v1-2} /(MPa ⁻¹)	压缩模量 /MPa	
											E_{s1-2} E_{s3-4}	
Zk1 (夯前)	9.7~11.3	34.7	2.01	0.95	98.7	37.3	21.4	15.9	0.84	0.58	2.45 4.75	120
Zk4 (夯后3个月)	9.0~10.2	32.3	2.06	0.82	100	37.0	21.5	15.6	0.69	0.44	4.55 8.84	180

表 6 不同土质条件下高能级强夯的有效加固深度及梅纳公式修正系数参考值

Table 6 Effective improvement depths of high energy DC and revised coefficients of Menard formulation in different soils

单击夯击能/(kN·m)	土质类别或多层土组合	有效加固深度/m	梅纳修正系数
8000	山谷型厚层碎石回填土：最大粒径 20 cm 左右，颗粒级配较好，且无地下水。	10.0~11.5	0.35~0.40
8000	滨海型下卧软弱夹层的厚层碎石回填土：回填碎石厚度约 8.0 m，最大粒径 40 cm 左右，颗粒级配差；下卧 2.0~3.0 m 软弱砂性土与黏性土，其下为砂砾石层至基岩；地下水位处于回填碎石层中部。	8.5~9.0	0.30~0.32
10000	滨海山前碎石回填土：处于滨海山前缓坡地带，强风化岩或夹薄层含碎石黏土的强风化岩之上回填厚层碎石土，碎块含量 60%，最大粒径 35 cm，颗粒级配中等；地下水位处于回填碎石层中上部。	12.0~12.5	0.38~0.39
15000	滨海型下卧软弱夹层的碎石回填地基：同 8000 kN·m 能级地质条件。	11.5	0.29~0.30

0.40；对于软弱下卧层浅、高地下水等不利情况应取修正系数的低值，对于回填碎石层厚、且级配较好时可取高值。

5 结 论

(1) 不同场地试夯研究表明，8000 kN·m 能级强夯山谷型厚层碎石回填土，其有效加固深度可达 10.0~11.5 m；对于滨海型下卧软弱夹层且存在地下水的碎石回填地基，其有效加固深度为 8.5~9.0 m；10000 kN·m 强夯滨海山前厚层碎石回填土，其有效加固深度为 12~12.5 m；15000 kN·m 强夯滨海下卧软弱夹层且存在地下水碎石回填地基，其有效加固深度可达 11.5 m。

(2) 对于滨海型下卧软弱夹层且存在地下水的碎石回填地基，采用 8000 kN·m 与 15000 kN·m 能级强夯其有效加固深度差别明显，且强夯作用机理完全不同；前者未影响到软弱夹层，而后者击穿下卧粉细砂与黏土夹层并影响至砂砾石层（侧向挤土至夯间），并使粉细砂与黏土层变薄且位置下移，呈凹陷型。

(3) 梅纳公式的修正形式用于预估高能级强夯的有效加固深度时，对于颗粒级配良好的均质厚层碎石素填土其适用性较好，修正系数为 0.35~0.40（在经验范围 0.34~0.80 内）；而对于存在软弱下卧层与地下水的碎石回填地基，由于二者对能量吸收作用，致使公式中的修正系数显著降低，其值在 0.29~0.32 范围内，且能级越高，修正系数越小；一般地对软弱下卧层浅、高地下水等不利情况应取修正系数的低值，对回填碎石层厚、且级配较好时可取高值。对于具有相似地质条件的高能强夯地基，可以此修正系数作为参考，最终以实际检测确定的有效加固深度为准。

(4) 对于含碎石的黏性土或黏性土裹碎石、软硬互层上的碎石回填地基、高地下水位等复杂地质条件下的强夯作用机理与有效加固深度问题目前还不十分清楚，仍需开展深入而细致地试验工作；特别是更高能级（15000~20000 kN·m）强夯技术应用于深厚碎石回填地基（大于 15~20 m），将成为未来发展方向。

参考文献：

[1] 王铁宏, 水伟厚, 王亚凌, 等. 强夯法有效加固深度的确定方法与判定标准[J]. 工程建设标准化, 2005(3): 27 - 38. (WANG Tie-hong, SHUI Wei-hou, WANG Ya-ling, et al. The definite method and decision criterion on effective depth of dynamic compaction improvement[J]. Standardization of Engineering Construction, 2005(3): 27 - 38. (in Chinese))

[2] 高广运, 水伟厚, 王亚凌, 等. 高能级强夯在大型石化工程中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1275 - 1279. (GAO Guang-yun, SHUI Wei-hou, WANG Ya-ling, et al. Application of high energy level dynamic compaction to high-capacity oil tank foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(8): 1275 - 1279. (in Chinese))

[3] 王铁宏, 水伟厚, 王亚凌, 等. 10000 kN·m 高能级强夯地面变形与孔压试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 759 - 762. (WANG Tie-hong, SHUI Wei-hou, WANG Ya-ling, et al. Experimental research on the ground deformation and pore water pressure during 10000 kN·m high energy level dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 759 - 762. (in Chinese))

[4] 水伟厚, 王铁宏, 王亚凌. 碎石回填地基上 10000 kN·m 高能级强夯标准贯入试验[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1309 - 1312. (SHUI Wei-hou, WANG Tie-hong, WANG Ya-ling. SPT for dynamic compaction with 10000 kN·m high energy on foundation backfilled with crushed stone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1309 - 1312. (in Chinese))

[5] JGJ79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 2002. (JGJ79—2002 Technical code for ground treatment of building[S]. 2002. (in Chinese))

[6] DB21/907—2005 建筑地基基础技术规范[S]. 2005. (DB21/907—2005 Technical code for building foundation[S]. 2005. (in Chinese))