

对强夯置换概念的探讨和置换墩长度的实测研究

水伟厚

(现代建筑设计集团 上海申元岩土工程有限公司, 上海 200040)

摘要: 强夯和强夯置换法是经济高效应用广泛的地基处理方法之一, 但工程界对强夯与强夯置换的概念理解仍存在很大分歧。值此多个地基处理技术规范修编的机会, 有必要对强夯和强夯置换的概念进行澄清。文中首次明确提出了强夯置换区别于强夯的4个条件: 有无填料、填料好否、夯锤静接地压力是否大于80 kPa和是否形成密实墩体。同时, 根据68项工程或项目实测资料, 首次提出了强夯置换墩长度与能级(最高达到18 000 kN·m)的经验关系, 并做成表格供工程人员预估置换墩长度时参考。

关键词: 强夯; 强夯置换; 置换墩长度; 18 000 kN·m 能级

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Exploring concept of dynamic replacement and measured length of replacement pier

SHUI Wei-hou

(Shenyuan Geotechnical Engineering Co. Ltd., Shanghai Modern Architectural Design Group, Shanghai 200040, China)

Abstract: Dynamic compaction(DC) and dynamic replacement have become generally accepted ground improvement techniques for their simplicity and cost-effectiveness. But conception of DC and dynamic replacement still have a lot of disagreement. On some foundation treatment specification revision of opportunity, it is necessary to improve the dynamic compaction and dynamic compaction replacement concepts of clarification. The distinctions between DC and dynamic replacement are: with or without filler; with or without grained soil; rammer static grounding pressure is or not greater than 80 kPa and whether formatted replacement piers. Meanwhile according to the measured data of more than 68 projects, this paper proposes the relations of dynamic displacement pier length and the energy level (top achieve 18 000 kN·m), for the first time in China. Also it makes form for engineering personnel reference.

Key words: dynamic compaction; dynamic replacement; length of replacement pier; DC energy level of 18 000 kN·m

1 前言

最近在参编4本规范, 有使用较为广泛的行标《建筑地基处理技术规范》^[1], 有新编国标《复合地基技术规范》, 新编国标《钢制储罐地基处理技术规范》, 还有上海市的《地基处理技术规范》等。在规范编制中, 每次讨论到强夯和强夯置换(上海规范还有降水强夯法), 因为牵涉到两者的联系和区别、停锤标准、有效加固深度的判定等问题, 大家都争论的非常激烈。另外, 最近参加了一些关于工

程中由于两者概念理解不同而导致纠纷的一些会议, 如设计文件要求强夯置换, 监理认为施工单位打的是强夯, 导致合同结算时出现不同意见。归根结底, 就是对强夯和强夯置换概念理解的不同。那么, 强夯和强夯置换的区别到底在哪里? 强夯置换墩的长度到底有多长? 本文拟结合一些工程实例, 谈谈对以上问题的理解。

2 规范的规定

强夯和强夯置换是一种经济高效的地基处理

收稿日期: 2011-04-10

基金项目: 国家建设部科研攻关基金资助项目(No. 04-2-016); 上海市科技启明星资助项目(No. 08QB14026); 上海现代建筑设计集团基金资助项目(No. J01Be-011-0807-000808-1A类-0215-基); (No. J01Be-011-1005-000310-3类-0056-基, No. J01Be-011-1005-002910-1类-0043-基, No. J01Be-111-0905-001509-3类-0236-基)。

第一作者简介: 水伟厚, 男, 1976年生, 博士, 国家注册土木工程师(岩土), 主要从事地基处理方面的工程和研究工作。E-mail: weihou_shui@xd-ad.com.cn

方法。强夯法加固地基的原理如图 1 所示, 即反复将 80~400 kN 的锤(最重的达 2 000 kN)起吊到 8~25 m 高处(最高的达 40 m), 而后自由落下, 其动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^[2~7]。

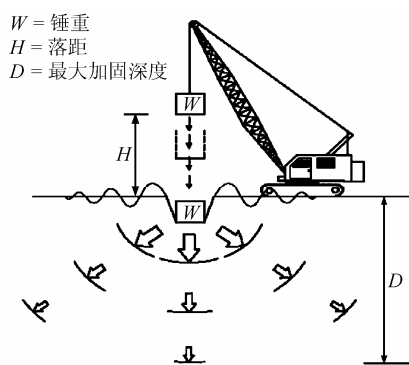


图 1 强夯法示意图

Fig.1 Sketch of dynamic compaction

首先讨论强夯法和强夯置换法的概念, 这在不同的规范中均有提及。

《建筑地基处理技术规范》^[1]规定中 2.1.7 强夯法: 反复将夯锤提到高处使其自由落下给地基以冲击和振动能量, 将地基土夯实地基处理方法。

2.1.8 强夯置换法: 将重锤提到高处使其自由落下形成夯坑, 并不断夯击坑内回填的砂石、钢渣等硬粒料, 使其形成密实的墩体的地基处理方法。从以上术语中可以看出, 好像强夯和强夯置换在施工过程中的区别是“强夯置换不断夯击坑内回填的砂石、钢渣等硬粒料”, 施工结果是“形成密实的墩体”。那么施工过程中, 是否夯坑中不断填料了, 就是强夯置换? 强夯过程中不填料? 施工结果中, 有密实墩体了就是强夯置换? 强夯夯点能不能也形成密实墩体?

也有些资料认为, 使用柱锤的是强夯置换, 使用平锤的是强夯, 那么与地基性状、与填料有关系吗? 带着一系列问题继续探讨。

《建筑地基处理技术规范》^[1]规定: 6.3.1 强夯锤质量可取 10~40 t, 其底面形式宜采用圆形或多边形, 锤底面积宜按土的性质确定, 锤底静接地压力值可取 25~40 kPa, ……。强夯置换锤底静接地压力值可取 100~200 kPa。正在修编的《建筑地基处理技术规范》6.2.3 条规定: 强夯锤质量可取 10~60 t, 其底面形式宜采用圆形或多边形, 锤底面积宜按土的性质确定, 锤底静接地压力值可取 25~80

kPa, 单击夯击能高时取大值, 单击夯击能低时取小值……6.2.5 条: 强夯置换锤底静接地压力值宜大于 80 kPa。

新编的国标《复合地基技术规范》: 13.3.1 强夯置换锤底静接地压力值可取 80~300 kPa。

从这些规定可以看出, 虽然用词为“可”或“宜”, 但有一个观点是相同的, 那就是强夯置换夯锤的静接地压力大于 80 kPa (80 kPa 是否合理暂不讨论, 需要说明的是这里所讲的强夯和强夯置换的夯锤均为平底, 不包括橄榄形锤或者子弹头锤等)。

3 强夯与强夯置换区别

强夯和强夯置换的区别在哪里? 通过以上相关规范规定解读, 可以知道两者区别主要在于: ①有没有填料? ②填料好不好(与原地基土比有无变化); ③静接地压力大不大(≥ 80 kPa)? ④是否形成墩体?(比夯间土明显密实)。

以上 4 个条件之间应该是“且”的关系, 只有同时满足以上 4 个条件才算是强夯置换, 如填土地基, 强夯施工过程中因夯坑太深时(影响施工效率和加固效果), 或提锤困难时(夯坑坍塌或有软土夹层吸锤), 都可以或应该填料, 这是强夯。强夯也可以填料, 不是填料一次就是强夯置换了。也不是夯一锤填一次, 可以是夯几锤填一次。对于采用柱锤强夯来说, 满足接地静压力是很容易的, 因为柱锤直径大多在 1.1~1.6 m; 对于平锤, 只有在锤重超过一定重量时可以满足锤底接地静压力要求, 且同时满足其他 3 个条件后的平锤施工才是强夯置换。

需要说明的是, 强夯和强夯置换之间没有一条不可逾越的鸿沟, 而是一个大工艺条件下针对难度相对较大不同地质条件不同设计要求下的两个产品, 强夯置换是施工且要求形成置换墩的一个工艺。在很多实际工程中不能简单地理解为强夯置换就是强夯用于加固饱和软黏土地基的方法。澄清概念的主要目的是为了保证强夯置换的加固效果, 避免用一个大扁锤(静接地压力很小)来施工强夯置换, 是很难形成“给力”的强夯置换墩的。《建筑地基处理技术规范》^[1]中的最高能级是 8 000 kN·m, 其倡导的概念是通过缩小锤底面积增加静压力来加强强夯置换的效果。随着目前工程界强夯能级的不断提高, 18 000 kN·m 的强夯和强夯置换已经有多个工程的经验, 较大锤底面积的强夯置换工程也越来越多。而且, 工程实践表明, 当能级超过 8 000 kN·m 后, 适当增大锤底面积对置换墩长度有利(将另文论述)。

4 工程实例

目前在强夯设计和施工过程中,也经常存在是采用强夯还是强夯置换,是采用平锤强夯置换还是采用异形锤(柱锤)强夯置换的争论。现就这些问题通过几个工程实例进行探讨。

(1) 辽宁葫芦岛某船厂地基处理工程

该工程地基采用开山石回填而成,填土厚度为 10 m,其下为 3 m 海底淤泥。地基处理采用 12 000 kN·m 平锤施工,夯坑深度平均为 5 m。为确保加固深度,施工过程中夯坑过深了,出现提锤困难了就回填开山石,否则不允许填料。现场施工见图 2,施工后效果分析见图 3。那么这样的施工工艺是强夯还是强夯置换?如果施工用的是柱锤呢?



图 2 葫芦岛某船厂强夯施工

Fig.2 The construction site of dynamic compaction in a ship factory at Hulu island

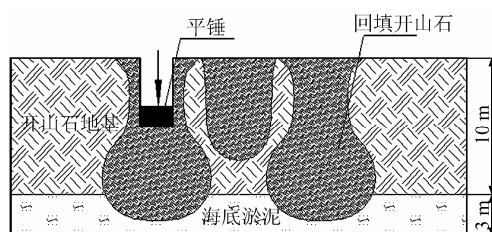


图 3 葫芦岛某船厂强夯示意图

Fig.3 Sketch of dynamic compaction for a ship factory at Hulu island

本项目采用的直径为 2.5 m,重量 60 t 的平锤,施工过程中进行了碎石填料,与原地层有差异(填料与原地基填土基本相同,对软弱下卧层有置换作用),形成了比较密实的能有效改良地基变形特性的置换墩。同时,满足上面的 4 个条件,使用柱锤

和平锤都是强夯置换。

(2) 内蒙古某煤制气地基处理工程

内蒙古某煤制天然气项目,场地主要为沙漠细砂地基,场地分别采用 8 000 kN·m 和 3 000 kN·m 能级平锤施工,其中 8 000 kN·m 能级施工过程中,夯坑回填碎石。两个能级采用的均是直径为 2.5 m 的平锤,3 000 kN·m 能级(夯锤 20 t)每遍施工后进行原地砂土推平再施工,而 8 000 kN·m (夯锤为 40 t)能级施工过程中回填了大量碎石料,如图 4 所示。

本项目 3 000 kN·m 能级施工虽有填料但不满足其他 3 个条件,仅仅算是强夯。8 000 kN·m 能级同时满足了强夯置换的 4 个条件,应该属于强夯置换。现场检测表明,夯点周边砂土地基相对密度大幅增加,夯点处形成了密实的碎石墩体,荷载作用点、变形敏感点、结构转折部位等应布置在夯点上。

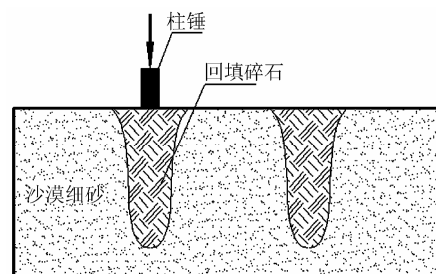


图 4 内蒙古某项目强夯置换示意图

Fig.4 Sketch of dynamic replacement for a project in Inner Mongolia

(3) 甘肃庆阳某湿陷性黄土地基工程

甘肃庆阳某工程位于我国最大的黄土塬——董志塬,属于大厚度自重湿陷性黄土地基。本场地采用 15 000 kN·m 能级的平锤施工,夯锤直径为 2.5 m,锤重 65 t,夯坑深达 5~6 m,最深 7~8 m。由于夯坑深度过大,施工过程中夯坑多次填入黄土,每遍夯后采用推平夯坑。施工效果示意图见图 5。

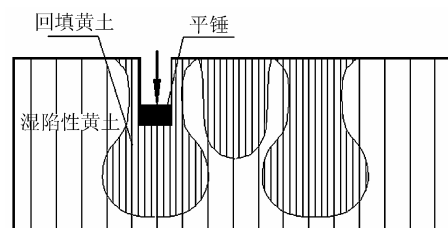


图 5 甘肃庆阳某湿陷性黄土地基强夯示意图

Fig.5 The dynamic compaction of collapsible loess foundation in Qingyang, Gansu province

根据填料性质和施工工艺,本场地施工工艺应归于强夯施工范畴。夯坑深度较大,即使采用了柱锤强夯,因填料与原土地基相同,不满足第2条,也只能算是强夯而非强夯置换。其实,处理后的地基经检测,夯点是密实的黄土墩体,夯间也是非常密实,随机抽检点基本上难以区分出夯点和夯间,达到了整体密实均匀的加固效果。

(4) 山东青岛某船厂项目

青岛某船厂地基处理是典型的上硬下软的双层地基,上面回填的是素填土(碎石土3~6 m),填土下为淤泥质土,部分区域采用10 000 kN·m平锤(直径为2.5 m,锤重50 t),部分区域采用2 000 kN·m柱锤(直径为1.5 m,锤重15 t)进行施工,夯坑过深时回填大粒径开山石,加固效果示意图见图6。检测结果表明,穿透填土层后,填料进入淤泥质土形成碎石墩体,能有效改良场地的变形特性,无论是平锤还是柱锤,均同时满足了4个条件,具备了强夯置换效果。

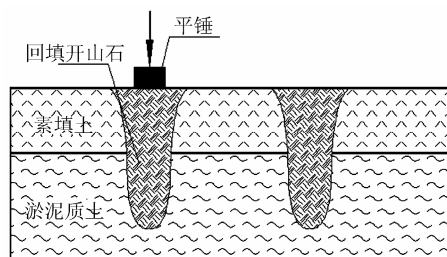


图6 双层地基强夯置换示意图

Fig.6 The dynamic replacement of double-layer foundation

5 置换墩长度

强夯置换有效加固深度是选择该方法进行地基处理的重要依据,又是反映强夯置换处理效果的重要参数。对于淤泥等黏性土,置换墩应尽量加长。大量的工程实例证明,因置换墩体毕竟为散粒体材料,当软土层底的深度在5~6 m以下时,没有沉管等导向工具的话,很少有强夯置换墩体能完全穿透软土层,着底在较好土层上。而对于厚度比较大的饱和粉土、粉砂土,因墩下土在施工中密度会增大,强度也有所提高,故在满足地基变形和稳定性要求的条件下可不穿透该土层。

强夯置换的加固原理相当于下列三者之和:

强夯置换=强夯(加密墩间土)+碎石墩(墩点下)+特大直径排水井(粗粒料)

(1)

因此,墩间的和墩下的粉土或黏性土通过排水

与加密,其密度及状态可以改善。强夯置换有效加固深度为墩长和墩底压密土厚度之和,应根据现场试验或当地经验确定。单击夯击能大小的选择与地基土的类别有关。一般说来,粉土、黏性土的夯击能选择应当比砂性土要大。此外,结构类型、上部荷载大小、处理深度和墩体材料也是选择单击夯击能的重要参考因素。

实际上影响有效加固深度的因素很多,除了夯锤重和落距以外,夯击次数、锤底单位压力、地基土性质、不同土层的厚度和埋藏顺序以及地下水位等都与加固深度有着密切的关系。鉴于有效加固深度问题的复杂性以及目前尚无适用的计算式。

针对高饱和度粉土、软塑~流塑的黏性土、有软弱下卧层的填土等细颗粒土地基(实际工程多为表层有2~6 m的粗粒料回填,下卧3~15 m淤泥或淤泥质土),本文根据全国各地50余项工程或项目实测资料的归纳总结(图7),提出了强夯置换主夯能级与墩长的建议值(表1)。图中也绘出了《建筑地基处理技术规范》条文说明中的18个工程数据当时的强夯置换能级在5 000 kN·m以下。初步选择时也可以根据变形要求和地层条件等选择墩长,然后参照本表选择强夯置换的能级,而后必须通过试夯确定。

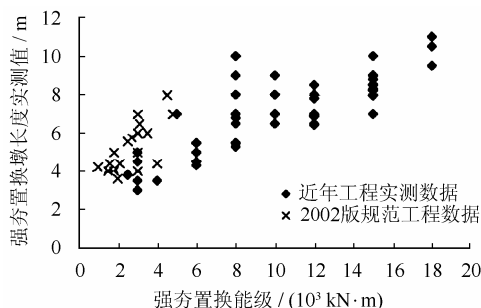


图7 强夯置换主夯能级与置换墩长度的实测值

Fig.7 The measured values of dynamic displacement pier length and the energy level

表1 强夯置换墩长度与强夯置换主夯能级的关系

Table 1 Relationship between dynamic displacement pier length and energy level

主夯能级 /(kN·m)	高饱和度粉土、软塑~流塑的黏性土、 有软弱下卧层的填土/m
3 000	3~4
6 000	5~6
8 000	6~7
12 000	8~9
15 000	9~10
18 000	10~11

需要注意的是表1中的能级为主夯能级。对于强夯置换法的施工工艺,为了要增加置换墩的长度,

工艺设计的一套能级中第 1 遍(工程中叫主夯)的能级最大,第 2 遍次之或与第 1 遍相同。每一遍施工填料后都会产生或长或短的夯墩。实践证明,主夯夯点的置换墩长度要比后续几遍的夯墩要长。因此,工程中所讲的夯墩长度指的是主夯夯点的夯墩长度。对于强夯置换法,主夯击能指的是第一遍夯击能,是决定置换墩长度的夯击能,是决定有效加固深度的夯击能。

6 结 论

(1) 通过以上对相关规范的理解和工程实例的分析,首次明确提出了强夯置换区别于强夯的四个条件:有没有填料?填料好不好?是否形成墩体?静接地压力是否大于等于 80 kPa。同时满足以上 4 个条件才是强夯置换。概念的澄清有利于保证强夯置换的加固效果。

(2) 根据 68 项工程或项目实测资料,首次提出了强夯置换墩长度与能级(最高可达 18 000 kN·m)的经验关系表格,可供工程人员在采用强夯置换法预估置换墩长度时采用。

致谢: 王铁宏、滕延京、王亚凌和梁永辉、何立军等同志对本论文提出了宝贵的意见,在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 中国建筑科学研究院. JGJ79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 王铁宏. 新编全国重大工程项目地基处理工程实录[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [3] 水伟厚. 冲击应力与 10 000 kN·m 高能级强夯系列试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [4] 王铁宏, 水伟厚, 王亚凌, 等. 10 000 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 10 000 kN·m high energy level dynamic compaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(7): 759—762.
- [5] 詹金林, 水伟厚, 何利军, 等. 18 000 kN·m 能级强夯处理深厚填海碎石土试验[J]. 工业建筑, 2010, 40(4): 96—99.
- ZHAN Jin-lin, SHUI Wei-hou, HE Li-jun, et al. Experimental study on treatment of thick gravel soil for marine reclamation land using dynamic compaction of 18 000 kN·m[J]. **Industrial Construction**, 2010, 40(4): 96—99.
- [6] 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.
- [7] 王铁宏, 水伟厚. 强夯技术与节能环保[J]. 节能与环保, 2005, (11): 6—9.
- WANG Tie-hong, SHUI Wei-hou. The energy-efficient and environmental protection technology—Dynamic compaction[J]. **Energy Conservation and Environmental Protection**, 2005, (11): 6—9.