

# 强夯置换法处理松软土地基若干问题研究

白冰<sup>1</sup>, 徐华轩<sup>2</sup>, 刘海波<sup>2</sup>, 范强惠<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中铁十六局集团有限公司, 北京 100044)

**摘要:** 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。这些问题包括地基土性的适用性问题、强夯置换的施工步骤和填料要求、孔隙水压力的演化过程和影响范围、强夯置换对周围土层的挤压效应所引起的侧向位移和深层位移的变化。分析随夯击次数的增加, 置换桩体的形成过程。此外, 还对强夯置换后复合地基的承载力等问题进行研究。

**关键词:** 土力学; 强夯置换法; 侧向位移; 孔隙水压力

**中图分类号:** TU 473

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)增 1 - 3001 - 06

## SOME PROBLEMS ON DYNAMIC REPLACEMENT METHOD TO IMPROVE SOFT SOIL GROUND

BAI Bing<sup>1</sup>, XU Huaxuan<sup>2</sup>, LIU Haibo<sup>2</sup>, FAN Qianghui<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. The Sixteenth Engineering Bureau Group Co., Ltd. of China Railway, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Based on field tests and theoretical analyses, some problems on the dynamic replacement method(DRM) to improve saturated soft soil ground are discussed. These problems include the validity of soils for the DRM, the construction processes and the demands of filling, the evolution of pore water pressure and affecting scopes. Besides, the lateral displacements and deep settlements of soil layers induced by the squeezing effects due to dynamic replacement are also discussed. The formation processes of block stone column and its mechanism with the number of dynamic loading increasing are analyzed. Finally, the variation of bearing capacity of the soft soil foundation improved by DRM is investigated.

**Key words:** soil mechanics; dynamic replacement method; lateral displacement; pore water pressure

## 1 引言

强夯置换法作为一种有效的软土地基加固手段已经在一些工程中得到应用<sup>[1~4]</sup>。强夯置换法是利用夯锤较大的冲击能将碎石、块石、矿渣等物理力学性能较好的粗粒料强行挤入天然地基, 通过置换形成桩-土复合地基<sup>[3, 4]</sup>, 最终达到加固地基的目的。该法施工简单、所用材料容易获得, 所形成的

桩体兼有复合地基和竖向排水通道的作用, 有时也具有对桩体周围土体挤密的效果。但由于地基的软硬程度和透水性差异较大, 因此加固后桩体和复合地基的形态也十分复杂, 加固作用和机制也不完全相同。目前, 强夯置换法已用来加固泥炭土、饱和淤泥或淤泥质土、有机质粉土、粉细砂、填土及黄土等软土地基。但该法在设计理论、承载力计算、作用机制和在对饱和土进行加固时关于孔隙水压力的消散等问题上尚有很多问题值得探讨。

**收稿日期:** 2009 - 03 - 03; **修回日期:** 2009 - 05 - 14

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50879003)

**作者简介:** 白冰(1966 -), 男, 博士, 1988年毕业于合肥工业大学土木工程系, 现任教授、博士生导师, 主要从事软土工程理论与应用方面的教学与研究工作。E-mail: baibing66@263.net

刘惠珊和饶志华<sup>[2]</sup>较早对强夯置换的设计方法与参数进行过研究。王保田和唐劲柏<sup>[5]</sup>用波动理论分析了强夯置换碎石桩在成桩过程中桩土界面的变化机制。张凤文和周洪彬<sup>[6]</sup>对强夯置换碎石桩法加固饱和粉土及粉质黏土地基后的地基承载力进行了试验,表明加固后复合地基承载力有显著提高。罗嗣海等<sup>[7]</sup>借助于分析打桩过程的一维波动方程,提出一种强夯置换深度估算的近似方法。曾庆军等<sup>[8]</sup>根据多个工程的实测资料对强夯置换深度进行了预测。秦宝和<sup>[9]</sup>结合客运专线复合地基处理的工程实例,就强夯置换法的机制和施工技术进行了分析。

已有研究大多局限于强夯置换施工原理的一般性描述,尚缺乏有针对性的实测资料<sup>[10~12]</sup>。本文结合京沪高速铁路松软土地基处理的实践,在现场进行了测试工作。利用这些结果讨论了强夯置换法加固地基时,关于加固地基土性的适用性问题,分析了强夯置换的施工步骤和填料要求,并对强夯置换施工时桩体形成对周围土层的挤压效应所引起的深层侧向位移和沉降变化进行研究。

## 2 强夯置换法的特点和适用条件

### 2.1 典型工程场地条件和土性

采用强夯置换块(碎)石墩(桩)法加固京沪高速铁路某路段的软土地基。该场地地貌为冲积平原,地形平坦开阔,大部分为耕地。该段线路以填方通过,中心最大填高为 7.18 m。拟加固地层的表层为黏土、局部为粉质黏土,呈褐灰色、深褐色、黄褐色,厚 4.4~8.3 m,部分地段含姜石 25%~90%。下为砂岩、泥岩,较为坚硬。地下水位深度为 1.1 m。

在试验场地深度 1 m 处进行探坑取样进行室内试验,测得该土层塑限  $w_p = 24.9\%$ ,液限  $w_L = 43.7\%$ ,塑性指数  $I_p = 18.8$ 。按照“建筑地基基础设计规范(GB50007 - 2002)”分类法,属于黏土。土粒的相对密度  $G_s = 2.67$ 。

试验得到现场土的含水量  $w = 19.5\% \sim 21.5\%$ ,孔隙比  $e = 0.72$ ,重度  $\gamma = 18.7 \text{ kN/m}^3$ ,干密度  $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ ,液性指数  $I_L = -0.25$ ,为硬塑状态。

### 2.2 强夯置换设计参数和施工步骤

一般认为,为减小强夯置换过程对土层的挤压和隆起效应,置换点的布置可采用 2, 3 遍交叉布置,每遍呈正方形布置<sup>[1, 4]</sup>或排与排之间交错布置<sup>[6]</sup>,最后再进行满夯。满夯的目的是加固地基表层的密实度。笔者认为,从大面积复合地基受力性状的合理

性来看,经过 2~3 次置换施工后,置换点呈梅花形或正方形布置比较合理,而以前者更好。置换点(夯点)间距应根据要达到的承载力大小和原状土的抗剪强度确定(可取 3~6 m),必要时采用较小的间距。

另一方面,夯击能的选择也是强夯置换的一个重要参数。从刘惠珊等<sup>[2, 6]</sup>研究来看,单点夯击能的选择范围是比较大的,一般为 1 600~4 000 kN·m。但从以往的工程经验来看,单点夯击能的选择与拟加固地基土的类型关系不大,而主要取决于桩体的设计深度(即加固深度)。

根据京沪高速铁路某路段松软土地基的特点,强夯置换块石墩单遍排距为 3.5 m,夯点间距为 7 m,两遍夯点呈正方形布置,2 遍夯点的间距为 3.5 m。强夯置换碎石墩分 3 遍进行(见图 1),前 2 遍为点夯,形成置换块石墩,夯点之间错落布置,最后 1 遍进行场地满夯。

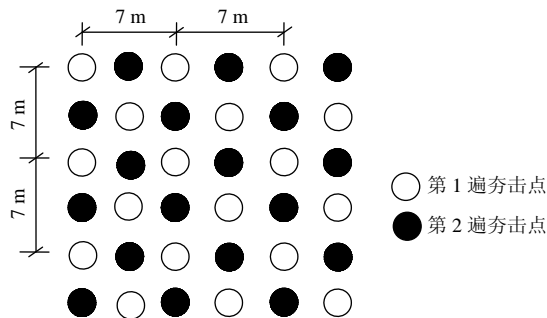


图 1 强夯置换块石墩夯点布置  
Fig.1 Drop pattern points for dynamic replacement

施工时,为避免吸锤效应,首先在置换夯点处铺设一定厚度的碎石垫层。对于第 1, 2 遍点夯,强夯夯锤质量取 22 t,夯锤直径取 1.2 m,夯锤高度为 2 m,单点夯击能为 3 000 kN·m。对于第 3 遍满夯,夯锤质量取 14 t,夯锤直径应适当增大,取 2.5 m,单点夯击能取 1 500 kN·m,每点 2 击。实践表明,根据这样的夯击能选择,对于京沪高速铁路松软土地基达到较大的承载力。

### 2.3 强夯置换特点和机制

笔者认为,强夯置换机制可归纳为桩式置换和整体置换 2 种主要作用。桩式置换的作用机制类似于碎石桩,即在置换桩体形成过程的同时,块石(或碎石)桩体下的土体得到压缩,而块石(或碎石)桩体与周边的土体界面发生竖向剪切破坏,并挤压周围的土体使其密实。另外,在地基表层,桩间土及碎石填料形成混合垫层,最终与置换桩体一起构成复合地基。同时,块(碎)石墩具有较好的透水性,可

加快超孔隙水压力的消散和地基的固结过程。

整体置换是通过置换作用将软弱层向外挤出, 形成换填垫层, 因此地基最后的变形和强度取决于置换材料的性质、置换层厚度以及下覆土层的性质。实际上, 很难将上述两种作用截然分开, 但对于不同性质的天然地基土, 强夯置换所形成的复合地基的组成形态差异很大, 而 2 种作用对承载力的贡献也就有很大不同。例如, 对于十分软弱的淤泥土地基, 整体置换的作用(即所谓挤淤)可能占主导地位。图 2 给出根据京沪高速铁路松软土地基的强夯置换效果给出的强夯置换后形成的复合地基的示意图。

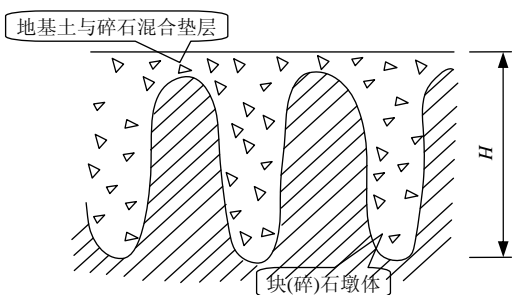


图 2 强夯置换后形成的复合地基示意图

Fig.2 Composite foundation formed by dynamic replacement

一方面, 京沪高速铁路松软土地基强夯置换试验要求大于 300 mm 的颗粒含量不超过总量的 30%。经测定, 石料抗压强度为 112~174 MPa。对于粒径较大的石料, 可进行适当粉碎。

另一方面, 填料过程和填料次数也是强夯置换的一个重要组成因素。为保证所形成墩体的完整性并避免较大的隆起量, 应适当增加填料的次数而每次填料量不宜过多。例如, 每一次填料完成后, 可连续夯击 2~3 次, 等夯锤沉入到一定深度(如接近夯锤顶部高度, 本次试验选用的夯锤高度为 2 m)后, 再进行第 2 次填料。

对于每一个块(碎)石墩, 当夯锤沉入深度小于 10 cm 后停止夯击, 并达到收锤标准。

### 3 强夯置换引起的孔隙水压力

#### 3.1 孔隙水压力的产生和消散

本文考察了典型强夯置换点(见图 3 中第 1 置换点)置换过程中, 不同水平距离(编号分别为  $K_1, K_3, K_5, K_7$ )和深度处(即 2, 4, 6 m)的孔隙水压力的演化过程(见图 4)。对于每个置换桩, 包括填料过程, 单击之间需要 5~10 min。

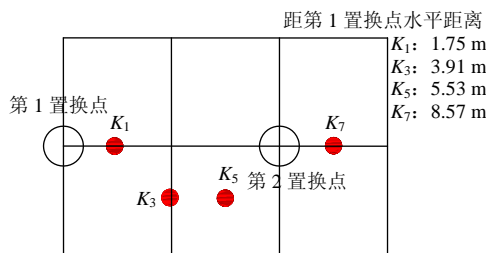
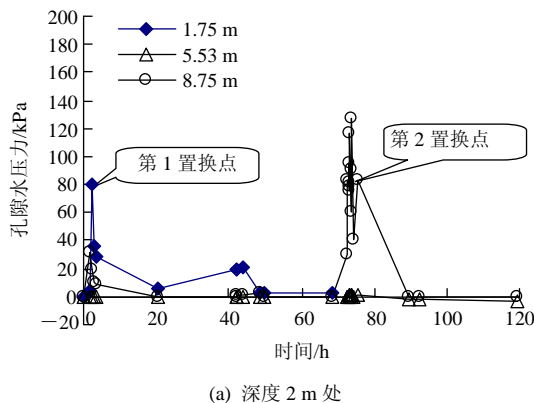
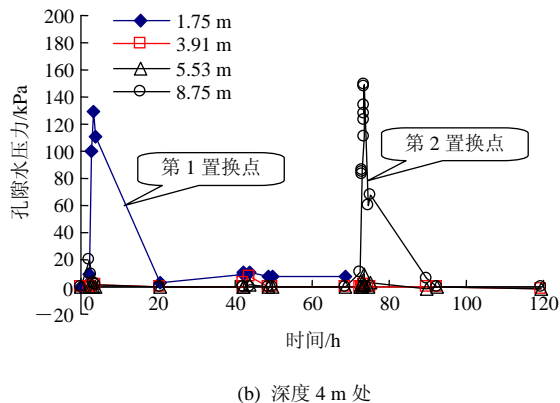


图 3 强夯置换点和传感器布置

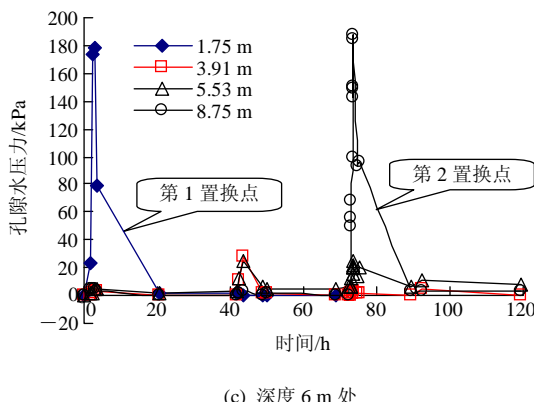
Fig.3 Laying sketch of transducers



(a) 深度 2 m 处



(b) 深度 4 m 处



(c) 深度 6 m 处

图 4 强夯置换诱致的孔隙水压力随时间变化

Fig.4 Variation of pore water pressure due to dynamic replacement with time

从图 4 可以看出, 在强夯荷载作用下, 孔隙水压力的上升值是十分明显的。例如, 当对第 1 置换

点进行置换时，在离该点 1.75 m 水平距离处深度 4 和 6 m 处的孔隙水压力最大可达 129.2, 178.2 kPa, 而且孔隙水压力的消散过程很快，即不超过 24 h, 孔隙水压力就可消散为 0。

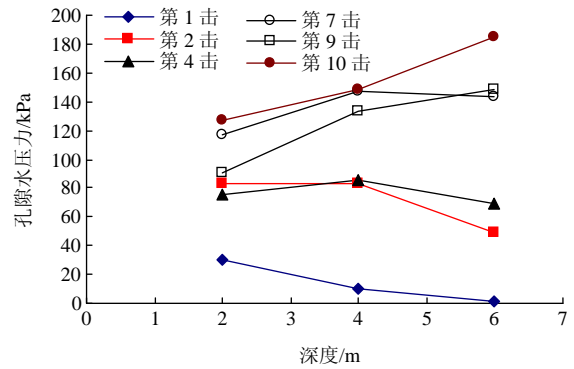
孔隙水压力消散很快的原因是，强夯置换所形成的块(碎)石墩体具有极强的透水性能，同时强夯荷载所诱致的高孔压(该孔压甚至大于相应点处的土层上覆压力，见图 4)使松软土地基产生大量不规则裂隙，从而大大加强了其排水通道，克服了常规强夯施工时可能出现的排水不畅的问题。根据本次试验可以看出，采取强夯置换法施工时，孔隙水压力消散的快慢不应成为施工进度的控制因素。

从图 4 还可以看出，随离置换点距离的增大，孔隙水压力显著下降，即表明孔隙水压力在水平方向的影响范围不大。经分析，当水平距离大于 4 m 后，孔隙水压力即接近于 0。当对第 2 置换点进行施工时，孔隙水压力也大致呈类似的规律。这里，孔隙水压力测点距第 2 置换点水平距离由近及远分别是  $K_7, K_3, K_3, K_1$ 。

### 3.2 孔隙水压力随夯击次数的变化

图 5 给出强夯置换过程中孔隙水压力演化。这里，第 1 击为设置碎石垫层后首次进行夯击测定的孔隙水压力；第 2, 4, 7, 9 击分别为对应击数填料完成并夯击后测定的孔隙水压力；第 3, 5, 6, 8, 10, 11 击为前一次夯击后不填料继续夯击测定的孔隙水压力。由于桩体本身的透水性很好，因此当第 10 击完成间歇一段时间后(见图 5(a))，孔隙水压力消散很快。

从图 5(b)可以看出，在第 1 击作用下，孔隙水压力的影响深度较浅(大致在 4 m 深度范围内)，且浅层(如深度 2 m 处)的孔隙水压力大于深处(如深度 4 和 6 m 处)的孔隙水压力。随着夯击次数的增加(即



(b) 孔隙水压力沿深度分布

图 5 强夯置换过程中孔隙水压力演化

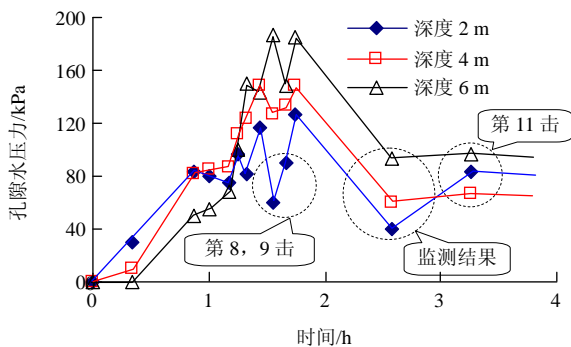
Fig.5 Evolution of pore water pressure with the number of drop

置换块石墩向下延伸和形成)，孔隙水压力逐渐向深处推进，从而使较深处的孔隙水压力明显增大(如第 2, 4 击)。在后面几击(如第 7, 9, 10 击)，较深处的孔隙水压力(可达到 184.5 kPa)反而大于浅层的孔隙水压力。需要指出，在第 8, 9 击作用下，深度 2 m 处的孔隙水压力甚至有一个明显的下降(见图 5(a))。归结其原因可认为，当夯锤底部对深部土层进行夯击时浅层处的土体受到较大的剪切作用，同时浅层处的孔隙水压力已有明显消散。

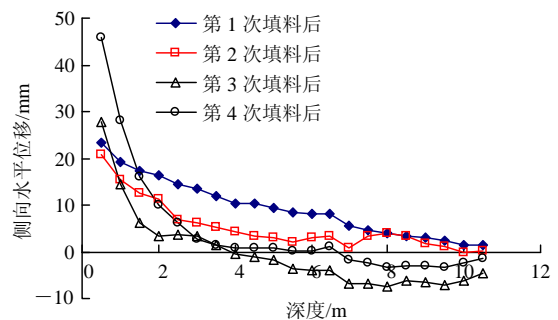
## 4 强夯置换引起的挤压效应

### 4.1 侧向水平位移

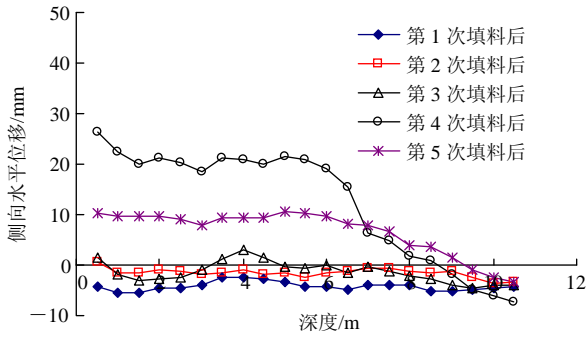
图 6 给出了强夯置换引起的侧向水平位移。从图 6(a)可以看出，强夯置换对周围土体的挤压效应是非常明显的。在水平距离 1.75 m 远处的 2 m 深度范围内，随着夯击次数的增加，向外的水平位移有不断增大的趋势，当第 4 次填料后进行夯击时，地表向外的位移可达 45.9 cm。但在较深处(如深度 2~8 m 范围内)水平位移变化则较为复杂，甚至出现向内的水平位移。实际上，这是由于夯锤定位不准确以及夯击时出现一定的倾斜所造成的。



(a) 孔隙水压力随时间变化



(a) 距强夯置换点 1.75 m



(b) 距强夯置换点 3.91 m

图 6 强夯置换引起的侧向水平位移

Fig.6 Lateral displacements caused by dynamic replacement

当然, 随着离开置换点距离的增大, 向外的水平位移明显减小。此外, 从图 6(b)可以看出, 在前面几击, 强夯置换所引起的侧向变形较小, 而在第 4, 5 次填料后进行夯击时, 由于置换桩体已有较大的深度, 因此强夯置换对深度土体的挤压明显增大, 而在稍浅处向外的水平位移反而会有所减小。实际上, 这一现象与图 5(b)所给出的孔隙水压力的发展规律是相互印证的。

### 4.2 深层沉降

图 7 给出了强夯置换引起的深层沉降。从图中可以看出, 强夯置换使得浅层土(如深度 0.4 m 处)有明显的隆起(最大值可达 10 cm), 而对于稍深土层(如深度 1.3 m 处)在前面几击有一定下沉; 而在后期由于桩体向地层深处推进而使土体向外侧挤压, 因此也会出现一定的隆起; 但在较深地层处(如深度 2.6m 以下), 土体主要表现为沉降的特点, 而且随着夯击次数的增加, 这种效应会逐渐影响到更深的土层。结合试验场地其他几个点的深层沉降观测资料及图 6 所给出的侧向水平位移观测结果可以认为, 本场地的强夯置换深度可以达到 7, 8 m。

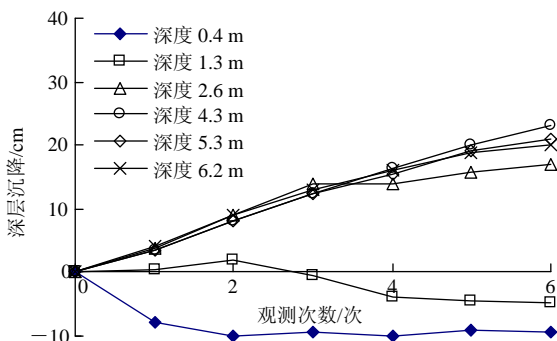


图 7 强夯置换引起的深层沉降

Fig.7 Deep settlements due to dynamic replacement

## 5 强夯置换加固后地基的承载力

强夯置换后地基可看作是地表有一定厚度的地基土与碎石组成的混合垫层的复合地基, 承载力会有显著提高。目前, 还很难从理论上准确估算强夯置换加固后承载力的大小, 比较常见的做法仍然是通过载荷试验测定复合地基的承载力。为方便检测, 也有测定块(碎)石墩体或块(碎)石墩之间的土体来评价加固效果的。表 1 给出强夯置换后京沪高速铁路地基土的承载力结果, 同时也将相关研究中<sup>[1, 6, 10]</sup>不同地基土类的几个典型工程的地基承载力列入表 1 中。

表 1 典型工程的地基承载力特征值

Table 1 Characteristic values of bearing capacity for some typical cases

工程编号	地基土主要特征描述	承载力特征值/kPa	填料	复合地基测试位置/测试方法	文献编号
1	京沪松软土(黏土、粉质黏土)	240	块石、碎石	墩间土/载荷板	本文
2	沼泽地软弱土层(淤泥、粉土)	350	矿渣	桩土复合体/载荷板, 动力触探	[1]
3	松软土(素填土、粉土、粉质黏土)	415~445 165~180	碎石土 碎石土	桩体/载荷板 桩间土/载荷板	[6]
4	黄土地基	300	级配碎石	桩土复合体/载荷板	[10]

从表 1 可以看出, 对于京沪高速铁路地基土, 强夯置换后块石墩之间土体的承载力可达 240 kPa。总体看来, 强夯置换后最终复合地基的承载力是比较高的, 表明强夯置换法加固各类软弱地基均是十分有效的。

## 6 结 论

(1) 研究表明, 强夯置换时单点夯击能的选择范围是比较大的。从以往的工程经验来看, 单点夯击能的选择与拟加固地基土的类型关系不大, 而主要取决于桩体的设计深度(即加固深度)。

(2) 强夯置换材料应选用级配好、强度性能较好的块石、碎石等填料。最大粒径可根据夯锤重量、夯击能大小和桩径确定。试验表明, 为保证所形成桩(墩)体的完整性并避免较大的隆起量, 应适当增加填料的次数而每次填料量不宜过多。

(3) 在强夯荷载作用下, 孔隙水压力的上升值是十分明显的, 而孔隙水压力的消散过程很快。因此, 采取强夯置换法施工时, 孔隙水压力消散的快



慢不应成为施工进度的控制因素。

(4) 随夯击次数的增加(即置换块石墩向下延伸和形成), 孔隙水压力逐渐向深处推进, 从而使较深处的孔隙水压力明显增大。在后面几击作用下, 深度处的孔隙水压力反而大于浅层的孔隙水压力。

(5) 强夯置换对周围土体的挤压效应是非常明显的, 随着夯击次数的增加, 地表浅层处向外的水平位移有不断增大的趋势, 但在较深处水平位移变化则较为复杂。同时, 强夯置换使得浅层土有明显的隆起, 而在较深地层处, 土层主要表现为沉降的特点。

### 参考文献(References):

- [1] 刘惠珊, 陈克景. 强夯加固软土的新发展——强夯置换[J]. 工业建筑, 1990, (7): 41 - 45.(LIU Huishan, CHEN Kejing. New developments on the reinforcement of soft clay foundation by dynamic compaction[J]. Industrial Construction, 1990, (7): 41 - 45.(in Chinese))
- [2] 刘惠珊, 饶志华. 强夯置换的设计方法与参数[J]. 地基基础工程, 1996, (2): 6 - 13.(LIU Huishan, RAO Zhihua. Design and parameters on dynamic replacement method[J]. Ground and Foundation Engineering, 1996, (2): 6 - 13.(in Chinese))
- [3] 白冰, 肖宏彬. 软土工程若干理论与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.(BAI Bing, XIAO Hongbin. The theory and application of soft clay engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002.(in Chinese))
- [4] 徐至钧. 强夯和强夯置换法加固地基[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.(XU Zhijun. Dynamic compaction and dynamic replacement for reinforcing ground[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.(in Chinese))
- [5] 王保田, 唐劲柏. 强夯碎石桩的发展及成桩机制分析[J]. 河海大学学报, 1999, 27(6): 30 - 34.(WANG Baotian, TANG Jinbai. Development of DRM and analysis of column-formation mechanism[J]. Journal of Hohai University, 1999, 27(6): 30 - 34.(in Chinese))
- [6] 张凤文, 周洪彬. 强夯置换碎石桩复合地基承载力的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 522 - 525.(ZHANG Fengwen, ZHOU Hongbin. Testing study of the dynamically formed stone column compound foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 522 - 525.(in Chinese))
- [7] 罗嗣海, 潘小青, 黄松华. 置换深度估算的一维波动方程法[J]. 地球科学, 2002, 27(1): 115 - 119.(LUO Sihai, PAN Xiaoqing, HUANG Songhua. One-dimensional wave equation model for estimating replacement depth of dynamic replacement[J]. Earth Science, 2002, 27(1): 115 - 119.(in Chinese))
- [8] 曾庆军, 李茂英, 李大勇. 强夯置换深度的估算[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 608 - 611.(ZENG Qingjun, LI Maoying, LI Dayong. Estimation of the displacement depth in dynamic replacement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 608 - 611.(in Chinese))
- [9] 秦宝和. 强夯及强夯置换技术在客运专线复合地基处理中的应用[J]. 铁道工程学报, 2007, (7): 33 - 37.(QIN Baohe. Application of strong tamping and its replacement technology in reinforcing composite subgrade of railway passenger dedicated line[J]. Journal of Railway Engineering, 2007, (7): 33 - 37.(in Chinese))
- [10] 王基文, 李允忠. 强夯置换法处理黄土地基的应用实例[J]. 土工基础, 2007, 21(3): 7 - 9.(WANG Jiwen, LI Yunzhong. Application of dynamic compaction method to collapsible loess subgrade[J]. Soil Engineering and Foundation, 2007, 21(3): 7 - 9.(in Chinese))
- [11] 张健, 王秀红, 史玉芳. 强夯置换法在处理饱和和软土地基的应用[J]. 长安大学学报, 2004, 21(1): 33 - 35.(ZHANG Jian, WANG Xiuhong, SHI Yufang. Heavily ramming displacement method applied to saturated soft soil[J]. Journal of Chang'an University, 2004, 21(1): 33 - 35.(in Chinese))
- [12] 李冰. 强夯置换加固填海地基的试验研究[J]. 河北工程大学学报, 2008, 25(3): 50 - 53.(LI Bing. Experimental research on the dynamic replacement compaction of fill foundation[J]. Journal of Hebei University of Engineering, 2008, 25(3): 50 - 53.(in Chinese))