

# 数值模拟法确定饱和土强夯施工参数

郑红娟<sup>1</sup>, 周世良<sup>2</sup>

(1. 南通航运职业技术学院, 江苏 南通 226010; 2. 重庆交通大学, 重庆 400074)

**摘要:**探讨了用数值模拟确定饱和地基土强夯的施工参数方法;根据孔隙水压力增量随夯击次数的变化情况确定强夯的最佳夯击次数;根据孔隙水压力消散情况确定强夯的间歇时间;根据土体沿深度方向的竖向变形确定土体有效加固深度;根据沿水平方向的竖向变形确定强夯的单点加固范围。研究结果为强夯设计和加固效果评价提供有力的依据。

**关键词:**强夯;饱和土;数值模拟;施工参数

中图分类号: TU472.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2010)06-0938-04

## Study on Confirmation of the Construction Parameter of Saturated Soil Reinforced by Dynamic Compaction

ZHENG Hong-juan<sup>1</sup>, ZHOU Shi-liang<sup>2</sup>

(1. Nantong Shipping College, Nantong 226010, Jiangsu, China;

2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Construction parameter of saturated soil reinforced by dynamic compaction through numerical simulation was discussed; the optimal rammer times were determined according to the varying curve of the increase of pore water pressure along with the rammer times; interval time of dynamic compaction was confirmed based on dissipation of water pressure of the pore; effective consolidation depth soil was ascertained according to vertical deformation of the soil; consolidation range of dynamic compaction was determined according to vertical deformation of the soil along with horizontal direction, which could provide basis for dynamic compaction design and reinforcement effect evaluation.

**Key words:** dynamic compaction; saturated soil; numerical simulation; construction parameter

强夯法是目前地基处理工程首选的加固方法,具有加固效果明显,适用范围广,设备简单、施工方便、经济易行等优点,为人们所广泛接受。对于饱和地基土,由于其缺少气相排水通道,施加强夯能量后孔隙水排出困难,超孔隙水压力一方面吸收能量,使土体不能得到加固,另一方面侧向作用扰动土体,使原有承载力降低,故在饱和地基土加固中慎用强夯法。但随着经济的发展,沿海、沿江开发的大规模展开,对于沿海、沿江大面积饱和地基土,人们开始研究如何将强夯法应用于饱和地基土的加固,经过岩土工作者们多年的共同努力,目前已经有很多饱和地基土加固工程使用强夯法,强夯加固饱和地基土的实践已经有了很大的发展<sup>[1-2]</sup>。饱和地基土强夯,已经有很多成功的实例<sup>[3]</sup>,但其施工设计尚未形成一套完整的设计计算理论,目前工程使用中通

常根据现场试验结果最后确定正式的强夯施工参数,但现场试验存在费用高、测试精度受外界诸多因素影响等缺点。笔者在文献[4]的基础上就强夯加固饱和地基土数值模拟作进一步研究,进而确定其施工参数。本文所采用的本构模型和算例的计算模型、网格划分(图1)、边界条件、土体计算参数及冲击荷载形式同文献[4]。

### 1 数值模拟确定施工参数

强夯处理高填方地基的施工设计,目前尚未形成一套完整的设计计算理论,目前工程使用中通常根据现场试验结果最后确定正式的强夯施工参数。根据数值模拟结果对强夯设计的主要参数确定进行初步探讨。

#### 1.1 最佳夯击次数

夯击次数是强夯施工中的一个重要参数。目前

收稿日期:2010-07-15;修订日期:2010-09-25

基金项目:重庆市教委科技项目(040406);重庆市水利水运工程重点实验室开发基金项目(SLK2006A04)

作者简介:郑红娟(1981-),女,江苏南通人,硕士,主要从事港口、海岸及近海工程专业的教学与研究。E-mail:xiyueyangcle@126.com。

国内确定夯击次数的方法不尽相同,而且对饱和土也没有特别的规定。图 2 为夯坑以下 272 节点(距夯坑中心 2 m,距地面 3.5 m,见图 1)、228 节点(距夯坑中心 2 m,距地面 4.4 m,见图 1)的超孔隙水压力随夯击数的变化图。由图 2 可见,在夯击击数达到 7 击时,超孔隙水压力增量随夯击击数的变化曲线非常平缓,根据文献[3]实录十六的工程实例的结论——利用超孔隙水压力增量随夯击击数的变化情况确定最佳夯击次数,说明本模型的最佳夯击击数为 7 击。同时,从有效应力之最大主应力和剪应力随时间的变化曲线(图 3、图 4)可见,在第 7 次夯击后(1.499 4 s)有效应力之最大主应力和剪应力都趋于稳定,说明最佳夯击击数也为 7 击。

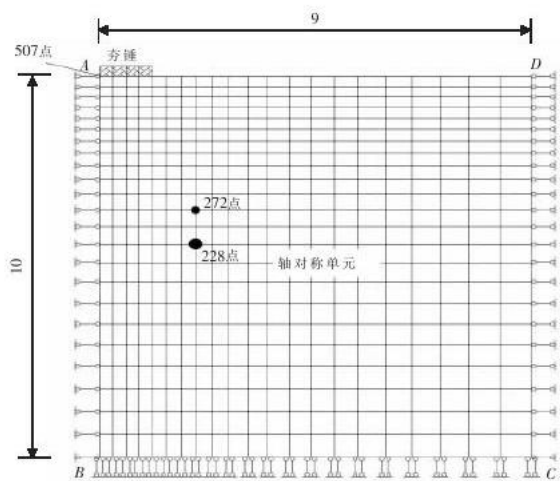


图 1 有限元网格划分

Fig. 1 Mesh generation of finite element

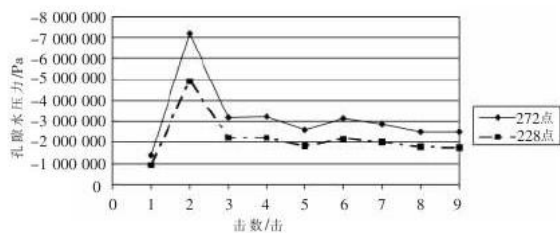


图 2 孔隙水压力增量与夯击击数的关系

Fig. 2 Relationship between pore water pressure increase and ramming times

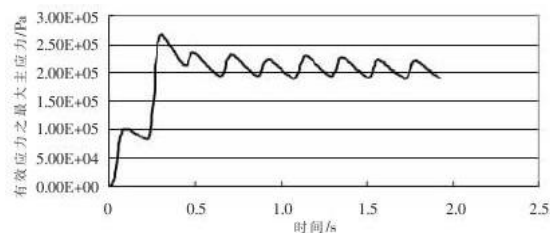


图 3 有效应力之最大主应力随时间变化曲线

Fig. 3 Transformation curve of the maximal principal stress of effective stress with the change of time

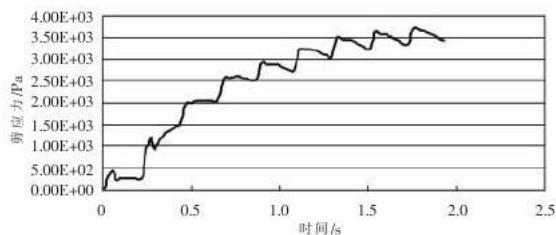


图 4 剪应力随时间变化曲线

Fig. 4 Transformation curve of shear stress with the change of time

### 1.2 间歇时间

相邻 2 遍夯击的间歇时间取决于加固土层中孔隙水压力消散所需要的时间。对黏性土,由于孔隙水压力消散较慢,故当夯击能逐渐增长时,孔隙水压力也相应叠加,间歇时间一般为 2~4 周;对砂性土,孔隙水压力的峰值出现在夯完后的瞬间,消散时间只有 2~4 min,为此,可不考虑间歇时间而连续夯击。

由图 5 发现,在第 7 次夯击间隙期末,土中集聚了很大的孔隙水压力有待消散,如果把强夯冲击荷载时间历程曲线<sup>[4]</sup>的第 7 击之后的加载值设为 0,并把时间尽量拉长,可以计算出孔隙水压力在没有荷载的情况下的消散情况,在孔隙水压力趋于 0 时确定相邻 2 遍夯击的间歇时间。由于饱和细颗粒土消散时间以天计算,即程序需拉长的时间以天计算,与模型选择的时间增量差距太大,计算需要时间太久,故本文没有计算第 7 击间隙期后的 0 加载情况。

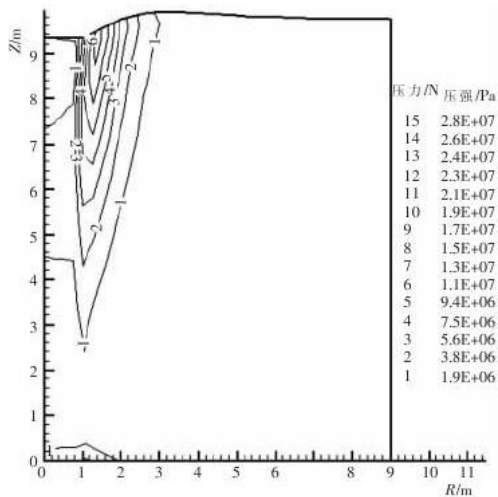


图 5 第 7 次夯击间隙期末孔隙水压力等值线

Fig. 5 Isoline map of pore water pressure distribution in the end of 7th break time

### 1.3 有效影响深度

有效加固深度可以理解为经强夯加固后,加固效果显著的土层范围,该土层强度提高和压缩模量增大。有效加固深度的影响因素很多,除锤重和落距外,地基土的性质、不同土层的深度和埋藏顺序、

地下水位以及其他强夯的设计参数等都与其有着密切的联系,另外测试方法和时间也有一定的影响。目前工程中确定有效加固深度的公式主要是修正的L. Menard公式<sup>[5]</sup>,经换算后其表达式为:

$$H = \alpha \sqrt{\frac{Wh}{10}} \quad (1)$$

式中: $H$ 为有效加固深度,m; $W$ 为锤重,kN; $h$ 为落距,m; $\alpha$ 为修正系数,0.2~0.95。

$W$ 和 $h$ 用算例的相关参数,其乘积为2000 kN·m,对于粉土、黏性土、湿陷性黄土等细颗粒土,强夯法的有效加固深度为5~6 m<sup>[6]</sup>,即 $\alpha$ 取0.35~0.42。

笔者通过土体的竖向变形对有效影响深度进行估算。图6为第5次夯击后,土体在对称轴上以及距对称轴1.1,2.0,2.7,3.5 m处沿深度的竖向变形。可以看出:离夯坑越近,竖向变形越大;在对称轴上(夯坑中心),深度约一个夯锤半径范围内,竖向变形基本相同,然后沿深度近似线性递减;在水平方向从对称轴到1倍夯锤半径内沿深度方向的竖向变形线基本重合,说明夯坑底部形状良好。

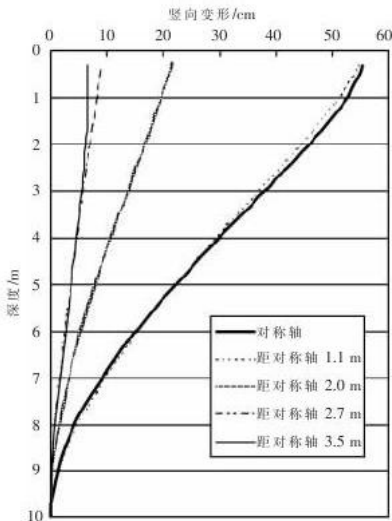


图6 土体沿深度方向的竖向变形

Fig. 6 Vertical deformation along with depth direction

计算结果显示,在8.7 m深度处,2倍夯锤半径范围内的竖向变形值约4.8 cm,因此可以认为强夯的影响深度为8.7 m。大量工程实践表明有效加固深度和影响深度的比值变化范围约为0.4~0.7<sup>[7]</sup>。本文算例若取有效加固深度和影响深度的比值为0.6,可以得到有效加固深度为5.22 m,这与L. Menard公式的结果基本相同。因此,对于高填方地基,进行分层填土加固时,要选取适当的分层厚度,才能得到满意的加固效果。

#### 1.4 单点加固范围

强夯的单点加固范围一般用加固半径来表示,

加固半径的计算公式<sup>[3]</sup>为:

$$R = \frac{k \sqrt{Wh}}{\nu\beta} \quad (2)$$

式中: $R$ 为有效加固半径,m; $\nu$ 为表示压缩波速度,m/s; $\beta$ 为土的能量吸收系数,根据土质情况在0.01~0.125之间取值; $k$ 为大于1的系数,一般为3~5。

$W$ 和 $h$ 用算例的相关参数, $\nu$ 按相关资料建议值取650 m/s, $\beta$ 取0.1, $k$ 取4,由公式(2)可以算得加固半径为1.95 m。该计算公式中的参数选取有较大的随意性,比如土的能量吸收系数和 $k$ 值,计算差异性较大。笔者通过分析不同深度处的竖向变形值来探讨加固范围的确定。

图7为第5次夯击后,土体距离地面0.55,1.1,2.0,2.7,3.5 m深度处沿水平方向的竖向变形图。由图可知,沿水平方向的竖向位移和夯坑形状类似,随着深度的增加,夯坑范围内竖向位移逐渐减小,3倍夯锤半径范围外土体的侧向挤压隆起也逐渐减小。深度3.5 m,水平方向距夯坑中心1.7 m处的竖向变形基本均在30 cm左右,因此可以认为本文算例的单点加固半径约为1.7 m,这与公式(2)计算的1.95 m接近,说明计算结果比较合理。强夯施工时的夯点间距应根据单点加固范围来确定,本文算例的夯点间距可采用4 m×4 m。

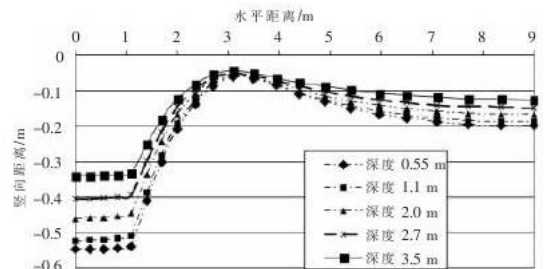


图7 沿水平方向的竖向变形

Fig. 7 Vertical deformation along with horizontal direction

## 2 结论

在文献[4]的基础上对强夯加固高填方饱和地基土的数值模拟作进一步研究,探讨用数值模拟方法确定强夯法施工参数,得出如下结论<sup>[8]</sup>:

1)根据程序计算结果绘制孔隙水压力增量随时间的变化曲线,根据曲线趋于恒定的点所对应的夯击次数,确定强夯的最佳夯击次数,本文模型的最佳夯击击数为7击。

2)根据程序计算结果绘制土体沿深度方向的竖向变形图,确定强夯的有效影响深度,进而确定土体的有效加固深度。

3)根据程序计算结果绘制土体沿水平方向的

竖向变形图,确定强夯的加固范围,由此确定高填方地基强夯的夯点间距,本文算例的夯点间距为 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 。

4)在算例的第7次夯击后,把间隙时间拉长,根据孔隙水压力的消散情况,可以确定强夯相邻2遍的间歇时间。

#### 参考文献:

- [1] 郑颖人,陆新,李学志,等.强夯加固软粘土地基的理论与工艺研究[J].岩土工程学报,2000,22(1):18-22.
- [2] 叶为民,唐益群,杨林德,等.强夯法加固饱和软土地基效果研究[J].岩土力学,1998,19(3):72-76.

- [3] 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,2004.
- [4] 周世良,庞博,郑红娟.强夯加固饱和地基土的数值模拟[J].水运工程,2009(4):140-146.
- [5] 高大钊.岩土工程的回顾与前瞻[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [6] 龚晓南.地基处理手册[M].3版.北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [7] 徐至钧,张亦农.强夯和强夯置换法加固地基[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [8] 郑红娟.高填方饱和地基土强夯处理数值模拟研究[D].重庆:重庆交通大学,2008.

(上接第911页)

## 4 结论

1)空间位阻法能够有效地解决PE改性沥青离析严重的问题,其原理清晰,为工业化生产的工艺设计及过程控制提供了基础。组合助剂中DL为沥青用量的4%、DXJ为8%、胶连剂为0.8%时,PE改性沥青的贮存稳定性最好;组合助剂与基质沥青的比

例应根据改性剂的剂量调整。

2)化学添加剂法制备PE改性沥青的工艺简单,所得到的改性沥青不仅具有良好的热贮存稳定性,而且具有优良的技术性能。

3)基质沥青这类高蜡沥青适宜于选用PE作为改性剂,改性效果显著,可达到III-B及III-C级技术标准(表14)。

表14 PE改性沥青技术指标

Tab. 14 Technical indicators of PE modified asphalts

试验项目	3% PE1 改性沥青	4% PE1 改性沥青	2% PE2 改性沥青
针入度/(0.1mm)	77	71	48
针入度指数PI	-1.05	-0.74	0.91
软化点/℃	49.5	52.2	66.1
运动黏度/(Pa·s)	0.405	0.425	1.500
闪点/℃	309	307	308
离析,软化点差/℃	无改性剂明显析出、凝聚	无改性剂明显析出、凝聚	无改性剂明显析出、凝聚
质量损失/%	0.12	0.10	0.02
针入度比/%	75.6	78.8	85.4
符合技术要求等级	III-B	III-B	III-C

4)借用PG分级标准评价,PE改性沥青的路用温度范围较之于基质沥青大幅度增加。用添加剂法制备的2%PE2改性沥青,其路用温度范围可以达到94℃(表15)。

表15 沥青SHRP分级

Tab. 15 SHRP grading of asphalts

	基质 沥青	基质沥青+ 3% PE1	基质沥青+ 4% PE1	基质沥青+ 2% PE2
高温等级	52	64	70	76
低温等级	-22	-22	-20	-18
温度范围/℃	74	86	90	94

#### 参考文献:

- [1] 张敏. NOVOPHALT 改性沥青路面质量的控制技术[J]. 中外公路,2004,24(4):39-42.
- [2] 赵可. 沥青及沥青混合料改性研究[D]. 西安:西安公路交通

- 大学,1999.
- [3] 赵可,原健安. 聚合物改性沥青机理研究(之一):改性剂对轻质组分的吸收作用及体系的聚集态[J]. 西安公路交通大学学报,2001,21(2):34-37.
- [4] 王仕峰,马丕明,欧阳春发,等. 聚乙烯/炭黑复合改性沥青的稳定化研究[J]. 石油沥青,2006(6):22-26.
- [5] Ouyang Chunfa, Wang Shifeng, Zhang Yong, et al. Low-density polyethylene/silica compound modified asphalts with high-temperature storage stability[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006,101(1):472-479.
- [6] 李军,张玉霞,张玉贞. 甲基丙烯酸缩水甘油酯接枝低密度聚乙烯沥青改性剂改性机理研究[J]. 炼油技术与工程,2007,37(8):16-20.
- [7] 高光涛,朱玉堂,张勇,等. 贮存稳定的LDPE/SBS共混改性沥青的制备[J]. 公路交通科技,2002,26(6):238-240.
- [8] 原健安. PE改性沥青中几个问题的讨论[J]. 西安公路交通大学学报,1999,19(1):13-16.