

# 填土地基强夯加固效果研究<sup>①</sup>

张北战, 姚仰平, 方雨菲

(北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191)

**摘要:**针对回填土地基,通过量纲分析得到强夯加固深度和累积夯沉量的计算公式,结合已有工程资料对所提出的计算公式进行验证。结果表明:该公式能够较为精确地预测填土地基的加固深度与累积夯沉量;分析表明:累积夯沉量与加固深度比值随着诸多要素而变化,仅在确定的落距和夯锤半径范围内的才可以作为常数进行推广;最后分析夯锤半径及厚度对强夯效果的影响。

**关键词:**强夯;加固深度;累积沉降量;夯锤尺寸

中图分类号: TU472

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)增刊 1-0030-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0563

## Reinforcement Effect of Dynamic Compaction on a Backfilled Foundation

ZHANG Bei-zhan, YAO Yang-ping, FANG Yu-fei

(School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Aiming at backfilled foundation, formulas of reinforcement depth and cumulative settlement have been obtained by dimensional analysis. The proposed formulas have been validated combined with the existing engineering data. The results show that the formulas can more accurately predict reinforcement depth of backfilled foundation and cumulative settlement, and also can analyze the relationship between cumulative settlement and reinforcement depth. The results showed that the ratio of cumulative settlement and reinforcement depth varies with many factors, and only in certain distance and rammer radius, can it be extended as a constant. In the last, we analyze the impact of the hammer radius and thickness on the effect of dynamic compaction. The conclusion has a certain reference value for similar practice.

**Key words:** dynamic compaction; reinforcement depth; cumulative settlement; hammer size

### 0 引言

强夯法处理大面积填土地基具有经济、效果显著等优点。自 1969 年问世以来受到了工程界的极大重视,在工程上得到了广泛应用。孔令伟<sup>[1]</sup>采用积分变换和传递矩阵法对强夯的应力分布特征进行了数值模拟;吴铭炳<sup>[2]</sup>、李本平<sup>[3]</sup>等编写了适应于强夯的动力分析有限元程序,通过模拟强夯作用下土

体的动应力分布,对强夯加固机理进行了分析;蔡袁强<sup>[4]</sup>对动力荷载作用土体的阻尼作用进行了改进,将 P 波和 S 波的阻尼引入到强夯中;Scott<sup>[5]</sup>将强夯加固地基的过程简化为理想的结构模型,并经过经典结构动力学理论来推导强夯作用下地基土的动力响应及锤土接触应力解析式,但由于简化过多很难应用于实际工程。关于强夯加固填土地基的加固深

① 收稿日期:2015-04-01

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2014CB047006);国家自然科学基金项目(11272031)

作者简介:张北战(1988-),男,硕士研究生,主要从事机场工程的高填方研究。E-mail:zhangbeizhan@sina.cn

通讯作者:姚仰平(1960-),男,教授、博士生导师,主要从事土的本构关系及机场工程的岩土问题研究。E-mail:ypyao@buaa.edu.cn

度的预测一直是强夯研究的热点问题之一。学者从不同的角度得到了加固深度的计算公式<sup>[6-9]</sup>,同时关于地基夯沉量的研究也不少<sup>[10]</sup>,然而强夯加固深度与累积夯沉量关系的研究还较少,累积夯沉量的大小往往只作为停夯的确定指标。

本文在前人研究的基础上应用 ABAQUS 有限元软件对强夯加固填土地基的过程进行模拟,分析外荷载对强夯效果的影响规律,通过量纲分析研究强夯作用下填土地基加固深度与累积夯沉量的计算公式,在此基础上对用累积夯沉量来预测强夯加固深度这一问题进行讨论。

### 1 有限元数值模拟

本文以康定机场试夯段<sup>[11]</sup>为研究对象,通过有限元法对强夯加固过程进行模拟。

#### 1.1 计算模型

在建立强夯夯击的非线性有限元模型时,考虑到强夯的动力学特征,模型取为圆柱体,半径大于 5 倍的夯锤直径(图 1)。为了能够较为真实地反映强夯过程中锤土接触应力的变化过程,选取夯锤的实际大小,将夯锤抬高到指定高度落下,考虑夯锤与土体的接触过程,接触面摩擦系数取 0.2。

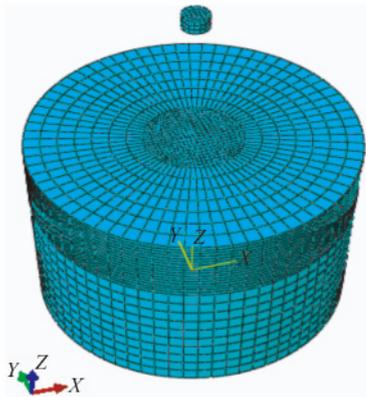


图 1 康定机场三维计算模型

Fig. 1 Three-dimensional model for Kangding Airport

#### 1.2 本构模型的选择

岩土材料的本构模型较多,且具有各自特点<sup>[12-14]</sup>。在强夯荷载作用下土体具有非线性、滞后性、应变率效应等特点,目前还没有能够较好反映夯击荷载作用下土体变形特性的本构模型。然而 M-C 模型具有简单、实用、参数少等优点,在强夯模拟中已经取得较为满意的结果,本文采用 M-Z 模型来模拟强夯冲击荷载作用下土体动力响应,对试夯段土体进行室内试验,得到土的基本参数,见表 1。

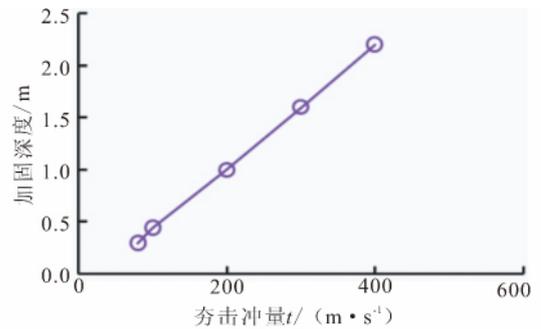
表 1 填土土体参数

Table 1 Parameters of filled soil

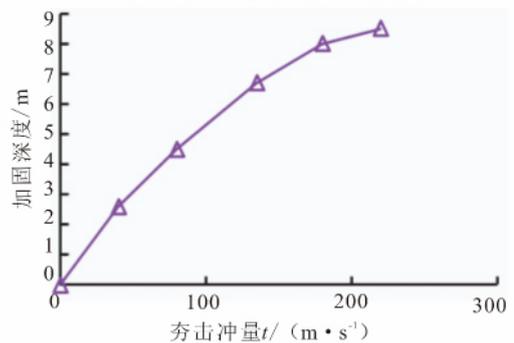
弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	初始屈服 塑性应变 $\epsilon_p$	剪胀角/ $^\circ$	摩擦角/ $^\circ$
18	0.35	5	0	10	30

## 2 强夯外荷载的数值模拟结果

关于强夯外荷载的控制参数大多采用夯击能,然而“重锤低落”优于“轻锤高落”问题的出现表明用夯击能作为施工控制参数存在很大不足。为了能够区分“重锤低落”优于“轻锤高落”,本文对夯击冲量与加固深度和累积夯沉量之间的关系进行研究,图 2 为夯击冲量对强夯加固效果的影响曲线。由图可知,夯击冲量与累积夯沉量与加固深度都存在一一对应关系,夯击冲量与累积夯沉量近似线性关系,而与加固深度关系近似抛物线。数值结果表明用夯击冲量作为施工控制参数具有明显的优势。



(a) 夯击冲量与累积夯沉量关系曲线



(b) 夯击冲量与加固深度关系曲线

图 2 夯击冲量与强夯效果的关系

Fig. 2 Relation between tamping impulse and effect of dynamic compaction

## 3 加固深度和累积夯沉量的计算公式

由于强夯过程较为复杂,理论研究远远落后于工程实践,然而加固深度研究的落脚点依然是服务于工程实践,所以加固深度公式应该具有简单、准确反映强夯影响因素、方便应用等特点。近年来一些

学者从量纲分析<sup>[9]</sup>的角度得到强夯加固范围的计算公式,由于量纲分析具有简单易行、传统经验为基础等优点,本文应用量纲分析方法对加固深度和累积夯沉量的计算公式进行研究。

影响强夯效果的主要参数有夯击冲量  $MV$ 、夯锤半径  $R$ 、填土初始干密度  $\rho_{d0}$  等。由于量纲分析的需要,引入了土体初始瑞利波速这一物理量  $C_R$ 。

量纲分析得:

$$[D] = \sqrt{\frac{MV}{S\rho_{d0}C_R}}R = \sqrt{\frac{t \cdot m/s}{m^2 \cdot t/m^3 \cdot m/s} \cdot m} = [m] \quad (1)$$

$$[h] = \frac{MV}{S\rho_{d0}C_R} = \frac{t \cdot \sqrt{2gH}}{m^2 \cdot t/m^3 \cdot m/s} = [m] \quad (2)$$

因此

$$D = \alpha \sqrt{\frac{MV}{R\rho_{d0}C_R}} \quad (3)$$

$$h = \beta \frac{MV}{S\rho_{d0}C_R} \quad (4)$$

其中  $\alpha$  和  $\beta$  为不同种类土的修正系数。

### 3 加固深度与夯击沉降量的预测

#### 3.1 加固深度的预测

表2为黄土地基加固深度统计表,数据来源于文献[15-17]。表2表明式(3)计算误差较小,能够较为准确地预测黄土地基强夯加固深度。

#### 3.2 累积夯沉量的预测

表3为黄土地基在强夯作用下累积夯沉量统计表,数据来源于文献[18]。由表3可知,公式(4)能够较好地反映强夯作用下黄土地基地表累积夯沉量。

表2 黄土地基加固深度统计表

Table 2 Reinforcement depths of loess foundation

质量/t	落距/m	夯锤半径/m	夯锤面积/m <sup>2</sup>	初始干密度/(t·m <sup>-3</sup> )	瑞利波速度/(m·s <sup>-1</sup> )	实测/m	本文公式/m	误差
20	10	1	3.14	1.33	180	7.46	8.12	-8.87%
10	13	1.12	4	1.33	180	5.47	5.77	-5.52%
20	10	1.12	4	1.33	185	7.74	7.51	2.95%
10	18	1.12	4	1.42	190	6.04	5.89	2.42%
10	11	1.15	4.16	1.43	190	5.02	5.14	-2.42%
25	25	1.49	7	1.44	190	9	8.73	2.97%
20	25	1.49	7	1.44	190	8	7.81	2.36%
20	20	1.49	7	1.44	190	7	7.38	-5.53%
40	20	1.26	5	1.41	185	10.75	11.64	-8.29%
40	20	1.59	8	1.72	220	9.5	8.57	9.72%

表3 黄土地基强夯累积夯击沉量统计表

Table 3 Cumulative settlements of loess foundation

夯锤质量/t	落距/m	密度/(t·m <sup>-3</sup> )	波速/(m·s <sup>-1</sup> )	半径/m	面积/m <sup>2</sup>	实测/m	本文公式/m	误差
10	10	1.4	200	1.25	4.91	0.618 8	0.560 081	9.49%
15	6.7	1.4	200	1.25	4.91	0.636 7	0.687 67	-8.01%
20	5	1.4	200	1.25	4.91	0.740 5	0.792 075	-6.96%

#### 3.3 累积夯沉量与加固深度的关系

目前关于填土累积夯沉量的研究主要还是为了确定停夯的次数。实际工程中,为了节约成本通常通过地表累积夯沉量来推测类似工程的加固深度,这就要求对累积夯沉量和加固深度的关系进行深入的研究。本文在式(3)、(4)的基础上对该问题进行分析。

由式(3)、(4)可得:

$$\frac{h}{D} = \eta \sqrt{\frac{MV}{R\rho_{d0}C_R}} \quad (5)$$

其中  $\eta$  为  $\alpha$  和  $\beta$  确定的常数。

由式(5)可知,累积夯沉量与加固深度的关系较为复杂,与夯锤落地冲量、夯锤的半径、填土地基的土性参数都有关。

式(5)表明,在其他参数(夯锤质量、落距、土性参数)不变的情况下,累积夯沉量与加固深度的比值随着夯锤半径的增大而减小。图3为累积夯沉量与加固深度的比值( $h/D$ )和夯锤半径的关系曲线。由图可知  $h/D$  是随着夯锤半径变化的,当夯锤半径处于 1~2 m 范围内, $h/D$  的取值处于 0.8~1 范围,

变化范围较小。

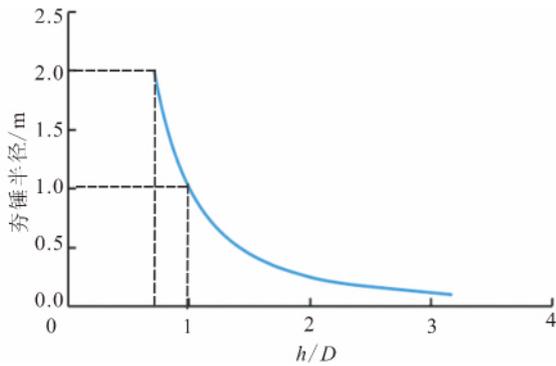


图 3 累积夯沉量与加固深度的比值和夯锤半径的关系曲线

Fig. 3 Relationship between  $h/D$  and hammer radius

同理,在夯锤大小、土性参数不变的情况下,累积夯沉量与加固深度的比值随着落距的增大而增加。图 4 为累积夯沉量与加固深度的比值和夯锤落距的关系曲线。由图可知,当夯锤落距在 0~13 m 范围内, $h/D$  取值变化幅度较大;落距在 13~20 m 范围内, $h/D$  变化幅度较小。

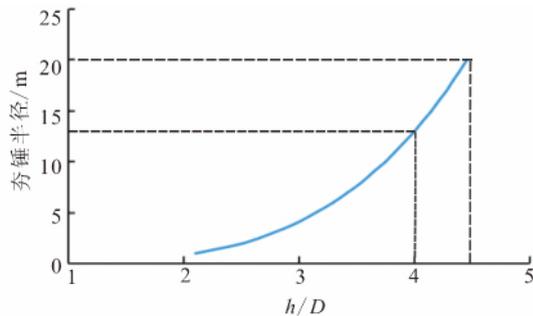


图 4 累积夯沉量与加固深度的比值和夯锤落距的关系曲线

Fig. 4 Relationship between  $h/D$  and drop height

综合图 3、图 4 可知,累积夯沉量与加固深度的比值是随着强夯参数的变化而变化的。在具体的工程中,若需要根据累积夯沉量来预测加固深度的大小,应该根据具体的落距和夯锤半径的大小谨慎判断,切记随意扩大经验值的使用范围。

#### 4 夯锤厚度与半径对强夯效果的影响

关于夯锤半径对强夯加固效果的研究目前主要思路<sup>[19]</sup>是保持夯锤质量不变,改变夯锤的半径,然而该方法实质上间接地改变了夯锤厚度——单位面积的夯锤质量。本文在上述强夯加固深度与累积夯沉量计算公式的基础上,对夯锤半径对强夯效果的

影响进行分析。

令  $\zeta = \sqrt{\frac{\sqrt{2gH}}{\rho_{do} C_R}}$ , 由式(3)得:

$$D = \zeta_{\alpha} \sqrt{\frac{M}{R}} = \zeta_{\alpha} \sqrt{\frac{\rho S h}{R}} = \zeta_{\alpha} \sqrt{\pi \rho R h} \quad (6)$$

其中  $\bar{h}$  为夯锤厚度。

由式(4)得:

$$h = \zeta^2 \beta \rho \bar{h} \quad (7)$$

比较式(6)、(7)可知,在其他参数(夯锤落距、土性参数)不变的情况下累积夯沉量仅与夯锤的厚度有关,与夯锤半径有关,即夯锤厚度一定,改变夯锤半径,不改变地表累积夯沉量。加固深度不仅仅与单位面积夯锤质量有关,还与夯锤半径都有关。笔者认为造成这两种不同变化规律的原因是加固深度涉及深部土颗粒的变形与位移。造成深部土颗粒变化的主要原因是动力波的传播,深部动应力波的大小不仅与震源单位面积应力大小及频率有关,还与震源的尺寸有关。

#### 5 结论

本文通过量纲分析并结合具体的工程实例,得到以下结论:

(1) 根据量纲分析结合工程实例提出的强夯加固深度与累积夯沉量计算公式能够对黄土地基进行较好的预测。

(2) 夯锤落距和夯锤半径在固定的范围内,加固深度与累积夯沉量的比值才可以近似为常数进行推广。

(3) 在土性参数与夯锤落距固定的条件下,加固深度随着夯锤半径和夯锤厚度的变化而变化,而累积夯沉量仅仅与夯锤的厚度有关,不随半径变化而变化。

#### 参考文献 (References)

[1] 孔令伟,袁建新.强夯的边界接触应力与沉降特性研究[J].岩土工程学报,1988,20(2):86-92.  
 [2] 吴铭炳,王钟琦.强夯机理的数值分析[J].工程勘察,1989(3):1-5.  
 [3] 李本平.有限元法分析强夯加固机理[D].杭州:浙江大学,1993.  
 [4] 蔡袁强,陈超,徐长节.强夯加固填土地基的三维数值模拟[J].岩土力学,2007,28(6):1108-1112.  
 [5] Scott R A, Pearce R W. Soil Compaction by Impact[J]. Geotechnique, 1975, 25(1):1-9.  
 [6] 冶金工业部建筑科学研究所.地基处理技术[M].北京:冶金工业出版社,1989.

- [7] 坂口旭,西海宏,服部正夫,等. 动力密工法しこるてん基础工事[J]. 土て基础,1979,27(9):206-209.
- [8] 王钟琦,邓祥林. 强夯机理及其环境影响[C]//第四届土力学及基础工程学术会议论文集. 北京:中国建筑工业出版社,1986.
- [9] 张平仓,汪稔. 强夯法施工实践中加固深度问题浅析[J]. 岩土力学,2000,21(1):76-80.
- [10] 牛志荣,杨桂通. 冲击作用下土体动力学特性研究[J]. 工程力学,2006,23(3):118-127.
- [11] 陈涛. 山区机场高填方地基变形及稳定性研究[D]. 郑州:郑州大学,2010.
- [12] 罗汀,秦振华,姚仰平,等. UH 模型切线刚度矩阵对称化及其应用[J]. 力学学报,2011,43(6):1186-1189.
- [13] 姚仰平,万征,秦振华. 动力 UH 模型及其有限元应用[J]. 力学学报,2012,44(1):132-39.
- [14] LUO T, QIN Z H, FENG X, et al. A Symmetrisation Method for Non-associated Unified Hardening Model[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 52(6):38-45.
- [15] 《地基处理手册》编写委员会. 地基处理手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [16] 倪石泉. 高能量强夯处理大厚度自重湿陷性黄土地基[C]//地基处理经验集萃. 北京:中国电力出版社,1996.
- [17] 杨存范. 强夯法处理深度湿陷性黄土地基[C]//地基处理经验集萃. 北京:中国电力出版社,1996.
- [18] 李天光. 重锤低落距与轻锤高落距强夯法加固湿陷性黄地基效果对比[J]. 工程勘察,1995,(2):14-17.
- [19] 田水,王钊. 强夯动力性能的显式非线性数值分析[J]. 岩土力学,2008,29(6):1580-1584.