

# 强夯加固湿陷性黄土路基的瞬态动力数值模拟

王克忠<sup>1,2</sup>, 冯耀奇<sup>3</sup>, 张延新<sup>1</sup>, 于德水<sup>1</sup>, 丁余慧<sup>1</sup>

(1.北京科技大学 土木与环境工程学院,北京 100083;2.山东农业大学 水利土木工程学院,山东泰安 271018;3.聊城市河道工程管理局,山东聊城 252000)

**摘要:**用三维有限单元法数值模拟计算了黄土路基单点多次夯击过程,在算例中给出了邯长高速公路夯击过程中地基内各点的应力、位移变化规律图形。并将计算结果与强夯法施工现场的测试结果作了比较。为精确模拟分析强夯加固机理提供了有效途径。

**关键词:**黄土;湿陷性;数值模拟

**中图分类号:**TU472.3<sup>+1</sup> **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2004)06-0053-04

## Instantaneous Dynamic Numerical Modeling of Collapsible Loess Foundation Consolidated by Ramming

WANG Ke-zhong<sup>1,2</sup>, FENG Yao-qi<sup>3</sup>, ZHANG Yan-xin<sup>1</sup>, YU De-shui<sup>1</sup>, DING Yu-hui<sup>1</sup>

(1. College of Civil and Environmental Engineering, USTB, Beijing 100083, P. R. China; 2. Institute of Water Resource Reconnaissance, Shandong Agriculture University, Taian 271810, Shandong P. R. China; 3. Liaocheng River Engineering Bureau, Liaocheng 252000, Shandong, P. R. China)

**Abstract:** In this paper, the procedure of single-point and multiple-time ramming for loess is simulated using the finite element method. The graph about the distribution of stress, displacement and pressure in the foundation during dynamic consolidation are provided in a sample with Han-chang expressway as an engineering background. The computational results obtained are compared with the data measured in the consolidation site. An effective path to simulate the consolidation mechanism precisely is provided.

**Keywords:** loess; collapsibility; numerical modeling

强夯法加固地基的技术已在国内外的地基加固工程中得到了广泛应用,但到目前为止,强夯法仍停留在经验设计阶段,严格的强夯模型建立和理论分析计算不多<sup>[1-3]</sup>。强夯的边界接触应力是强夯理论分析的重要边界条件,也是强夯理论分析一大难点所在。基于实测夯锤冲击地面的应力波为一尖峰,没有明显的第二应力波,常将强夯产生的瞬态荷载简化成三角形,峰值和夯击时间用一维非弹性模型所得公式确定,而在数值分析时又应用该结果进行非线性弹性甚至弹塑性分析,显然是欠合理的。有限元法的优点是可以方便地实现对涉及的各类复杂地基本构模型、边界条件和复杂形体等问题进行数值分析。

强夯法加固地基的机理复杂,影响因素很多且涉及到众多耦合和非线性问题,因此大部分研究中都把实际问题作了简化,其计算结果应用到工程上还有一定困难。采用较实际的力学模型对强夯过程进行理论分析和数值模拟,可了解和掌握湿陷性黄土在受夯击时的应力分布规律,夯后土体变形区域和重塑性分布范围。

## 1 瞬态动力学数值模拟

### 1.1 强夯时夯锤的刚体运动特性

从高处自由下落的夯锤撞击到地表面时,接触应力的大小是随时间改变的,其分布也是不均匀的。

\* 收稿日期:2004-07-10

作者简介:王克忠(1965-),男,山东冠县人,副教授,博士生,主要从事道路工程和土力学方面的教学和研究工作。

本着实际出发,本文仍假设锤底应力为均匀分布,并假定夯锤为刚体,夯锤与地表面为光滑接触,即切向分力为0,则接触瞬时夯锤的刚体运动方程为

$$mg - F(t) = m \frac{\partial^2 u_z(t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中: $m$ 为夯锤质量; $F(t)$ 为夯锤底面所受到土的反力; $u_z(t)$ 为夯锤的位移。 $F(t)$ 与夯锤和地表接触应力 $\sigma_z(t)$ 的关系为

$$F(t) = -\pi a^2 \sigma_z(t) \quad (2)$$

式中: $a$ 为夯锤的底面半径; $\sigma_z(t)$ 为地基表面与夯锤的接触应力,以拉应力为正,压应力为负。将式(2)代入式(1),有

$$mg + \pi a^2 \sigma(t) = m \frac{\partial^2 u_z(t)}{\partial t^2} \quad (3)$$

利用初始条件:当 $t=0^+$ 时, $u_z(t)=0$ , $\frac{\partial^2 u_z(t)}{\partial t^2} = \sqrt{2gh} = v_0$ , $g$ 为重力加速度, $h$ 为夯锤的落距,对式(3)进行 Laplace 变换得

$$\pi a^2 \hat{\sigma}_z(q) + \frac{mg}{q} = m[q^2 \hat{u}_z(q) - v_0] \quad (4)$$

式(4)即为在域内边界接触应力与表面位移的关系式。

## 1.2 模型建立

强夯加固过程是瞬时对地基土体施加一个巨大的冲击能量,使土体发生一系列的物理变化,如土体结构的破坏或液化、排水固结压密<sup>[4]</sup>以及触变恢复等。其作用结果是一定范围内地基强度提高、孔隙挤密。模拟计算中采用如下假设:①夯锤为刚体,夯击过程中夯锤底部始终保持在水平位置;②地基土为均质弹塑性介质;③土体的水平和垂直方向的渗透系数是不同的;④在夯击过程中地基处于准静态;不考虑地基土的惯性力。

边界条件 被夯击湿陷性黄土体为圆柱形,夯击能量以辐射形式传播,离荷源较远处的土体所受夯击影响忽略不计,大胆猜测并假定距荷源一定距离处圆柱侧面不透水且无法向位移,顶部夯击区外是自由表面,则边界条件为在土体底部 $z=0$ 处

$$\omega = 0, F_r = 0, v_z = 0 \quad (5)$$

$$\text{侧面 } r = a \quad \omega = 0, F_r = 0, v_z = 0 \quad (6)$$

$$\text{顶面 } z = h \text{ 非夯击区} \quad F_r = 0, F_z = 0, p = 0 \quad (7)$$

$$\text{顶面 } z = h \text{ 夯击区} \quad v_z = 0 \quad (8)$$

式中: $\omega$ 为各点的竖向位移; $p$ 为边界上的给定荷载; $v_z$ 为孔隙水渗流速度。

实常数选择 强夯法有效加固深度随夯击能量的变化而改变<sup>[5]</sup>,夯击能愈大,有效加固深度也愈大。考虑到圆柱土体的实际变形和应力变化沿垂向逐渐变小的趋势,取模型计算参量 $h=12\text{ m}$ , $a=15\text{ m}$ 。实际夯锤重量 $w=mg=2000\text{ kN}$ ,试验段土的密实度 $\rho=1.526\text{ kg/m}^3$ 。

土体弹性模量<sup>[6]</sup>按式(9)计算:

$$E_s = \left(1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu}\right) E_p \quad (9)$$

式中: $E_s$ 为压缩模量; $\mu$ 为泊松比,取 $0.3$ <sup>[6]</sup>。

加载过程(拟静力法)据动量定理计算接触应力,再根据接触应力得到接触压力,取夯锤为研究对象,考虑冲击前瞬时夯锤的速度为 $v_0 = \sqrt{2gh}$ ( $h$ 为夯锤落距)和相互作用结束瞬间夯锤的速度 $v_1$ ,设锤土接触面的最大应力为 $\sigma_{\max}$ ,接触时间为 $\Delta t$ 。

式中: $S$ 为夯锤的底面积; $M$ 为夯锤的质量。接触时间 $\Delta t$ 可由式(11)得到。郭见扬<sup>[8]</sup>(1996)从动

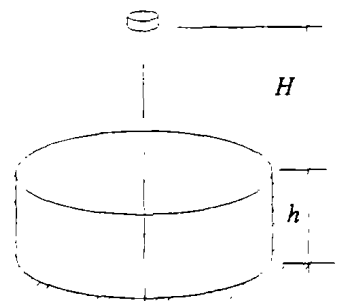


图1 强夯土体模型示意图

量定理推出了接触面应力的峰值和平均值公式<sup>[7]</sup>:

$$\sigma_{\max} = 2\bar{\sigma}_z = \frac{2w}{S} \left(1 + \sqrt{\frac{2h}{g} \frac{1}{\Delta t}}\right) \quad (10)$$

式中: $w$ 为夯锤的重量。刘惠珊从动量定理和重力做功推出接触面应力公式<sup>[5]</sup>;  $L$ 为单击时的夯沉量。如果忽略夯击时的夯能损失,则有:

$$\Delta t = \sqrt{\frac{L}{2g}} \quad (11)$$

由此便可求得  $F_{\max}$  或  $\bar{F}$ 。进而可以得到接触压力  $N$ 。根据以上公式及本工程参数可以求得从夯锤与地面接触到夯锤入土静止所要时间  $\Delta t = 0.085$  s。

### 1.3 模型求解

1.3.1 单元划分 强夯过程模拟中,夯坑周边土体单元将形成较大的变形破坏范围,特别是由于夯锤的冲剪作用,夯坑侧壁理论上将形成一剪切滑移带,若不采用特殊处理,将很容易出现网格畸变<sup>[7]</sup>而导致计算过程中网格失稳,采用三角形格元和重分技术都不能完全保证计算的顺利进行。文献[10]中介绍:在1986年版的EPIC编码程序以及Kimsey和Zukas的文章中引入了侵蚀元(erosion)的概念。当某一单元的等效塑性应变达到某一指定的临界值时,便认为该单元完全破坏,丧失抵抗变形的能力,只在单元节点上保留该单元的质量,随后只在体力作用下运动。引入侵蚀元,采用矩形格元分析强夯夯击过程,可很好地消除单元网格畸变的影响,而不再作其他特殊处理,可以模拟分析较大的夯沉量。该土体模型网格为矩形,边长为0.5 m,整个模型横向分60个单元,竖向24个单元,共1440个矩形单元。

采用Drucker-Prager<sup>[9]</sup>准则,该准则由Mohr-Coulomb准则和Mises准则扩展和推广而来,具简单实用、参数少的优点。

#### 1.3.2 模型本构方程

$$\{d_\sigma\} = [D_{ep}]\{d_\epsilon\} \quad (12)$$

式中: $\{d_\sigma\}$ 为应力增量列阵; $\{d_\epsilon\}$ 为应变增量列阵; $[D_{ep}]$ 为弹塑性矩阵。

动力平衡方程 把土体作为连续介质,不考虑孔隙水与土骨架之间的相对运动,考虑阻尼的影响,则土体质点的运动方程为:

$$[M]\{u_1\} + [c]\{u_2\} + [K]\{u_3\} = \{R\} \quad (13)$$

式中: $[M]$ 为集中质量矩阵; $\{u_1\}$ 为质点加速度列阵; $[c]$ 为阻尼矩阵; $\{u_2\}$ 为质点速度列阵; $[K]$ 为劲度矩阵; $\{u_3\}$ 为质点位移列阵; $\{R\}$ 为质点荷载列阵。

### 1.4 模拟结果分析

采用有限元软件对上述建立的二维数值模拟计算,模拟方案采用单点夯击,得到夯击竖向位移分布图、弹性及塑性变形区以及应力分布图。这些图形能够反映土体夯击后的各项力学指标变化状况及强夯效果。以下从单点夯击后的沉降值、应力分布及塑性区分布情况进行分析。

1.4.1 夯点土沉降量分析 单点夯沉量是判断强夯有效加固深度大小的重要参数,又是确定夯击次数的依据。工程实践和理论分析表明随夯击数增加,土体密实度增加、孔隙度减小、土体被压实,所以单点夯沉量随着夯击次数的增加逐渐减小。工程上确定夯击次数的标准为最后两击夯沉量不大于20 mm;同时考虑夯坑周围不发生过大隆起。强夯时孔隙水压力是影响夯沉量的主要因素之一,图3为强夯后土体的实测孔隙水压力变化曲线。

由图2可见,单击夯沉量随夯击次数的增加而减小,在第5次夯击之后,单击夯沉量趋于平稳,第七次夯击时单击夯沉量为0.049 m。图4为单点六击时的夯点竖向位移模拟图。

1.4.2 最大主应力分析 最大主压应力随着深度增加而逐渐减弱,其最大值出现在夯锤与土体接触面上;最大主应力随着夯击次数的变化而变化,夯击次数越多,最大主应力影响范围越大。图5为六击时的最大主应力分布图。随着夯击次数的增加,影响范围逐渐扩大,到7击时夯锤下8 m处最大主应力为0.48 MPa,土体在此深度以上受到强夯的极大影响,土体强度提高很大。对一系列的夯击图分析,强夯

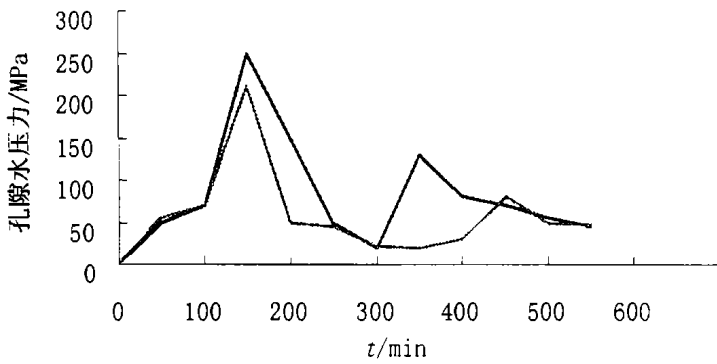


图 2 单点夯沉量与夯击次数关系曲线

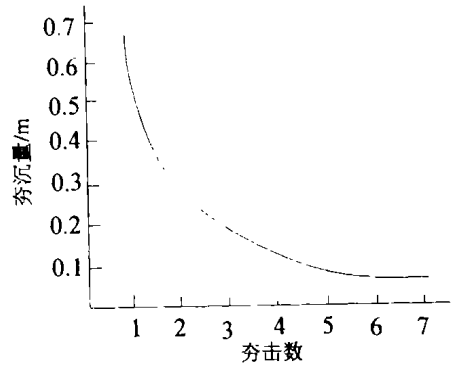


图 3 强夯后孔隙水压力变化曲线

过程中夯坑侧壁土体出现拉应力,而且随着夯击次数的增加有增长的趋势,但在第 6 夯时,开始有所回落,说明最佳夯击次数在 6 次左右。最大主应力变化情况在一定程度上可以反映土体的强夯效果。应用三维有限单元法对强夯土体进行瞬态动力学数值模拟,得到了土体模型在冲击力下最大主应力的分布情况及变化规律。另据图 5,应力分布从内向外呈递减趋势。

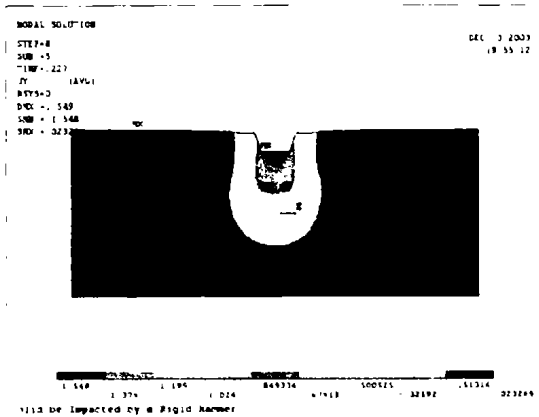


图 4 六击土体竖向位移示意图

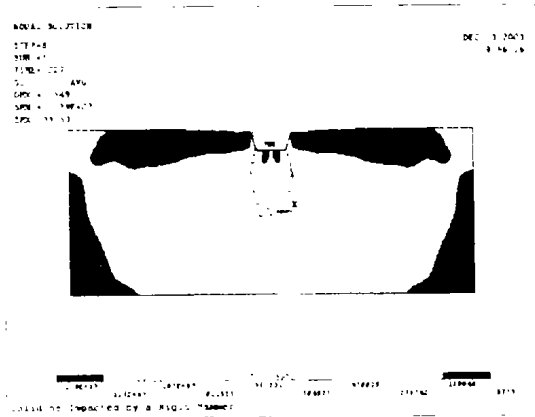


图 5 单点六击土体最大主应力分布图

1.4.3 塑性变形区分析 图 6 为单点多次夯击的塑性区分布图,土体模型的塑性变形区随夯击数不断扩大,开始几击增大趋势明显,第五击之后变化不大,土体塑性变形区趋于稳定。

## 2 结语

1) 土体中的竖向位移主要发生在夯锤正下方一定范围内,且随深度衰减较快,特别是后面几击,土体位移主要发生在土体上部。

2) 强夯法瞬态动力学数值模拟结果证明:夯法处理地基存在最佳夯击次数,在此夯击次数范围内,土体加固范围随着夯击次数的增加而增加;多余的夯击对土体加固效果影响不大,对工程没有实际意义。

3) 与以往不同,笔者对夯点土和夯间土加固机理进行了研究,夯间土加固是相邻夯击对土体的侧向挤密,夯间土范围内土体加固强度较夯点土体的加固强度要小的多,因此点夯后采用满夯是必要的。

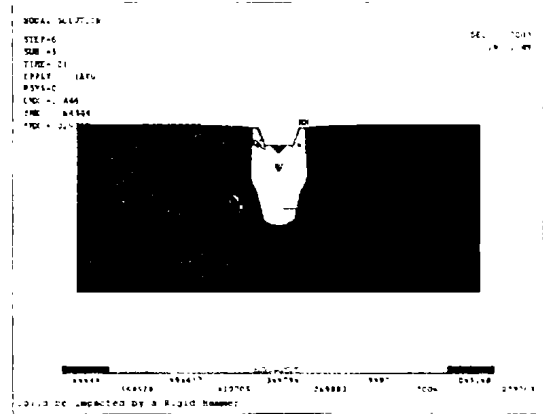


图 6 单点五击土体塑性形变分布图

本文所探讨的分段降刚度法虽然是一种较为粗略的分析方法,但它的特点在于将试验中试件的具体反应如裂缝开展、挠度变化、控制截面实测应变和破坏现象等作为确定各刚度区段刚度折减程度的依据。因此,从某种程度来说,其效果并不低于其它公认的较精确的分析方法。本次试验分析只是一个简单的特例,若要将该方法推广应用到更复杂的结构试验分析中,一方面需要做更多的理论准备,另一方面也需要积累更多的分析经验。

### 参考文献:

- [1] GB 50010-2002, 混凝土结构设计规范[S].
- [2] 杜拱辰. 现代预应力混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.
- [3] H. 尼尔森, 姚玲森, 沈莲芬. 预应力混凝土设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1984.
- [4] 屈凯峰. 竖向及水平荷载作用下后张预应力框架的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
- [5] 孙新敏. 后张有粘接预应力混凝土框架弯矩调幅的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
- [6] 朱伯龙, 董振祥. 钢筋混凝土非线性分析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1985.
- [7] 刘毅, 魏巍, 白绍良. 考虑非线性特征的钢筋混凝土框架杆件刚度折减系数[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, 22(1): 25-32.
- [8] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

---

(上接第 56 页)

### 参考文献:

- [1] Menard L, Borioise Y. Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation of civil engineers[J]. Geotechnique, 1975, 25(1): 3-18.
- [2] Fang H Y, Ellis G W. Laboratory study of ground response to dynamic densification[J]. Frity Engineering Laboratory Report, 1983, (3): 462-466.
- [3] 张永钧, 杨广鉴, 蔡梓林. 强夯法处理可液化地基的试验研究[R]. 北京: 中国建筑科学研究院, 1984.
- [4] 钱家欢, 钱学德, 赵维炳, 等. 动力固结的理论与实践[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(6): 1-17.
- [5] 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, (3): 46-52.
- [6] 曾庆军. 强夯置换深度的估算[J]. 岩土工程学报, 2002, 9(5): 608-609.
- [7] 陈洁, 李尧臣, 周顺华. 强夯·强夯加固地基的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2000, 21(12): 1-3.
- [8] 郭见扬. 强夯夯锤的冲击力问题[J]. 土工基础, 1996, 10(2): 36-37.
- [9] 龚晓楠. 高等土力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1999.
- [10] Durbin F. Numerical inversion of laplace transforms, an efficient improvement to dubner and abate s method[J]. Comput J 1974, 17(4): 371-376.