

欠固结非饱和土强夯冲击动量传递关系及应用

刘淼¹, 王芝银¹, 张如满², 袁鸿鹄², 张琦伟²

1. 中国石油大学城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249
2. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100044

摘要 夯锤和地层之间的相互作用是强夯地基处理效果研究的重要内容。针对欠固结非饱和土体弱胶结多孔结构的特点, 忽略在强夯冲击荷载作用下弱胶结土体骨架的弹性响应, 基于动量守恒原理, 建立夯锤和土层系统的动量方程。通过将强夯单击加固过程表述为各微小薄层土顺次达到临界孔隙比的过程, 构建强夯单击加固过程的递推格式, 并将其推广于多次夯击的全过程。依据递推格式编写相应的计算程序, 以北京园博园强夯加固工程为实例计算夯沉量、夯击速度、夯击时间等参数。实验表明, 地基的累计夯沉量随着夯击次数逐渐增加, 单击夯沉量逐渐减少, 且单击夯沉量在经过多次夯击之后逐渐趋于平稳; 计算结果与现场实测结果的对比表明, 采用这种递推格式计算出的夯沉量数值及变化趋势和实际相符。进一步探讨了夯沉量、夯击速度随夯击时间和夯击次数的变化特性。动量递推方法为欠固结非饱和土地基强夯加固计算提供了一个新的思路, 也为实际工程设计提供了参考。

关键词 欠固结非饱和土; 强夯机理; 动量方程; 临界孔隙比

中图分类号 TU47

文献标志码 A

DOI 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.t2.011

Impact Momentum Transfer of Dynamic Compaction in Unsaturated Under-consolidated Soil and Its Application

LIU Miao¹, WANG Zhiyin¹, ZHANG Ruman², YUAN Honghu², ZHANG Qiwei²

1. Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. Beijing Institute of Water, Beijing 100044, China

Abstract The interaction between hammer and formation is a main concern in the dynamic compaction studies. According to the weak cemented and porosity characteristics of the unsaturated soil under impact loading, the elasticity behavior of the unsaturated soil skeleton is not important. In this paper, the momentum equation between the hammer and the soil layers is established, and the dynamic compaction is expressed as a process of the layers reaching the ultimate porosity sequentially. The recursive equation based on the above viewpoint is also set up and extended to the whole process of the dynamic compaction. Based on the recursive equation, a computation program is developed, and furthermore, the foundation settlement, the hammer speed, the impact time and others are calculated for the example of the dynamic compaction project in Beijing Garden EXPO. It is shown that the total settlement increases with the impact number, the single settlement decreases with the number and appears to be stable after several impacts. The calculated settlement is in good agreement with the field experimental data. The tamping speed and the settlement with the tamping time are discussed in the end. The momentum recursive method provides a new way for the calculation of the dynamic compaction in the unsaturated under-consolidated soil and could be used in engineering designs.

Keywords unsaturated under-consolidated soil; compaction mechanism; momentum equation; ultimate porosity

0 引言

强夯过程是一个非常复杂的非线性过程, 至今仍然没有

一套成熟的理论及计算方法。关于夯锤和土体相互作用的研究主要有两个方向: 一是将土体作为弹性或者弹塑性材料,

收稿日期: 2013-04-18; 修回日期: 2013-06-08

作者简介: 刘淼, 博士研究生, 研究方向为岩石力学及其工程应用, 电子信箱: llygogo@163.com

以弹性模量为基础建立动力学关系^[4];二是将土体视为多孔可压缩材料,以孔隙率为基础进行研究^[5-7]。前者的研究成果较为丰富,涵盖了夯击作用下的位移场、应力场等的发展变化规律,但对夯坑的形成以及夯坑边缘的不连续区域表征不足;后者可以计算夯坑深度以及加固深度等问题,且具有较高精度,但对土体内部的应力分布表述比较欠缺。

大量现场量测及室内试验表明,强夯时的接触荷载非常接近于三角形或者半个正弦脉冲,且只有一个波形,在研究过程中通常作为冲击荷载考虑。对于土体材料在冲击荷载下的特性,国内外学者也进行了相关的研究^[8-10]。皮爱如等^[12]通过室内冲击实验,认为在冲击荷载作用下土体材料的弹性段不明显,且表现出明显的应变率效应。Hinckley等^[13]认为,对于表现出完全塑性应力应变特性的材料,冲击荷载产生的压缩波会在接触的表面产生积聚现象,过高的应力不能被即时传递,直到发生了压实变形。Song等^[14]通过对低密度环氧泡沫材料进行动态和准静态压缩实验证实了这一点,并指出压缩波的速度取决于加载速率。因此,类比强夯冲击加载的特点,当作用于特定的具有弱胶结多孔结构的土体时,压缩波将会在夯锤底部产生积聚。本文将多孔材料受高速冲击产生的压缩波在接触表面积聚的现象应用到受强夯加载作用的土体上,建立夯锤与锤下各微小薄层土碰撞的动量方程,构建强夯加固过程的递推格式,并将其应用到具体工程实例中进行验证。

1 弱胶结多孔结构土体受冲击荷载的基本假定

当非饱和土体以弱胶结多孔结构形式存在时,土颗粒之间通过胶结物黏结维持结构,胶结物的强度通常较小,这种结构特点使得土体在小应力状态下表现出弹性或者弹塑性特征。然而对于强夯这种冲击荷载,土体的胶结结构瞬间遭到破坏,地基特性表现为土颗粒的动力学性质。基于弱胶结多孔土体以及夯击加载的特点,本文对夯击作用过程做如下假设:

(1) 强夯高速冲击压密时忽略土体侧向膨胀。冲击压密时土体原有的骨架结构瞬息被破坏,空隙被压缩,强夯直接影响的土体区域为锤体下的圆柱形土体,侧向膨胀相比竖向压缩变形可以忽略^[17,18],该区域同周围地层之间主要是剪切关系。

(2) 冲击作用下土体的 $e-p$ 曲线简化为在临界孔隙比处产生阶跃。假定在强夯冲击作用下,弱胶结多孔结构土体的 $e-p$ 曲线在临界孔隙比(极限孔隙比)^[5,9]处产生阶跃,忽略土体在达到临界孔隙比后的压缩量(图1)。图1中, e 为孔隙比, e_1 为初始孔隙比, e_2 为临界孔隙比, σ_c 为临界应力, p 为土体所受的压应力。

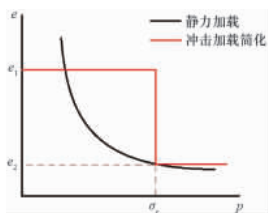


图1 冲击作用下土体的 $e-p$ 曲线假定
Fig. 1 Idealization of $e-p$ curve of soil under impact

2 强夯动量传递关系

在实际的夯击碰撞过程中,夯锤的动量并未立即分配到整个地层,而是通过锤下的土体逐层向下传递,直到动量耗尽。将夯锤下方与夯锤等径的圆柱形地基均分为无限多微小薄层,层厚记为 s ,从地表向下分别编号为第 $1 \sim n$ 层土(图2),则单层土的压缩量为

$$\Delta s = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} s \quad (1)$$

式中, s 为层厚, Δs 为该层的压缩量。

单层土的质量为

$$m' = \rho s \pi a^2 \quad (2)$$

式中, a 为夯锤半径, ρ 为土体的天然密度。

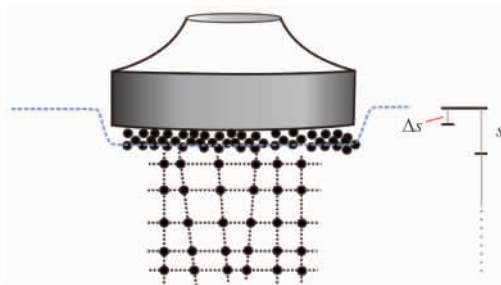


图2 冲击作用下的土体变形
Fig. 2 Soil compaction by impact load

2.1 单次夯击算法

夯锤与第1层土发生碰撞,将第一层土压密,由于压缩波在接触表面积聚,此时第2层土未受影响。碰撞结束后,夯锤和第1层土共同以速度 v_1 继续向下运动,如图2所示,碰撞过程满足动量定理

$$mv - (m + m')v_1 = F_1 t_1 \quad (3)$$

式中, m 为夯锤质量, v 为夯锤接触地面时的速度, v_1 为锤土碰撞后的共同速度, t_1 为碰撞作用时间, F_1 为第1层土与夯锤组成系统受到的外力,包括下层土支持力、系统内土自重、锤重及侧面摩阻力。下层对上层的的支持力等于临界应力,侧面摩阻力为土体侧面与周围地层间的剪切力。采用摩尔-库伦强度理论,则有

$$F_1 = \pi a^2 \sigma_c - m'g - mg + 2\pi a s \left(\rho g \frac{s}{2} k \tan \varphi + c \right) \quad (4)$$

式中, $k = \mu / (1 - \mu)$ 为土体侧压力系数, σ_c 为临界应力, φ 为土体内摩擦角, c 为土体黏聚力。

压缩该层时夯锤运动持续时间

$$t_1 = \frac{2\Delta s}{v + v_1} \quad (5)$$

式中, $v = \sqrt{2gh}$, h 为夯锤落距。

将式(4)、(5)代入式(3),即可得出夯锤和第1层土碰撞后的共同运动速度 v_1 。

接着夯锤和第1层土以速度 v_1 与第2层土进行碰撞,应用动量定理有

$$(m+m')v_1-(m+2m')v_2=F_2t_2 \quad (6)$$

式中, v_2 为碰撞作用后锤土共同运动速度, t_2 为作用时间, F_2 为此时系统受到的外力总和, 即

$$F_2=\pi a^2\sigma_c-2m'g-mg+2\pi a(2s-\Delta s)\left(\rho g\frac{2s+\Delta s}{2}-k_0\tan\varphi+c\right) \quad (7)$$

此时的运动时间变为

$$t_2=\frac{2\Delta s}{v_1+v_2} \quad (8)$$

将式(7)、(8)代入式(6), 即可以解出 v_2 。于是, 当夯锤与第 i 层土碰撞时, 动量定理可表述为

$$[m+(i-1)m']v_{i-1}-(m+im')v_i=F_it_i \quad (9)$$

式中,

$$F_i=\pi a^2\sigma_c-im'g+2\pi a[is-(i-1)\Delta s]\cdot\left(\rho g\frac{is+(i-1)\Delta s}{2}-k_0\tan\varphi+c\right)-mg \quad (10)$$

$$t_i=\frac{2\Delta s}{v_{i-1}+v_i} \quad (11)$$

这里, F 、 v 、 t 意义同上, 下标代表各自所在土层号, 下同。

如此一直递推下去, 直到第 j 次计算得出 v_j 的 2 个根为 0 或无实际意义, 则计算终止。此时夯坑深度 $\Delta H_j=j\Delta s$, 夯击作用总时间 $T_j=\sum_{i=1}^j t_i$, 压密深度 $H_j=js$ 。式(3)、(9)即为单次夯击计算格式。

2.2 多次夯击算法

当进行第 k 次 ($k>1$) 夯击时, 锤土接触时地层中已经存在之前夯击形成的长度为 $H_{k-1}-\Delta H_{k-1}$ 的密实土柱, 且夯锤自由落体段增加了 ΔH_{k-1} 的高度, 如图 3 所示。图 3 中 H 、 ΔH 分

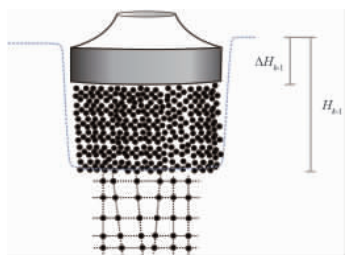


图 3 多次夯击时的力学特性

Fig. 3 Mechanical feature of multiple impacts

表 1 地层参数和施工参数

Table 1 Parameters of foundation and dynamic compaction consolidation

锤重 m/kg	落距 h/m	锤半径 a/m	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	初始孔隙比 e_1	临界孔隙比 e_2	临界应力 σ_c/kPa	天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	泊松比 μ
21000	15	1.2	19.5	27	0.75	0.45	950	1.54	0.4

夯沉量的计算结果如图 4 所示, 计算出的第 1 击的夯沉量最大, 之后逐渐减小, 7 次夯击的累计夯沉量为 1.49m, 夯击压密深度为 8.71m。通过二者的对比可以看出, 夯沉量计算值和实测值变化趋势基本相同, 峰值也较为接近, 因此, 该计算方法对于夯沉量的表述与实际相符。

夯击速度和夯沉量随夯击时间的变化见图 5。从单次夯击结果可以看出, 夯击速度随着时间逐渐减小, 且衰减速率

别为压密深度和夯坑深度, 下标代表夯击次数, 此时的碰撞初速度为

$$v=\sqrt{2g(h+\Delta H_{k-1})} \quad (12)$$

锤土接触瞬间, 由于已经压密的土柱不存在压缩过程, 因此动量守恒, 即

$$mv=\left(m+\frac{m'H_{k-1}}{s}\right)v_0 \quad (13)$$

于是, 夯锤和土柱以 v_0 继续与土柱下的土体碰撞, 递推格式为

$$\left[m+\frac{m'H_{k-1}}{s}+(i-1)m'\right]v_{i-1}-\left[m+\frac{m'H_{k-1}}{s}+im'\right]v_i=F_it_i \quad (14)$$

式中,

$$F_i=\pi a^2\sigma_c-\left(\frac{m'H_{k-1}}{s}+im'\right)g-mg+2\pi a[H_{k-1}-\Delta H_{k-1}+is-(i-1)\Delta s]\cdot\left(\rho g\frac{is+(i-1)\Delta s+2H_{k-1}}{2}-k_0\tan\varphi+c\right) \quad (15)$$

$$t_i=\frac{2\Delta s}{v_{i-1}+v_i} \quad (16)$$

递推终止条件与单次夯击相同。如果在第 j 次完成迭代,

则夯坑深度 $\Delta H_k=\Delta H_{k-1}+j\Delta s$, 夯击作用时间 $T_k=\sum_{i=1}^j t_i$, 此时的压密深度 $H_k=H_{k-1}+js$ 。多次夯击的计算过程需要逐次进行, 各次夯击的计算格式按式(13)、(14)计算。

3 应用实例

北京园博园强夯工程位于京西郊永定河畔, 待处理场地为深厚的回填地基, 成分主要为建筑垃圾、碎石、生活垃圾等, 至夯击施工时地基已经过 3~4 年的天然固结过程, 场地土体平均含水率 13.6%, 含水量较低。通过现场勘察^[9]及工程类比, 获取的场地地层参数和施工参数见表 1。依据前述的递推格式编写计算程序, 总共计算了 7 次夯击, 计算结果包括夯沉量、夯击时长、夯击速度等。为检验计算结果的合理性, 在现场进行了夯击试验, 实际测量了同一区域的 4 个夯点夯沉量随夯击次数的变化情况。

(斜率)随时间逐渐减小, 这表明夯锤和土体的接触应力随时间逐渐减小; 夯沉量随时间逐渐增加, 其斜率取决于夯击速度的变化, 在夯击开始时增长较快, 夯击临近终止时增长较慢。从多次夯击数据的比较可知, 碰撞时锤土的初速度随夯击次数逐渐减小, 单击夯沉量、单击作用时间随夯击次数也逐渐减小, 这表明随着地层的密实, 夯击的影响效果逐渐减弱。

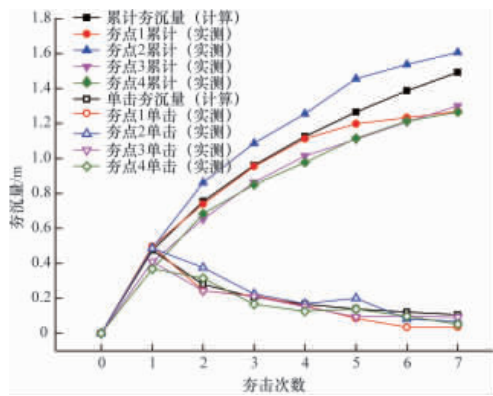


图4 夯沉量的计算值与测量值的比较

Fig. 4 Comparison of calculated and measured settlements by impact

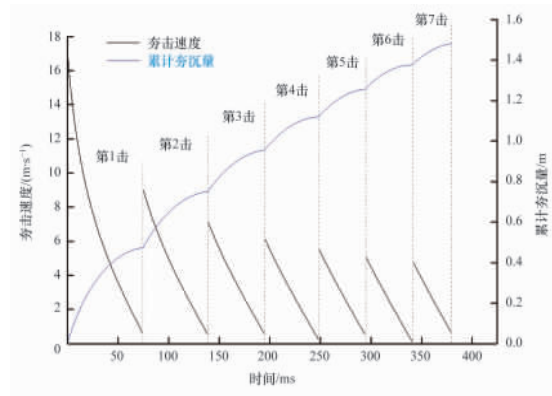


图5 夯击速度和夯沉量随时间的变化(共7次夯击)

Fig. 5 Impact velocity and settlement vary with time (7 impacts)

4 结论

(1) 根据冲击应力作用多孔结构时应力积聚的特点,将强夯加固欠固结非饱和土体的过程表述为夯锤下各层土顺次达到临界孔隙比的过程,在动量定理的基础上,依次求解各层碰撞的力学方程,建立夯沉量、夯击速度随夯击时间的变化关系。

(2) 结合具体工程实例,将夯沉量计算结果和实际测量数据进行比较,结果表明该计算格式对于夯沉量的计算基本符合实际,动量传递关系可用于园博园强夯工程的计算。

(3) 探讨了夯沉量、夯击速度随夯击时间及夯击次数的变化规律,计算表明随着夯击次数的增加,单次夯击对地基的影响逐渐减弱。

参考文献 (References)

[1] 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.
 Qian Jiahuan, Qian Xuede, Zhao Weibing, et al. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(6): 1-17.

[2] 刘汉龙, 高有斌, 曹建建, 等. 强夯作用下接触应力与土体竖向位移计算[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1493-1497.
 Liu Hanlong, Gao Youbin, Cao Jianjian, et al. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1493-1497.

[3] Mayne P W, Jones J S. Impact stressed during dynamic compaction[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(10): 1342-1346.

[4] Scott R A, Pearce R W. Soil compaction by impact [J]. Geotechnique, 1975, 25(1): 19-30.

[5] 张利军, 万来玉. 制约强夯夯实效果的极限孔隙比问题 [J]. 土工基础, 1990, 4(2): 22-25.
 Zhang Lijun, Wan Laiyu. Soil Engineering and Foundation, 1990, 4(2): 22-25.

[6] 郭见扬. 土层夯实过程模型和极限孔隙比 [J]. 土工基础, 1997, 11(1): 35-41.
 Guo Jianyang. Soil Engineering and Foundation, 1997, 11(1): 35-41.

[7] 叶观宝, 陈望春, 徐超, 等. 强夯法地基处理有效加固深度的分析研究 [J]. 上海地质, 2003, 3(1): 22-25.
 Ye Guanbao, Chen Wangchun, Xu Chao, et al. Shanghai Geology, 2003, 3(1): 22-25.

[8] Mirzaev O P. Effective method for dynamic compaction of slightly

cohesive saturated soils [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2002, 39(6): 208-213.

[9] Wall W A, Erhart T, Ramm E. Adaptive remeshing in transient impact processes with large deformations and nonlinear material behavior[C]//III European Conference on Computational Mechanics, Dordrecht: Springer Netherlands, 2006: 410.

[10] Fattah M Y, al-Musawi H H M, Salman F A. Treatment of collapsibility of gypseous soils by dynamic compaction [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2012, 30(6): 1369-1387.

[11] Pasdarpour M, Ghazavi M, Teshnehlab M, et al. Optimal design of soil dynamic compaction using genetic algorithm and fuzzy system [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29(7): 1103-1112.

[12] 皮爱如, 沈兆武, 王肖钧, 等. 土壤冲击特性的实验研究[J]. 震动与冲击, 2003, 22(3): 28-30.
 Pi Aiu, Shen Zhaowu, Wang Xiaojun, et al. Journal of Vibration and Shock, 2003, 22(3): 28-30.

[13] Hinckley W M, Yang J C S. Analysis of rigid polyurethane foam as a shock mitigator[J]. Experimental Mechanics, 1975, 15(5): 177-183.

[14] Song B, Forrestal M J, Chen W. Dynamic and quasi-static propagation of compaction waves in a low-density epoxy foam [J]. Experimental Mechanics, 2006, 46(2): 127-136.

[15] Nian W, Subramaniam K V L, Andreopoulos Y. Dynamic compaction of foam under blast loading considering fluid-structure interaction effects [J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 50(1): 29-39.

[16] Zheng Z, Liu Y, Yu J, et al. Dynamic crushing of cellular materials continuum-based wave models for the transitional and shock modes[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 42(1): 66-79.

[17] 郭见扬. 夯能的传播和夯实柱体的形成 [J]. 土工基础, 1996, 10(4): 21-28.
 Guo Jianyang. Soil Engineering and Foundation, 1996, 10(4): 21-28.

[18] 熊巨华, 胡斌, 冯世进, 等. 强夯法加固粉土地基室内模型试验研究 [J]. 世界地震工程, 2010, 26(S1): 241-246.
 Xiong Juhua, Hu Bin, Feng Shijin, et al. World Earthquake Engineering, 2010, 26(S): 241-246.

[19] 姜晶, 李惊春, 林万顺, 等. 永定河园博园水源净化工程初步设计阶段工程地质勘察报告[R]. 北京: 北京市水利规划设计研究院, 2011.
 Jiang Jing, Li Jingchun, Lin Wanshun, et al. Geological prospecting report of Yongding river Gardon EXPO water purification project as pre-design[R]. Beijing: Beijing Institute of Water, 2011.

(责任编辑 侯澄芝, 马宇虹)