

置换深度估算的一维波动方程法

罗嗣海¹, 潘小青¹, 黄松华¹, 龚晓南²

(1. 华东地质学院资源与环境工程系, 江西抚州 344000; 2. 浙江大学土木工程系, 浙江杭州 310027)

摘要: 强夯置换的应用已逐渐广泛,但其设计是高度经验性的. 强夯置换的理论研究较为肤浅,特别是置换深度的计算尚无较好的方法. 为此,提出了模拟夯击过程的一维波动方程理论模型;初步建议了模型中有关参数的取值并用工程实例进行了验证;用所提出的模型探讨了置换体形成与扩展的基本规律;给出了应用的简化形式. 结果表明,一维波动方程法及其简化形式与实际吻合较好,可应用于强夯置换的置换深度估算.

关键词: 强夯置换; 置换深度; 一维波动方程; 参数; 简化公式.

中图分类号: TU472.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2002)01-0115-05

作者简介: 罗嗣海(1966—),男,教授,2000年毕业于浙江大学,获博士学位,从事工程地质与岩土工程的教学与研究. E-mail: drsoil@sina.com

0 引言

强夯置换是近年来在强夯的基础上发展起来的一种适用于处理高饱和度、低透水性粘性土的一种地基处理方法,其加固机理主要是置换作用. 因此,置换体的几何性态(直径和长度)是影响强夯置换加固效果的主要因素,是强夯置换中的主要研究课题之一. 目前关于这一课题的研究主要是经验性的. 由于夯击时的侧向膨胀,桩体直径 D_p 一般大于夯锤直径 D ,但比值 D_p/D 受许多因素影响,不同研究者认识也不一致. 张咏梅等^[1]通过填土中的工程实践和粉土中的模型试验,认为一定置换次数后, $D_p/D \approx 1.5 \sim 1.8$; 而杨光熙^[2]对深圳国际机场淤泥中置换的实例,则认为 $D_p/D \approx 1.15$.

相对而言,置换深度(桩体长度)是一个更为重要、也更为困难的课题. 一定土质条件下,它主要取决于夯击的能量(主要是单点夯击能),也与锤径大小有密切关系. 刘惠珊等^[3]曾提出首先求出锤底压力,然后视墩体为一刚性基础,利用墩底处土层的强度条件来求置换深度的理论思路. 但这一概化模型与实际相距太大,原作者本人也认为求解出的结果过大. 目前,确定置换深度 H_r 的公式有两类:一类

是沿用修正的 Menard 公式,但采用较低修正系数 α ,即:

$$H_r = \alpha \sqrt{WH/10}, \quad (1)$$

式中: W 为夯锤重量/kN, H 为落距/m. 杨光熙^[2]建议当淤泥厚度小于 5 m 时,修正系数 α 取 0.2,淤泥厚度大于 6 m 时, α 取 0.3; 另一类是刘惠珊等^[3]建立的单击夯击能 $E_1 = WH$ 与置换深度 H_r 线性经验关系:

$$\text{下限关系 } E_1 = 940(H_r - 3.2), \quad (2a)$$

$$\text{平均关系 } E_1 = 940(H_r - 2.1). \quad (2b)$$

比较式(1)、(2)的计算结果,可得到:对淤泥厚度小于 5 m 时,式(1)与式(2b)计算结果相近. 但总体而言,这些成果较离散,彼此相差较大. 特别是现有公式和成果没有考虑锤径和土质条件的影响.

从定性的角度推测,随着夯击数与置换次数的增加,强夯置换时置换体向下扩展和侧向膨胀,置换体的几何性态发生变化. 因此,一定单击夯击能量下,形成一定深度的置换体需要一定的夯击数;一定夯击数则对应一定的置换体深度;某一单击夯击能对应着一定的最大置换深度. 但现有方法仅能粗略估算最大置换深度;不能计算达到该深度所需的夯击数;也不能给出对应置换深度时的桩尖贯入度. 因此,本文在简化的基础上提出一个一维波动模型,初步建议了模型中相关参数的取值,首次模拟

了置换体的形成过程和探讨了置换体形成的某些规律,根据计算结果,给出了简化的计算公式。

1 置换深度估算的一维波动模型

1.1 基本假设

为简化求解,本文作出如下假设,将强夯置换过程简化为一维波动问题:(1)置换体为一个规则的圆柱体,不考虑置换体复杂几何形态;(2)将桩体视作竖向一维变形的弹塑性体,因此,波的传播是沿竖向一维进行的;(3)桩体材料服从 Ginsburg^[4]、Chow 等^[5]提出的应力—应变关系,因此,当应变为 ϵ 时的割线模量 E 为:

$$E = E_{s0} \epsilon_* / (\epsilon_* - \epsilon). \quad (3)$$

对应的卸荷与再加荷模量为:

$$E_r = E / (1 - \eta); \quad (4)$$

式中: E_{s0} 为无侧胀初始切线模量; ϵ_* 为应变渐近值; η 为残余应变与卸荷时总应变的比值。(4)计算土阻力时,视桩侧与桩端土为只能承受压力的刚塑性体,桩侧和桩端的静阻力可采用单桩极限承载力的计算公式计算;在饱和粘性土中,桩端土和桩侧土的极限阻力 q_{pu} 和 q_{su} 分别为:

$$q_{pu} = (6 \sim 9)c_u + \gamma H_r, \quad (5)$$

$$q_{su} = 0.45c_u. \quad (6)$$

单位桩长的侧阻力 R_s 和桩端土的阻力 R_p 采用下式计算:

$$R_s = A_s q_{su} (1 + J_s v), \quad (7)$$

$$R_p = A_p q_{pu} (1 + J_p v), \quad (8)$$

式中: c_u 为土的不排水强度; A_s 和 A_p 分别为单位桩长的侧面积和桩底面积; J_s 和 J_p 分别为桩侧和桩端阻尼系数; v 为桩体运动速度。(5)不考虑桩体材料差异对应力波传播的影响。

1.2 求解方法

在上述基本假设下,锤—置换体—土间的相互作用可用下列方程描述:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 h}{\partial Z^2} + R, \quad (9)$$

式中: h 为桩内某截面的竖向位移; E 和 ρ 分别为桩体材料的弹性模量和密度; R 为桩周土的阻力项; t 为时间. 利用分离单元法求解方程(9)时,从土中取出置换体,将锤—置换体离散成 n 个分离单元(第一个单元为夯锤,单元高度为 ΔZ),锤和置换体的刚度用无质量的、加荷与卸荷时弹性模量不同的弹簧

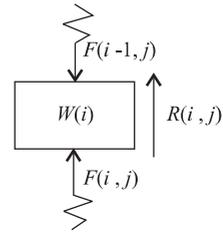


图 1 第 j 时段第 i 单元的受力

Fig. 1 Forces acting on element i at time section j

模拟,各部分的重量则由刚性单元来表示,桩周土的动阻力分别用摩擦键和粘壶表示.第 j 时段第 i 单元的受力如图 1. i 单元的重量 $W(i)$ 为:

$$W(i) = \gamma_p A_p \Delta Z. \quad (10)$$

使 i 单元产生单位变形所需之力(即各单元的弹簧常数) $K(i)$:

$$K(i) = \begin{cases} A_p E(i) / L(i), & \text{加荷,} \\ A_p E_r(i) / L(i), & \text{卸荷.} \end{cases} \quad (11)$$

各单元桩侧阻力 $R(i, j)$ 为:

$$R(i, j) = A_s q_{su} (1 + J_s v(i, j-1)), \quad (12)$$

桩端土阻力 R_p 为:

$$R_p(n, j) = A_p q_{pu} (1 + J_p v(n, j-1)), \quad (13)$$

从夯击第一击开始依次对各击进行计算.对每击的计算时把一次锤击的时间分成许多极短的时间间隔,在每一个时间段 Δt 内,应力波仅在一个单元内运动;因此,在这个时间段内,应力波在一个单元内可看作等速运动,在下一时间段内速度才发生变化.利用第 $(j-1)$ 时段末各单元的位移和速度可计算第 j 时段末的位移和速度,依次计算各时段,直到出现下列情况为止:第 n 个单元的位移已达最大;各单元的速度均为 0 或负值;此时完成了一次锤击的计算.计算中,当第 i 个单元的弹簧压缩量小于历史上的最大压缩量时即为卸荷或再压缩;反之,则为加荷.

很显然,完成某击计算时,第 n 个单元的最大位移即为该击对应的置换深度的增长;当夯坑充填后,则置换体(桩体)长度增加(计算时可增加土单元).累计各击的置换深度增长值和置换体(桩体)长度增加值,即可得到对应夯击击数时的置换深度和桩体长度.

上述计算中的基本公式为(第 i 单元 j 时段):单元体 i 的位移

$$h(i, j) = h(i, j-1) + v(i, j-1) \Delta t, \quad (14)$$

$$\text{弹簧压缩量 } \Delta h(i, j) = h(i, j) - h(i, j-1), \quad (15)$$

$$\text{弹簧作用力 } F(i, j) = K(i) \Delta h(i, j), \quad (16)$$

单元 i 上的合力

$$Z(i, j) = F(i-1, j) - F(i, j) - R(i, j), \quad (17)$$

单元 i 的加速度 $a(i, j) = Z(i, j)g/W(i), \quad (18)$

单元 i 的速度 $v(i, j) = v(i-1, j) + a(i, j)\Delta t. \quad (19)$

利用上述方法对夯击过程进行模拟,可得到置换深度和置换体长度及置换体的单击贯入度随置换次数和夯击击数的变化,由此可解决:(1)一定土质和施工工艺参数条件下,达到设计要求的置换深度所需的锤击数;(2)一定土质和施工工艺参数条件下,能有效地达到的最大置换深度;(3)一定土质条件下,达到工程要求的置换深度,较合理的施工工艺参数;(4)置换体向深度方向发展的变化规律及其影响因素。

2 计算参数取值的建议

按上述方法探讨置换体的形成和发展规律时,需用到的参数包括施工参数 W (锤重)、 H (落距); 桩体材料参数 E_{s0}, ϵ_*, η ; 被置换体的不排水强度 c_u , 阻力尼系数 J_s 和 J_p ; 桩体直径 D_p ; W, H 为已知,被置换体的不排水强度 c_u 可实测,根据经验,其余参数的取值范围如下:

$$E_{s0} = 40 \sim 50 \text{ MPa}, \epsilon_* = 0.3 \sim 0.45, \eta = 0.8 \sim 0.9,$$

$$D_p \approx D, J_s = 0.33 \sim 0.43, J_p = 1.0 \sim 1.3.$$

3 模型的初步验证

利用上述计算模型,对部分工程实例^[2](见表 1)进行计算,得出置换深度(H_r)随夯击击数(N)及单击贯入度(dH_r)随置换深度(H_r)的变化过程如图 2 所示.各实例计算中所用参数为 $E_{s0} = 50 \text{ MPa}$,

$\epsilon_* = 0.3, \eta = 0.8, J_s = 0.33, J_p = 1.33$.图中同时示出了现场夯击结束时实际的夯击击数及测到的置换体深度。

对比计算与实测结果,可以看出:尽管作了高度的近似处理,对夯锤直径在 1.5~2.0 m 左右的强夯置换工程,本节所提出的计算模型和相应的计算参数,基本能反映置换体向深度方向的扩展过程。

4 置换体形成的若干规律

(1)随着置换体深度的增大,置换体向深度方向扩展的速度减慢;一定土质和施工条件下,置换体的扩展存在一个临界深度,超过该深度后,置换体基本不能再向下扩展。

(2)置换体的深度与单击夯击能呈正相关,但这种关系尚与夯锤重量和落距的组合密切相关,如图 3a, 3b 所示,所取的计算参数为:

$$E_{s0} = 50 \text{ MPa}, \epsilon_* = 0.3, \eta = 0.8,$$

$$J_s = 0.33, J_p = 1.33, c_u = 25 \text{ kPa}, D = 1.8 \text{ m}.$$

图 3 中三种组合关系的含义为:

重锤低落距

$$W = WH/10 \text{ kN}, H = 10 \text{ m}. \quad (20a)$$

中锤中落距

$$W = 10\sqrt{WH}/10 \text{ kN}, H = \sqrt{WH}/10 \text{ m}. \quad (20b)$$

轻锤低落距

$$W = 100 \text{ kN}, H = WH/100 \text{ m}. \quad (20c)$$

相应的计算结果拟合 $H_r - WH$ 关系为:

重锤低落距

$$H_r = 0.00133 WH + 3.27. \quad (21a)$$

中锤中落距

$$H_r = 0.000725 WH + 3.35. \quad (21b)$$

表 1 国内几个强夯置换工程概况

Table 1 Outlines of some projects in China treated by dynamic replacement

序号	工程名称	被置换土层	W/kN	H/m	WH/kJ	D/m	H_r/m	$f/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$
1	马钢原料堆场	淤泥质粉质粘土, 厚层	200	16.0	3 200	2.4	6.5	65
2	禹城水泥厂	5 m 内为粘、粉土, 以下为砂	150	20.0	3 000	1.5	4.7	110
3	古交矿办公楼	粉土, 粉砂类粘性土	162	10.0	1 620	2.75	4.0	75
4	山西大学化学楼	5~6 m 厚流态粘性土	115	14.0	1 600	2.3	4.0	70
5	深圳机场拦淤堤	淤泥 5~6 m, 以下为粉质粘土	180	14.0	2 520	1.4	6.0	30
6	深圳机场停机坪	填土 2.5 m, 以下约 5 m 淤泥	150	20.0	3 000	1.0	7.0	30
7	北仑港二期堆场	厚层淤泥质粉质粘土	220	20.5	4 510	1.6	8.2	60
8	某原油中转库	淤泥质粘土	150	20.0	3 000	1.4	8.5	55
9	某 5 万 t 油罐	粉土与粉质粘土互层	150	13.3	2 000	1.5	4.5	110
10	武钢四烧	淤泥, 厚层	180	19.5	3 500	2.5	6.0	90

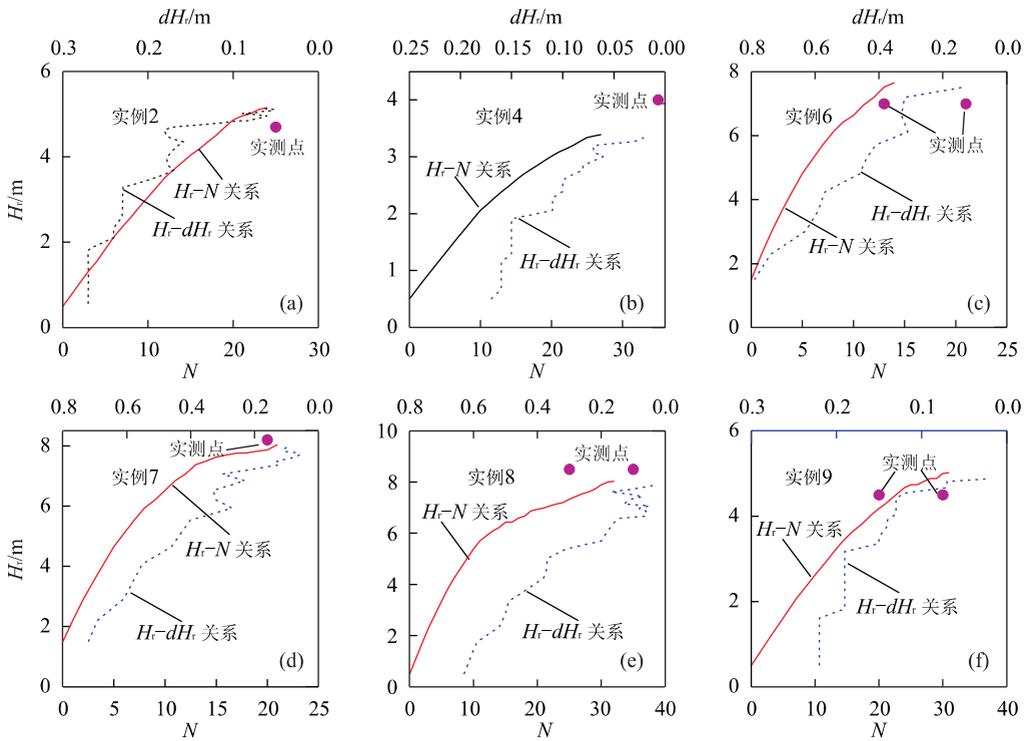


图 2 置换深度、夯击数、单击贯入度关系及其与实测结果比较(实例序号同表 1)

Fig. 2 The relationships between displaced depth and number of blows, penetration depth of per blow and comparison with measured results

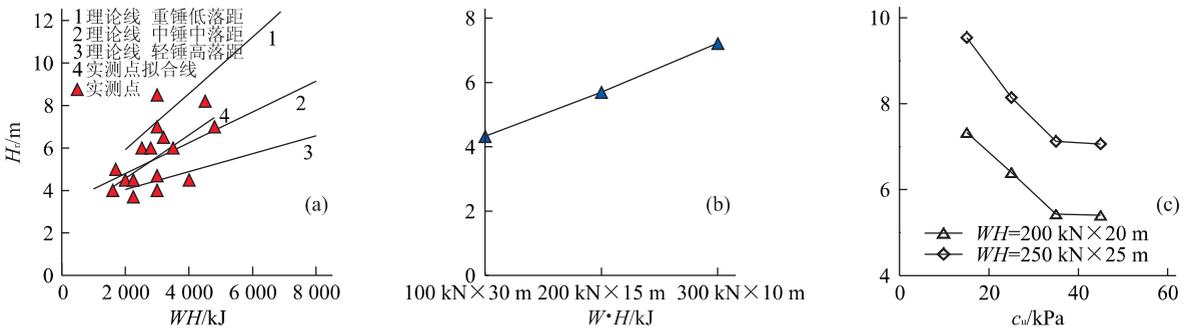


图 3 不同条件对 H_r 的影响

Fig. 3 Effect of different conditions on replacement depth
a. H_r - WH 关系; b. W 与 H 组合对 H_r 的影响; c. 土质对 H_r 的影响

轻锤高落距

$$H_r = 0.00042WH + 3.22 \quad (21c)$$

将工程实测数据点标于图 3a 中, 它们基本落于重锤低落距和轻锤高落距对应的两条理论线之间, 在常用的单击夯击能范围内, 实测点的经验拟合线与中锤中落距的理论线相接近. 由此间接说明所建立的计算模型基本与工程实际相符合.

(3) 置换体的深度与被置换土层的性质有关, 如图 3c, 由此得出的土质修正系数 α_{c_u}

$$\alpha_{c_u} = \begin{cases} \frac{H_{r,c_u}}{H_{r,25}} = -0.371c_u/25 + 1.378, & 15 \text{ kPa} \leq c_u \leq 35 \text{ kPa} \\ 1, & c_u > 45 \text{ kPa} \end{cases} \quad (22)$$

综合上述各式, 得出计算置换体深度的简化式:

$$H_r = \alpha_{c_u} (aWH + b) \quad (23)$$

式中的系数 a, b 与 W 和 H 的组合有关, 参见(2)中各式. 利用上式对表 1 中工程实例 1~10 进行计算, 得出的结果及其与实测值的对比如图 4. 图中结果说明, 由本节理论模型的计算结果得出的置换深度

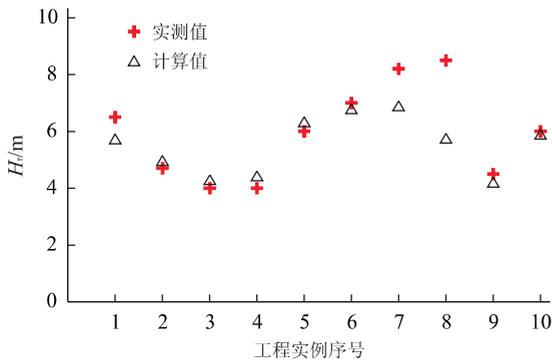


图 4 简化公式的计算结果及其与实测值的比较

Fig. 4 The calculated results using simplified formula and comparison with measured results

简化计算式能较好地与实测资料吻合。

参考文献:

[1] 张咏梅, 史光金. 强夯置换方法的应用与研究[A]. 第六届全国土力学与基础工程学术讨论会论文集[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991. 629—632.

Zhang Y M, Shi G J. Application and research of dynamic replacement methods [A]. Proceedings of the 6th national conference on soil mechanics and foundation engineering [C]. Beijing: China Architectural Industry Press, 1991, 629—632.

[2] 杨光煦. 强夯挤淤的原理、方法及工程实践[J]. 建筑技术, 1992, 19(1): 1—8.

Yang G X. The principle, method and practice of dynamic displacement [J]. Building Techniques, 1992, 19(1): 1—8.

[3] 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 H S, Rao Z H. The design method and parameters of dynamic replacement [J]. Foundation Engineering, 1996, (2): 6—13.

[4] Ginsburg T. Propagation in soil columns [J]. Journal of Engineering Mechanics, American Society of Civil Engineering (ASCE), 1964, 90(1): 125—163.

[5] Chow Y K, Yong D M, Lee S L. Dynamic compaction of loose sand deposits [J]. Soils and Foundation, 1992, 32(4): 93—106.

One-Dimensional Wave Equation Model for Estimating Replacement Depth of Dynamic Replacement

Luo Sihai¹, Pan Xiaoqing¹, Huang Songhua¹, Gong Xiaonan²

(1. Department of Resources and Environmental Engineering, East China Geological Institute, Fuzhou 344000, China; 2. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Dynamic replacement has gained wide application, but its design is highly empirical. There is no way to estimate properly the displacement depth. In this event, this paper draws its attention on this subject, proposes a one-dimensional wave equation model and its solution method for the replacement depth estimation, and gives the values of the parameters in this model for reference. Case studies showed this model is satisfactory. Thereafter, the replacement process has been simulated and a simplified formula for the replacement depth estimation is presented.

Key words: dynamic replacement; replacement depth; one-dimensional wave model; parameter; simplified formula.