

冲孔桩关乎成孔效率上限的提钻高度计算

范旭红¹,薛颖楠¹,杨帆¹,任冠宇²

(1. 江苏大学土木工程与力学学院,江苏 镇江 212013;2. 中国二十冶集团有限公司,上海 201900)

摘要 目的 冲孔桩在孔壁稳定前提下的成孔效率与提钻高度密不可分,找到单次冲击锤头的最佳提钻高度,为成孔效率上限计算提供依据。方法 利用有限元软件 ABAQUS 模拟锤头在泥浆中下落,探究锤头质量、泄浆孔半径、泥浆黏度、泥浆相对密度对锤头运动速度的影响规律。结果 锤头在泥浆中自由下落约 0.5 s 即达到最大速度,对应高度约 1 m;利用 MATLAB 的最小二乘法得到最佳提钻高度表达式为 $H=0.4467+0.0337X_m-5.6677X_d+21.2329X_d^2-0.2363X_w$ 。结论 锤头在泥浆中自由下落不超过 1m(具体数值由参数确定)即可达到收尾速度,之后立刻触底,可实现最短速度内达到最大冲击功,从而实现成孔效率最大化。

关键词 冲击成孔;成孔效率上限;收尾速度;ABAQUS;提钻高度

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Calculation of Bit Lifting Height of Punching Pile Related to Upper Limit of Hole Forming Efficiency

FAN Xuhong¹,XUE Yingnan¹,YANG Fan¹,REN Guanyu²

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang, China, 212013; 2. China 20th Metallurgical Group Co. Ltd., Shanghai, China, 201900)

Abstract: The hole forming efficiency of the punching pile under the premise of the stability of the hole wall is closely related to the drilling height. Finding the best drilling height for a single impact provides a basis for the calculation of the upper limit of hole forming efficiency. The method is to use the finite element software ABAQUS to simulate the hammer head falling in the mud, so that explore the influence of hammer quality, slurry discharge hole radius, slurry viscosity and slurry gravity on the speed of the hammer head. The result is that the hammer head will freely fall in the mud for about 0.5 s to reach the maximum speed, corresponding to a height of about 1m; Using the least square method of MATLAB, the expression of the optimal lifting height is obtained as follows: $H=0.4467+0.0337X_m-5.6677X_d+21.2329X_d^2-0.2363X_w$. The conclusion is that the hammer head can reach the finishing speed when the hammer head falls freely in the mud within 1m (the specific value is determined by the parameter), and then touch the bottom

收稿日期:2020-09-07

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51978315)

作者简介:范旭红(1969—),女,副教授,主要从事防灾与减灾等方面研究。

immediately, which can achieve the maximum impact energy within the shortest speed, thereby maximizing the hole forming efficiency.

Key words: percussion drilling; upper limit of hole forming efficiency; terminal velocity; ABAQUS; bit lifting height

冲击成孔是钻孔灌注桩的重要成孔工艺,广泛适用于黏土层、碎石土层、砾卵石层、裂隙发育地层等各类地质环境,应用前景广阔^[1]。冲击成孔灌注桩是采用现场钻孔然后灌注混凝土来实现的,其施工效率主要取决于成孔效率^[2]。目前有关成孔效率的研究多是从施工工艺把控及病害预防角度得到的定性结论^[3-7],也有学者尝试改变钻头结构来提高破岩效率从而提高成孔效率^[8-10],但针对成孔过程中触底动能源头输入的研究还不多见。

冲击钻锤头通过钻机的悬吊获得势能,而后在泥浆中自由落体,受到设备阻力和泥浆阻力的影响耗散掉一部分的能量,另一部分能量转化为锤头的触底动能,进行破岩挤土形成桩孔。单次冲击时触底动能的大小决定了破岩挤土的程度,由提钻高度决定的锤头势能是冲击过程的唯一动能输入,直接影响着成孔效率。当然在成孔过程中还必须确保孔壁处于稳定状态,在孔壁稳定前提下的最大成孔速度就是成孔效率上限。

随着科技的高速发展,计算机技术也越发的普及,一些实际问题的演化结果也可以使用有限元分析软件进行模拟得到直观的结果^[11-13],但目前针对冲击作用过程的模拟研究还不多见。王晓辉^[14]采用 ABAQUS 的显式动力学方法针对球体入水过程进行了模拟,笔者也基于此种方法分析冲击锤头在泥浆中的下落过程,得到了锤头的运动时程关系,并以此为依据得到了单次冲击时的最佳提钻高度,极具工程应用价值。

1 锤头收尾速度及影响因素

在冲击成孔灌注桩中,通常采用泥浆护

壁的方式来保持孔壁的稳定性,锤头由重力势能转化为触底动能的过程中,需要克服泥浆阻力做功,泥浆阻力与锤头速度有关,速度越大阻力越大^[15],假设锤头在泥浆中受到的阻力为 F_s ,且 $F_s = kv$,其中 k 为泥浆阻力系数,由牛顿第二定律可知:

$$mg - kv = m \frac{dv}{dt} \tag{1}$$

对式(1)变形可得:

$$dt = - \frac{m d(mg - kv)}{k (mg - kv)} \tag{2}$$

锤头的自由落体过程中,初速度为 0,假设 t 时刻的速度为 v_t ,对式(2)左右两边积分得:

$$\int_0^t dt = \int_0^{v_t} - \frac{m}{k} \frac{d(mg - kv)}{(mg - kv)} \tag{3}$$

对式(3)求积分并取对数后可得到泥浆中锤头运动速率与时间的关系:

$$v = \frac{mg}{k} (1 - e^{-\frac{kt}{m}}) \tag{4}$$

随着时间增加,泥浆的阻力也增大,加速度逐渐减小,当 $t \rightarrow +\infty$ 时,锤头的加速度为零。此时,锤头的运动由加速度减小的加速下落运动转变成匀速下落运动,锤头受到的阻力最大,与重力大小相等方向相反,合力为零。由此可推测,若锤头加速度刚达到 0 即刚开始做匀速直线运动时触底,就能在最短的时间内得到最大的冲击动能。为探究锤头在泥浆中的运动情况,采用有限元软件 ABAQUS 进行模拟分析。

并且由式(4)可知,影响锤头收尾速度的两个主要参数为锤头质量和泥浆阻力(由于机械的不断改良,设备阻力可忽略不计)。锤头质量通常与锤头的大小即锤头直径、高度有关;泥浆阻力与泥浆性能有关,也与锤头

四周的泄浆孔大小有关^[16]。参照《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650—2020)^[17]有关泥浆性能指标的描述,取泥浆相对密度及黏度这两个会影响锤头下落速度的直接相关指标,在采用 ABAQUS 模拟时通过调整直接相关指标控制泥浆工况。

2 锤头下落的 ABAQUS 模拟

在工程中,对于土质坚硬且地质条件较好的地层,为提高成孔效率,多采用增加提钻高度的方式来提高锤头的冲击能,而现场及室内试验由于费用大、试验条件复杂而得不到普遍应用,因此其提钻高度完全依赖于工程经验总结。随着计算机技术的发展,越来越多的复杂工程可利用计算机求解,ABAQUS 的显示求解器可有效解决冲击等运动事件,特别是能够解决庞大复杂的问题和模拟高度非线性问题,应用范围广泛。

2.1 模型设置

ABAQUS 中常用的两种物质在空间中运动的表达方法为拉格朗日描述及欧拉描述。拉格朗日描述是一种物质描述,研究质点物理量(U/E/S)随时间的变化规律,多用于固体;欧拉描述是一种空间描述,物质在固定的框架(欧拉网格)下流动,研究空间点的物理量(P/N/T)随时间的变化规律,多用于流体^[18]。泥浆作为液体可流动材料,在 ABAQUS 中考虑采用欧拉分析的方式,而冲锤作为固体采用拉格朗日单元,冲锤在泥浆中下落可以采用耦合的欧拉—拉格朗日分析方法,通常称之为 CEL(Coupled Eulerian-Lagrangian)分析。

2.1.1 泥浆模型建立

泥浆通常被认为是宾汉流体,只有当切应力超过一个最小剪应力 τ_0 的临界值才发生剪切变形,且切应力随剪切变形速率呈现线性变化,即在流动时保持恒定黏度,是一种典型的非牛顿流体。ABAQUS 不能直接定义宾汉流体,但存在一个更广义的 Herschel-

Bulkley-Model(赫巴模型),可以用来定义宾汉流体的剪切黏度^[19]。Herschel-Bulkley 流变模式的本构方程见式(5),根据参数取值不同,它能统一表示牛顿、宾汉、指数流变模式的特性,该方程准确性高、适用范围广,广泛适用于泥浆及水泥浆。

$$\begin{cases} \gamma = 0; \\ \tau = \tau_0 + k\gamma^n. \end{cases} \quad (5)$$

式中: τ_0 为屈服应力,Pa; k 为稠度系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$; γ 为剪切率, s^{-1} ; n 为流变指数,无量纲。当模型中的流变指数 $n=1$ 时,Herschel-Bulkley 模型退化为 Bingham 模型,与状态方程(EOS)中描述的材料配合使用,即可准确描述泥浆的流动行为。参考工程经验,泥浆参数取值见表 1。

表 1 泥浆模拟参数

Table 1 Mud simulation parameters		
泥浆静切力/Pa	泥浆密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泥浆黏度/ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
5	1 300	22

2.1.2 锤头模型建立

考虑到工程实际,锤头以洛阳锤为原型设计,锤头参数见表 2。锤头在下落过程中形状和大小保持不变,且不产生形变,可近似看做刚体,在赋予材料属性后,通过 Ridid Body 将整个锤头的运动强制约束到一个参考点上,用参考点的速度及位移表达整个锤头的运动状态。

表 2 锤头模型参数

Table 2 Hammer model parameters		
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/Pa	泊松比
7 800	2.06×10^{11}	0.28

2.1.3 土体模型建立

锤头下落过程中的外力只来自泥浆阻力,锤头不与孔壁土体直接接触,土体类型对锤头下落的收尾速度无影响。为验证这一假设,笔者尝试使用相同的锤头及泥浆参数,改变土体参数进行 5 组模拟,结果表明 5 组工

况下的锤头时间-速度曲线基本重合,速度方差为 6.4×10^{-7} ,证明假设成立,故在后续模型中不再考虑土体类型的影响。

2.1.4 工况表

影响锤头收尾速度的主要因素为锤头质量及泥浆阻力,在进行有限元模拟时,前者可

由锤头的大小即锤头直径作为控制指标,后者可由泥浆密度、黏度和锤头泄浆孔半径作为控制指标。针对4个控制指标各设置7组工况来研究其对锤头收尾速度的影响,工况情况见表3。

表3 工况表

Table 3 Working condition table

控制指标	序号	锤头直径/m	泄浆孔半径/m	泥浆黏度/(Pa·s)	泥浆相对密度
锤头直径	工况1	1.0	0.25	22	1.3
	工况2	1.2	0.25	22	1.3
	工况3	1.4	0.25	22	1.3
	工况4	1.6	0.25	22	1.3
	工况5	1.8	0.25	22	1.3
	工况6	2.0	0.25	22	1.3
	工况7	2.2	0.25	22	1.3
泄浆孔半径	工况8	1.6	0.10	22	1.3
	工况9	1.6	0.15	22	1.3
	工况10	1.6	0.20	22	1.3
	工况11	1.6	0.25	22	1.3
	工况12	1.6	0.30	22	1.3
	工况13	1.6	0.35	22	1.3
	工况14	1.6	0.40	22	1.3
泥浆黏度	工况15	1.6	0.25	16	1.3
	工况16	1.6	0.25	18	1.3
	工况17	1.6	0.25	20	1.3
	工况18	1.6	0.25	22	1.3
	工况19	1.6	0.25	24	1.3
	工况20	1.6	0.25	26	1.3
	工况21	1.6	0.25	28	1.3
泥浆相对密度	工况22	1.6	0.25	22	1.0
	工况23	1.6	0.25	22	1.1
	工况24	1.6	0.25	22	1.2
	工况25	1.6	0.25	22	1.3
	工况26	1.6	0.25	22	1.4
	工况27	1.6	0.25	22	1.5
	工况28	1.6	0.25	22	1.6

考虑到工程实际,所有模拟工况对应的泥浆孔半径均比锤头半径大1 cm。对于工况1~工况7中的锤头直径变化,都是以工

况4中1.6 m锤头(对应高度1.8 m)为基础等比例缩小、放大得到。

2.2 模拟结果与分析

图1为锤头排开泥浆下落时的有限元模拟示意图。工况1~工况7的锤头下落时间-速度曲线见图2,可以看出,锤头质量对收尾速度有明显影响,锤头直径为1 m(对应质量1 834.44 kg)时,锤头的收尾速度为1.2 m/s;当锤头直径为2.2 m(对应质量19 516.19 kg)时,锤头的收尾速度达到2.1 m/s,可见锤头质量与收尾速度明显正相关,锤头质量越大则下落速度越快,冲击功也越大。但实际工程中,由于受钻孔直径的限制,锤头直径不能自由加大或减小,且锤头材质较为统一,密度难以改变,故通过增大锤头质量的方式增加锤头速度比较困难。

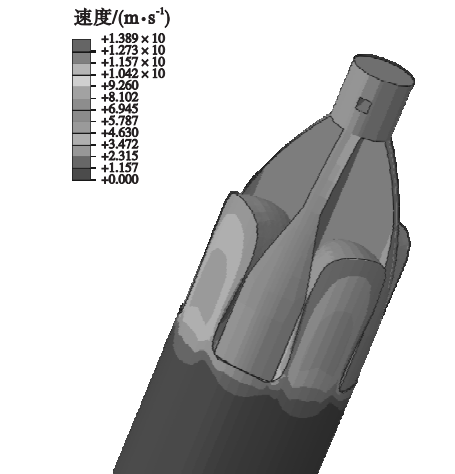


图1 锤头下落示意图

Fig.1 Schematic diagram of hammer head falling

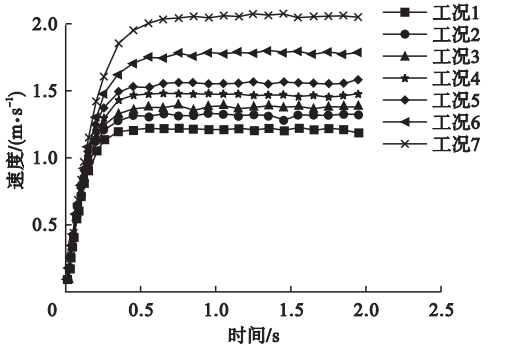


图2 锤头直径变化的时间-速度曲线

Fig.2 Time velocity curves of hammer head diameter change

工况8~工况14的锤头下落时间-速

度曲线见图3,可以看出,泄浆孔半径越大对收尾速度越有利。泄浆孔半径变大,则锤头底面接触泥浆的面积变小,在下落过程中受到的泥浆碰撞阻力变小,速度会增大^[16]。但是增大泄浆孔半径意味着减小锤头质量,这与工况1~工况7锤头质量与收尾速度成正比的结论冲突,可见增大泄浆孔半径比一味增加锤头质量更具有经济效益;但是增大泄浆孔半径也意味着会减小锤头的底面积,不利于破岩挤土,实际工程中需要谨慎衡量。

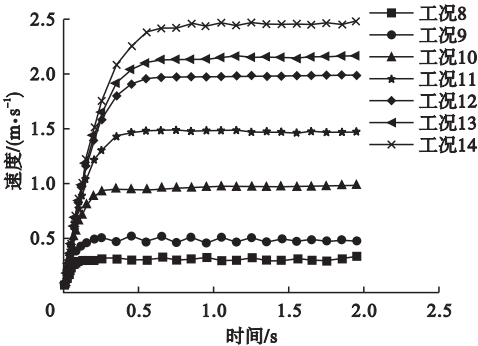


图3 泄浆孔半径变化的时间-速度曲线

Fig.3 Time velocity curves of discharge hole radius change

工况15~工况21的锤头下落时间-速度曲线见图4,可以看出,泥浆黏度变化对锤头下落速度影响很小。

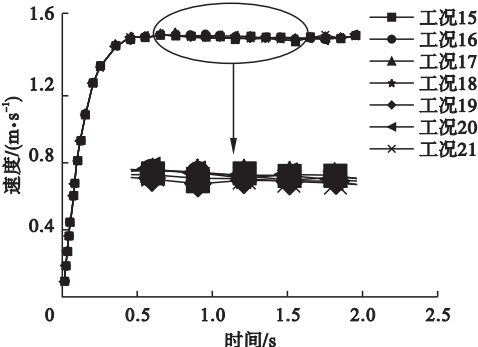


图4 泥浆黏度变化的时间-速度曲线

Fig.4 Time velocity curves of mud viscosity change

黏度表现为液体运动时各分子或颗粒间产生的内摩擦力,是反映液体流动行为的特征。对钻孔灌注桩而言,黏度越大的泥浆在孔壁上产生的泥皮越厚,对阻隔渗漏、维护孔壁稳定有利。但黏度过大,钻进过程中易

“糊钻”,造成泥浆泵故障,增加泥浆净化的困难,从而影响钻进速度。

工况 22 ~ 工况 28 的锤头下落时间 - 速度曲线见图 5,可以看出,泥浆相对密度越大锤头收尾速度越小。泥浆相对密度大时,泥浆对孔壁的侧压力大于孔隙水压力,对维护孔壁稳定有利,同时泥浆相对密度越大携带钻渣的能力也越大。但比重过大,失水量亦会增大,孔壁上的泥皮也增厚,增加了泥浆原料的消耗,而且会给清孔和灌注混凝土造成困难。泥浆相对密度增大,意味着泥浆中固体颗粒含量增大,还会对钻具产生较大的磨损。

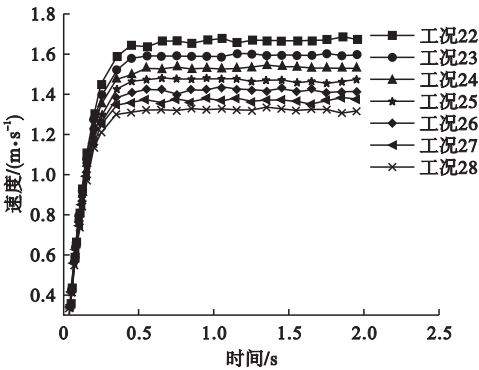


图 5 泥浆相对密度变化的时间 - 速度曲线

Fig. 5 Time velocity curves of mud weight change

3 最佳提钻高度的拟合函数

模拟发现,锤头在下落过程中很快就能达到收尾速度,各工况的平均收尾时间为 0.5 s,且 0.5 s 对应的锤头位移均不超过 1 m,说明锤头在下落不超过 1 m 的距离就达到收尾速度,之后速度将保持不变,即锤头用于破岩挤土的触底动能将保持不变。传统工程经验认为在砂卵石层等坚硬密实的岩层中,应当通过提高钻机冲程的方式增加掘进速度^[20],这显然是不对的,提高钻头高度并不能有效增加锤头的冲击功。

为了弄清每个工况在求解成孔效率上限时的最佳提钻高度,利用 MATLAB 编程,当某时刻收尾速度 v_t 减去后面所有时刻平均

速度 \bar{v} 的差与 \bar{v} 的比值精度小于 5% 时则认为该时刻刚好达到收尾速度,将每个工况中刚达到收尾速度对应的锤头下落高度提取出来,可与对应变量绘制成散点图。由于散点图只能看出定性规律,为了更好地了解及预测这些规律,在 MATLAB 中利用最小二乘法建立一个新的函数模型去逼近这些已知的离散点进行曲线拟合。

3.1 锤头质量与对应收尾高度关系分析

在对工况 1 ~ 工况 7 的锤头质量与收尾高度的关系分析时发现,虽然锤头直径越大收尾速度越快,但锤头直径与收尾高度没有明确的相关性,究其原因在于改变锤头直径时,锤头体积及表面积也一并改变,这将影响泥浆的黏滞阻力及碰撞阻力作用,未达到控制单一变量的初衷,故笔者又通过改变密度、保持锤头大小不变的方式来增加锤头质量,密度及质量参数见表 4,泄浆孔半径取 0.25 m,泥浆黏度取 22 Pa·s,泥浆比重取 1.3,最终得到了图 6 中的散点图。此处改变密度是为了接近前文工况 1 ~ 工况 7 中的锤头质量,目的仅仅是得到锤头质量与收尾速度的理论对应关系。

表 4 锤头密度变化工况表

Table 4 Working condition table of hammer head density change

工况	锤头密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	锤头质量/t
29	1 557.63	1.5
30	3 634.48	3.5
31	5 711.32	5.5
32	7 800.00	7.5
33	9 865.01	9.5
34	11 941.85	11.5
35	14 018.69	13.5

锤头质量与对应收尾高度的散点图如图 6 所示,从图中可以看出,锤头质量与收尾高度大致呈线性关系,对其进行线性拟合,拟合曲线过原点,原因在于锤头质量为 0 时不会下落,对应收尾高度为 0,由此可设拟合函

数为

$$H_m = K_m X_m \tag{6}$$

式中: H_m 为锤头质量对应的收尾高度; K_m 为锤头质量对应的拟合系数; X_m 为锤头质量。

计算后求得 $K_m = 0.037\ 2$,得到一次多项式拟合函数:

$$H_m = 0.037\ 2 X_m \tag{7}$$

绘制图 6 中的理论曲线图,二者方差为 0.018 4,方差越接近 0 拟合结果越好,文中方差达到 10^{-2} 级,说明拟合度良好。

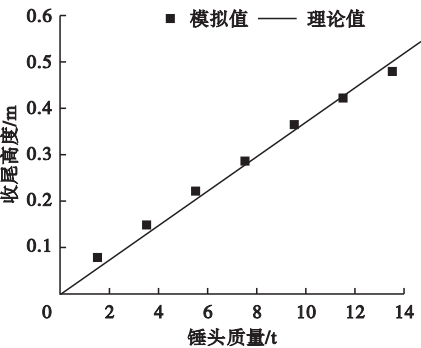


图 6 锤头质量与对应收尾高度关系图
Fig. 6 Relationship between hammer head mass and corresponding ending height

3.2 泄浆孔半径与对应收尾高度关系分析

泄浆孔半径与对应收尾高度的散点图如图 7 所示,从图中可以看出,锤头质量与收尾高度近似呈指数关系,但考虑到其余变量均使用的多项式函数拟合,此处若使用指数函数拟合,将不利于后文最佳提钻高度的公式推导。

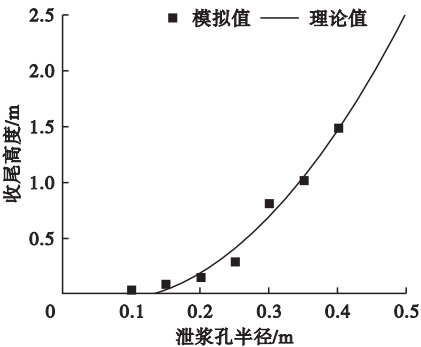


图 7 泄浆孔半径与对应收尾高度关系图
Fig. 7 Relationship between discharge hole radius and corresponding ending height

因此使用多项式函数拟合,拟合曲线应当过原点,原因在于锤头泄浆孔半径为 0 时,根据泥浆的不可压缩特性可知锤头不会下落,收尾高度为 0。

在使用一次多项式函数拟合后得到模拟值与理论值的方差为 0.327 7,绘图后发现拟合曲线与模拟值偏离严重,因此尝试使用二次多项式拟合,设函数为

$$H_d = K_{d1} X_d + K_{d2} X_d^2 \tag{8}$$

式中: K_{d1} 及 K_{d2} 为二次多项式拟合的系数。

求得 $K_{d1} = -1.840\ 9$, $K_{d2} = 13.811\ 1$,得到二次多项式拟合函数:

$$H_d = -1.840\ 9 X_d + 13.811\ 1 X_d^2 \tag{9}$$

绘制图 7 中的理论曲线图,二者方差为 0.085 5,拟合度良好。

笔者又继续进行三次、四次多项式拟合,方差分别为 0.091 8 和 0.092 0,发现次数越大拟合结果反而不好,因此最终选用了二次多项式的拟合结果。

3.3 泥浆黏度与对应收尾高度关系分析

泥浆黏度与对应收尾高度的散点图如图 8 所示,从图中可以看出,模拟值近乎在一条直线上,模拟值之间的方差为 2.19×10^{-7} ,说明泥浆黏度变化的影响很小。

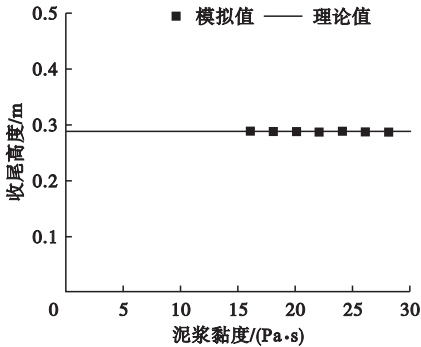


图 8 泥浆黏度与对应收尾高度关系图
Fig. 8 Relationship between mud viscosity and corresponding ending height

因此设函数为

$$H_v = K_v \tag{10}$$

式中: H_v 为泥浆黏度对应的收尾高度; K_v 为泥浆黏度对应的拟合系数。

计算后求得 $K_v = 0.287\ 4$, 得到拟合函数:

$$H_v = 0.287\ 4. \tag{11}$$

绘制图 8 中的理论曲线图,二者方差为 $4.679\ 6 \times 10^{-4}$,近似于 0,拟合度很好。

3.4 泥浆相对密度与对应收尾高度关系分析

泥浆相对密度与对应收尾高度的散点图如图 9 所示,从图中可以看出,泥浆相对密度与收尾高度呈反比关系。

首先假设一次拟合函数为

$$H_w = K_{w1} + K_{w2}X_w. \tag{12}$$

式中: H_w 为泥浆相对密度对应的收尾高度; K_{w1} 及 K_{w2} 为一次多项式拟合的系数; X_w 为泥浆相对密度。

求得 $K_{w1} = 0.608\ 1$, $K_{w2} = -0.236\ 3$,得到一次多项式拟合函数:

$$H_w = 0.608\ 1 - 0.236\ 3X_w. \tag{13}$$

绘制图 9 中的理论曲线图,二者方差为 0.012 9,拟合度良好。

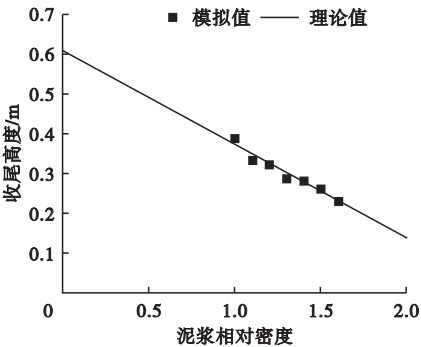


图 9 泥浆相对密度与对应收尾高度关系图

Fig. 9 Relationship between mud specific gravity and corresponding ending height

笔者又继续使用二次多项式拟合,得到对应的方差为 0.012 2,与一次拟合函数相比,方差的缩减幅度非常小,因此使用一次拟合函数就已经足够了,没有必要为了追求更小的方差而使用高次多项式。

3.5 锤头收尾高度的函数表达式

在分别得到 4 类指标对应的拟合函数后,为了更加直观的得到一个有关最佳提钻高度的统一表达式,使用最小二乘法将 4 个

独立函数整合在一起,设函数表达式为

$$H = K_1 + K_2X_m + K_3X_d + K_4X_d^2 + K_5X_w. \tag{14}$$

式中: K_1 为泥浆黏度及泥浆相对密度对应的常数项; $K_2 \sim K_5$ 为与 3 个相关变量对应的系数。

求得 $K_1 = 0.446\ 7$, $K_2 = 0.033\ 7$, $K_3 = -5.667\ 7$, $K_4 = 21.232\ 9$, $K_5 = -0.236\ 3$,最终方差为 0.046 7,拟合结果良好。由此得到最佳提钻高度的函数表达式为

$$H = 0.446\ 7 + 0.033\ 7X_m - 5.667\ 7X_d + 21.232\ 9X_d^2 - 0.236\ 3X_w. \tag{15}$$

将式(15)用于工况 8 ~ 工况 35 计算理论值,与模拟值一起绘于图 10,二者吻合良好。

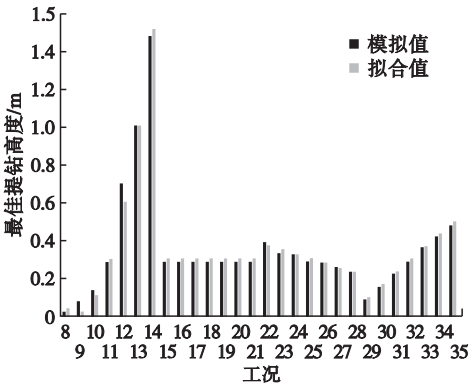


图 10 最佳提钻高度的模拟值与拟合值

Fig. 10 Simulation values and fitting values of optimum drilling height

4 结 论

(1)由锤头在泥浆中的下落时间—速度曲线可得,锤头在下落约 0.5 s 后达到最大速度,达到最大速度后的瞬间触底可最快完成单次冲击,实现成孔效率最大化。

(2)利于 MATLAB 的最小二乘法得到最佳提钻高度的拟合函数为 $H = 0.446\ 7 + 0.033\ 7X_m - 5.667\ 7X_d + 21.232\ 9X_d^2 - 0.236\ 3X_w$ 。在工程中输入实际参数即可得到对应的提钻高度,极具应用价值。

(3)笔者发现在工程中经常采用增加提钻高度来增加锤头冲击功的方式是有误的。

锤头达到收尾速度所需高度一般不超过1 m,当提钻高度超过收尾高度后,锤头的冲击功将不再增加,锤头多余的势能不是转化为锤头动能,而是被泥浆阻力耗散转化为泥浆热能及泥浆动能。

参考文献

- [1] 万江英. 钻孔灌注桩施工方法的研究与应用[D]. 南昌:南昌大学,2014.
(WAN Jiangying. Research and application of bored pile construction method [D]. Nanchang: Nanchang University, 2014.)
- [2] 沈保汉. 桩基础施工新技术专题讲座(二十六)冲击钻成孔灌注桩(上)[J]. 工程机械与维修,2013(1):140-144.
(SHEN Baohan. Lecture on new technology of pile foundation construction(26)percussive bored pile(Article I) [J]. Construction machinery & maintenance, 2013(1):140-144.)
- [3] XING Haofeng, LIU Liangliang. Effects of construction technology on bearing behaviors of rock-socketed bored piles as bridge foundations [J]. Journal of bridge engineering, 2019, 24(4):1-9.
- [4] PAN M L. Construction method for forming hole by large-diameter bored pile in high-strength rock stratum; 201410236991. 3 [P]. 2014-05-30.
- [5] LIU M F, PENG Z B, WANG J J, et al. Drilling technology of bored-pile in alternating layer of hard and soft rock [J]. Journal of central south university (science and technology), 2010, 41(3):1109-1115.
- [6] 杨平,周志良,黄晓东,等. 钻孔灌注桩施工对邻近既有隧道影响数值分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(6):1064-1073.
(YANG Ping, ZHOU Zhiliang, HUANG Xiaodong, et al. Numerical analysis on influence of adjacent operated tunnel caused by bored pile construction [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(6):1064-1073.)
- [7] LEI B, XIA H L, KUN Y E, et al. Supporting construction technology of long steel casing, percussion and grabbing and rotary drilling bored pile in silt-rock fill layer [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2013, 35(S2):1184-1187.
- [8] WEI M, HE K, PENG Z, et al. Analysis on collapse factors of hole wall of bored pile based on grey relational theory [J]. Engineering construction, 2017, 49(11):11-14.
- [9] 程万里. 冲锤对冲击钻机掘进效率的影响及成孔质量研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.
(CHENG Wanli. Study on the drivage efficiency and drilled-hole quality for The hammer of percussion drill [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.)
- [10] CHEN Jinhuan. Bored-froming control of Impact bored pile in complex geology [J]. Fujian architecture, 2014(7):77-79.
- [11] MASSARENTI I M. Percussion-reverse circulation water-well drilling system designed and developed in Italy [J]. Groundwater, 2010, 2(2):25-27.
- [12] SHI D, YANG Y, DRNG Y, et al. DEM modelling of screw pile penetration in loose granular assemblies considering the effect of drilling velocity ratio [J]. Granular matter, 2019, 21(3):1-16.
- [13] 南锐锐. LNG 储罐预应力混凝土外罐地震响应的试验研究分析[D]. 大庆:东北石油大学,2019.
(NAN Ruirui. Experimental research on seismic response of prestressed concrete outer wall of LNG storage tank [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2019.)
- [14] 王晓辉,褚学森,冯光. 基于 ABAQUS 显式 CEL 方法的球体入水数值研究[J]. 船舶力学, 2018, 22(7):838-844.
(WANG Xiaohui, CHU Xuesen, FENG Guang. Numerical simulation of sphere's water-entry based on Coupled Eulerian-Lagrangian method [J]. Journal of ship mechanics, 2018, 22(7):838-844.)
- [15] 郑焕武. 理想流体作用下的物体运动; 流体阻力和升力的计算[M]. 北京:光明日报出版社,2014.
(ZHENG Huanwu. Object movement under the influence of ideal fluid; calculation of fluid resistance and lift [M]. Beijing: Guangming Daily Press, 2014.)
- [16] 王春,杨帆,付磊,等. 一种冲击钻孔灌注桩的冲击功主动控制方法; CN201911153753. 5 [P]. 2020-2-28.
(WANG Chun, YANG Fan, FU Lei, et al. An active control method of impact energy for drilling hole pile; CN201911153753. 5 [P]. 2020-2-28.)
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵施工技术规范; JTG/T 3650—2020 [S]. 北京:人民交通出版社,2020.
(Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical guidelines for construction of highways, bridges and culverts; JTG/T 3650—2020 [S]. Beijing: China Communications Publishing House, 2020.)
- [18] AHMADZADEH M, SARANJAM B, FARD A H. Numerical simulation of sphere water entry problem using Eulerian-Lagrangian method [J]. Applied mathematical modeling, 2014(38):1673-1684.
- [19] 王鹰宇. ABAQUS 分析用户手册—材料卷[M]. 北京:机械工业出版社,2018.
(WANG Yingyu. ABAQUS user's manual-materials volume [M]. Beijing: China Machine Press, 2018.)
- [20] 李东侠,徐光华. 土力学与地基基础[M]. 北京:北京理工大学出版社,2013.
(LI Dongxia, XU Guanghua. Soil mechanics and foundation [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2013.)
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)