

# 深厚软土区钻孔灌注桩混凝土用量 算法与应用

欧阳松彪<sup>1</sup>, 周小勇<sup>2\*</sup>, 谭子阳<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中铁十六局集团第三工程有限公司, 浙江 湖州

<sup>2</sup>中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年9月3日; 录用日期: 2024年11月8日; 发布日期: 2024年11月18日

## 摘要

在桩基础的建设中, 常出现实际混凝土用量大于理论混凝土用量的情况, 充盈系数作为二者的比值, 一定程度上能反映桩基础的建设情况。为明确桩基础灌注前的理论混凝土用量, 推进精细化施工建设。本算法通过对桩基础建设中混凝土性质以及土层参数进行软件模拟计算, 得到不同土层的变形情况, 之后进一步对其他因素进行考虑, 并使用桩孔三维检测数据进行修正, 得到桩基建设中混凝土用量的参考值。最后通过与实际工程应用结果进行比较, 表明该算法与实际工程混凝土用量基本吻合, 可以为类似工程提供有价值的参考依据。

## 关键词

铁路桥梁, 充盈系数, 数值计算, 桩基础, 深厚软土

# Calculation and Application of Concrete Dosage of Bored Pile in Deep Soft Soil Area

Songbiao Ouyang<sup>1</sup>, Xiaoyong Zhou<sup>2\*</sup>, Ziyang Tan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Third Engineering Co., Ltd. of China Railway 16th Bureau Group, Huzhou Zhejiang

<sup>2</sup>Engineering College of China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan Hubei

Received: Sep. 3<sup>rd</sup>, 2024; accepted: Nov. 8<sup>th</sup>, 2024; published: Nov. 18<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In the construction of pile foundation, the actual concrete consumption is often greater than the

\*通讯作者。

文章引用: 欧阳松彪, 周小勇, 谭子阳. 深厚软土区钻孔灌注桩混凝土用量算法与应用[J]. 交通技术, 2024, 13(6): 444-452. DOI: 10.12677/ojtt.2024.136048

theoretical concrete consumption. The filling coefficient, as the ratio of the two, can reflect the construction of pile foundation to a certain extent. In order to clarify the theoretical concrete consumption before pile foundation pouring and promote the refined construction. This algorithm obtains the deformation of different soil layers through the software simulation calculation of the concrete properties and soil parameters in the pile foundation construction, and then further considers other factors, and uses the three-dimensional detection data of pile holes to modify, so as to obtain the reference value of concrete consumption in the pile foundation construction. Finally, through the comparison with the actual engineering application results, it shows that the algorithm is basically consistent with the actual engineering concrete consumption, which can provide a valuable reference for similar projects.

## Keywords

Railway Bridges, Refinement Algorithm, Numerical Calculation, Pile Foundation, Deep Soft Soil

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着国家“双碳”战略的深入,绿色低碳交通与精细化施工成为城市交通与工程领域的关键趋势[1],桩基础作为关键基础设施,在建设时常遭遇混凝土用量超出预期的挑战,尤其是深厚软土区钻孔灌注桩,其混凝土用量异常偏大且难以定量分析[2]。当前,尽管已有研究探讨了充盈系数与地质条件、施工技术、工程器械等因素的关系[3]-[10],但对于充盈系数的控制,仍然以优化施工工艺、施工器械等措施减小其他因素对充盈系数的影响。而针对施工前计算混凝土预计使用量的方法仍显得不足。

因此,迫切需要发展一种针对深厚软土区钻孔灌注桩的混凝土用量精细算法,以科学指导实际工程,减少浪费,提升建设质量。该算法将综合考虑地质条件、施工技术、设备状况等多方面因素,为“双碳”目标下的绿色施工提供有力支持。

## 2. 混凝土用量的计算方法

钻孔灌注桩是高层、重型建筑(构筑)物工程的主要基础形式[11]。其施工操作简易,安全性高,在桥梁与民用建筑中得到广泛的应用[12]。本算法以钻孔灌注桩为研究对象,采用我国东南沿海地区深厚软土地层作为地质条件,不考虑岩溶等特殊地质条件的影响。并假设混凝土在进行灌注时桩孔十分稳定,不存在孔壁塌陷等问题。

用于计算的参数有地层参数、混凝土灌注速度、沉渣厚度、破桩头高度、桩径、桩长等。另外,加入成孔超声检测数据对桩基础所耗混凝土体积进行修正。该修正值记作 $\Delta V$ ,其大小等于桩孔实测体积减去桩孔理论体积。

综上所述,桩基础总混凝土用量计算式为:

$$V_Z = V_1 + V_2 + V_3 \quad (1)$$

式(1)中,

$V_Z$  为桩基础总混凝土用量(单位为:  $m^3$ );

$V_1$  为桩身中间节段体积(已用 $\Delta V$ 修正);

$V_2$  为沉渣、混凝土混合物所消耗混凝土体积;

$V_3$  为破桩头消耗混凝土体积。

## 2.1. 混凝土侧压力曲线计算

式(1)中,  $V_1$  以及  $V_2$  的计算需要用到混凝土侧向变形量, 而侧向变形量与混凝土对孔壁的压力有关, 因此需要对混凝土侧压力进行考虑。

在实际中, 混凝土对孔壁的侧压力一般是难以确定的。因为混凝土有一定的流动性, 随着时间的推移, 其流动性、塑性会逐渐减弱, 对孔壁的压力也会随之减弱, 但在未完全凝固之前, 混凝土具有的流动性质会对侧压力产生影响。即混凝土的灌注速度与侧压力有很强的相关性[13]。综合来看, 侧压力受混凝土坍落度、浇筑速度的影响较大, 受环境温度的影响不明显[14]。因此首先考虑混凝土坍落度、浇筑速度等因素对侧压力产生的影响, 参考相关规范, 侧压力采用式(2)及式(3)确定(取小值)。

$$F = 0.22\gamma_c t_0 \beta_1 \beta_2 V^{1/2} \quad (2)$$

$$F = \gamma_c H \quad (3)$$

式(2)和(3)中,

$F$  为新浇筑混凝土的最大侧压力(单位为:  $\text{kN/m}^2$ );

$\gamma_c$  为单位体积混凝土的重力(单位为:  $\text{kN/m}^3$ );

$t_0$  为新浇混凝土的初凝时间(单位为: h);

$\beta_1$  为外加剂影响修正系数;

$\beta_2$  为混凝土坍落度影响修正系数;

$V$  为混凝土浇筑速度(单位为:  $\text{m/h}$ );

$H$  为混凝土侧压力计算位置处至混凝土顶面的总高度(单位为: m)。

混凝土有效压头高度的计算公式:

$$h = F / \gamma_c \quad (4)$$

$h$  为有效压头高度(单位为: m)。

有效压头高度是指混凝土侧压力随混凝土灌注高度增大而增大的最大高度, 当混凝土浇筑超过此高度后, 侧压力将不再增大。

由式(2)及式(4)可得到以下公式:

$$h = 0.22 t_0 \beta_1 \beta_2 V^{1/2} \quad (5)$$

假设现有一桩基础深 80 m, 孔径 1.8 m, 灌注时间约为 5 小时, 混凝土初凝时间为 8 小时, 终凝时间 12 小时, 灌注速度为 16  $\text{m/h}$ 。根据式(5)得出有效压头高度  $h$  约为 7 m, 同时可以计算得出混凝土最大侧压力为 168  $\text{kN}$ 。

若按照上述计算方法, 对该桩孔进行混凝土灌注, 则混凝土最大侧压力始终保持 168  $\text{kN}$ , 直至灌注完毕。但这种侧压力分布与真实值应该是不符的。因此, 考虑到桩基础具有深度大的特点, 提出以下侧压力计算方法:

浇筑一节段混凝土后, 再在其上方浇筑混凝土, 假设下方混凝土已凝固完毕, 则其侧压力图形应如图 1(a)所示。新旧混凝土融合后, 由于新浇筑混凝土对旧混凝土存在一定的压力, 混凝土下方侧压力应增大, 若将混凝土材料视为理想的流体, 则侧压力图形如图 1(b)所示。假设在混凝土接近终凝时的某个阶段, 因上方混凝土压力导致的混凝土最底层侧压力增加量仅为将混凝土替换为流体时侧压力增加量的

百分之一。则其侧压力分布如图 1(c)所示。假设经过 12 小时混凝土接近终凝，侧压力衰减至流动状态下的 0.01 倍，则每小时侧压力衰减系数  $a$  约为 0.68。

$$F_c = \Delta F \times a^{t-1} \tag{6}$$

式(6)中，

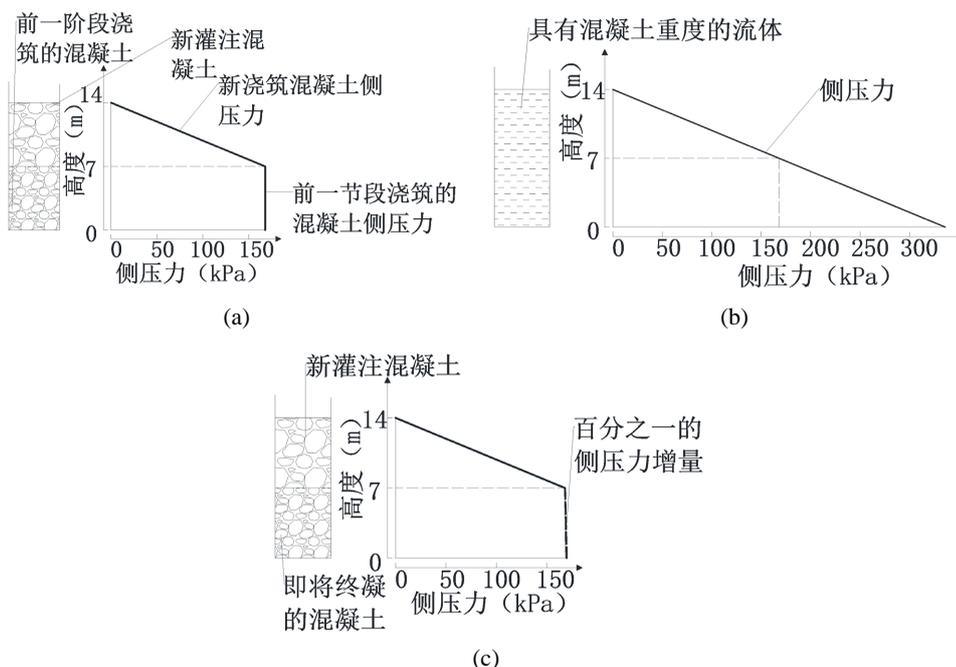
$F_c$  为混凝土侧压力增量(单位为: kPa);

$\Delta F$  为将混凝土视为理想流体时的侧压力增量;

$t$  为混凝土所处节段编号，最高节段编号为 1。

$a$  为根据终凝时间求得的衰减系数。

综上所述，得到了计算混凝土侧压力的方法。



**Figure 1.** Lateral pressure distribution. (a) Lateral pressure diagram without considering lateral pressure increase; (b) Lateral pressure diagram when concrete is an ideal fluid; (c) Lateral pressure diagram of concrete at approximate final setting

**图 1.** 侧压力分布图。(a) 不考虑侧压力增加的侧压力图；(b) 混凝土为理想的流体时的侧压力图；(c) 混凝土近似终凝时的侧压力图

## 2.2. 桩孔扩张变形量计算模拟混凝土侧压力曲线计算

得到混凝土侧压力曲线后，可以计算土体在相应压力下的变形。此处采用 ABAQUS 有限元模拟软件进行变形值计算。模型深度 80 m，桩孔孔径 1.8 m，以灌注速度 20 m/h 计算侧压力大小，分析在该压力曲线下，土层的变形情况。采用模型的长宽为 60 m，深度为 80 m，如图 2 所示。

建模时，土层密度采用  $1980 \text{ kg/m}^3$ ，弹性模量采用有侧限条件下的压缩模量，其大小为 10 MPa，泊松比采用 0.38，摩擦角为  $13^\circ$ ，粘聚力为 29,000 Pa。模型采用摩尔库伦本构模型，三维实体单元，单元属性为 C3D8R。在网格划分阶段，桩孔周围划分较密，远离桩孔的部分划分得较粗。另外，为了突出主要考虑因素对桩孔的影响，做出如下假设[15]：不考虑地下水对孔壁的影响；岩土体均为各向同性的弹塑性材料；忽略钻孔器械及人为因素对孔壁的影响；忽略钻孔周围堆载。

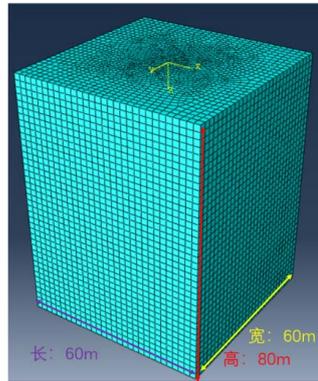


Figure 2. Modeling model diagram  
图 2. 建模模型图

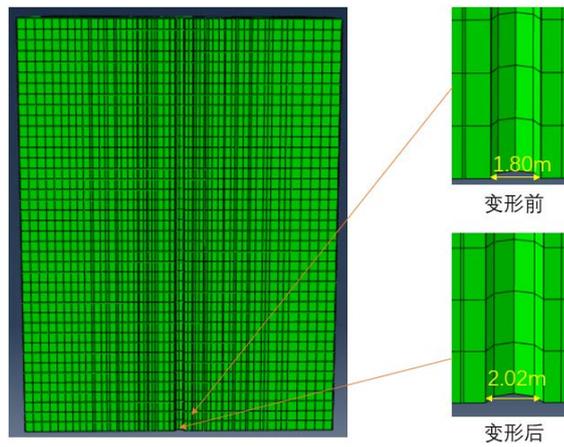


Figure 3. Soil deformation diagram under concrete lateral pressure  
图 3. 混凝土侧压力作用下土体变形图

通过上述方法，求出了在相应灌注速度下，稍软土层的变形情况。变形情况见图 3。实际工程中，绝大部分情况下桩周土体不会全部是同一性质的土体，因此，需要针对不同的土体进行计算。以压缩模量为主要控制参数时，其变形曲线最终汇总如图 4 所示。

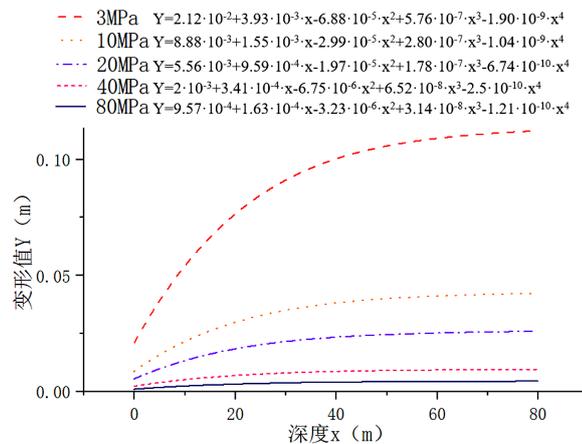


Figure 4. Summary of deformation curve  
图 4. 变形曲线汇总图

当压缩模量超过 80 MPa，到达 100 MPa 及以上时，由混凝土侧压力导致的土层变形就极其微小了，可以忽略不计，因此，只考虑在上述几种压缩模量范围内土体的变形。

通过上述曲线，便可以计算在相应灌注速度及地质条件下，土体产生的变形。例如当土体压缩模量为 3 MPa 时，由变形曲线可以得出不同深度下土体的变形量。当土体压缩模量为 8 MPa 时通过 3 MPa 和 10 MPa 的变形曲线线性内插，可得到近似变形量。再用桩孔实测数据对其进行修正，得到  $V_1$ 。

### 2.3. 沉渣段、破桩头段混凝土消耗量计算

考虑到桩底还有部分沉渣会与混凝土结合形成沉渣、混凝土混合物，因此桩底沉渣段消耗混凝土量应略微减少，这部分混合物体积为  $V_2$ 。实际计算时，将该混合物近似视为柱体计算体积，即采取底面积乘高的方式计算。

当桩基础浇筑至顶部时，为保证桩顶强度，需要多浇筑一段破桩头。破桩头体积为  $V_p$ 。由于破桩头可能夹泥或含有沉渣等杂质，破桩头体积应略微大于其消耗的混凝土体积。

破桩头与沉渣节段消耗的混凝土量如下：

$$V_2 = \alpha_1 V_z \tag{7}$$

$$V_3 = \alpha_2 V_p \tag{8}$$

式中：

$V_z$  为沉渣和混凝土混合物的体积；

$V_p$  为破桩头的体积；

$\alpha_1$  为折减系数，根据沉渣间空隙决定。

$\alpha_2$  为折减系数，根据破桩头段所含杂质质量决定。

结合上述计算结果，可以综合估算一根桩基础所需的混凝土量。进而得出相应的充盈系数。对于其他尺寸的桩基础，只需结合对应的混凝土灌注速度，计算混凝土压力曲线，并计算对应土体条件下的变形曲线，由该变形曲线得到混凝土计算用量。

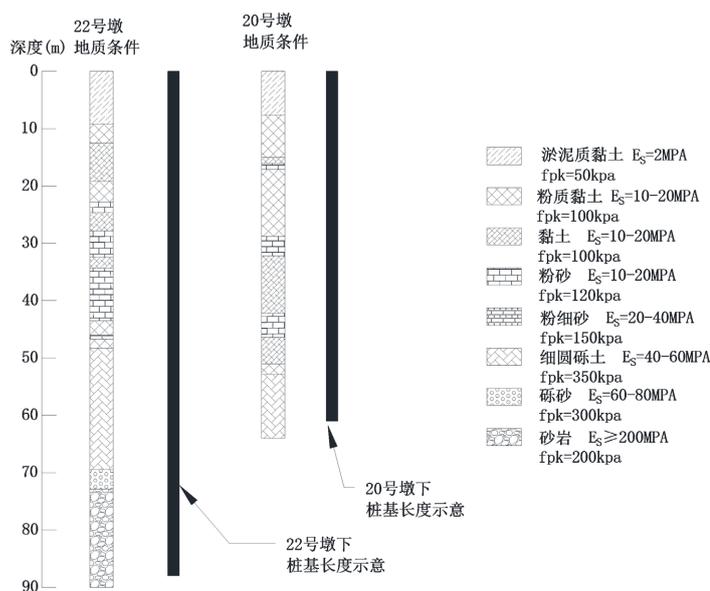


Figure 5. Checking geological conditions of pile foundation  
图 5. 验算桩基础地质条件

### 3. 工程应用

#### 3.1. 计算结果

现有某项目位于我国东南沿海地区，工程实施里程长度约 10 km。包含钻孔灌注桩基础约 2000 根，成孔方式为旋挖成孔或反循环回转钻成孔。

结合项目实际桩基础施工情况，选取 10 根桩基础进行桩基混凝土消耗量比对计算，并使用桩孔实测数据对  $V_1$  进行修正。地质条件如图 5，计算流程如图 6。对于计算时难以获取的某些地层参数例如压缩模量等，可取一般经验值进行计算。例如对于某粉质黏土，其压缩模量范围为 10 为 20 MPa，在计算时可取 15 MPa 进行计算得到其变形曲线，对于其他参数，例如泊松比，也可取经验值进行计算。最终计算结果如图 7、图 8 所示。

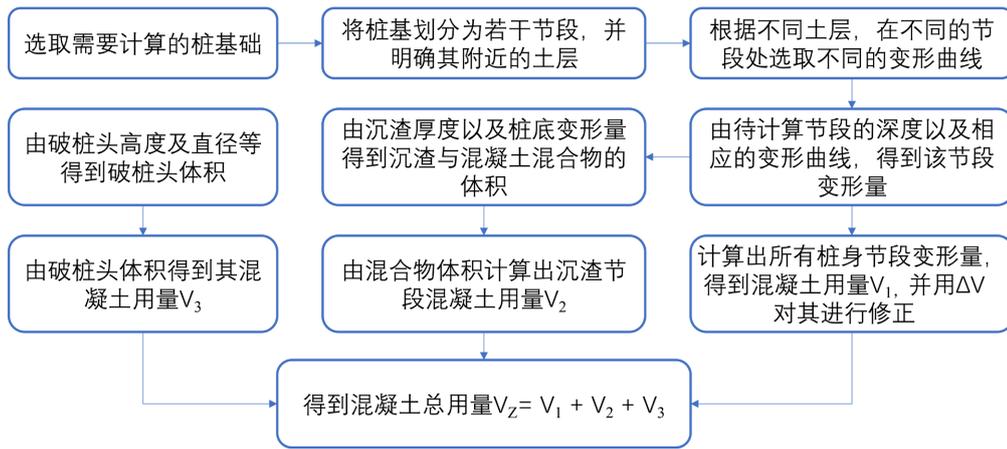


Figure 6. Calculation flow chart  
图 6. 计算流程图

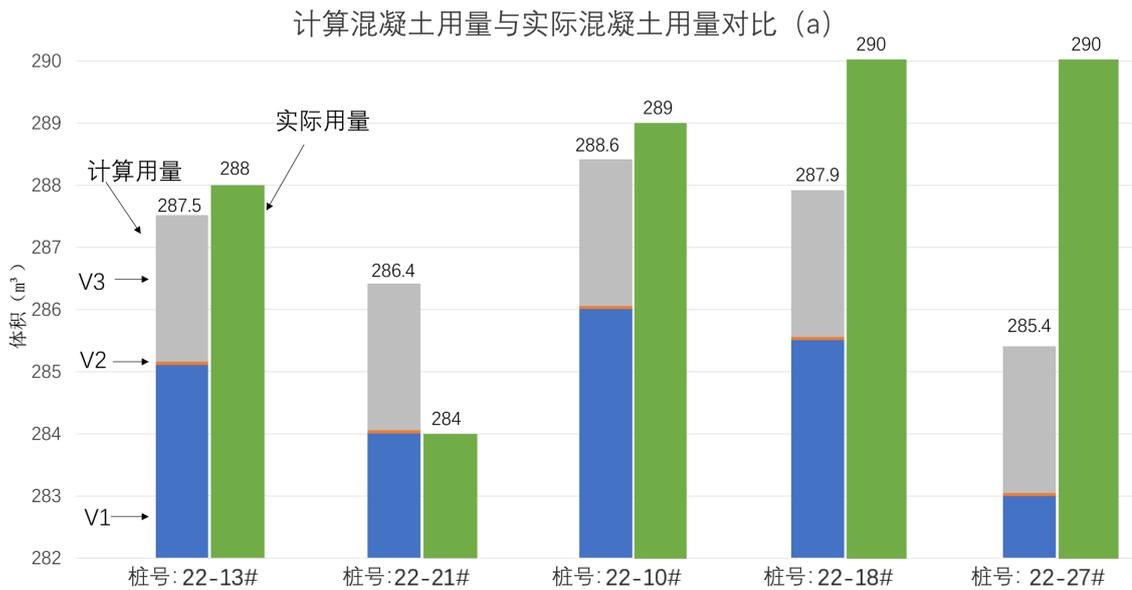
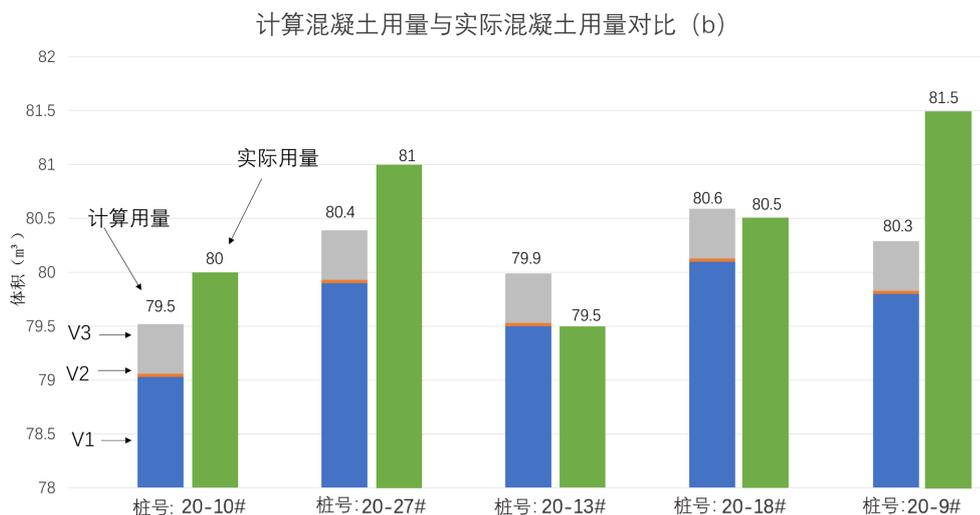


Figure 7. Concrete consumption checking results (a)  
图 7. 混凝土用量验算结果(a)

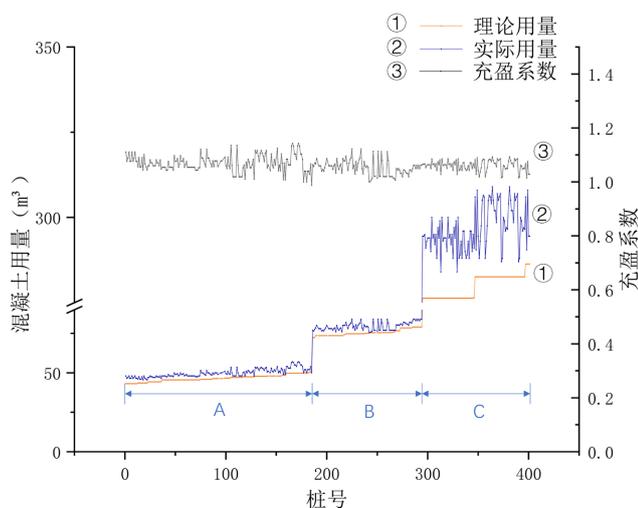


**Figure 8.** Concrete consumption checking results (b)  
**图 8.** 混凝土用量验算结果(b)

### 3.2. 结果对比

对项目中已完成建设的约 400 根桩基础进行统计，其设计混凝土用量、实际混凝土用量及充盈系数如图 9 所示。其中，A、B、C 三部分分别代表三类桩基础，其桩径分别为 1 m、1.25 m、2 m。C 类桩基础由于桩径更大，因此在充盈系数接近的情况下，会比前两类桩基础消耗更多的混凝土，即超灌量明显增多。根据图 7 及图 8 可以看出，使用算法计算所得的数据与真实数据有一定误差，综合分析计算过程与实际过程，误差来源可能有以下几点：钻孔完成后，桩基础实际成孔体积与其设计的理论体积有一定误差；假设的混凝土侧压力曲线与真实的侧压力曲线并不完全一致等。

由计算结果及图 9 可以看出，工程中桩基础的实际混凝土用量均多于理论用量，且随着桩基尺寸的增大，超灌量普遍随之增加。结合精细化算法计算得出的理论结果来看，该算法计算结果与实际工程混凝土用量基本吻合，说明了由该算法计算得出的结果具有一定的参考价值。



**Figure 9.** Statistical diagram of pile foundation concrete consumption  
**图 9.** 桩基础混凝土用量统计图

## 4. 结论

通过对混凝土施工时的灌注速度、土体软硬程度等条件进行考虑,并结合有限元模拟软件进行研究,得到了混凝土压力作用下的土体变形曲线。结合该曲线以及实际工程项目,得出如下结论:

(1) 提出的精细化算法能够较为准确地计算相应地区下桩基础的混凝土用量,但仍存在一定量的偏差。这可能是因为受到其他因素的影响。例如施工人员的熟练度、工程器械的保养程度、混凝土的性质等等。

(2) 算法得出的充盈系数与真实值较接近,说明该算法可为类似工程提供有价值的参考依据。

## 参考文献

- [1] 刘经伟,张毅歌.基于“双碳”战略的城市低碳交通发展研究[J].洛阳师范学院学报,2023,42(8):58-61.
- [2] 周靖东.旋挖灌注桩结算充盈系数过大的索赔案例分析[J].内江科技,2023,44(10):120-121+115.
- [3] 黄娇.旋挖钻湿法施工扩孔系数影响因素分析[J].西部交通科技,2019(5):97-98+117.
- [4] 王伟,丁伟,聂庆科.钻孔灌注桩混凝土充盈系数控制的分析研究[J].勘察科学技术,2017(S1):22-26+54.
- [5] 董志明,王国溶,陈艳玲.谈小孔径旋挖灌注桩混凝土充盈系数的控制[J].山东水利,2023(5):45-47.
- [6] 冀紫豪,高科飞.粉砂地层旋挖钻孔灌注桩混凝土充盈系数控制研究[J].中国建材科技,2021,30(6):133-134+140.
- [7] 张维炎,鲁嘉,周滴平,等.圆孔扩张理论的孔壁稳定计算模型[J].低温建筑技术,2013,35(4):90-92.
- [8] 陈开凡.大口径机钻孔影响孔壁稳定的因素及稳定孔壁的措施[J].广西水利水电,1994(2):31-36.
- [9] 张子洋.复杂海相地层灌注桩施工孔壁稳定性分析与护壁泥浆配比优化研究[D]:[硕士学位论文].长沙:中南大学,2022.
- [10] 张善钊,杨志伟.填海地区旋挖灌注桩混凝土充盈系数控制[J].中国建材科技,2022,31(6):109-110.
- [11] 徐新跃.软土地基提高钻孔灌注桩承载力的研究[J].勘察科学技术,2001(1):22-25.
- [12] 李照中.钻孔灌注桩质量事故成因及处理[J].铁道建筑,2007(10):70-71.
- [13] 杨飞,赵翀,周伟,等.增黏剂对新拌自密实混凝土性能及模板侧压力的影响[J].新型建筑材料,2022,49(2):75-78.
- [14] 李文广.新浇筑混凝土模板侧压力影响因素试验研究[J].铁道建筑,2019,59(11):37-40+45.
- [15] 聂守权.贵州某特大桥钻孔灌注桩孔壁稳定性分析及评价研究[D]:[硕士学位论文].西安:西安理工大学,2023.