

# 旋喷桩单桩施工引起的孔隙水压力数值模拟



戚 蓝<sup>1</sup>, 汤浩翔<sup>1</sup>, 渠元闯<sup>2</sup>, 程子悦<sup>2</sup>

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;  
2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

**摘要:** 为研究高压旋喷桩施工引起孔隙水压力的变化规律, 以某滨海区域一工程现场试验为基础, 建立数值分析模型, 对高压旋喷桩施工进行模拟。结果表明: 不同深度处的土体孔隙水压力沿径向基本呈对数衰减, 孔隙水压力沿深度大体上呈递减趋势, 局部出现拐点, 有覆土情况下的有限元计算值更接近实测数据, 深层有限元计算方法得出的孔隙水压力的消散过程与实测数据拟合较好, 且随着深度减小误差增大, 随着注浆压力的增大, 孔隙水压力也增加。

**关键词:** 高压旋喷桩; 施工; 孔隙水压力; 数值模拟

中图分类号: U 656; TU 472

文献标识码: A

文章编号: 1002-4972(2017)02-0173-05

## Numerical simulation of pore water pressure caused by construction of single jet grouting pile

QI Lan<sup>1</sup>, TANG Hao-xiang<sup>1</sup>, QU Yuan-chuang<sup>2</sup>, CHENG Zi-yue<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;  
2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300074, China)

**Abstract:** Based on the field experiments at a project in a coastal area, a numerical model was built to simulate the construction of high pressure jet grouting in order to investigate the variation laws of pore water pressure caused by the construction of high pressure jet grouting pile. The results show that the pore water pressure of the soil at different depths along the radial direction is basically logarithmic attenuation, the pore water pressure along the depth generally shows a decreasing trend while the turning point appears in the local area, the calculation of a finite element with covering is closer to the measured data, the dissipation of pore water pressure derived from the deep finite element calculation method fits well with the measured data, and with the depth decreasing error increase. The pore water pressure increases with the increase of grouting pressure.

**Keywords:** high pressure jet grouting pile; construction; pore water pressure; numerical simulation

高压旋喷桩地基处理方法是利用钻机把带有喷嘴的注浆管钻进土层的预定位置后, 以高压设备将水泥浆变成高压喷射流横向喷出, 冲切、扰动、破坏土体, 同时钻杆以一定速度逐渐提升, 将浆液与土粒强制搅拌混合, 浆液凝固后, 在土中形成一个圆柱状固结体, 以达到加固地基的目的<sup>[1]</sup>。

高压旋喷桩施工在对土体冲切和破坏的同时, 很容易使周边土体产生位移, 进而对既有建筑物的基础产生挤压变形, 使既有结构物存在隐患<sup>[2-3]</sup>。同时, 施工过程中也会产生一定的孔隙水

压力, 而人们往往忽略了孔隙水压力的影响。

一般理论均认为高压旋喷桩属于非挤土桩的范畴, 其对周围已建建筑物的影响较小, 非软土区域的高压旋喷桩施工经验也表明, 在非软土区施工高压旋喷桩的影响范围并不是很大。崔江余<sup>[4]</sup>探讨了在施工过程中高压喷射注浆法引起的超孔隙水压力, 根据半无限土体上小孔扩张问题的解, 分析了在超孔隙水压作用瞬时土中的应力和变形。翁承显<sup>[5]</sup>通过引用面积置换率的概念, 依据土的弹塑性力学和 Vesic 圆孔扩张理论, 推导

收稿日期: 2016-06-15

作者简介: 戚蓝 (1955—), 女, 博士, 教授, 从事高坝结构、基础工程强度分析与稳定分析方面的研究。

了高压旋喷桩施工中应力增量的理论计算公式,并得到了高压旋喷桩成桩时的孔隙水压力计算公式,针对地铁盾构隧道受高压旋喷桩施工影响而破坏的工程实例,探讨了高压旋喷桩施工对地铁隧道产生影响的问题。邓开鸿<sup>[6]</sup>基于高压旋喷桩的成桩机理,引入散粒介质的颗粒离散元分析方法,研究了喷射流的扩散和压力衰减规律,并对不同土体情况下高压旋喷桩施工的压力衰减、土体位移进行了详细的分析。姚笑青等<sup>[7]</sup>认为可将桩沉入土中的过程近似为土体受水平向挤压而破坏的过程。从土压力理论出发,可证明实测资料所反映的应力增量随深度增加的现象,故桩对土的水平向挤压力随深度增加而增加。引入群桩孔压叠加系数 $\alpha$ ,按面积加权平均来计算桩间孔压值,并指出当土中水平向应力因叠加而大于竖向应力时,将出现横向裂隙,桩群内孔压趋于上覆有效土重。唐世栋等<sup>[8]</sup>通过对桩基施工过程中实测资料的分析,与理论解进行对比,探讨了单桩沉桩时桩周土中的超孔隙水压力的分布规律及影响范围,并对桩端下孔隙水压力的球形影响区最大半径进行了讨论。

崔江余在对某住宅楼纠斜时采用高压喷射注浆法设置止水帷幕,施工过程中,由于没有估计到超孔隙水压的危害性,每根旋喷桩间隔时间较短,致使预先完工的3口降水井(距止水帷幕最近的为3 m)全部被泥砂浆填满(原井深20 m),井口向外溢水(地下水水位为-2 m),使降水井完

全报废。这一工程实例说明施工时产生的超孔隙水压力对于周边环境的影响是不容忽视的。然而,目前对于高压旋喷桩施工产生的孔隙水压力的研究相对较少,本文将以三维建模为基础,基于圆孔扩张理论,结合工程实例,具体分析施工时孔隙水压力的变化规律,以期对孔隙水压力的研究有所补充。

### 1 工程概况

工程位于某滨海区域,区域内主要是围海造地的吹填地基,以淤泥土为主,淤泥深度达20~30 m,属于典型的软土地基,具有含水量高、压缩性高、灵敏度高、易变形、抗剪强度低等特点,区域内典型的地质剖面及各土层参数见表1。

表1 地质剖面与土层参数

| 土层号                    | 固快    |                    | 快剪    |                    | 承载力/<br>kPa |
|------------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------------|
|                        | C/kPa | $\varphi/(^\circ)$ | C/kPa | $\varphi/(^\circ)$ |             |
| ② <sub>1</sub> 淤泥质粉质黏土 | 10.5  | 8.9                | 8.5   | 4.6                | 50          |
| ② <sub>1</sub> '含粉砂淤泥  | 8.2   | 7.7                | 7.5   | 3.8                | 60          |
| ② <sub>2</sub> 淤泥      | 8.5   | 6.3                | 7.2   | 2.3                | 50          |

工程实施的高压旋喷桩位于桥梁0#桥台与1#桥墩之间,旋喷桩最外排桩中心距离桥梁钻孔灌注桩中心的间距2.5 m。旋喷桩桩径0.6 m,桩距1.2 m,梅花形布置,共4排,工程采用单管法施工,注浆压力为20 MPa。桥梁总宽度41.5 m,中间设缝分开为左右两幅,见图1。桥梁钻孔灌注桩桩径1 m,桩长66 m,桥台处2排,桥墩处1排,桩间距4.4 m。桩位的具体布置见图2。

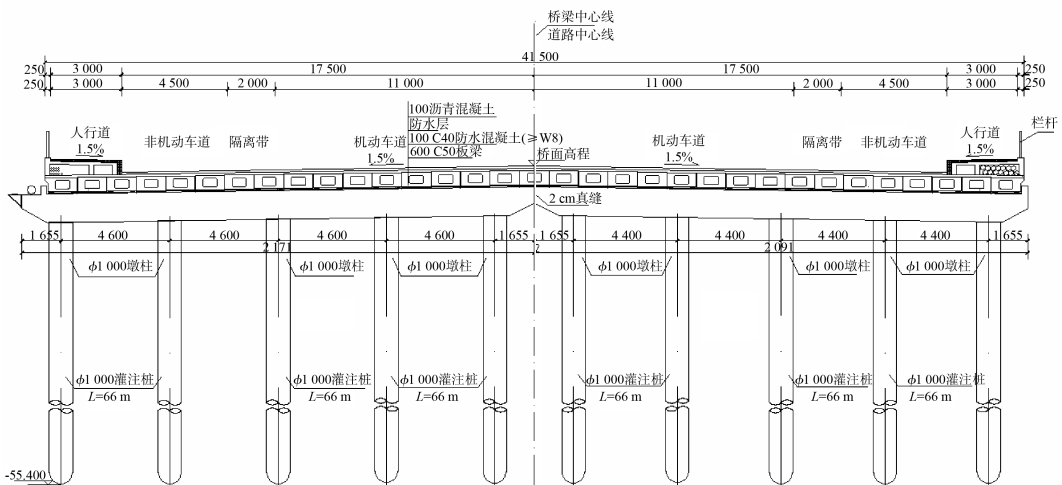


图1 桥梁立面(高程:m;尺寸:mm。下同)

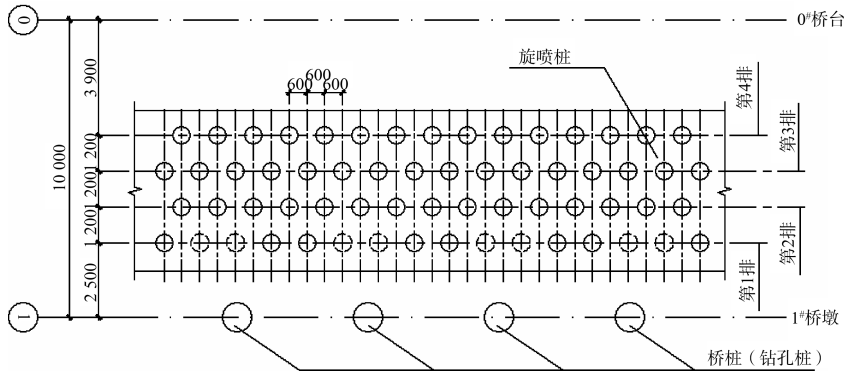


图 2 桩位布置

2 三维建模

工程中常用的土体本构模型有 Mohr-Coulomb 模型, 该模型参数获得简单, 物理意义明确, 使用经验较多。在本文研究中, 土体的应力路径并不复杂, 也不存在卸载问题, 研究采用 Mohr-Coulomb 模型合理可行。

旋喷桩采用圆柱体模型, 直径 0.6 m, 打设深度为 23 m, 但是, 考虑到实际施工情况, 防止出现“冒浆”现象, 在顶部预留 2 m 厚的覆土, 即旋喷桩的深度为 21 m; 影响区采用圆形区域, 半径 10.3 m; 模型自旋喷桩底部向下再取 2 m, 即模型深度为 25 m。三维有限元计算范围取为: 南北向(Y轴方向)宽度 10.3 m, 东西向(X轴方向)宽度 10.3 m, 深度(Z轴方向)取 25 m。有限元模型如图 3 所示。

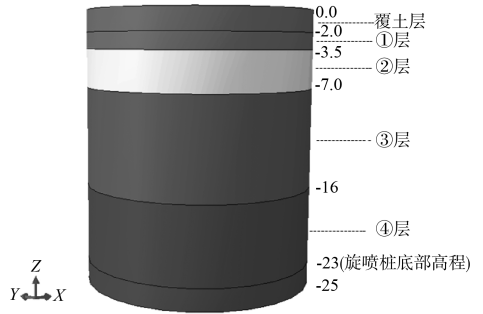


图 3 有限元模型 (单位: m)

土体单元采用土体单元采用 8 节点缩减积分单元 C3D8RP。对模型底部采用三向约束, 四周采用水平约束, 并将顶部表面压强设置为 0 kPa 边界条件, 在高压旋喷桩施工位置即圆孔内侧按 10 m 深度以均布荷载的形式施加超孔隙水压力边界。荷载施加及边界条件如图 4 所示。在进行有限元数值模拟时, 各土层的计算参数见表 2。

表 2 土层计算参数

| 编号 | 土类      | 压缩模量 $E_s$ /MPa | 泊松比   | 摩擦角/( $^\circ$ ) | 粘聚力/kPa | 渗透系数/( $10^{-9}$ m/s) |
|----|---------|-----------------|-------|------------------|---------|-----------------------|
| ①  | 黏土      | 4.05            | 0.461 | 8.4              | 16.8    | 4.0                   |
| ②  | 淤泥质粉质黏土 | 2.34            | 0.479 | 4.6              | 13.0    | 11.0                  |
| ③  | 含粉砂淤泥   | 1.99            | 0.483 | 3.8              | 7.5     | 8.3                   |
| ④  | 淤泥      | 1.72            | 0.490 | 2.3              | 7.2     | 5.8                   |

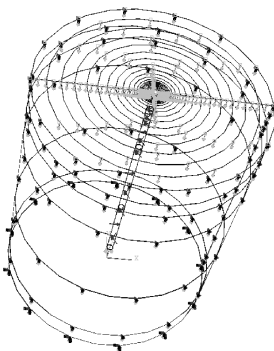


图 4 荷载施加及边界条件

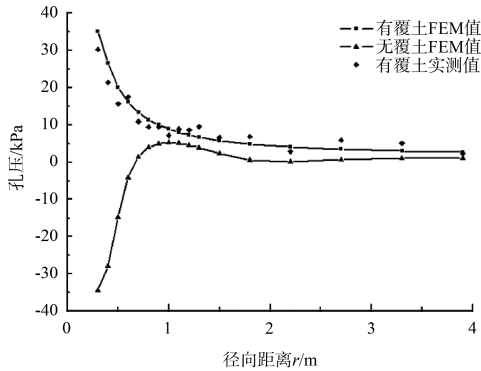
3 实测数据对比

进行实测时, 旋喷桩打设深度为 21 m, 上部预留 2 m 厚的覆土, 其土体性质与表 2 中①号土体性质一致; 进行有限元计算时, 分两种工况: 有覆土与无覆土, 有覆土时荷载施加至距模型顶部 2 m 处, 其深度为 21 m; 无覆土时荷载施加至模型顶部, 其深度也是 21 m。

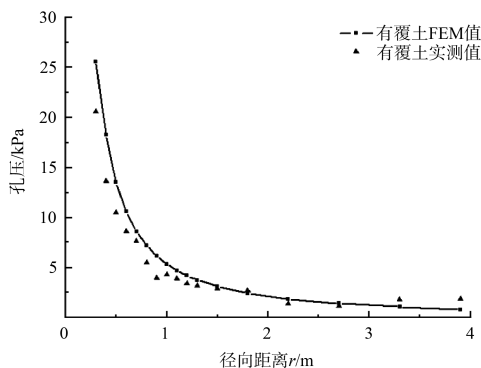
3.1 超孔隙水压力沿径向数据对比

为分析单桩施工引起的超孔隙水压力的分布

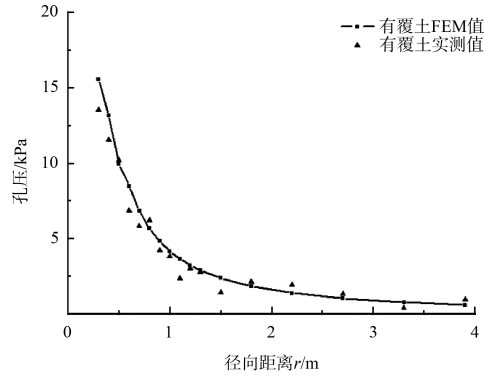
及其影响范围,把不同距离孔隙压力计上测得各孔隙水压力增量,做为单桩施工时距桩轴不同距离处引起的超孔隙水压力。选取模型上覆土以下0 m(桩顶处)、4 m(桩身4 m处)、8 m(桩身8 m处)超孔隙水压力(POR)有限元计算结果(FEM值)与实测数据对比分析,同时列出了不考虑覆土时的桩顶处超孔隙水压力曲线作对比,如图5所示。图5的结果显示,不同深度处的土体孔隙水压力沿径向近似呈对数衰减,最后逐渐趋于零,其最大值可达35 kPa。从图中可以看出,孔隙水压力计算值和实测值存在一定的误差,且深度越小误差越大,误差产生的主要原因是高压旋喷桩实际施工时,由于上部土体侧限较小,通常会产生较大的地表隆起,伴随着孔隙水压力的释放,导致上部土体的孔压偏小;且随着深度增加,土体侧限增大,成桩对孔隙水压力的影响减小,深层土体的孔压计算值更接近实测值。图5a)中,无覆土情况下,孔隙水压力计算值基本为负值,原因是上部土体在施工时产生较大的地表隆起,出现“冒浆”现象,导致孔压出现负值。



a) 桩顶处



b) 桩身4 m处



c) 桩身8 m处

图5 桩顶、桩身POR对比

### 3.2 超孔隙水压力沿深度数据对比

本工程旋喷桩施工工艺采用单管法施工,进行实测时,旋喷桩自下而上喷射注浆,即注浆管从埋深23 m处旋喷至埋深2 m处;分别选取注浆管喷射注浆时埋深为2~10 m处的孔隙水压力实测值,并将其与相应位置处的有限元计算值进行对比分析,得出POR沿深度变化的对比,如图6所示。图6的结果显示,POR沿深度先增后减,总体上呈递减的趋势,反映在云图上,云图呈蝴蝶形,如图7所示。POR出现拐点的原因是上部土体的侧限较小,施工时地表隆起,伴随着孔压的消散,导致上部土体的孔压较下部土体小。从图7中可以看出,计算值和实测值存在一定的误差,且深度越大误差越小,原因是随着深度的增大,土体侧限增加,成桩对孔隙水压力的影响会减小。

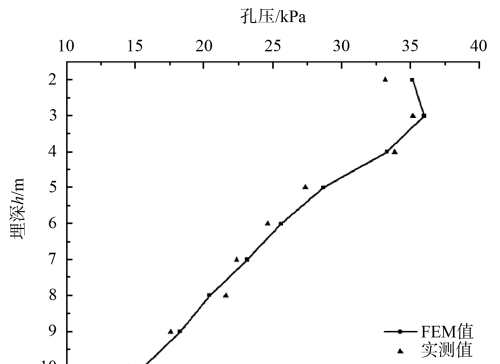


图6 POR沿深度数据对比

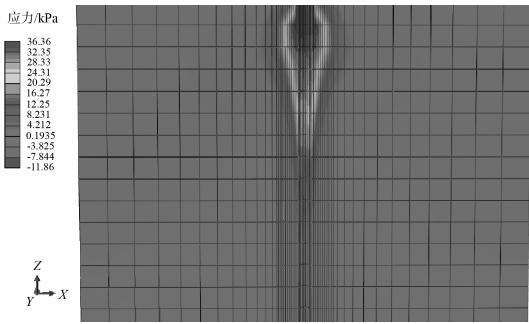


图 7 有限元计算云图

### 3.3 不同注浆压力引起的超孔隙水压力对比

进行数值模拟时, 注浆压力分别采用 5、10、15 和 20 MPa, 将所得孔隙水压力的最大值与实测孔隙水压力的最大值进行对比分析, 曲线如图 8 所示。由图 8 可知, 当注浆压力较小时, 孔隙水压力的实测值较 FEM 值偏大, 随着注浆压力的增大, 孔隙水压力的实测值和 FEM 值也增加, 但是, FEM 值较实测值偏大。从图中可以看出, 孔隙水压力最大值与注浆压力成近似线性关系, 对其进行线性拟合, 得出如下公式:

$$\Delta u_{\max} = 1.6P \quad (1)$$

式中:  $\Delta u_{\max}$  为孔隙水压力最大值(kPa);  $P$  为注浆压力(MPa)。

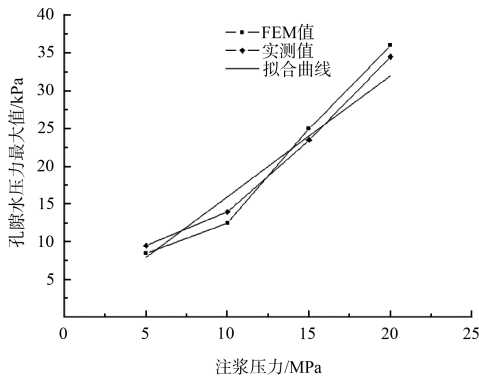


图 8 孔隙水压力最大值与注浆压力关系

## 4 结论

1) 通过有限元计算值与实测值的对比分析可知, 土体上部存在覆土时有限元计算结果更接近实测数据; 无覆土情况下, 孔隙水压力有限元计算值基本为负值, 其值可达 -35 kPa。因此, 为了使有限元模拟结果更精确, 进行旋喷桩施工有限元数值模拟时土体模型上部宜存在覆土。

2) 可以采用对数函数的形式表达桩侧土中孔隙水压力与距离的关系; 随着埋深的增加, 桩侧土中孔隙水压力的影响范围减小。孔壁处即桩土界面处的孔隙水压力沿埋深总体上呈递减趋势, 在埋深 3 m 左右处出现拐点, 达到最大值 36 kPa。深层有限元计算方法得出的孔隙水压力的消散过程与实测数据拟合较好, 随着深度减小误差增大。

3) 旋喷桩成桩期间引起的孔隙水压力直接受注浆压力的影响, 随着注浆压力的增大而增加, 成近似线性关系。

## 参考文献:

- [1] 徐至钧, 全科政. 高压喷射注浆法处理地基[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [3] 龚晓南. 复合地基理论与工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [4] 崔江余. 高压喷射注浆法产生的超孔隙水压分析[J]. 探矿工程, 2000, 32(1): 32-34.
- [5] 翁承显. 地铁盾构隧道受高压旋喷桩挤土作用的研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [6] 邓开鸿. 高压旋喷桩的成桩机理和挤土效应研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [7] 姚笑青, 胡中雄. 饱和软土中沉桩引起的孔隙水压力估算[J]. 岩土力学, 1997, 18(4): 30-35.
- [8] 唐世栋, 何连生, 傅纵. 软土地基中单桩施工引起的超孔隙水压力[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 725-729.
- [9] 谭世霖. 高压旋喷桩在高速公路软基处治中的试验研究[J]. 水运工程, 2007(11): 115-119.
- [10] 王志丰, 王亚琼, 谢永利. 水平旋喷成桩引起超静孔隙水压力研究[J]. 西安科技大学学报, 2016, 36(2): 207-212.
- [11] SHEN S L, WANG Z F, SUN W J, et al. A field trial of horizontal jet grouting using the composite-pipe method in the soft deposits of Shanghai [J]. Tunnelling and underground space technology incorporating trenchless technology research, 2013, 35(4): 142-151.
- [12] 魏新江, 陈伟军, 魏纲, 等. 盾构隧道施工引起的土体初始超孔隙水压力分布研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2 103-2 109.