

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.004



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



新建地铁车站增层开挖对既有桩基 侧摩阻力的影响

袁传旭¹, 甄雪东¹, 陈坤², 黄阜³, 肖健³, 凌同华³

(1. 深圳地铁建设集团有限公司, 广东深圳 518026; 2. 中建五局华南建设有限公司, 广东深圳 518002; 3. 长沙理工大学土木与环境工程学院, 长沙 410114)

摘要: 在新建地铁车站零距离下穿既有地铁区间隧道施工过程中, 基坑的增层开挖导致既有桩基侧摩阻力下降, 从而对桩基的承载力产生不利影响。目前, 新建地铁车站增层开挖施工作用下既有桩基侧摩阻力的计算理论尚不成熟。以深圳地铁 13 号线公明广场站零距离下穿既有 6 号线项目为背景, 采用 Mindlin 应力解推导增层开挖卸荷作用下既有桩基侧摩阻力的计算公式, 研究新建地铁车站增层开挖过程中既有桩基侧摩阻力的变化规律。通过与数值模拟结果进行对比, 验证理论计算方法的正确性, 在此基础上获得参数变化对桩侧摩阻力和卸荷应力的影响规律。结果表明: 既有桩侧摩阻力随增层开挖深度的增大而减小, 侧壁卸荷应力与总卸荷应力的比值随增层开挖深度的增加而增大; 桩侧摩阻力随增层开挖面积的增大而增大, 侧壁卸荷应力与总卸荷应力的比值随增层开挖面积的增大而减小。在开挖深度较深、开挖面积较小或考虑边桩侧摩阻力时, 需考虑侧壁卸荷应力的影响。

关键词: 地铁车站; 增层开挖; 桩侧摩阻力; 卸荷应力; Mindlin 应力解

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)02-0140-10

Effect of excavation beneath a new subway station on the shaft resistance of existing piles

YUAN Chuanxu¹, ZHEN Xuedong¹, CHEN Kun², HUANG Fu³, XIAO Jian³,
LING Tonghua³

(1. Shenzhen Metro Construction Group Co., Ltd., Shenzhen 518026, Guangdong, P. R. China; 2. China Construction Fifth Division South China Company, Shenzhen 518002, Guangdong, P. R. China; 3. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, P. R. China)

Abstract: During the construction of a new subway station beneath an existing operational tunnel, the shaft resistance of existing piles induced by excavation may decrease, and thus affect the bearing capacity of the piles. Currently, the theory of computing the shaft resistance for existing piles induced by excavation is not clear.

收稿日期: 2023-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(52278395、52078061)

作者简介: 袁传旭(1980-), 男, 高级工程师, 主要从事地铁工程建设研究, E-mail: 11815476@qq.com。

黄阜(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: hfcust@csust.edu.cn。

Received: 2023-10-23

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52278395, 52078061)

Author brief: YUAN Chuanxu(1980-), senior engineer, main research interest: subway engineering construction, E-mail: 11815476@qq.com.

HUANG Fu (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: hfcust@csust.edu.cn.

Taking Shenzhen Metro Line 13 Gongming Square Station crossing the existing Line 6 project at zero distance as a case study, a calculation formula of pile shaft resistance induced by excavation under existing buildings is obtained by using the Mindlin stress solution. By comparison with the numerical simulation results, the correctness of the Mindlin stress solution is proved. The influence of parameter changes on pile shaft resistance and unloading stress is analyzed. The results show that: when the depth of excavation increases, the total pile shaft resistance decreases, and the ratio of sidewall unloading stress to total unloading stress increases; when the excavation area increases, the total pile shaft resistance increases, and the ratio of sidewall unloading stress to total unloading stress decreases. Therefore, when the excavation depth is large, the excavation area is small, or the shaft resistance of side piles is taken into consideration, the influence of the sidewall unloading stress must be taken into account.

Keywords: subway station; layered excavation; pile shaft resistance; unloading stress; Mindlin's stress solution

随着城市化进程的加速,城市核心地带的地下结构也越来越密集,新建地铁车站下穿既有地铁区间隧道的情况屡见不鲜。地铁线路一般在规划时就已确定新建地铁车站下穿既有地铁线路的具体位置。而新建地铁在开挖施工过程中必然会引起周围土体应力的重分布,导致地层变形,进而影响上部既有地铁的运营安全。因此,在新建地铁下穿既有线路的位置,既有地铁下方会预先布置桩基,确保新建地铁车站增层开挖诱发既有线路的沉降变形不超过安全阈值。但是,即使既有线路下方预先布置了支撑桩,新建车站增层开挖过程中挖除的土体必然会导致支撑桩的桩侧摩阻力下降,从而影响上部既有结构的稳定。因此,有必要对新建地铁车站下穿既有线路过程中增层开挖卸荷影响下既有桩基的侧摩阻力开展研究,为新建地铁下穿既有线路施工过程中既有线路的运营提供安全保障。

对于既有建筑下方桩基在新建基坑开挖影响下的承载力及受力特征,已有很多学者开展了相关研究并取得了一些成果。Iwasaki等^[1]研究了由于基坑开挖卸荷导致下部桩基出现拉力的工程现象;朱火根等^[2]分析了上海某工程基坑开挖卸荷回弹导致下部工程桩基出现拉断现象;陈锦剑等^[3]采用数值分析软件研究了深基坑开挖情况下抗拔桩的受力情况,结果表明,卸荷对桩身轴力有明显的负面影响;纠永志等^[4]利用室内试验分析了开挖条件下桩身轴力的变化规律;基于现场试验,张乾青^[5]提出了更合理的群桩基桩的双曲线荷载传递模型,并进行了理论计算;江杰等^[6]采用二阶段法得出了开挖条件下考虑土体蠕变的单桩受力及变形计算方法;杨淑娟等^[7]依托某基坑工程项目,通过现场试验分析了不同开挖深度及施工工况下微型钢管桩弯矩的分布规律。饶凯等^[8]利用PLAXIS 3D有限元软件对抗拔桩的桩-土界面法向应力进行研究,揭示了基坑开挖工况下抗拔桩的承载机理。杨庆光等^[9]基于

Vesic圆孔理论,提出了在基坑开挖卸荷作用下坑底管桩竖向承载力的弱化折减系数计算方法。通过分析既有建筑桩基在增层开挖情况下的受力特征,龚晓南等^[10]提出了增层开挖情况下桩身侧摩阻力的理论计算方法。伍程杰等^[11]利用PLAXIS有限元软件分析了增层开挖条件下群桩的承载特性。单华峰等^[12-13]采用荷载传递方法获得了增层开挖条件下桩侧与桩端阻力的传递函数以及刚性承台下群桩的控制方程。王成等^[14]利用室内模型试验揭示了增层开挖条件下不同桩顶约束对桩基内力的影响。王术剑等^[15]建立了桩侧与桩端荷载传递模型,得到增层开挖条件下在役桩竖向承载力的计算方法。然而,现有的增层开挖情况下桩侧摩阻力理论计算大多采用基于平面应变理论的二维分析方法,且未考虑围护结构及开挖侧壁卸荷面对桩侧摩阻力的影响。

以深圳地铁13号线公明广场站零距离下穿既有6号线区间隧道为背景,构建三维单桩理论分析模型,采用Mindlin应力解计算获得新建地铁车站增层开挖卸荷作用下既有桩基的有效应力,进而得到桩基侧摩阻力的计算公式。通过与数值模拟结果进行对比,证明了该理论计算方法的正确性,在此基础上分析参数变化对桩侧摩阻力和卸荷应力的影响规律。

1 增层开挖作用下既有桩基侧摩阻力计算

在新建地铁车站零距离下穿既有地铁区间隧道施工过程中,基坑增层开挖施工导致既有区间下方桩基周围土体被逐层挖除,桩基承载力变化较大。通过计算增层开挖前后桩周土体的竖向有效应力,推导出增层开挖作用下桩侧摩阻力的计算公式。

1.1 理论分析模型

矩形基坑长度为 L , 宽度为 B , 深度为 h 。基坑下部存在既有桩基, 桩长为 l , 桩体直径为 D 。以桩与地面交点为原点、竖直向下为 Z 轴正方向建立坐标轴。基坑四周已提前做好围护结构。基坑底部

存在既有荷载, 且在增层开挖时既有荷载仍然存在。该部分荷载包括两部分: 长为 L 、宽为 B 的面荷载 σ'_z 以及与 Y 坐标轴重合、长度为 B 的线荷载 q_z 。增层开挖后, 基坑深度变为 $h + \Delta h$, 如图 1 所示。

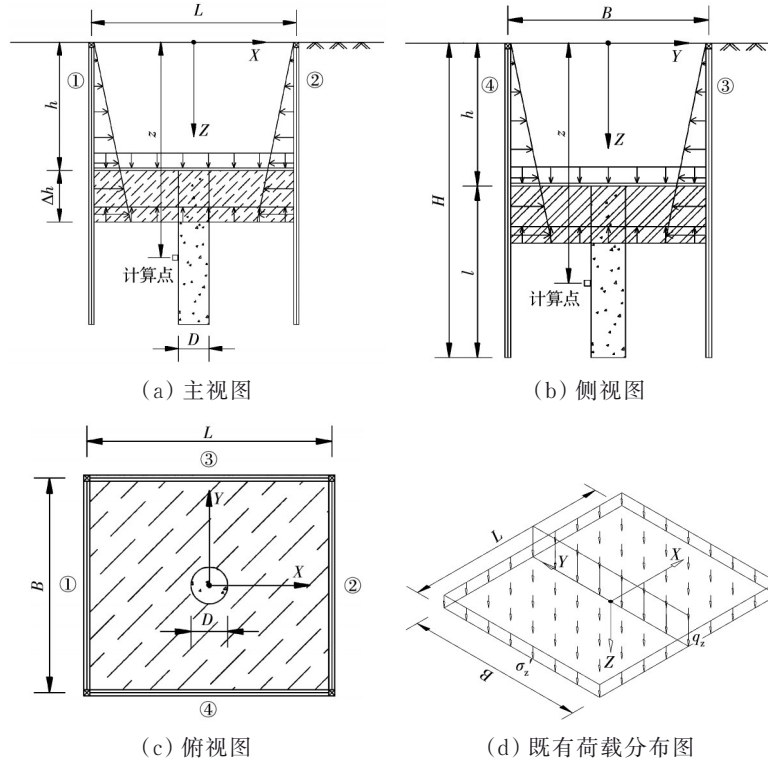


图 1 新建地铁车站增层开挖理论分析模型

Fig. 1 Theoretical analysis model for excavation of new subway station beneath an existing tunnel

1.2 简单公式法计算有效应力

地面以下桩基 z 处的任意点如图 1 所示。在开挖前, 假设开挖土体的平均有效重度为 $\bar{\gamma}_1$, 则 z 处竖向有效应力为

$$\sigma_v = \bar{\gamma}_1(z - h) + \sigma'_z + \frac{q_z}{B} \quad (1)$$

增层开挖后, 假设开挖土体的平均有效重度为 $\bar{\gamma}_2$, 则 z 处竖向有效应力为

$$\sigma_v = \bar{\gamma}_2(z - h - \Delta h) + \sigma'_z + \frac{q_z}{B} \quad (2)$$

1.3 Mindlin 应力法计算有效应力

根据 Mindlin 等^[16]的研究, 泊松比为 μ 的半无限空间体内作用集中力 p 如图 2 所示。空间体内任意一点 M 的竖向有效应力 σ_z 计算式为

$$\sigma_z = -\frac{p}{8\pi(1-\mu)} \left[\frac{(1-2\mu)(z-c)}{r_1^3} + \frac{3(z-c)}{r_1^5} - \frac{(1-2\mu)(2-c)}{r_2^3} + \frac{3(3-4\mu)z(z+c)^2}{r_2^5} - \frac{3c(z+c)(5z-c)}{r_2^5} + \frac{30cz(z+c)^3}{r_2^7} \right] \quad (3)$$

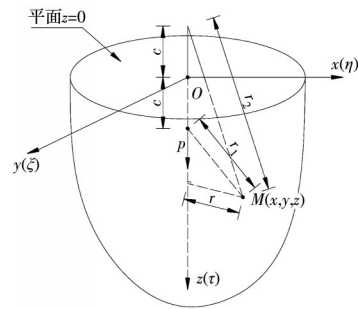


图 2 竖向集中荷载 Mindlin 解示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Mindlin solution under vertical concentrated load

式中

$$\left. \begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ r_1 &= \sqrt{r^2 + (z-c)^2} \\ r_2 &= \sqrt{r^2 + (z+c)^2} \end{aligned} \right\}$$

$$\sigma_z^{dl} = -\frac{\sigma}{8\pi(1-\mu)} \int_{-B/2}^{B/2} \int_{-L/2}^{L/2} \left[\frac{(1-2\mu)(z-c)}{T_1^3} + \frac{3(z-c)}{T_1^5} - \frac{(1-2\mu)(2-c)}{T_2^3} + \frac{3(3-4\mu)z(z+c)^2}{T_2^5} - \frac{3c(z+c)(5z-c)}{T_2^5} + \frac{30cz(z+c)^3}{T_2^7} \right] dx dy$$

$$\left. \frac{3c(z+c)(5z-c)}{T_2^5} + \frac{30cz(z+c)^3}{T_2^7} \right] d\xi d\eta \quad (4)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= \sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2+(z-h)^2} \\ T_2 &= \sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2+(z+h)^2} \end{aligned} \right\}$$

在基坑底部与 Y 坐标轴重合、长度为 B 的线荷载 q 的单位力 qdη 作用下,桩周土体计算点(x,y,z)的竖向附加应力σ_z^{d2}为

$$\begin{aligned} \sigma_z^{d2} = & -\frac{q}{8\pi(1-\mu)} \int_{-B/2}^{B/2} \left[\frac{(1-2\mu)(z-c)}{T_3^3} + \right. \\ & \frac{3(z-c)}{T_3^5} - \frac{(1-2\mu)(2-c)}{T_4^3} + \frac{3(3-4\mu)z(z+c)^2}{T_4^5} - \\ & \left. \frac{3c(z+c)(5z-c)}{T_4^5} + \frac{30cz(z+c)^3}{T_4^7} \right] d\eta \quad (5) \end{aligned}$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} T_3 &= \sqrt{(y-\eta)^2+(z-h)^2} \\ T_4 &= \sqrt{(y-\eta)^2+(z+h)^2} \end{aligned} \right\}$$

图 1 所示坐标系中,在考虑基坑侧壁卸荷引起的桩基附加应力之前,需计算侧壁应力。张治国等^[17]将基坑侧壁卸荷应力等效为三角荷载,大小为 K₀γz,但这种计算方法未考虑围护结构对基坑侧壁的支护作用。根据姜兆华等^[18]的研究,在围护结构作用下,基坑侧壁卸荷应力应乘以折减系数β(β<1),可取值为 0.75,因此,基坑侧壁卸荷应力为 βK₀γz。

图 1 所示坐标系中,在基坑侧壁①上卸荷应力 βK₀γz 作用下,对式(3)进行积分,可以得到桩周土体任意点(x,y,z)的竖向附加应力σ_z^{c1}。

$$\begin{aligned} \sigma_z^{c1} = & -\frac{\beta K_0 \gamma (x+B/2)}{8\pi(1-\mu)} \int_{-L/2}^{L/2} \int_0^h \left\{ \frac{-1+2\mu}{R_1^3} + \right. \\ & \frac{3(z-\tau)^2}{R_1^5} + \frac{1-2\mu}{R_2^3} + \frac{3(3-4\mu)(z+\tau)^2}{R_2^5} - \\ & \left. \frac{6\tau}{R_2^5} \left[\tau + (1-2\mu)(z+\tau) + \frac{5z(z+\tau)^2}{R_2^2} \right] \right\} \tau d\eta d\tau \quad (6) \end{aligned}$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \sqrt{(x+B/2)^2+(y-\eta)^2+(z-\tau)^2} \\ R_2 &= \sqrt{(x+B/2)^2+(y-\eta)^2+(z+\tau)^2} \end{aligned} \right\}$$

同理,在基坑侧壁②③④上的卸荷应力作用下,桩周土体任意点(x,y,z)的竖向附加应力σ_z^{c2}、σ_z^{c3}、σ_z^{c4}分别为

$$\begin{aligned} \sigma_z^{c2} = & -\frac{\beta K_0 \gamma (x-B/2)}{8\pi(1-\mu)} \int_{-L/2}^{L/2} \int_0^h \left\{ \frac{-1+2\mu}{R_3^3} + \right. \\ & \frac{3(z-\tau)^2}{R_3^5} + \frac{1-2\mu}{R_4^3} + \frac{3(3-4\mu)(z+\tau)^2}{R_4^5} - \end{aligned}$$

$$\left. \frac{6\tau}{R_4^5} \left[\tau + (1-2\mu)(z+\tau) + \frac{5z(z+\tau)^2}{R_4^2} \right] \right\} \tau d\eta d\tau \quad (7)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} R_3 &= \sqrt{(x-B/2)^2+(y-\eta)^2+(z-\tau)^2} \\ R_4 &= \sqrt{(x-B/2)^2+(y-\eta)^2+(z+\tau)^2} \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned} \sigma_z^{c3} = & -\frac{\beta K_0 \gamma (y-L/2)}{8\pi(1-\mu)} \int_{-B/2}^{B/2} \int_0^h \left\{ \frac{-1+2\mu}{R_5^3} + \right. \\ & \frac{3(z-\tau)^2}{R_5^5} + \frac{1-2\mu}{R_6^3} + \frac{3(3-4\mu)(z+\tau)^2}{R_6^5} - \end{aligned} \quad (8)$$

$$\left. \frac{6\tau}{R_6^5} \left[\tau + (1-2\mu)(z+\tau) + \frac{5z(z+\tau)^2}{R_6^2} \right] \right\} \tau d\xi d\tau$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} R_5 &= \sqrt{(x-\xi)^2+(y-L/2)^2+(z-\tau)^2} \\ R_6 &= \sqrt{(x-\xi)^2+(y-L/2)^2+(z+\tau)^2} \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned} \sigma_z^{c4} = & -\frac{\beta K_0 \gamma (y+L/2)}{8\pi(1-\mu)} \int_{-B/2}^{B/2} \int_0^h \left\{ \frac{-1+2\mu}{R_7^3} + \right. \\ & \frac{3(z-\tau)^2}{R_7^5} + \frac{1-2\mu}{R_8^3} + \frac{3(3-4\mu)(z+\tau)^2}{R_8^5} - \end{aligned} \quad (9)$$

$$\left. \frac{6\tau}{R_8^5} \left[\tau + (1-2\mu)(z+\tau) + \frac{5z(z+\tau)^2}{R_8^2} \right] \right\} \tau d\xi d\tau$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} R_7 &= \sqrt{(x-\xi)^2+(y+L/2)^2+(z-\tau)^2} \\ R_8 &= \sqrt{(x-\xi)^2+(y+L/2)^2+(z+\tau)^2} \end{aligned} \right\}$$

式(4)~式(9)均可通过 Gauss-Legendre 数值积分进行计算。由式(4)~式(9)可知,将既有面荷载σ_z^c代入式(4),可以得到既有面荷载σ_z^c作用下桩周土体任意点(x,y,z)的竖向附加应力σ_z^d。

将既有面荷载q_z代入式(5),可以得到既有面荷载q_z作用下桩周土体任意点(x,y,z)的竖向附加应力σ_z^d。计算点受到的竖直向下的有效应力σ_v^d可以采用式(10)计算。

$$\sigma_v^d = \bar{\gamma}z + \sigma_z^{c1} + \sigma_z^{c2} \quad (10)$$

增层开挖前,基坑深度为 h,开挖土体重度为 γ₁,基坑所受面荷载为 γ₁h。代入式(4)和式(6)~式(9),可以得到开挖卸荷对桩周土体任意点(x,y,z)竖直向上的有效应力σ_z^d(γ₁h)。

$$\begin{aligned} \sigma_z^d(\bar{\gamma}_1 h) = & \sigma_z^{d1}(\bar{\gamma}_1 h) + \sigma_z^{c1}(\bar{\gamma}_1) + \\ & \sigma_z^{c2}(\bar{\gamma}_1) + \sigma_z^{c3}(\bar{\gamma}_1) + \sigma_z^{c4}(\bar{\gamma}_1) \end{aligned} \quad (11)$$

增层开挖后,基坑深度为 h+Δh,开挖土体重度为 γ₂,基坑所受面荷载为 γ₂(h+Δh)。代入式(4)和式(6)~式(9),可以得到开挖卸荷对桩周土体任意点(x,y,z)竖直向上的有效应力σ_z^d(γ₂(h+Δh))。

$$\begin{aligned} \sigma_z^d(\bar{\gamma}_2(h+\Delta h)) &= \sigma_z^{d1}(\bar{\gamma}_2(h+\Delta h)) + \sigma_z^{c1}(\bar{\gamma}_2) + \\ &\sigma_z^{c2}(\bar{\gamma}_2) + \sigma_z^{c3}(\bar{\gamma}_2) + \sigma_z^{c4}(\bar{\gamma}_2) \end{aligned} \quad (12)$$

因此, 增量开挖前桩周土体任意点竖向有效应力 σ_v 为

$$\sigma_v = \sigma_v^d - \sigma_z^d(\bar{\gamma}_1 h) \quad (13)$$

增量开挖后, 桩周土体任意点竖向有效应力 σ_v 为

$$\sigma_v = \sigma_v^d - \sigma_z^d(\bar{\gamma}_2(h+\Delta h)) \quad (14)$$

1.4 桩侧摩阻力计算公式推导

在考虑利用静力法计算总的桩侧阻力前, 需计算单位面积桩侧摩阻力。桩侧摩阻力的古典计算公式主要有 α 法、 β 法和 λ 法。Tomlinson 等^[19]提出了计算饱和黏性土侧摩阻力的 α 法。

$$q_{su} = \alpha c_u \quad (15)$$

式中: α 为黏着系数; c_u 为土体不排水抗剪强度。

Chandler^[20]、Burland^[21]、Azzouz 等^[22]先后提出了有效应力法 (β 法), 用以计算黏性土以及非黏性土单位面积桩侧摩阻力。在有效应力法 (β 法) 基础上, 冯莉君等^[23]提出了适用于桩端持力层为较硬土层的、适用范围更大的桩侧摩阻力 q_{su} 计算方法。

$$q_{su} = K \tan(\delta \sigma_v) + c \quad (16)$$

式中: K 为桩侧土的静止侧压力系数; δ 为桩-土接触面摩擦角; σ_v 为桩侧土体的有效应力; c 为桩侧土体的黏聚力。

Vijayvergiya 等^[24]提出了能够反映侧摩阻力深度效应的 λ 法, 计算式为

$$q_{su} = \lambda(\sigma_v + 2c_u) \quad (17)$$

式中: λ 为与桩长有关的系数, 随桩的入土深度增加而递减。

α 法无法反应侧摩阻力的深度效应, λ 法虽然可以反映深度效应, 但目前学术界缺乏用于确定系数 λ 的统计数据。由于本文依托工程桩端持力层为中风化花岗岩(土状), 因此, 采用文献^[24]中适用于桩端持力层为较硬土层的 β 法计算桩侧摩阻力。

在增量开挖前, 假设桩-土体系已经充分固结平衡, 桩侧土为正常固结土, 此时静止侧压力系数 K 为

$$K = 1 - \sin \varphi \quad (18)$$

增量开挖后, 桩土平衡体系遭到破坏, 桩侧土还未来得及固结, 此时为超固结土。对于超固结土的静止侧压力系数 K , Zheng 等^[25]认为

$$K = (1 - \sin \varphi) R_{OC}^{\sin \varphi} \quad (19)$$

式中: φ 为桩侧土体内摩擦角; R_{OC} 为超固结比, 等于增量开挖前后有效应力之比。由于既有桩基为混凝土桩, 桩土接触面比较光滑, 根据张乾青等^[26]的统

计, 桩土接触面摩擦角 δ 取为 $\delta = 0.9\varphi$ 。因此, 增量开挖前桩侧摩阻力为

$$q_{su} = (1 - \sin \varphi) \tan(0.9\varphi) \sigma_v + c \quad (20)$$

增量开挖后桩侧摩阻力为

$$q_{su} = (1 - \sin \varphi) R_{OC}^{\sin \varphi} \tan(0.9\varphi) \sigma_v + c \quad (21)$$

桩的总侧阻力为

$$Q_{su} = \pi d \int_l q_{su} dz \quad (22)$$

2 数值模拟

为验证增量开挖卸荷作用下桩侧摩阻力计算公式的正确性, 采用有限元软件 PLAXIS 3D 构建 13 号线公明广场站零距离下穿既有 6 号线增量开挖的三维模型, 通过模拟新建基坑的增量开挖, 获得增量开挖卸荷作用下单桩侧摩阻力, 与理论计算获得的解进行对比, 以验证理论计算的有效性。

2.1 工程概况

深圳地铁 13 号线公明广场站与既有 6 号线通道换乘, 且车站零距离下穿既有 6 号线。车站全长 337 m, 标准段宽 22.5 m, 基坑深约 26.7 m。6 号线目前已开通试运营, 且已预留地连墙和下方桩基。在修建 13 号线下穿段时, 工程方需采用增量开挖的方式将下部土体挖除, 后由立柱桩承担 6 号线区间及上部结构荷载, 然后再修筑地下车站结构。在新建车站下穿段增量开挖过程中, 既有 6 号线地铁需要维持正常运营。

取 6 号线下部受力最为复杂的中心立柱桩进行分析。根据工程资料, 该立柱桩受力长度为 8.4 m, 受力宽度为 6.8 m, 桩顶位于地下 13.5 m, 该桩基承受的地面超载、区间覆土荷载、6 号线区间荷载等可简化为面荷载与线荷载的组合。其中面荷载之和为 222.5 kN/m², 线荷载之和为 303 kN/m。下穿段增量开挖 12.5 m, 开挖至地下 26 m。场地土层分布及物理力学参数如表 1 所示。

2.2 有限元建模

采用 PLAXIS 3D 构建地铁 13 号线公明广场站零距离下穿既有 6 号线增量开挖的三维数值模型, 如图 3 所示。该模型采用土体硬化模型, 考虑了压缩硬化, 可较好地反映开挖卸载引起的土体应力、应变变化。既有立柱桩顶承受荷载已简化为面荷载与线荷载的组合, 建模时可将有立柱桩桩顶上部结构(如 6 号线区间结构以及覆土)忽略, 将受荷区域简化为一个长度为 8.4 m、宽度为 6.8 m、深度为 13.5 m 的基坑, 上部荷载以面荷载与线荷载的组合作用于基坑底部。基坑四周采用板单元模拟地下连续墙围护结构, 深度与桩底一致。基坑底部

表 1 土层分布及物理力学参数

Table 1 Soil layer distribution and physico-mechanical parameters

层号	名称	层厚/m	重度/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比	压缩模量/MPa
1-1	素填土	5.1	17.1	12	8	0.15	5
5-6	中粗砂	4.8	20.6	2	25	0.27	25
15-1-1	全风化片麻状黑云母花岗岩	5.8	19.5	26	24	0.27	50
15-1-2	强风化片麻状黑云母花岗岩	8.5	19.7	18	27	0.26	100
15-1-3	强风化片麻状黑云母花岗岩	4.4	24.0	20	48	0.25	140
15-1-4	中风化片麻状黑云母花岗岩		26.0	150	58	0.24	20 000

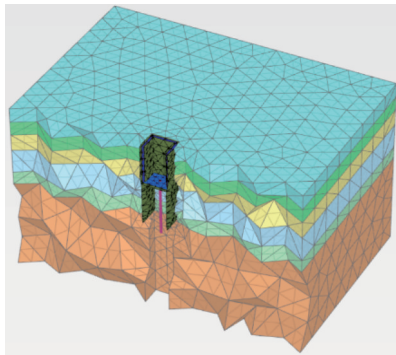


图 3 新建地铁车站增层开挖三维有限元模型

Fig. 3 3D finite element model for layered excavation of new subway station beneath an existing tunnel

采用板单元模拟底板,底板上作用既有面荷载 222.5 kN/m²(8.4 m×6.8 m),既有线荷载 303 kN/m (6.8 m)。计划在基坑底部再开挖 12.5 m,分 3 次开挖,开挖深度分别为 3.0、5.5、4.0 m,以模拟新建地铁车站下穿段的增层开挖。既有立柱桩为 φ1 200 mm 的混凝土灌注桩,位于模型中心处,桩长 20 m,桩身混凝土标号为 C50。增层开挖后,该立柱桩需承担上部结构荷载。根据 Randolph 等^[27]的理论计算模型,X、Y 和 Z 方向的尺寸分别取 100、125、60 m,以避免边界效应对计算精度的影响。

在模拟过程中,采用界面单元模拟桩-土之间摩阻力的作用,并引入强度折减因子模拟桩-土界面的折减作用。具体计算过程为:首先计算土体重力,建立初始地应力场。激活既有围护结构后,开挖基坑并激活既有桩基础。然后施加既有荷载,模拟上覆土体的固结平衡。之后再行下穿段增层开挖,开挖分 3 次进行,分别开挖 3、5.5、4 m,直到开挖至设计深度。

2.3 数值模拟与理论计算结果对比

分别运用简单公式法、Mindlin 应力法以及三维有限元模拟对增层开挖单桩侧摩阻力进行计算,以验证推导的 Mindlin 应力解的有效性。图 4~图 6 分别为基坑开挖长度为 8.4 m、宽度为 6.8 m 时采用简单公式法、Mindlin 应力解法以及有限元法计算的不同开挖深度桩侧摩阻力沿桩身分布曲线。从图 4~图 6 可以看出,Mindlin 应力解法所求得的桩侧摩

阻力沿桩身分布规律与有限元法计算结果基本一致。表 2 为采用简单公式法、Mindlin 应力解法以及有限元法计算的开挖长度为 8.4 m、开挖宽度为

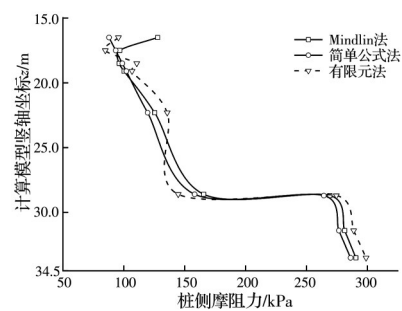


图 4 开挖深度为 3 m 时不同计算方法下桩侧摩阻力分布图
Fig. 4 Distribution diagram of pile shaft resistance using different calculation methods at the excavation depth of 3 m

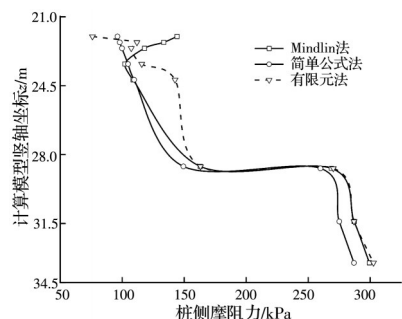


图 5 开挖深度为 8.5 m 时不同计算方法下桩侧摩阻力分布图

Fig. 5 Distribution diagram of pile shaft resistance using different calculation methods at the excavation depth of 8.5 m

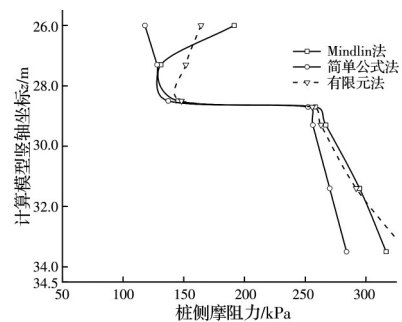


图 6 开挖深度为 12.5 m 时不同计算方法下桩侧摩阻力分布图
Fig. 6 Distribution diagram of pile shaft resistance using different calculation methods at the excavation depth of 12.5 m

6.8 m 时不同增层开挖深度的总桩侧摩擦阻力的对比。从表 2 可以看出,简单公式法计算结果偏小,与有限元法差距在 5%~10% 左右,这是由于简单公式法实际上是 Mindlin 应力法在无穷大开挖面积的简化形式,其开挖卸荷值过大,导致计算得到的桩侧阻力偏小。而 Mindlin 法与有限元法计算结果较为接近,偏差仅为 2%~5% 左右,证明本文推导的理论计算结果有效。

表 2 增层开挖条件下不同计算方法的总桩侧摩擦阻力对比
Table 2 Comparison of total pile shaft resistance using different calculation methods under layered excavation

增层开挖深度/m	简单公式法总桩侧摩擦阻力/kN	Mindlin 法总桩侧摩擦阻力/kN	有限元法总桩侧摩擦阻力/kN
1.0	2 983	3 083	3 154
3.0	2 820	2 910	2 923
5.0	2 493	2 597	2 641
8.5	2 129	2 233	2 319
10.0	1 980	2 031	2 049
12.5	1 645	1 806	1 821

3 参数分析

为了分析不同开挖深度和面积下桩侧摩擦阻力的变化规律,利用 Mindlin 应力解计算方法计算不同参数作用下增层开挖施工过程中既有桩基的侧摩阻力。

3.1 开挖深度影响

在保持开挖面积 $L=8.4\text{ m}$ 、 $B=6.8\text{ m}$ 不变的情况下,采用 Mindlin 应力解计算方法计算得到不同开挖深度下桩侧摩阻力以及侧壁卸荷应力的值,分析其随这些参数的变化规律。

图 7 为保持开挖面积 $L=8.4\text{ m}$ 、 $B=6.8\text{ m}$ 不变的情况下,不同开挖深度下的桩侧摩阻力分布图。由图 7 可知,随着增层开挖的进行,桩侧摩阻力总体分布趋势为:在增层开挖面下方一定距离,桩侧摩阻力随埋深的增大而减小。这是由于上部土层开挖卸荷引起桩周土有效应力降低,从而使桩侧摩阻力减小。随着埋深继续增加,土体有效应力不断增加,桩侧摩阻力随埋深而增加。在 $z=28.5\text{ m}$ 处,桩侧摩阻力出现较大突变,这是由于此处的下部土层为中风化片麻状黑云母花岗岩,土体黏聚力和内摩擦角的突然增大使得桩侧摩阻力也随之增大。表 3 为保持开挖面积 $L=8.4\text{ m}$ 、 $B=6.8\text{ m}$ 不变的情况下不同开挖深度下总桩侧摩阻力。由表 3 可知,随着增层开挖深度的增加,桩侧土体被挖除,总桩侧摩阻力不断减小。

表 4 为保持开挖面积 $L=8.4\text{ m}$ 、 $B=6.8\text{ m}$ 不变的情况下不同开挖深度下的卸荷应力。由表 4 可

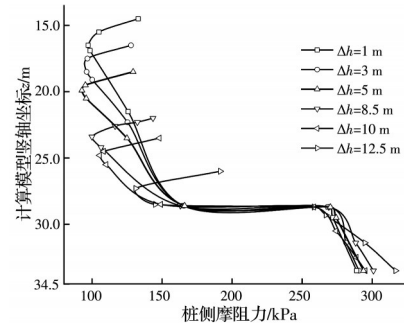


图 7 不同开挖深度下的桩侧摩阻力分布图

Fig. 7 Distribution diagram of pile shaft resistance at different excavation depths

表 3 不同开挖深度下总桩侧摩阻力

Table 3 Total pile shaft resistance at different excavation depths

增层开挖深度/m	总摩阻力/kN	增层开挖深度/m	总摩阻力/kN
1.0	3 083	8.5	2 233
3.0	2 910	10.0	1 980
5.0	2 597	12.5	1 806

知,随着增层开挖深度的增加,总卸荷应力与总侧壁卸荷应力先增大后减小,这是由于桩周土体积随增层开挖深度的增加而减小,从而导致卸荷应力先增大后减小,但侧壁卸荷应力与总卸荷应力比值不断增加。这一规律说明,在增层开挖情况下,若开挖深度较深,仅考虑底部卸荷应力会导致计算结果发生较大偏差。

表 4 不同增层开挖深度下卸荷应力

Table 4 Unloading stress induced by layered excavation at different excavation depths

开挖深度/m	总卸荷应力 σ_z^d /(kN/m)	总侧壁卸荷应力 σ_z^s /(kN/m)	$(\sigma_z^s/\sigma_z^d)/\%$
1.0	935	125	13.4
3.0	1 034	148	14.3
5.0	1 121	168	15.0
8.5	1 234	198	16.1
10.0	1 258	204	16.2
12.5	1 220	198	16.3

3.2 开挖面积影响

为分析开挖面积对既有桩基侧摩阻力的影响,采用 Mindlin 应力解计算在保持开挖深度 $\Delta h=8.5\text{ m}$ 不变的情况下不同开挖面积桩侧摩阻力以及侧壁卸荷应力的值。

图 8 为保持开挖深度 $\Delta h=8.5\text{ m}$ 不变的情况下不同增层开挖面积桩侧摩阻力分布图。从图 8 可以看出,在 $z=28.5\text{ m}$ 以下时,同一埋深下桩侧摩阻力与开挖面积的关系不明显。表 5 为保持开挖深度 $\Delta h=8.5\text{ m}$ 不变的情况下不同开挖面积总桩侧摩阻力。从表 5 可以看出,桩侧总摩阻力随着增层开挖

面积的增大而增大。这一现象可以解释为:开挖面上存在既有力,既有力随着开挖面积的增大而增大,从而导致桩侧摩阻力也随之增大。

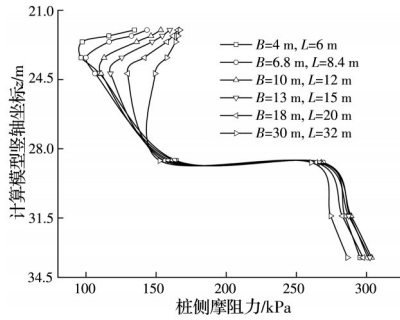


图 8 不同开挖面积下桩侧摩阻力对比图

Fig. 8 Comparison of pile shaft resistance at different excavation areas

表 5 不同开挖面积下总桩侧摩阻力

Table 5 Total pile shaft resistance at different excavation areas

开挖面积	总桩侧摩阻力/kN
4.0 m×6.0 m	2 211
6.8 m×8.4 m	2 233
10.0 m×12.0 m	2 269
13.0 m×15.0 m	2 282
18.0 m×20.0 m	2 310
30.0 m×32.0 m	2 337

表 6 为保持开挖深度 $\Delta h=8.5\text{ m}$ 不变的情况下不同开挖面积的卸荷应力。由表 6 可知,随着增层开挖面积的增加,总卸荷应力不断增大,总侧壁卸荷应力先增大后减小,但侧壁卸荷应力与总卸荷应力的比值不断减小,且在开挖面积仅有 $4\text{ m}\times 6\text{ m}$ 时,侧壁卸荷应力在总卸荷应力中的占比达 18.3%。说明在增层开挖情况下若开挖面积较小,或者在考虑边桩的桩侧摩阻力时,应考虑侧壁卸荷应力的影响。

表 6 不同增层开挖面积下的卸荷应力

Table 6 Unloading stress induced by layered excavation at different excavation areas

开挖面积	总卸荷应力 $\sigma_z^d/(kN/m)$	总侧壁卸荷 应力 $\sigma_z^d/(kN/m)$	$(\sigma_z^d/\sigma_z^d)/\%$
4.0 m×6.0 m	890	163	18.3
6.8 m×8.4 m	1 234	198	16.1
10.0 m×12.0 m	1 538	208	13.5
13.0 m×15.0 m	1 729	203	11.7
18.0 m×20.0 m	1 947	165	8.5
30.0 m×32.0 m	2 274	76	3.3

4 结论

依托深圳地铁 13 号线零距离下穿既有 6 号线

项目,基于 Mindlin 应力法推导增层开挖卸荷作用下既有桩基侧摩阻力的计算公式。通过与有限元计算结果对比,证明了理论结果的有效性,在此基础上分析参数变化对桩侧摩阻力与卸荷应力的影响规律。主要结论如下:

1)既有桩侧摩阻力随增层开挖深度的增大而减小,随增层开挖面积的增大而增大。

2)侧壁卸荷应力与总卸荷应力的比值随增层开挖深度的增大而增大,侧壁卸荷应力与总卸荷应力的比值随增层开挖面积的增大而减小。在增层开挖深度较深,开挖面积较小,或考虑边桩的桩侧摩阻力时,仅考虑底部卸荷应力的影响而忽略侧壁卸荷应力会使计算结果发生较大偏差。

3)增层开挖施工期间,应做到每间隔一定深度施作好冠梁和混凝土支撑等内支撑结构,减少侧壁卸荷给桩侧摩阻力造成的损失;开挖到基底标高时,应及时施作底板,减少底部卸荷应力造成的桩侧摩阻力下降导致的上部既有结构变形。

参考文献

[1] IWASAKI Y, WATANABE H, FUKUDA M, et al. Construction control for underpinning piles and their behaviour [J]. Géotechnique, 1994, 44(4): 681-689.

[2] 朱火根,孙加平.上海地区深基坑开挖坑底土体回弹对工程桩的影响[J].岩土工程界,2005,8(3):43-46.
ZHU H G, SUN J P. Effect of soil rebound on engineering piles at the bottom of deep foundation pit excavation in Shanghai [J]. Geotechnical Engineering, 2005, 8(3): 43-46. (in Chinese)

[3] 陈锦剑,王建华,范巍,等.抗拔桩在大面积深开挖过程中的受力特性分析[J].岩土工程学报,2009,31(3):402-407.
CHEN J J, WANG J H, FAN W, et al. Behavior of uplift pile foundation during large-scale deep excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 402-407. (in Chinese)

[4] 纠永志,黄茂松.开挖条件下黏土中单桩竖向承载特性模型试验与分析[J].岩土工程学报,2016,38(2):202-209.
JIU Y Z, HUANG M S. Studies on pile bearing characteristics in saturated clay under excavation by model tests and a simplified method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 202-209. (in Chinese)

[5] 张乾青.竖向抗压桩承载机理与受力特性分析方法[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(4):93-105.
ZHANG Q Q. Bearing mechanism and response analysis method of vertically loaded piles [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(4): 93-105. (in Chinese)

[6] 江杰,张探,欧孝夺,等.软土地基基坑开挖对坑底桩受力与位移影响的时效分析[J].科学技术与工程,

- 2021, 21(25): 10880-10886.
- JIANG J, ZHANG T, OU X D, et al. Time effect analysis of foundation pit excavation on pile axial force and displacement in soft soil foundation [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(25): 10880-10886. (in Chinese)
- [7] 杨淑娟, 马加骁, 张明义, 等. 土岩深基坑微型钢管桩承载性能试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(30): 12540-12545.
- YANG S J, MA J X, ZHANG M Y, et al. Experimental study on mechanical behavior of micro-tube piles in deep soil-rock foundation pit [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(30): 12540-12545. (in Chinese)
- [8] 饶凯, 刘彦辉, 王际凯, 等. 基坑开挖卸荷下桩基抗拔承载力影响因素研究[J]. *兰州理工大学学报*, 2023, 49(2): 130-137.
- RAO K, LIU Y H, WANG J K, et al. Study on influence factors of uplift pile bearing capacity under unloading of foundation pit excavation [J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2023, 49(2): 130-137. (in Chinese)
- [9] 杨庆光, 陈小巍, 贺敏, 等. 基坑开挖卸荷对坑底管桩承载性状影响研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2023, 19(3): 777-783.
- YANG Q G, CHEN X W, HE M, et al. Study of pipe pile bearing characteristic in foundation pit for excavation and unloading [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2023, 19(3): 777-783. (in Chinese)
- [10] 龚晓南, 伍程杰, 俞峰, 等. 既有地下室增层开挖引起的桩基侧摩阻力损失分析[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(11): 1957-1964.
- GONG X N, WU C J, YU F, et al. Shaft resistance loss of piles due to excavation beneath existing basements [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(11): 1957-1964. (in Chinese)
- [11] 伍程杰, 俞峰, 龚晓南, 等. 开挖卸荷对既有群桩竖向承载性状的影响分析[J]. *岩土力学*, 2014, 35(9): 2602-2608.
- WU C J, YU F, GONG X N, et al. Influence of excavation unloading on vertical bearing behavior of existing pile groups [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(9): 2602-2608. (in Chinese)
- [12] 单华峰, 夏唐代, 俞峰, 等. 既有建筑物地下室增层开挖群桩沉降性状研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(增刊 1): 46-50.
- SHAN H F, XIA T D, YU F, et al. Settlement of pile groups associated with excavation beneath existing basement [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(Sup 1): 46-50. (in Chinese)
- [13] 单华峰, 王春凌, 夏唐代, 等. 承台刚度对受荷群桩基础承载性状的影响研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(4): 1078-1087.
- SHAN H F, WANG C L, XIA T D, et al. Influence of cap stiffness on the bearing behavior of loaded pile group [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(4): 1078-1087. (in Chinese)
- [14] 王成, 钱建固, 陆琦, 等. 地下开挖对既有桩基影响的模型试验研究[J]. *结构工程师*, 2021, 37(1): 128-133.
- WANG C, QIAN J G, LU Q, et al. Model test study on influence of underground excavation on existing pile foundation [J]. *Structural Engineers*, 2021, 37(1): 128-133. (in Chinese)
- [15] 王术剑, 冯若峰, 张乾青, 等. 既有建筑地下开挖工程中在役桩竖向承载特性分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2023, 55(2): 117-124.
- WANG S J, FENG R F, ZHANG Q Q, et al. Vertical bearing characteristics of in-service pile in underground excavation engineering of existing building [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2023, 55(2): 117-124. (in Chinese)
- [16] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid [J]. *Physics*, 1936, 7(5): 195-202.
- [17] 张治国, 张孟喜, 王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. *岩土力学*, 2011, 32(7): 2085-2092.
- ZHANG Z G, ZHANG M X, WANG W D. Two-stage method for analyzing effects on adjacent metro tunnels due to foundation pit excavation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(7): 2085-2092. (in Chinese)
- [18] 姜兆华, 张永兴. 基坑开挖对邻近隧道纵向位移影响的计算方法[J]. *土木建筑与环境工程*, 2013, 35(1): 7-11, 39.
- JIANG Z H, ZHANG Y X. Calculation of influence on longitudinal deformation of adjacent tunnels due to excavation [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2013, 35(1): 7-11, 39. (in Chinese)
- [19] TOMLINSON M J. Some effects of pile driving on skin friction [C]//*Proceedings of the Conference on Behavior of Piles*. London: Institution of Civil Engineers, 1971: 107-114.
- [20] CHANDLER R J. The shaft friction of piles in cohesive soils in terms of effective stresses [J]. *Civil Engineering and Public Works Review*, 1968, 63: 48-51.
- [21] BURLAND J. Shaft friction of piles in clay: A simple fundamental approach [J]. *Ground Engineering*, 1973, 6(3): 30-42.
- [22] AZZOUC A S, BALIGH M M, WHITTLE A J. Shaft resistance of piles in clay [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, 116(2): 205-221.

- [23] 冯莉君. 某沿海地区预应力管桩侧摩阻力不同取值方法对比[J]. 勘察科学技术, 2014(2): 37-40, 47.
FENG L J. Comparison of different methods for pile side friction of prestressed pipe piles in a coastal area [J]. Site Investigation Science and Technology, 2014(2): 37-40, 47. (in Chinese)
- [24] VIJAYVERGIYA V N, FOCHT J A. A new way to predict capacity of piles in clay[C]//Proceedings of the 4th Annual Offshore Technology Conference. Texas: Society of Petroleum Engineers, 1972: 865-874.
- [25] ZHENG G, PENG S Y, NG C W W, et al. Excavation effects on pile behaviour and capacity [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(12): 1347-1356.
- [26] 张乾青, 李术才, 李利平, 等. 考虑侧阻软化和端阻硬化的群桩沉降简化算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 615-624.
ZHANG Q Q, LI S C, LI L P, et al. Simplified method for settlement prediction of pile groups considering skin friction softening and end resistance hardening [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 615-624. (in Chinese)
- [27] RANDOLPH M F, WROTH C P. Analysis of deformation of vertically loaded piles [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978, 104(12): 1465-1488.

(编辑 王秀玲)