

文章编号:1672-3961(2025)06-0108-12

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2024.152

深基坑永久支护 RECV 桩工作机理与计算分析

李连祥^{1,2,3}, 车秀熙^{1,2}, 李未龙⁴, 邱叶凡^{1,2}, 张尚儒^{1,2}, 汪楚涵^{1,2}

(1.山东大学基坑与深基础工程技术研究中心, 山东 济南 250061; 2.山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061; 3.山东高速岩土工程有限公司, 山东 济南 250102; 4.中十冶投资集团有限公司, 陕西 西安 710021)

摘要:针对现有“临时性”深基坑支护导致资源浪费、环境污染以及传统圆形支护桩墙体平整度难以控制、推广永久支护受阻等问题,本研究提出一种上矩形、中扩体、下圆形变截面(the upper rectangular, middle expanded, lower circular variable section, RECV)桩,作为深基坑永久支护结构。结合朗肯土压力理论和弹性地基梁法,推导 RECV 桩全桩身的弯矩、剪力、应力计算公式;采用有限元方法建立数值模型,并基于工程监测数据验证模型的可靠性后,模拟对比了 RECV 桩与传统圆形桩作为基坑支护桩时的水平位移和桩身弯矩特性。数值模拟结果表明:在锚杆支护条件下,RECV 桩的最大水平位移较圆形桩小 18.2%,单位体积混凝土支护能力提高 14.8%,表现出更强的抗变形能力和单位体积混凝土支护效率优势。理论计算结果与模拟结果走势基本一致。本研究可为 RECV 桩的内力计算提供参考,为 RECV 桩的技术理论和设计方法奠定基础,推动永久支护技术的发展。

关键词:基坑支护;异形桩;永久支护;有限元;弹性地基梁**中图分类号:**TU94 **文献标志码:**A**引用格式:**李连祥,车秀熙,李未龙,等.深基坑永久支护 RECV 桩工作机理与计算分析[J].山东大学学报(工学版),2025,55(6):108-119.

LI Lianxiang, CHE Xiuxi, LI Weilong, et al. Working mechanism and calculation analysis of RECV pile for permanent support of deep foundation pit[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(6):108-119.

Working mechanism and calculation analysis of RECV pile for permanent support of deep foundation pit

LI Lianxiang^{1,2,3}, CHE Xiuxi^{1,2}, LI Weilong⁴, QIU Yefan^{1,2}, ZHANG Shangru^{1,2}, WANG Chuhan^{1,2}

(1. Foundation Pit and Deep Foundation Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. School of Civil Engineering and Hydraulic Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 3. Shandong Hi-Speed Geotechnical Engineering Co., Ltd., Jinan 250102, Shandong, China; 4. CTMG Investment Group Co., Ltd., Xi'an 710021, Shaanxi, China)

Abstract: Aiming at the problems of resource waste, environmental pollution caused by the 'temporary' nature of existing deep foundation pit support, the difficulty in controlling the flatness of the traditional circular support pile wall, and the obstruction of promoting permanent support, this study proposed an upper rectangular, medium-expanded, and lower circular variable section (RECV) pile as a permanent support structure for deep foundation pits. This study combined Rankine's earth pressure theory and elastic foundation beam method to derive the calculation formulas of bending moment, shear force and stress of the whole pile of RECV pile. The finite element method was used to establish the numerical model, and the reliability of the model was verified based on the engineering monitoring data. The horizontal displacement and bending moment characteristics of RECV pile and traditional circular pile as foundation pit supporting pile were simulated and compared. The numerical simulation results showed that under the condition of bolt support, the horizontal displacement of RECV pile was significantly smaller than that of traditional circular pile, which showed stronger anti-deformation ability and unit volume concrete support efficiency advantage. The theoretical calculation results were basically consistent with the simulation results, which could provide reference for the internal force calculation of RECV piles, lay a foundation for the technical theory and design method of RECV piles, and promote the development of permanent support technology.

Keywords: foundation pit support; special-shaped pile; permanent support; finite element; elastic foundation beam

收稿日期:2024-07-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51508310);山东省优秀中青年科学家科研基金资助项目(BS2013SF024);济南市科技计划资助项目(201201145)

第一作者简介:李连祥(1966—),男,河北唐山人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为基坑工程理论与技术。E-mail:jk_doctor@163.com

0 引言

“临时性”理念导致大量深基坑的支护桩墙在主体地下结构完成后浪费在地下,不可避免地导致环境污染和碳排放增加^[1]。永久支护结构是将基坑围护结构与建筑物地下主体结构相结合,按照开挖和主体结构使用的设计工作年限进行功能设计,将竖向支护桩、墙定位为地下主体结构的一部分,永久承担坑外水、土压力,地下室外墙仅承担肥槽回填土压力。永久支护的应用可以有效减少环境破坏,实现资源的合理利用,契合高质量发展理念,是未来深基坑发展的一个重要方向。

深基坑支护永久化是岩土工程师的心愿,其理念的发展是一个循序渐进的过程。文献[2]提出“一桩三用”,使排桩与地下室外墙形成复合结构共同抵抗水平土压力;文献[2-4]提出主体结构与支护结构相结合的“桩墙合一”基坑支护技术,并列入相关技术标准;文献[5-9]提出深基坑岩土结构化永久支护理论与设计方法,阐释了永久支护体系构件组成与构造过程,明确深基坑永久支护结构是高质量基坑发展的重要方向;文献[10]介绍了华盛顿特区的 Marriott Marquis 会议中心开挖支护与永久结构相结合的一个成功案例。

现阶段的基坑围护结构以支护桩为主,地连墙的应用要远少于支护桩。支护桩截面为圆形且施工要穿过不同地层,这就为永久支护桩墙平整度带来诸多推广障碍^[11],为此文献[12-13]提出上矩形、中扩体、下圆形变截面(the upper rectangular, middle expanded, lower circular variable section, RECV)桩的施工设备和应用方向。

掌握新型桩工作机理,建立其独有理论是推广应用的前提和基础。国内对桩的水平受力机理研究取得了一定进展。文献[14]在前人数值模拟的基础上确定试验方案,利用大型试验模型槽进行水平静载足尺试验,分析了大直径现浇混凝土管桩(large diameter pipe pile by using cast-in-place concrete, PCC)承受水平荷载时的内力、变形、极限承载力和土体抗力;文献[15]以理论结合实践,基于工程数据建立可行性模型,分析大直径人工挖孔扩底灌注桩水平承载性能,得出扩底桩的水平承载性能,进一步分析了扩大头对水平承载特性的影响;文献[16]依托实际工程数据,建立数值模型,计算分析了水平荷载下大直径嵌岩桩的受力变形机理与合理嵌岩深度,并分析了钢套管和套箱填砂对深水嵌岩桩水平承载力的影响;文献[17]通过

ABAQUS 有限元模拟结合实测数据,分析了南昌市某深基坑工程中隔离桩对临近地铁隧道的保护效果,研究发现,隔离桩水平位置对隧道衬砌内力影响显著,距离越近保护效果越好。

以上学者在试验前均做了大量研究,以工程实际数据支撑数值模拟模型,进而从数值试验结果中获得桩的一些特性,但研究均针对基桩的水平受力工作性状,目前鲜有变截面桩做基坑支护桩时的相关成果。理论计算为数值试验先导,文献[18]将支护结构简化为竖放的弹性地基梁,支撑、锚杆及岩土体用弹簧系统代替,分别建立入土段以上以及入土段的弹性地基梁微分方程,考虑两段墙在基坑底面处的连续条件进行求解,为研究 RECV 支护桩工作机理提供了思路。

本研究针对山东省某公共停车场圆形截面永久支护桩墙面凹凸不平的弊病,提出 RECV 桩代替传统圆桩。为得出新桩型作为基坑支护桩时的受力特性,本研究将传统支护桩计算方法与桩基计算中弹性地基梁法相结合,推导出 RECV 桩全桩身力学计算公式,并依托现场监测数据确定数值模型,进而在数值试验平台中展开试验,得出支护桩的变形和力学特性并进一步验证公式的科学性,建立新型桩的技术理论和设计方法,为进一步完善施工装备和基桩足尺试验奠定基础。

1 RECV 支护桩

1.1 成桩工艺

在传统圆形旋挖成孔的基础上,以基桩直径为矩形短边外切长方形截面,在基坑开挖深度内形成上部矩形截面段。为将矩形外切圆形产生的土体收集、排除,在基底下采用旋挖扩底工艺^[19],形成扩径段,再通过与上部圆桩一致的桩径继续完成支护桩嵌固段,同时把上部矩形外切掉下的土沉入孔底,依靠嵌固段钻机二次清孔,解决桩端沉渣问题。RECV 桩与桩墙示意图如图 1 所示。

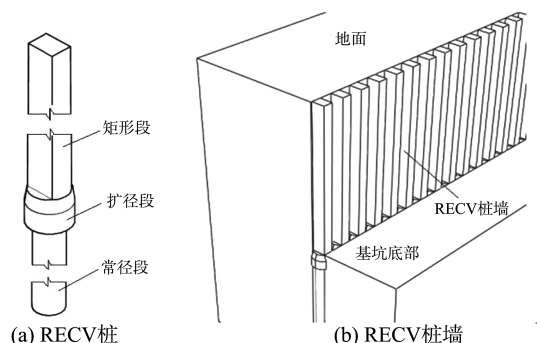


图 1 RECV 桩与桩墙示意图

Fig.1 RECV pile and pile wall diagram

在旋挖钻机桅杆上增加矩形切刀和可伸缩切刀杆,钻具组成如图2所示。

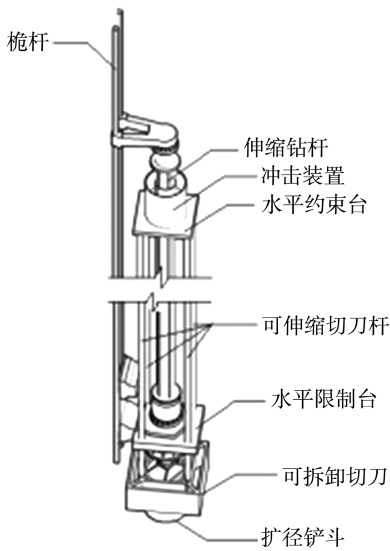


图2 钻具构件组成图
Fig.2 Drill assembly diagram

工作时,钻头先开始工作,切刀杆缩至最短处于待命状态,待旋挖钻头钻进至预定位置时开始扩底工作,同时切刀开始切土,扩底、切土同时进行,切落的土掉入扩底钻头内由钻头带出;待扩底与切土工作结束后,切刀停止工作,钻头继续钻进直至预定深度,由此形成 RECV 桩桩孔。施工工序如图3所示。

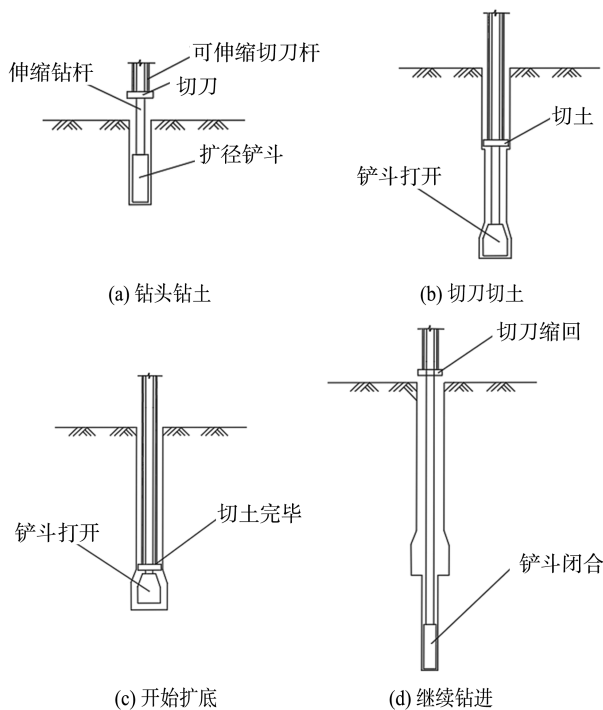


图3 RECV 桩施工流程图
Fig.3 RECV pile construction flow chart

1.2 工作机理

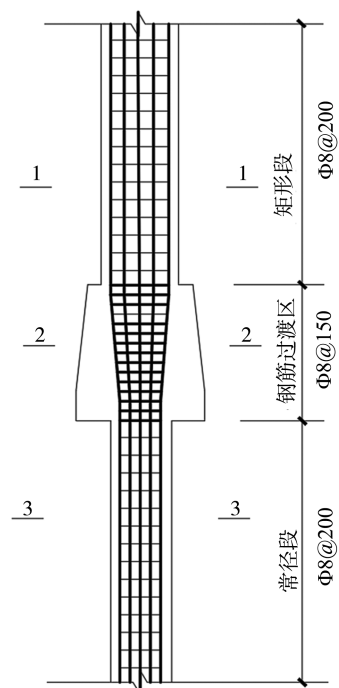
RECV 桩因上部矩形段表面平整,克服了圆形桩墙不平整的弊端,结合现有渠式等厚度水泥土截水帷幕^[20-21]支护桩和水泥土搅拌墙交替排列,形成平整的墙体,保证永久支护平整度大大提升。

工程实践表明,基坑开挖至坑底后桩身最大弯矩出现在坑底内侧附近^[22]。工艺要求产生的扩径体,恰好有针对性地保证了支护桩的受力特征,形成力学优势。

1.3 基桩构造与配筋

桩身可分为3部分:上部为矩形桩,作为支护段;中部为扩径体,由上部圆台与圆柱体组成;下部常规圆形桩为常径段。其中,扩径体与常径段在基坑中形成嵌固段。

钢筋笼包括纵向钢筋和横向箍筋,纵向钢筋桩身的长度方向上通长布置,并且纵向钢筋和横向箍筋的数量根据工程设计计算结果合理布局。纵向钢筋在上部桩身内按照上部桩身的矩形截面成矩形排列;在下部桩身内按照下部桩身的圆形截面成圆形排列;桩身两侧的纵向钢筋进行加强处理,加强处理可以通过增加纵向钢筋的直径,也可以增加纵向钢筋的密度;在扩径体内的部分为向内弯折的过渡区,改变纵向钢筋的形状,实现从上部桩身到下部桩身的过渡。RECV 桩钢筋布置如图4所示。



(a) 桩身纵筋布置

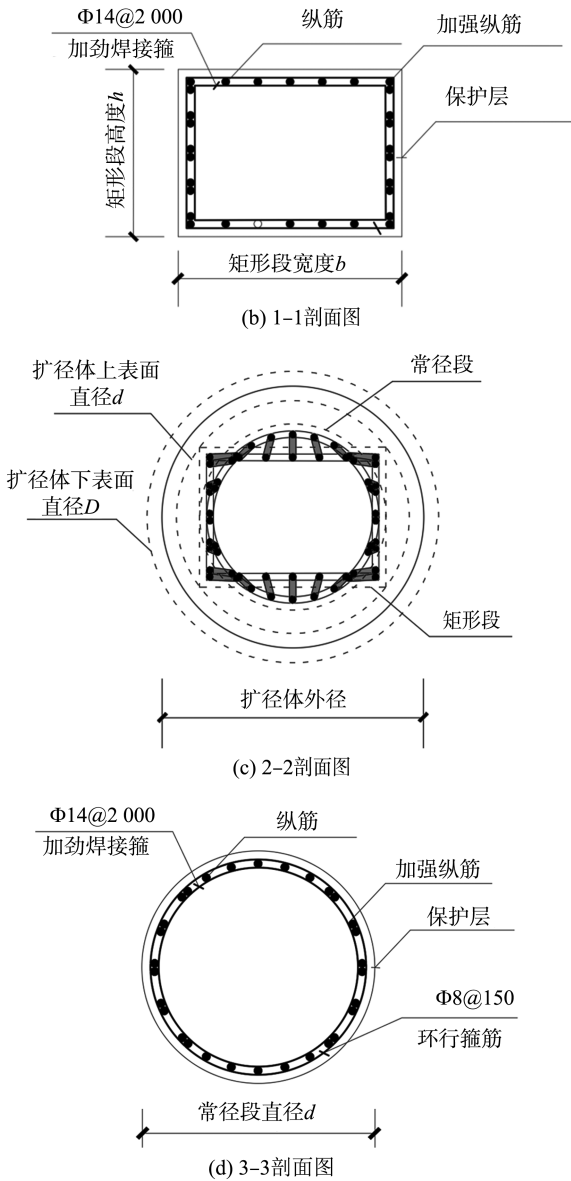


图4 RECV 桩钢筋布置

Fig.4 Reinforcement arrangement of RECV pile

2 RECV 支护桩理论计算

支挡式基坑支护结构的计算可根据支护的形式进行拆分。锚拉式、内支撑式支挡结构可分为挡土结构和锚拉、支撑结构计算,悬臂式支挡结构可看作平面杆系进行计算。无论哪种形式的支挡结构,在计算时均采用平面杆系弹性支点法^[23]。

2.1 矩形段计算分析

支挡式结构应按最不利作用效应进行设计,将支护结构以坑底为界分为支护段和嵌固段两部分。支护段采用朗肯土压力计算;嵌固段采用弹性地基梁法,将上部土压力所产生的剪力、弯矩等看作初始条件代入计算。

2.1.1 土压力计算

支撑构筑物周围填土的挡土结构大多受主动土压力作用。根据朗肯土理论,朗肯主动土压力如图5所示。图5中, E_a 为主动土压力, kN/m ; φ 为土的内摩擦角, $(^\circ)$ 。支护结构所受主动土压力经典模型如图6所示。图6中, γ 为土的密度, kg/m^3 ; K_a 为主动土压力系数; z_0 为土压力0点深度。

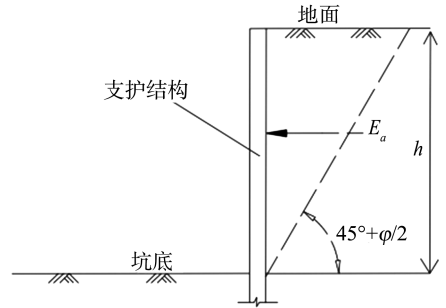


图5 朗肯主动土压力图示

Fig.5 Rankine active earth pressure diagram

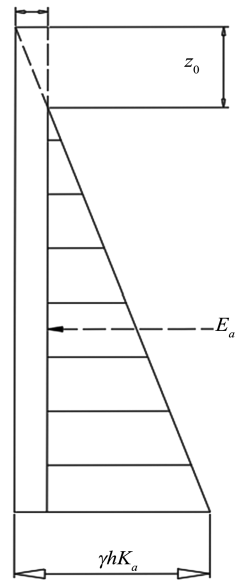


图6 黏性土主动土压力分布

Fig.6 Active earth pressure distribution of clay

单一土层中主动土压力强度计算公式为

$$\sigma(z) = (\gamma z + q_0) K_a - 2c \sqrt{K_a}, \quad (1)$$

式中: $\sigma(z)$ 为主动土压力强度, kPa ; c 为土的黏聚力, kPa ; z 为计算点距土表面的距离, m ; q_0 为地面处均布附加荷载, kN/m 。

2.1.2 无支撑内力计算

$\sigma(z)$ 与载荷集度 $q(z)$ 之间的关系为

$$\frac{dq(z)}{dz} = \sigma(z), \quad (2)$$

则

$$\frac{d^2 M(z)}{dz^2} = \frac{dF_s(z)}{dz} = q(z), \quad (3)$$

式中, $M(z)$ 为弯矩, $F_s(z)$ 为剪力。

在不考虑附加荷载和成层填土时, 剪力

$$F(z) = \iint \sigma(z) dz = \frac{\gamma K_a}{6} z^3 - c\sqrt{K_a} z^2, \quad (4)$$

故由主动土压力引起的弯矩

$$M(z) = \iiint \sigma(z) dz = \frac{\gamma K_a}{24} z^4 - \frac{c\sqrt{K_a}}{3} z^3, \quad (5)$$

将矩形段看作受弯直梁, 则桩身应力

$$\sigma_w = \frac{M}{W}, \quad (6)$$

式中, W 为截面模量, 矩形截面模量为 $\frac{bh^2}{6}$ 。

单一土层中无锚杆支撑时支护段任意一处的桩身应力

$$\sigma_w(z) = \frac{M(z)}{W} = \frac{6 \iiint \sigma(z) dz}{bh^2}. \quad (7)$$

2.1.3 有支撑内力计算

锚拉式和内支撑式支挡结构采用平面杆系结构弹性支点法进行计算。将锚杆看作弹性支座, 桩上部近似看作一受土压力的多跨连续梁, 弹性支点法计算简图如图 7 所示。图 7 中, a_1 为第一排支撑到桩顶的距离; a_2 为第二排支撑到第一排支撑的距离; a_3 为第三排支撑到第二排支撑的距离; a_4 为第三排支撑到坑底的距离, F_1 、 F_2 、 F_3 分别为第一、二、三排的支撑力。

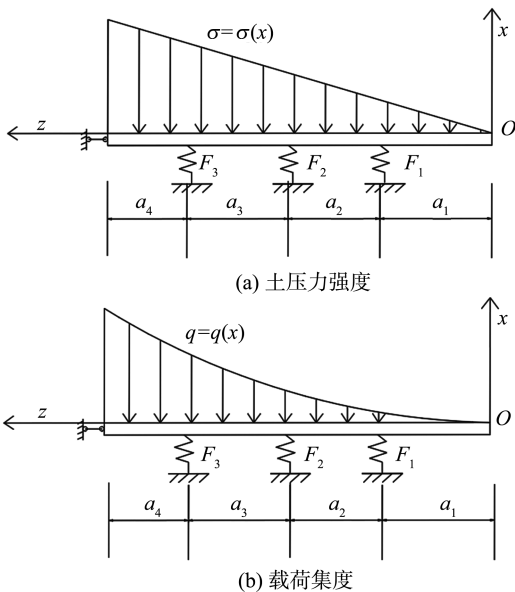


图 7 弹性支点法计算简图

Fig.7 Elastic fulcrum method calculation diagram

采用锚杆支撑时, 锚杆对支撑结构的作用力为

$$F_i = k_R(v_R - v_{R0}) + P \cdot \cos \alpha \cdot b_a / s, \quad (8)$$

式中: F_i 为挡土结构计算宽度内的第 i 道弹性支点

水平反力, kN; k_R 为挡土结构计算宽度内弹性支点刚度系数, kN/m; v_R 为挡土构件在支点处的水平位移, m; v_{R0} 为设置锚杆或支撑时, 支点的初始水平位移, m; P 为锚杆的预加轴向拉力或支撑的预加轴向压力, kN; α 为锚杆倾角或支撑仰角, ($^\circ$); b_a 为挡土结构计算宽度, m, 对于单根支护桩, 取排间距; s 为锚杆或支撑的水平间距, m。

分段计算弯矩。 a_1 段弯矩

$$M(z) = \frac{\gamma K_a}{24} z^4 - \frac{c\sqrt{K_a}}{3} z^3, \quad (9)$$

a_2 段弯矩

$$M(z) = \frac{\gamma K_a}{24} z^4 - \frac{c\sqrt{K_a}}{3} z^3 - F_1(z - a_1), \quad (10)$$

a_3 段弯矩

$$M(z) = \frac{\gamma K_a}{24} z^4 - \frac{c\sqrt{K_a}}{3} z^3 - F_1(z - a_1) - F_2(z - a_1 - a_2), \quad (11)$$

a_4 段弯矩

$$M(z) = \frac{\gamma K_a}{24} z^4 - \frac{c\sqrt{K_a}}{3} z^3 - F_1(z - a_1) - F_2(z - a_1 - a_2) - F_3(z - a_1 - a_2 - a_3). \quad (12)$$

总结上述规律, 有锚杆或内支撑时上部矩形段弯矩

$$M(z) = \frac{\gamma K_a}{24} z^4 - \frac{c\sqrt{K_a}}{3} z^3 - \sum_0^i F_i(z - \sum_0^i a_i), \quad (13)$$

剪力

$$F(z) = \frac{\gamma K_a}{6} z^3 - c\sqrt{K_a} z^2 - \sum_0^i F_i. \quad (14)$$

2.2 嵌固段计算分析

对于嵌固段采用线弹性地基反力法进行计算, 将土体视为弹性介质, 其水平抗力系数随深度线性增大, 即 m 法^[24]。弹性地基梁如图 8 所示, 支护段转角如图 9 所示。

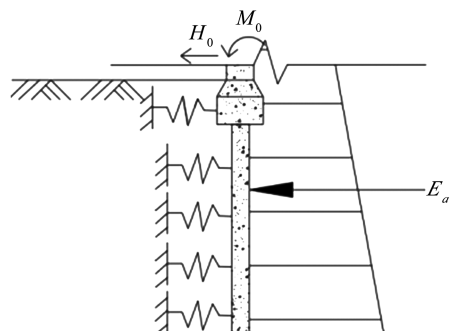


图 8 弹性地基梁

Fig.8 Beam on elastic foundation

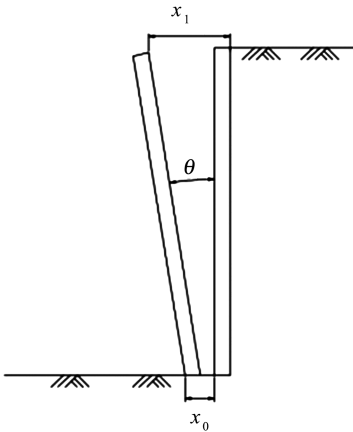


图9 支护段转角图

Fig.9 Support section angle diagram

将主动土压力产生的弯矩 M_0 、剪力 H_0 、水平位移 x_0 、转角 θ_0 视作桩顶初始条件, H_0 、 M_0 计算公式分别为

$$H_0 = \frac{\gamma K_a}{6} z_0^3 - c \sqrt{K_a} z_0^2, \quad (15)$$

$$M_0 = \frac{\gamma K_a}{24} z_0^4 - \frac{c \sqrt{K_a}}{3} z_0^3, \quad (16)$$

忽略初始分布土反力强度,则作用在挡土构件上的分布土反力计算公式为

$$p_s = k_s x, \quad (17)$$

$$k_s = mz, \quad (18)$$

$$m = \frac{0.2\varphi^2 - \varphi + c}{v_b}, \quad (19)$$

式中: p_s 为分布土反力, N/m^2 ; x 为计算点处的水平位移, m ; k_s 为地基水平抗力系数, N/m^3 ; m 为水平抗力系数的比例系数,其取值可按水平荷载试验即地区经验取值,亦可按式(19)计算; v_b 为挡土构件在坑底处的水平位移,当不大于 10 mm 时,按 10 mm 计算。

桩的截面形状可影响桩周土抗力,其截面宽度

$$b_1 = \begin{cases} k_f(d+1), & d > 1 \\ k_f(1.5d+1.5), & d \leq 1 \end{cases}, \quad (20)$$

式中: k_f 为桩的形状系数,方形截面取 1.0,圆形截面取 0.9; d 为桩的直径,考虑安全因素,矩形取长边 b 。

坑底处主动土压力强度

$$p_0 = \gamma h K_a - 2c \sqrt{K_a} = k_s x_0,$$

式中, h 为基坑深度, m 。

根据变形协调关系,坑底初始位移

$$x_0 = \frac{\gamma h K_a - 2c \sqrt{K_a}}{k_s}, \quad (21)$$

对于转角,可近似将上部矩形部分看作受三角荷载

的悬臂梁。

顶端位移

$$x_1 = \frac{q_0 h^4}{30EI}, \quad (22)$$

式中: E 为混凝土的弹性模量, Pa ; I 为截面惯性矩, m^4 。近似的,将梁身看作刚性转动,则转角

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{x_1 - x_0}{h} \right), \quad (23)$$

在初始条件下桩身产生挠曲,微分方程为

$$EI \frac{d^4 x}{dz^4} = -p(z) = b_1 p_s, \quad (24)$$

进一步

$$\frac{d^4 x}{dz^4} + \alpha^5 z v = 0, \quad (25)$$

$$\alpha = \sqrt[5]{\frac{m b_1}{EI}}, \quad (26)$$

式中: α 为桩的水平变形系数, $1/m$; 钢筋混凝土桩的抗弯刚度 $EI = 0.85 E_c I_0$, 其中 E_c 为混凝土的弹性模量, I_0 为桩身换算截面惯性矩。

对上式求解,可得沿桩身深度 z 处的弯矩和剪力表达式为

$$M(z) = \alpha^2 EI \left(x_0 A_3 + \frac{\theta_0}{\alpha} B_3 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_3 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_3 \right), \quad (27)$$

$$F(z) = \alpha^3 EI \left(x_0 A_4 + \frac{\theta_0}{\alpha} B_4 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_4 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_4 \right), \quad (28)$$

式中: A_3 、 A_4 、 B_3 、 B_4 、 C_3 、 C_4 、 D_3 、 D_4 为影响系数,其具体的取值可查阅文献[24]。

在不忽略初始分布土反力的情况下,

$$p_s = k_s v + p_{s0}, \quad (29)$$

$$p_{s0} = \sigma_{pc} K_a$$

$$\sigma_{pc} = \gamma(z+h)$$

式中: p_{s0} 为初始分布土反力, kPa ; σ_{pc} 为支护结构内测计算点由土的自重产生的竖向总应力, kPa 。由此,式(24)可写为

$$EI \frac{d^4 x}{dz^4} = -p(z) = b_1 (k_s v + p_{s0}), \quad (30)$$

基本挠曲线方程为

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + m z b_1 y + p_{s0} b_1 - \sigma_{ak} b_0 = 0, \quad (31)$$

$$b_0 = \begin{cases} 1.5b + 0.5, & b \leq 1 \\ b + 1, & b > 1 \end{cases}, \quad (32)$$

式中: y 为支护桩水平挠曲变形; z 为竖向坐标,以坑底为原点; b_1 为桩截面计算宽度, m ; σ_{ak} 为主动侧土

压力强度, kPa; b_0 为荷载计算宽度, m。

嵌固段桩身应力 σ_w 根据 $\sigma_w = \frac{M}{w}$ 、 $W = \frac{\pi d^3}{32}$ 确定,

为安全起见, 扩体部分的直径取扩径体上表面较小的直径计算。

综上, 将 RECV 桩分为 3 段计算, RECV 桩计算示意图如图 10 所示。

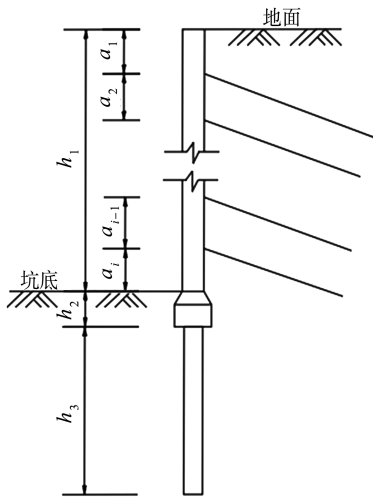


图 10 RECV 桩计算示意图

Fig.10 RECV pile calculation diagram

RECV 总体公式为

(1) 弯矩

$$M(z) = \begin{cases} \frac{\gamma K_a}{24} z^4 - \frac{c \sqrt{K_a}}{3} z^3 - \sum_0^i F_i(z - \sum_0^i a_i), & h_1 < z < 0 \\ \alpha^2 EI(x_0 A_3 + \frac{\theta_0}{\alpha} B_3 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_3 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_3), & h_3 + h_2 < z \leq h_1 \end{cases}$$

(2) 剪力

$$F(z) = \begin{cases} \frac{\gamma K_a}{6} z^3 - c \sqrt{K_a} z^2 - \sum_0^i F_i, & h_1 < z < 0 \\ \alpha^3 EI(x_0 A_4 + \frac{\theta_0}{\alpha} B_4 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_4 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_4), & h_3 + h_2 < z \leq h_1 \end{cases}$$

(3) 应力

$$\sigma(z) = \begin{cases} \frac{6M_1(z)}{bh^2}, & h_1 < x < 0 \\ \frac{32M_2(z)}{\pi d_1^3}, & h_2 < x < h_1, \\ \frac{32M_2(z)}{\pi d_2^3}, & h_3 < x < h_2 \end{cases}$$

式中, d_1 为扩径体上表面直径, d_2 为常径段直径。

3 工程案例的数值验证

3.1 数值模型与科学性验证

济南市某拟建停车场利用楼板永久使用外伸支撑^[5-6]。选择该项目 FH 支护单元, 支护形式采用桩锚支护, 基坑深度为 10.75 m, 支护桩为 $\Phi 800@1500$ 的混凝土灌注桩, 桩长 17 m, 桩间距 1.5 m。采用 3 层锚索, 孔体直径为 150 mm, 采用二次压力注浆工艺。土层参数及锚杆参数分别见表 1、2。

表 1 土层参数

Table 1 Soil layer parameters

土层	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	摩擦角/ ($^\circ$)	黏聚力/ kPa
杂填土	1 900	0.30	12.0	5.0
黄土状粉质黏土	1 910	0.30	15.2	19.1
粉质黏土 1	1 910	0.30	15.5	19.1
卵石	2 000	0.30	35.0	3.0
粉质黏土 2	1 910	0.30	15.4	34.0
桩	2 500	0.20		
腰梁	2 500	0.25		

表 2 锚杆参数

Table 2 Bolt parameters

分层	长度/ m	锚固 长度/m	直径/ mm	标准 拉力/kN	锁定值/ kN	倾角/ ($^\circ$)	锚固 位置/m
第一层	17.0	9.5	150	151	115	25	-3.0
第二层	13.5	7.5	150	154	120	25	-5.5
第三层	11.0	6.0	150	147	115	25	-8.0

永久支护结构须满足主体结构对裂缝的要求^[25], 影响桩身裂缝最直接的因素是桩身应力, 而桩身应力受弯矩与截面矩共同的影响。扩径体的存在会加强截面矩, 故只考虑弯矩分析对桩身应力的影响。利用有限元软件进行模拟, 得出两种不同桩型作为支护桩时的桩身弯矩以及位移, 可以更加直观地反映出 RECV 桩的特性。对临时支护阶段的桩锚支护阶段建立有限元模型, 即基坑外侧水土压力由支护桩墙与锚杆承担。

截取两根支护桩及其所支护土体建立数值模型, 桩体采用线弹性模型, 土体本构关系选取 Mohr-Coulomb 模型。土体长为 42.0 m, 高为 18.7 m, 截取厚度为 2.8 m。桩采用双桩模型, 锚杆和腰梁均为线弹性单元。xz 面: $U_y = 0$; xy、yz 面: $U_x = U_y = U_z = 0$ 。

有限元模型如图 11 所示。

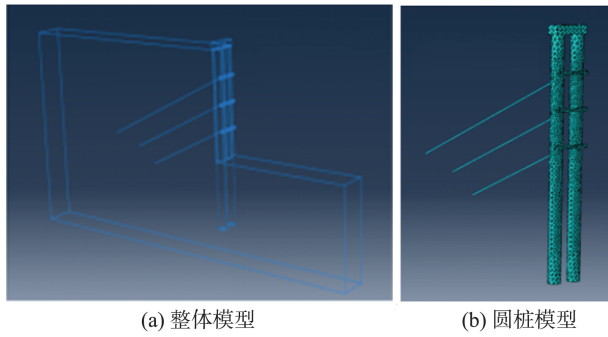


图 11 有限元模型

Fig.11 Finite element model

弹性模量计算公式为

$$E = kE_s,$$

式中, E_s 为压缩模量, k 取 2.0~3.5。

锚杆预应力的施加采用温差法,即

$$a = \frac{N}{EAT}, \quad (33)$$

式中, a 为线膨胀系数, A 为锚杆截面积, N 为锚杆应力, T 为温度。

本研究共布设深层位移监测点 6 个,对 2-2 剖面(SC4)土体进行长期监测直至开挖结束,对比 SC4 点监测数据与模拟数据,结果如图 12 所示。

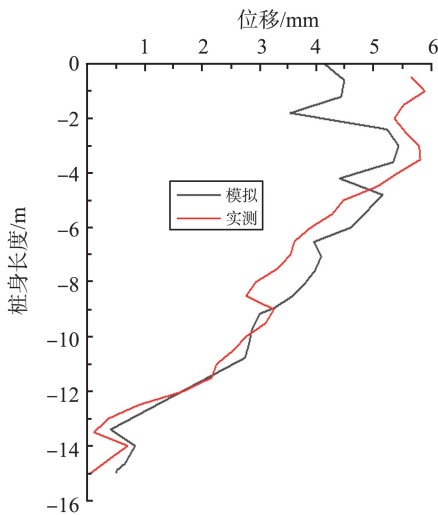


图 12 计算结果与监测结果对比

Fig.12 The calculated results were compared with the monitoring results

由图 12 可知,模拟数据与实测数据走向大体一致,在地表附近差异较大,实测结果比模拟结果大 2 mm 左右,模拟结果中在锚杆位置有较明显突变,在基坑底以下部分趋于吻合。总体而言,曲线走势基本一致,可以证明计算模型是可行的,可用做 RECV 支护桩的模拟分析。

3.2 数值试验模型

在单一土层中建立计算模型,土层为均质粉质

黏土,重力加速度取 10 m/s^2 ,施加 20 kPa 表面荷载,尺寸及边界条件如上述。支护桩为 RECV 桩、圆形桩(对照组),两桩均采用双桩模型。开挖工况分为 4 段,各工况如表 3 所示。

表 3 计算工况

Table 3 Working condition of calculations

工况	开挖深度/m	说明
一	2.7	无腰梁和锚索
二	5.2	桩身 2.5 m 处设置一道腰梁和锚索,锚索施加 115 kN 的预应力
三	7.7	桩身 2.5、5.0 m 处分别设置腰梁和锚索,第一、二道锚索分别施加 115、120 kN 的预应力
四	10.4	桩身 2.5、5.0、7.5 m 处设置腰梁和锚索,第一、三道锚索施加 115 kN 的预应力,第二道锚索施加 120 kN 的预应力

RECV 桩单桩尺寸为:矩形部分 $0.8 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$, $L = 10.0 \text{ m}$,扩径体 $h = 1.0 \text{ m}$ (圆台段 $h = 0.4 \text{ m}$,圆柱段 $h = 0.6 \text{ m}$),圆台上表面直径 $D = 1.0 \text{ m}$,下表面直径 $D = 1.3 \text{ m}$ 。常径段 $D = 0.8 \text{ m}$, $L = 6.0 \text{ m}$ 。扩径规格符合文献[21]中规定。土层参数见表 4。

表 4 土层参数

Table 4 Soil layer parameters

土层	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	摩擦角/ ($^\circ$)	黏聚力/ kPa	压缩 模量/kPa
粉质黏土	1 900	0.3	15.4	34	2×10^4

3.3 结果分析

3.3.1 桩身位移分析

桩身的水平位移结果如图 13 所示。

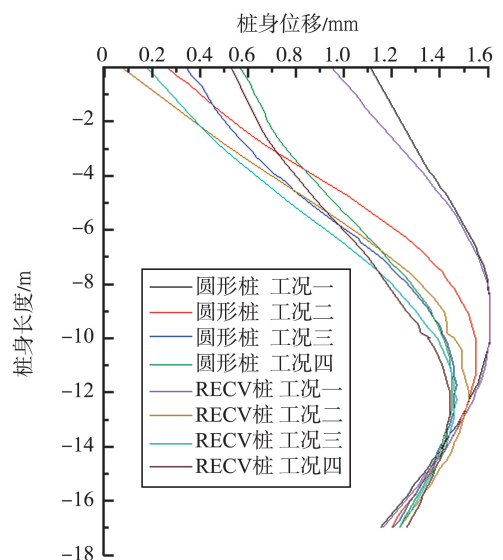


图 13 桩身水平位移曲线图

Fig.13 Horizontal displacement diagram of pile body

在工况二、三、四中,RECV 桩的水平位移在

12 m以上明显小于圆形桩。工况一由于未设锚索,位移均为正值,且在开挖面 2.7 m 以上两种桩的抗弯能力差异较大,但开挖面以下位移相近;工况二设置一道锚索,RECV 桩和圆形桩的最大位移出现在桩顶;工况三增加了第二道锚索,随着开挖深度增加,桩侧土压力增大,导致桩身位移在基坑开挖面(7.7 m)以上顺时针偏转,桩顶位移增大;工况四中,RECV 桩和圆形桩的最大最小位移差进一步减小,位移曲线进一步变陡,桩身位移向平动变化,桩顶位移进一步增大,位移差最大处从桩顶转移到桩身 9 m 处,RECV 桩位移为 0.126 cm,圆

形桩位移为 0.154 cm,RECV 桩比圆形桩位移小约 18.2%。

从桩身水平位移变化来看,在混凝土用量基本相同的前提下,RECV 桩的支护效果优于圆形桩。本例中,RECV 桩体积为 8.813 m^3 ,圆形桩体积为 8.545 m^3 ,RECV 桩混凝土用量较圆形桩多 3%。从最终开挖阶段来看,位移差最大处 RECV 桩较圆形桩小 18.2%,单位体积混凝土支护能力提高 14.8%。

3.3.2 桩身弯矩分析

桩身弯矩如图 14 所示。弯矩的正负表示方向,大小为其绝对值。

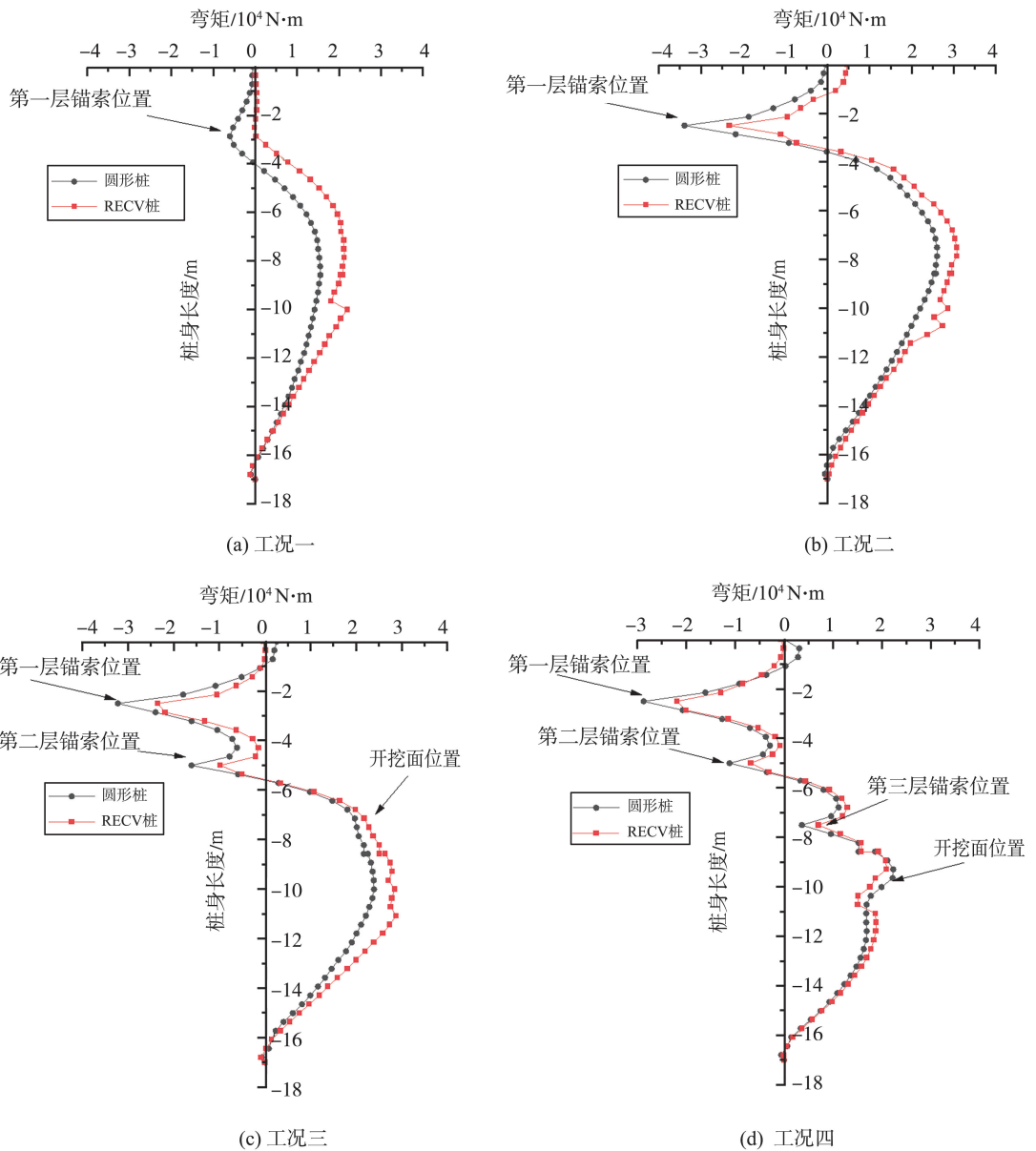


图 14 桩身弯矩曲线

Fig.14 Pile bending moment curve

从图 14 可以看出,相同工况下两种桩型的弯矩曲线大体一致,在设有锚索的工况下锚索位置有明

显凸起,RECV 桩扩径体的位置也有明显弯折。工况一下,RECV 桩整体桩身弯矩大于圆形桩,桩身最

大弯矩出现在桩身 7 m 左右,RECV 桩扩大头处弯矩突变,数值与桩身最大弯矩大致相同,两桩的最大弯矩差值出现在桩身 4 m 左右,最小差值则在 2.5 m,即开挖面附近;工况二两桩的桩身弯矩差值有缩小的趋势,最大弯矩均出现在锚索处,两者最大值相差不大;工况三在开挖面以上两者曲线走势基本一致,最大弯矩均出现在第一排锚索附近,5.5 m 以上 RECV 桩弯矩小于圆形桩,5.5 m 以下差值缓慢增大;工况四(最终开挖状态)下两桩的弯矩曲线趋于一致,在扩径体处弯矩明显小于圆形桩。

综上所述,通过弯矩对比可得到以下结论。

(1)在无锚索条件下,RECV 桩扩径体处弯矩

最大,但远未达到有锚索条件下的最大弯矩;

(2)在工况二、三下扩径体处出现明显弯矩增大,但数值上均未超过相同工况下圆形桩的最大弯矩;

(3)工况四扩大头处弯矩减小,桩身最大弯矩出现在锚索位置,扩径体的存在能有效减小其附近的弯矩,从而起到保护桩身的作用;

(4)4 种工况下,开挖面以上 RECV 桩弯矩基本小于圆形桩,对桩身的安全具有积极作用。

3.4 模拟结果与理论计算对比

4 种工况下的公式计算结果与模拟结果对比如图 15 所示。

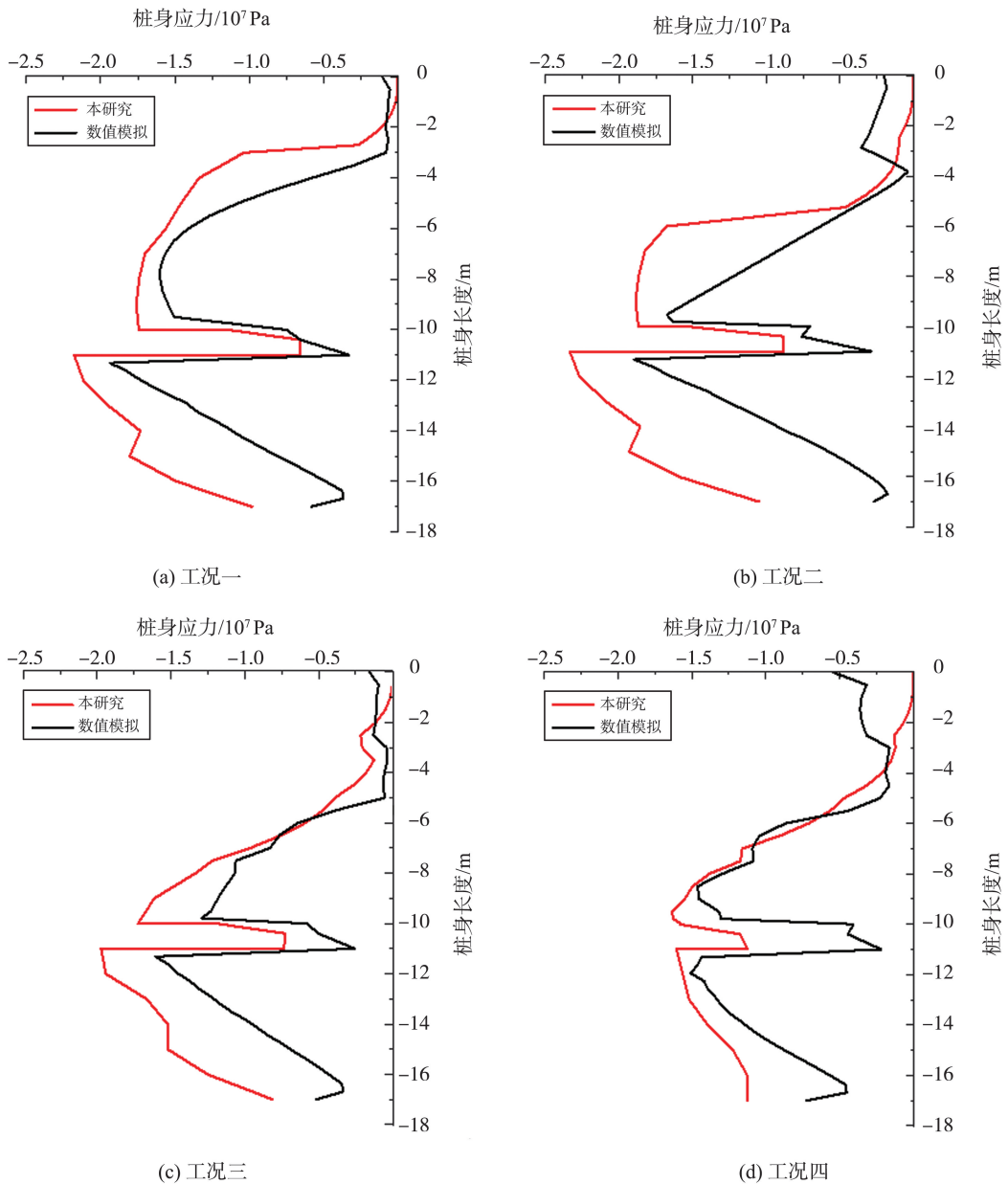


图 15 公式计算与模拟结果对比

Fig.15 Comparison of formula calculation and simulation results

从图 15 可以看出,两条曲线走势基本一致。计算结果初始值较小,在 2~4 m 处逐渐大于模拟值,基坑开挖面以下计算结果大于模拟值,桩身应力最大位置相同。本研究运用弹性地基梁法计算 RECV 桩应力具有较高的准确性。

4 结论

(1)RECV 支护桩解决了传统永久支护中存在的墙体不平整、垂直度难以控制的问题,可一次性成孔,施工快速便捷,减少了不必要的后期装修处理工序,施工中可在支护桩墙上直接做地下室外墙,大大减少了工序、节省成本,有利于后期研究并推动行业对永久支护的重视和应用。

(2)RECV 支护桩与传统圆形桩相比,其抵抗水平位移变形能力要强于传统圆形支护桩。由于扩径体的存在,能有效保护基坑底部弯矩最大处,减小桩身应力。基坑开挖面以上的矩形部分,能充分发挥其几何形状的优势,抵抗变形能力得到加强。

(3)利用朗肯土压力理论与弹性地基梁法推导出的 RECV 桩在简单支护条件下的计算公式,精确了桩身弯矩、剪力、应力的计算方法,并与模拟数据对比,计算结果在保证安全性的前提下基本符合实际情况,可以用作 RECV 桩的内力计算。

参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院. 建筑基坑支护技术规程: JGJ120—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [2] 左人宇. “一桩三用”技术与实践[D]. 杭州:浙江大学, 2001:3-4.
ZUO Renyu. The “One-Pile Three-Use” technology and practice[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001: 3-4.
- [3] 王卫东, 沈健. 基坑围护排桩与地下室外墙相结合的“桩墙合一”的设计与分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊1): 303-308.
WANG Weidong, SHEN Jian. Design and analysis of the “Combined Pile-Wall” method integrating diaphragm piles with basement outer walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(Suppl.1): 303-308.
- [4] 王卫东, 王建华. 深基坑工程中主体工程地下结构与支护结构相结合的研究与实践[J]. 工业建筑, 2004, 3(增刊2):11.
WANG Weidong, WANG Jianhua. Research and practice on the combined use of main project underground structure and support structure in deep foundation pit engineering [J]. Industrial Construction, 2004, 3(Suppl.2): 11.
- [5] 李连祥, 刘兵, 李先军. 支护桩与地下主体结构相结合的永久支护结构[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(2): 119-126.
LI Lianxiang, LIU Bing, LI Xianjun. Permanent support structure integrating retaining piles with underground main structure[J]. Journal of Building Science and Engineering, 2017, 34(2): 119-126.
- [6] 李连祥, 李胜群, 邢宏侠, 等. 深基坑岩土结构化永久支护理论与设计方法[J]. 建筑结构, 2024, 54(13): 133-140.
LI Lianxiang, LI Shengqun, XING Hongxia, et al. Theory and design methods of rock-soil structured permanent support for deep foundation pits[J]. Building Structure, 2024, 54(13): 133-140.
- [7] 李连祥, 刘兵, 成晓阳. 基坑支护桩永久存在对地下室外墙土压力分布的影响[J]. 山东大学学报(工学版), 2018, 48(2):30-38.
LI Lianxiang, LIU Bing, CHENG Xiaoyang. Effect of permanent retaining piles on soil pressure distribution on basement exterior walls in foundation pits[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2018, 48(2): 30-38.
- [8] 李连祥. 积极推进基坑工程变革—兼谈支护结构永久化与可回收[EB/OL]. (2018-09-21) [2024-07-02]. <https://news.yantuchina.com/39312.html>
- [9] 李连祥. 土岩二元深基坑工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2022: 5-6.
- [10] FANTAYE S Y, JOHNSON S, VERASTEGUI R. Nothing temporary here: gain efficiency by integrating excavation support as permanent foundation [C]// Engineers AEI 2015. Milwaukee, USA: [s.n.], 2015: 141-150.
- [11] 李连祥. 地下结构群深基坑工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2023: 66-67.
- [12] 山东大学, 山东高新岩土科技有限公司. 一种钢筋混凝土钻孔灌注桩的钻具: 202311238194.4[P]. 2023-12-29.
- [13] 山东高新岩土科技有限公司, 山东大学. 一种基坑永久支护桩墙及其施工方法: 202311238131.9[P]. 2023-12-01.
- [14] 刘汉龙, 张建伟, 彭劼. PCC 桩水平承载特性足尺模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 161-165.
LIU Hanlong, ZHANG Jianwei, PENG Jie. Full-scale model test study on horizontal bearing characteristics of PCC piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 161-165.

- [15] 王俊林,王复明,任连伟,等.大直径扩底桩单桩水平静载试验与数值模拟[J].岩土工程学报,2010,32(9):1406-1411.
WANG Junlin, WANG Fuming, REN Lianwei, et al. Horizontal static load test and numerical simulation of large-diameter bellied piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1406-1411.
- [16] 王建华,陈锦剑,柯学.水平荷载下大直径嵌岩桩的承载力特性研究[J].岩土工程学报,2007(8):1194-1198.
WANG Jianhua, CHEN Jinjian, KE Xue. Study on bearing capacity characteristics of large-diameter rock-socketed piles under horizontal loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007(8): 1194-1198.
- [17] 徐长节,朱怀龙,龙莉波,等.深基坑隔离桩对坑外既有隧道保护效果分析[J].隧道与地下工程灾害防治,2019,1(1):119-126.
XU Changjie, ZHU Huailong, LONG Libo, et al. Analysis of the protective effect of isolation piles on existing tunnels outside deep foundation pits [J]. Disaster Prevention of Tunnels and Underground Engineering, 2019, 1(1): 119-126.
- [18] 杨光华.深基坑支护结构的实用计算方法及其应用[J].岩土力学,2004(12):1885-1896.
YANG Guanghua. Practical calculation methods and applications for deep foundation pit support structures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(12): 1885-1896.
- [19] 上海市基础工程集团有限公司.全液压旋挖扩底灌注桩(AM工法)技术规程:T/CECS 1291—2023[S].北京:中国建筑工业出版社,2023.
- [20] 王卫东,邸国恩.TRD工法等厚度水泥土搅拌墙技术与工程实践[J].岩土工程学报,2012,34(增刊1):628-633.
WANG Weidong, DI Guoen. TRD method: thickened cement soil mixing wall technology and engineering practice [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(Suppl.1): 628-633.
- [21] 浙江省住房和城乡建设厅.渠式切割水泥土连续墙技术规程:JGJ/T303—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [22] 郭印,赵刚,孙元帝,等.桩锚式支护桩内力和变形测试研究[J].地下空间与工程学报,2009,5(5):1020-1024.
GUO Yin, ZHAO Gang, SUN Yuandi, et al. Experimental study on internal forces and deformation of anchored retaining piles [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5): 1020-1024.
- [23] 朱彦鹏,王秀丽,于劲,等.悬臂式支护桩内力的试验研究[J].岩土工程学报,1999(2):101-104.
ZHU Yanpeng, WANG Xiuli, YU Jin, et al. Experimental research on internal forces of cantilever retaining piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999(2): 101-104.
- [24] 中国建筑科学研究院.建筑桩基技术规范:JGJ 94—2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [25] 中国建筑科学研究院.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

(编辑:郭少华)