

# 考虑邻近建筑物影响的基坑支护结构受力响应分析<sup>1)</sup>

赵世永<sup>2)</sup>

(中铁十五局集团有限公司, 上海 200070)

(中铁十五局集团城市轨道交通工程有限公司, 河南洛阳 471000)

**摘要** 为了深入了解邻近建筑物对基坑支护结构受力响应的影响, 通过学习前人的研究成果和基于自身经验采用三参数地基弹性梁模型, 来考虑邻近建筑物与支护结构间有限宽土压力、基底应力等的影响, 根据支护结构受力特点, 得到一种考虑邻近建筑影响的支护结构计算分析模型; 采用桩身离散的方法创建了支护结构的内力及其变形计算的矩阵表达式, 得到一种半解析解答的方法; 并根据工程实例对该方法进行计算验证, 对建筑基底应力、距支护结构距离的影响规律进行了分析, 验证了本方法的可行性, 可为城镇建筑密集区域的基坑工程类似支护设计提供参考。

**关键词** 基坑工程, 邻近建筑, 受力响应, 理论计算, 半解析解

中图分类号: TU473 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-20-487

## MECHANICAL BEHAVIORS OF SUPPORTING STRUCTURE OF FOUNDATION PIT WITH CONSIDERATION OF THE INFLUENCE OF ADJACENT BUILDING<sup>1)</sup>

ZHAO Shiyong<sup>2)</sup>

(China Railway 15th Bureau Group Limited Company, Shanghai 200070, China)

(Urban Rail Transit Engineering Limited Company of China Railway 15th Bureau, Luoyang 471000, Henan, China)

**Abstract** In order to better understand the mechanical behaviors of the supporting structure of the deep foundation pit, a tri-parameter foundation model is used, according to different stress patterns of the supporting structure, to build a computational analysis model with consideration of the influence of the adjacent building. In this computational analysis model, the additional stress caused by the adjacent building and the pressure of a certain width soil between the supporting structure and the adjacent building are considered. The matrix expressions for the internal forces and the deformations of the supporting structure are derived by using the pile discrete method and the matrix transfer method, and the semi-analytical solution for the supporting structure is obtained. For an excavation project, the influences of the additional stress caused by the adjacent building and the distance between the supporting structure and the adjacent building are analyzed, this method is verified, and it can be used for the design of this type of supporting projects in dense urban areas.

**Key words** foundation pit engineering, adjacent building, mechanical response, theoretical calculation, semi-analytical solution

本文于 2020-11-19 收到。

1) 河南省住房城乡建设科技计划资助项目 (K-1817, K-1818, K1816, K-1940)。

2) 赵世永, 高级工程师, 研究方向为地基基础工程。E-mail: 150302137@qq.com

**引用格式:** 赵世永. 考虑邻近建筑物影响的基坑支护结构受力响应分析. 力学与实践, 2021, 43(3): 371-379

Zhao Shiyong. Mechanical behaviors of supporting structure of foundation pit with consideration of the influence of adjacent building. *Mechanics in Engineering*, 2021, 43(3): 371-379

目前,我国的基础设施建设正处于快速发展的时期,有许多的城市开始进入到地下空间的高速建设阶段,其“规模化、系统化、综合化”成为了这一阶段较为显著的特征。而且随着国家的节能省地型城市建设政策的不断落实,建筑密度不断加大,城市中心地带建筑密集区高层、超高层建筑、地下商场、地下通道等工程大量涌现,与之对应的基坑开挖工程与周围建构筑物的相互影响问题不可避免。目前,针对基坑开挖对临近建筑基础的影响研究逐渐深入。Son等<sup>[1]</sup>通过数值模拟分析了地层开挖对邻近建筑物变形的影响;李志伟等<sup>[2]</sup>采用有限元分析的手段,给出了基坑开挖影响下周边建筑物相对挠曲变形的评估方法;张治国等<sup>[3-4]</sup>和王卫东等<sup>[5]</sup>依据上海地区土质等实际工程中存在的特点,研究了深基坑开挖与周围浅基础沉降之间的规律,并给出了基坑开挖对邻近浅基础影响的简化评价方法。然而,这些研究多集中于基坑开挖对临近建筑基础的影响,而在基坑开挖中如何合理考虑临近既有建筑物基础的影响来进行支护结构的设计,成为工程设计人员必须合理处理并进行深化研究的课题。

考虑到周边建筑基础对基坑支护结构的影响,金亚兵等<sup>[6]</sup>通过理论假定给出了基坑坡顶局部超载作用下土压力的简化计算图式;张莲花等<sup>[7]</sup>基于该方法,考虑超载大小、距基坑边缘距离及其作用宽度和相对深度等因素的影响,依据实际工程对采用不同基坑支护结构的受力响应进行了对比分析研究;张浩等<sup>[8]</sup>针对不平衡堆载工况,通过研究给出了邻近结构工程桩的受力计算分析方法,为基坑支护结构的受力响应理论分析提供了可供借鉴的经验;李峰等<sup>[9]</sup>通过研究临近建筑物基础埋深较深的工况(如地下室、地铁站等),提供了一种有限宽土体作用在基坑支护结构上土压力的计算方法,进一步深化了基坑开挖对附近建筑基础影响的相关研究。然而,这些成果大多是和悬臂式基坑支护方面相关的受力研究,没有考虑受附近建筑基础影响下的多支点基坑支护方式(如:墙锚支护等)的相关受力分析,但在我国应用此类支护结构的基坑工程很常见。张浩等<sup>[10]</sup>依据弹性地基梁模型,给出了考虑到基坑内预留土影响下的多支点支护结构受力变形计算模型,但未考虑基坑附近建筑物基础局部超载对支护结构产生的影响。因此,考虑临近基础影响的基坑支护结构的设计计算理论仍有待进一步深入的研究。

为此,考虑到临近建筑基础超载产生的影响,本文依据三参数弹性地基梁模型的方法,结合多支点支护结构的受力特点,建立支护结构受力变形计算分析模型,然后支护结构受力响应的半解析解答可通过桩身离散与矩阵递推法推导得出,从而为合理计算临近建筑基础超载对多支点支护结构产生的作用提供参考。

## 1 计算模型与基本假定

### 1.1 支护结构受力控制方程

考虑临近建筑(如地下室、地铁站等)影响的典型支护结构受力特征见图1。在图1中, $h_c$ 表示支护结构与临近建筑间有限宽土体影响作用区域; $h_u$ 为支护结构的下部临空段; $q$ 为临近建筑基底超载应力; $\Delta q$ 为基底局部超载对支护结构的附加土压力; $q_d$ 为嵌固段坑底土对支护结构产生的水平向抗力。实际工程中,基坑开挖势必引起周围土体发生向坑内的位移变形,而对支护结构产生土压力作用( $p_a$ );支护结构受土压力作用亦会发生向坑内的侧向位移,而受到坑内被动区土的水平抗力作用( $q_d$ )。由此可见,支护结构与土的相互作用属于典型的被动桩土相互作用模式<sup>[8,11]</sup>。

据此,考虑临近建筑影响,根据开挖支护结构受

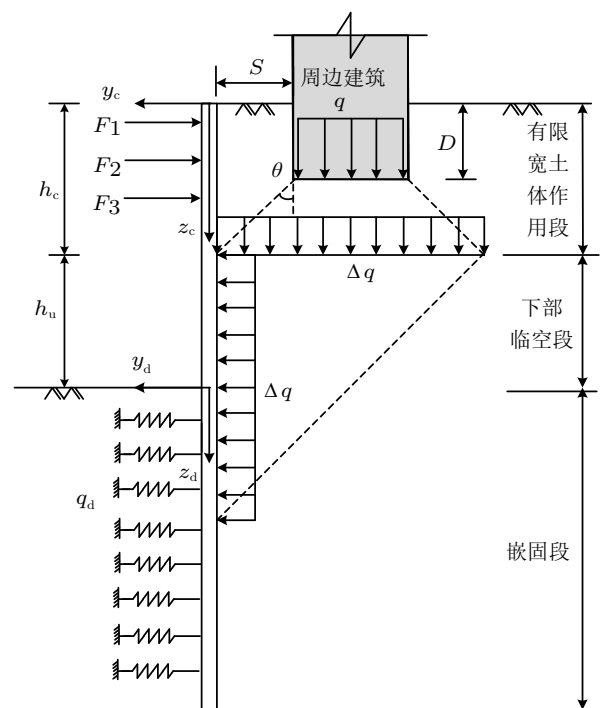


图1 支护结构内力计算模型

力特征, 可将支护桩划分为两段, 即开挖深度范围的临空段和坑底以下的嵌固段。其中, 考虑受力不同, 临空段又可分为: ①上部受有限宽土体作用的临空段, 受坑外有限宽土体土压力作用和支点 (锚杆或内支撑等) 集中力作用; ②下部临空段, 不仅受坑外主动土压力的作用, 还受到因建筑基底超载引起的附加荷载 ( $\Delta q$ ) 作用; 嵌固段则同时受到坑外主动土压力和坑内土抗力作用。进而, 以临空段和嵌固段顶点为原点分别建立独立坐标系  $y_c - z_c$  和  $y_d - z_d$ , 根据静力平衡, 忽略轴力影响, 可建立各桩段的控制微分方程

### (1) 临空段

$$EI \frac{d^4 y_c}{dz_c^4} = p_a(z_c) \quad (1)$$

### (2) 嵌固段

$$EI \frac{d^4 y_d}{dz_d^4} + q_d(y_d, z_d) = p_a(z_d) \quad (2)$$

式中,  $EI$  为支护桩刚度,  $q_d(y_d, z_d)$  为坑底被动区土的抗力,  $p_a(z_c)$  和  $p_a(z_d)$  为支护结构外侧土压力。

## 1.2 计算参数的确定

如图 1 所示, 由于邻近建构筑物 (地下室、地铁站等) 的存在, 支护结构受其影响承受的是有限土体的土压力, 若仍根据朗肯土压力理论计算, 易导致土压力计算偏大, 造成浪费。因此, 需对该区域土压力做进一步修正。假定邻近建构筑物埋深为  $D$ , 受基坑开挖影响, 有限土体极限滑裂面倾角与水平面呈  $\theta$  开展, 基于滑楔体平衡理论, 可求得该状态下有限宽土体作用于基坑支护桩上的主动土压力<sup>[9]</sup>

$$E_a = \left( \frac{1}{2} \gamma S - k \right) (2h_c - S \operatorname{ctg} \theta) \frac{\cos(\theta + \varphi)}{\sin(\theta + \delta + \varphi)} - \frac{cS}{\cos \delta} \left[ 1 + \frac{\cos(\theta + \delta) \cos(\theta + \varphi)}{\sin \theta \sin(\theta + \delta + \varphi)} \right] \quad (3)$$

式中,  $S$  为有限土体宽度,  $\gamma$  为土体容重,  $c$  为黏聚力,  $\varphi$  为内摩擦角,  $\delta$  为土体的外摩擦角,  $k$  为黏着力。

为便于计算, 根据土压力强度的线性关系, 由式 (3) 可求得有限宽土体作用段分布土压力

$$p_a(z_c) = 2E_a z_c / h_c^2 \quad (4)$$

考虑建构筑物基底超载的影响, 基底应力  $q$  沿  $\theta$  扩散, 在区间  $[h_c, h_c + B + 2(h_c - D) \tan \theta]$  内对支护

结构产生附加土压力

$$\Delta q = \frac{qB}{B + 2(h_c - D) \tan \theta} \quad (5)$$

式中,  $B$  为邻近建构筑物基础宽度。

下部临空段外侧的主动土压力

$$p_a(z_c) = \gamma(z_c - D) K_a - 2c\sqrt{K_a} \quad (6)$$

式中,  $K_a$  为主动土压力系数,  $K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$ 。受基底局部载荷影响区域的土压力为

$$p_a(z_c) = \gamma(z_c - D) K_a - 2c\sqrt{K_a} + \Delta q \quad (7)$$

据此, 综合式 (4)~式 (7), 基坑范围内支护结构临空段外侧土压力可统一表示为

$$p_a(z_c) = a' z_c + b' \quad (8)$$

式中,  $a'$  和  $b'$  为常数。

参考文献 [10], 坑底以下支护结构外侧土压力为一定值, 其大小与坑底处土压力相等, 则嵌固段外侧土压力为

$$p_a(z_d) = c' \quad (9)$$

式中,  $c'$  为常数。

基坑底部的被动区土体会对基坑支护桩的受力产生影响, 考虑到这一点, 根据弹性地基梁法, 将坑内土体和支护桩间存在的相互作用通过建立被动受压弹簧来模拟, 只需选择符合工程实际的土层弹簧刚度值, 就可以通过支护桩位移模式及其大小, 来求得基坑内分布在支护结构上的土体抗力

$$q_d(y_d, z_d) = k_d(z_d) b_1 y_d \quad (10)$$

式中,  $b_1$  是基坑支护桩的计算宽度;  $k_d(z_d)$  为坑底嵌固段的地基抗力系数, 假定坑内土抗力与支护桩侧向位移成正比, 采用三参数 ( $m, z_0, n$ ) 地基抗力模型, 有:  $k_d(z_d) = m(z_s + z_d)^n$ ,  $m$  为地基比例系数,  $n$  为土体抗力的深度指数,  $z_s$  为坑底处的当量深度, 此处考虑基坑开挖后坑底土体变成超固结土, 虽然发生应力释放, 但  $z_s$  仍具有一定的刚度。

## 2 支护结构内力响应计算

### 2.1 控制方程求解

为了简化计算和便于编程, 对支护结构进行离散, 采用矩阵传递系数法进行统一求解。

2.1.1 临空段控制方程求解

考虑支护结构支点集中力与外侧土压力分界的影响, 将临空段离散为  $N_c$  份, 每段长度  $h_1 = h_c/N_c$ , 并保证集中力作用于离散节点处; 取任意段  $i$  建立独立坐标系进行分析, 如图 2 所示。为简化分析, 将微段外侧主动土压力取为

$$p_{ai} = a \cdot (2i - 1) h_1/2 + b \quad (11)$$

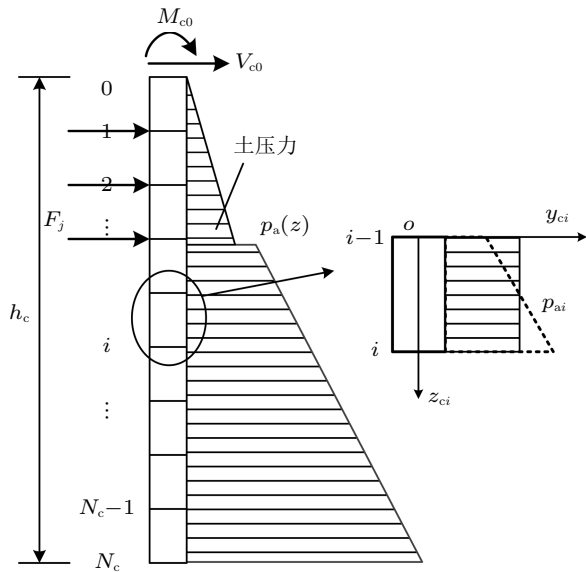


图 2 临空段离散示意图

由式 (1) 将临空段第  $i$  桩段控制方程转化为

$$\frac{d^4 y_{ci}}{dz_{ci}^4} = \overline{p_{ai}} \quad (12)$$

式中,  $\overline{p_{ai}} = p_{ai}/(EI)$ 。对微分方程 (11) 求解可得

$$y_{ci} = C_{o1} + C_{o2} z_{ci} + C_{o3} z_{ci}^2 + C_{o4} z_{ci}^3 + \frac{\overline{p_{ai}}}{24} z_{ci}^4 \quad (13)$$

式中,  $y_{ci}$  为第  $i$  段任意位置  $z_{ci}$  处的桩身挠曲;  $C_{o1}, C_{o2}, C_{o3}, C_{o4}$  为常系数。

设  $\varphi_{ci}, M_{ci}$  和  $V_{ci}$  分别为  $z_{ci}$  处桩身转角、弯矩和剪力, 则由材料力学基本理论可得

$$\varphi_{ci} = \frac{dy_{ci}}{dz_{ci}}, \quad M_{ci} = EI \frac{d^2 y_{ci}}{dz_{ci}^2}, \quad V_{ci} = EI \frac{dM_{ci}}{dz_{ci}} \quad (14)$$

设第  $i$  段顶端 ( $z_{ci} = 0$ ) 响应参量为  $y_{ci0}, \varphi_{ci0}, M_{ci0}$  和  $V_{ci0}$ , 联合式 (12) 和式 (13) 可求出  $C_{o1}, C_{o2}, C_{o3}, C_{o4}$ ; 进而将其回代入式 (12) 和式 (13) 可得

$$U_{ci}(h_1) = S_{ci}(h_1) \cdot U_{ci0} \quad (15)$$

式中,  $U_{ci}(h_1) = [y_{ch}, \varphi_{ch}, M_{ch}, V_{ch}, 1]^T$ , 其中  $y_{ch}, \varphi_{ch}, M_{ch}, V_{ch}$  分别为第  $i$  段底部 ( $z_{ci} = h_1$ ) 的水平位移、转角、弯矩和剪力;  $U_{ci0} = [y_{ci0}, \varphi_{ci0}, M_{ci0}, V_{ci0}, 1]^T$ ,  $y_{ci0}, \varphi_{ci0}, M_{ci0}, V_{ci0}$  不仅为第  $i$  段顶部的水平位移、转角、弯矩和剪力, 还是第  $i - 1$  段底部的水平位移、转角、弯矩和剪力, 即  $U_{c(i-1)}(h_1)$ ;  $S_{ci}(h_1)$  为第  $i$  微段的系数矩阵

$$S_{ci}(h_1) = \begin{bmatrix} A_{c1} & B_{c1} & C_{c1} & D_{c1} & E_{c1} \\ A_{c2} & B_{c2} & C_{c2} & D_{c2} & E_{c2} \\ A_{c3} & B_{c3} & C_{c3} & D_{c3} & E_{c3} \\ A_{c4} & B_{c4} & C_{c4} & D_{c4} & E_{c4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$A_{cj}, B_{cj}, C_{cj}, D_{cj}, E_{cj}$  ( $j = 1 \sim 4$ ) 为矩阵方程的 20 个系数。

考虑变形受力连续性, 基于式 (14) 可得

$$U_{ci}(h_1) = S_{ci}(h_1) \cdot U_{c(i-1)}(h_1) \quad (16)$$

考虑到锚杆、内支撑等支点集中力对支护结构的作用, 假设  $F_j$  为支点  $x_j$  处的集中力, 则  $x_j$  点处上下截面的变形内力关系为

$$U_x^d = S_{cx} U_x^u \quad (17)$$

式中,  $U_x^d$  和  $U_x^u$  分别为临空段  $x_j$  节点处下截面和上截面的内力变形参量矩阵,  $S_{cx}$  为集中力引起的突变矩阵

$$S_{cx} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & F_j \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

进而, 可得临空段受力响应的矩阵传递方程

$$U_{cN_c}(h_1) = S_{cN_c}(h_1) \cdots S_{cx} \cdots S_{c1}(h_1) \cdot U_{c0} = S_c \cdot U_{c0} \quad (18)$$

式中,  $S_c$  为支护桩临空段总的系数矩阵;  $U_{c0} = [y_{c0}, \varphi_{c0}, M_{c0}, V_{c0}, 1]^T$ , 为桩顶处的内力变形参量矩阵;  $U_{cN_c}(h_1) = [y_{cN_c}, \varphi_{cN_c}, M_{cN_c}, V_{cN_c}, 1]^T$ , 为临空段和嵌固段交界面处的参量矩阵。

2.1.2 嵌固段控制方程求解

如图 3 所示，将嵌固段分为  $N_d$  份，每段长  $h_2 = h_d/N_d$ ，取任一段  $i$  建立独立坐标系进行分析，微段外侧土压力取为

$$p_{ai} = c' \tag{19}$$

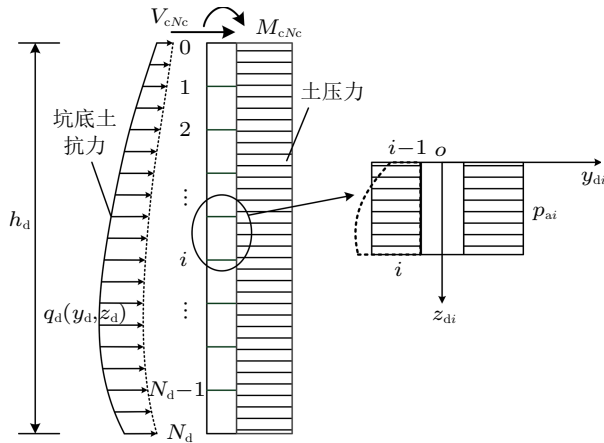


图 3 嵌固段离散示意图

考虑坑底地基土的抗力作用，基于式 (10) 采用中值定理，将第  $i$  微段的土体抗力系数简化为

$$k_{di} = \int_{(i-1)h_2}^{ih_2} m(z_s + z_d)^n dz_d / h_2 = \frac{m(z_s + ih_2)^{n+1} - m[z_s + (i-1)h_2]^{n+1}}{(n+1)h_2} \tag{20}$$

由式 (2) 可将第  $i$  微段控制方程转化为

$$\frac{d^4 y_{di}}{dz_{di}^4} + \alpha_{di}^4 y_{di} = t \tag{21}$$

式中， $\alpha_{di}^4 = k_{di} b_1 / (EI)$ ， $t = p_{ai} / (EI)$ ， $b_1$  为计算宽度。进而，对该微分方程求解可得

$$y_{di} = e^{gz_{di}} (C_{d1} \cos gz_{di} + C_{d2} \sin gz_{di}) + e^{-gz_{di}} (C_{d3} \cos gz_{di} + C_{d4} \sin gz_{di}) + t / \alpha_{di}^4 \tag{22}$$

式中， $y_{di}$  为  $z_{di}$  处桩身挠曲变形； $g = \alpha_{di} / \sqrt{2}$ ； $C_{d1}$ ， $C_{d2}$ ， $C_{d3}$ ， $C_{d4}$  为常系数。

与临空段推导方法相同，可得  $i$  微段矩阵方程

$$U_{di}(h_2) = S_{di}(h_2) \cdot U_{di0} \tag{23}$$

式中， $U_{di}(h_2) = [y_{dh}, \varphi_{dh}, M_{dh}, V_{dh}, 1]^T$ ， $y_{dh}$ ， $\varphi_{dh}$ ， $M_{dh}$ ， $V_{dh}$  为第  $i$  段底部 ( $z_{di} = h_2$ ) 的水

平位移、转角、弯矩和剪力； $U_{di0} = [y_{di0}, \varphi_{di0}, M_{di0}, V_{di0}, 1]^T$ ， $y_{di0}$ ， $\varphi_{di0}$ ， $M_{di0}$ ， $V_{di0}$  不仅为第  $i$  段顶部的水平位移、转角、弯矩和剪力，还是第  $i-1$  段底部的水平位移、转角、弯矩和剪力，即  $U_{d(i-1)}(h_2)$ ； $S_{di}(h_2)$  为第  $i$  微段的系数矩阵

$$S_{di}(h_2) = \begin{bmatrix} A_{d1} & B_{d1} & C_{d1} & D_{d1} & E_{d1} \\ A_{d2} & B_{d2} & C_{d2} & D_{d2} & E_{d2} \\ A_{d3} & B_{d3} & C_{d3} & D_{d3} & E_{d3} \\ A_{d4} & B_{d4} & C_{d4} & D_{d4} & E_{d4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中  $A_{dj}$ ， $B_{dj}$ ， $C_{dj}$ ， $D_{dj}$ ， $E_{dj}$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) 为矩阵方程的 20 个系数，是微段长度  $h_2$  的函数。

考虑各微段变形受力连续性，由式 (22) 可得

$$U_{di}(h_2) = S_{di}(h_2) \cdot U_{d(i-1)}(h_2) \tag{24}$$

进而，可得整个桩段受力响应的矩阵传递方程

$$U_{dN_d}(h_2) = S_{dN_d}(h_2) \cdots S_{d2}(h_2) S_{d1}(h_2) \cdot U_{d0} = S_d \cdot U_{d0} \tag{25}$$

式中， $U_{d0} = [y_{cN_c}, \varphi_{cN_c}, M_{cN_c}, V_{cN_c}, 1]^T$ ，为临空段和嵌固段交界面处的内力变形参量矩阵； $U_{dN_d}(h_2) = U_{dL} = [y_{dL}, \varphi_{dL}, M_{dL}, V_{dL}, 1]^T$ ，为支护桩底端处的内力变形参量矩阵； $S_{di}(h_2)$  为第  $i$  段的系数矩阵； $S_d$  为嵌固段总的系数矩阵。

2.2 连续条件与求解方法

由临空段与嵌固段的连续条件可知

$$U_{d0} = U_{cN_c}(h_1) \tag{26}$$

据此，联合式 (18) 和式 (25) 可得整个支护桩的内力变形矩阵方程

$$U_{dL} = S_d S_c \cdot U_{c0} = S \cdot U_{c0} \tag{27}$$

式中， $S$  即为整个支护桩的总系数矩阵。

矩阵方程 (27) 中涉及到支护桩顶边界参量  $y_{c0}$ ， $\varphi_{c0}$ ， $M_{c0}$ ， $V_{c0}$  和桩端边界参量  $y_{dL}$ ， $\varphi_{dL}$ ， $M_{dL}$ ， $V_{dL}$ 。考虑到不同的桩顶和桩端约束条件，那么桩顶自由时

$$M_{c0} = M_0, V_{c0} = H_0 \tag{28}$$

桩顶固定时

$$y_{c0} = 0, \varphi_{c0} = 0 \quad (29)$$

桩端自由时

$$M_{dL} = 0, V_{dL} = 0 \quad (30)$$

桩端嵌固时

$$y_{dL} = 0, \varphi_{dL} = 0 \quad (31)$$

据此，可通过以下步骤计算支护结构的变形内力。

(1) 将支护桩顶已知条件式 (28) 或式 (29)、桩端已知条件式 (30) 或式 (31) 代入到矩阵方程 (26) 中，可得到有关 4 个未知量的 4 个方程组成的方程组，通过求解该方程组可得未知的桩顶和桩端边界参量；

(2) 根据桩顶边界  $U_{c0} = [y_{c0}, \varphi_{c0}, M_{c0}, V_{c0}, 1]^T$  和递推式 (16) 可求得临空段中任一微段  $i$  ( $1 \leq i \leq N_c$ ) 的下截面内力变形

$$U_{ci}(h_1) = S_{ci}(h_1) \cdots S_{cx} \cdots S_{c1}(h_1) \cdot U_{c0} \quad (32)$$

当  $i = N_c$  时，式 (32) 可求得临空段底端的内力变形  $U_{cN_c}(h_1) = [y_{cN_c}, \varphi_{cN_c}, M_{cN_c}, V_{cN_c}, 1]^T$ ；

(3) 由临空段与嵌固段交界面处的连续条件 ( $U_{d0} = U_{cN_c}(h_1)$ ) 可得嵌固段顶端处的内力变形参量  $U_{d0} = [y_{cN_c}, \varphi_{cN_c}, M_{cN_c}, V_{cN_c}, 1]^T$ ，进而代入递推公式 (24) 可求得嵌固段中任一微段  $i$  ( $1 \leq i \leq N_d$ ) 的下截面内力变形

$$U_{di}(h_2) = \prod_{j=1}^i S_{dj}(h_2) \cdot U_{d0} = \prod_{j=1}^i S_{dj}(h_2) \cdot S_c U_{c0} \quad (33)$$

综上所述，通过对支护桩的合理离散，由式 (32) 和式 (33) 可求得各节点处支护桩的变形内力值。

### 3 工程实例分析

郑州市黄河路西延隧道工程位于郑州市金水西路西站北街以东，黄河路下穿北编组站隧道以西，呈西南至东北走向，与郑州轨道交通 5 号线西站街站至沙口路站区间走向基本重合，采用明挖顺筑

法施工。区间场地平坦开阔，场地地貌属于山前冲洪积缓倾平原，地层主要为第四系上更新统地层，主要有砂质粉土、黏质粉土、粉质黏土，夹有粉细砂，主要地层物理力学指标如表 1 所示。其中，区段 DK0+943.450~DK0+987.395 临近有一多层建筑，地上 6 层，地下 1 层为地下室，基础埋深 4.85 m，与围护桩净距 3.8 m。临近该建筑的围护结构采用钻孔灌注桩 + 混凝土支撑/预应力锚索支护体系，采用 1 道混凝土支撑和混凝土支撑下设 10 道竖向等距锚索进行支护，如图 4 所示。基坑开挖深度为 23 m，钻孔灌注桩的直径为 1.2 m，其长度为 34 m；锚索竖向间距为 2.0 m，采用抗拉设计强度值为 1320 MPa 的钢绞线。

表 1 土层物理力学参数

土层名称	$h_i/m$	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	$E_s/MPa$	$c/kPa$	$\varphi/(^\circ)$
杂填土	1.2	18.3	7.10	12.0	19.0
砂质粉土	6.5	19.3	7.13	17.3	23.0
黏质粉土	3.5	19.2	7.53	19.7	21.1
黏质粉土	1.2	19.5	8.12	18.2	22.1
细砂	9.5	19.8	19.00	2.0	34.0
黏质粉土	4.7	19.7	8.53	20.5	23.1
粉质黏土	7.4	20.1	9.10	34.0	18.0

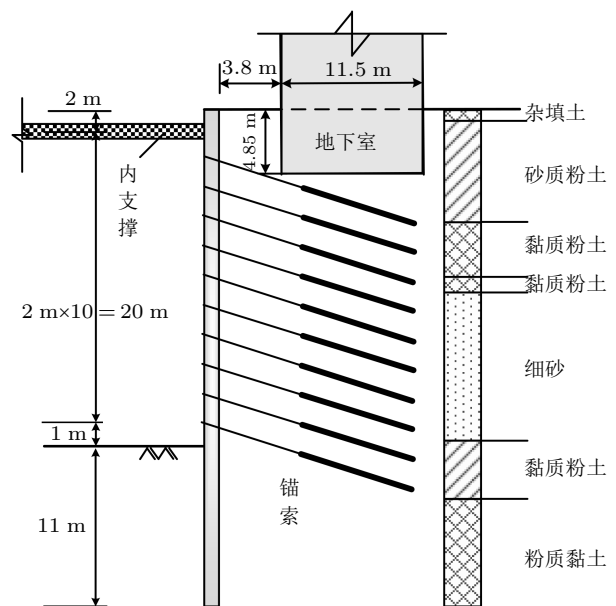


图 4 断面示意图

利用本文提出的方法对该区段围护结构的受力变形进行计算分析。在计算坑外分布在支护结构上的

土压力时，考虑到支护结构深度范围内土层较多，可以对土层指标进行加权平均来合理简化计算。经过对土层参数加权平均计算后可得： $\gamma = 19.6 \text{ kN/m}^3$ ， $c = 17.2 \text{ kPa}$ ， $\varphi = 24.6^\circ$ ；嵌固段土层主要为黏质粉土层和粉质黏土层，考虑坑内卸荷影响，取其综合抗力系数为  $150 \text{ kN/m}^4$ 。考虑到内支撑受力和锚索集中力在基坑开挖过程中是动态变化的，为简化计算，取内支撑设计轴力和锚索的锁定值。根据设计资料，内支撑设计轴力为  $1441 \text{ kN}$ ，锚索锁定值从上向下依次取值为  $300 \text{ kN}$ ， $350 \text{ kN}$ ， $350 \text{ kN}$ ， $400 \text{ kN}$ ， $400 \text{ kN}$ ， $450 \text{ kN}$ ， $500 \text{ kN}$ ， $500 \text{ kN}$ ， $500 \text{ kN}$  和  $450 \text{ kN}$ ；邻近建筑每层超载取  $20 \text{ kPa}$ ，基底总应力为  $140 \text{ kPa}$ ；围护桩桩身模量为  $38 \text{ GPa}$ ，临空段长度为  $23 \text{ m}$ ，嵌固段长度为  $11 \text{ m}$ ，围护桩的桩顶和桩端都采取自由边界条件来合理简化实际工程。

该区段现场设置了两个水平位移监测点 LD-1 和 LD-2，现场实测与采用本文方法计算所得的围护结构位移分布曲线如图 5 所示。可以看出，围护结构实测最大位移为  $7.12 \text{ cm}$  和  $7.81 \text{ cm}$ ，采用本文方法计算得到的围护结构最大位移为  $6.58 \text{ cm}$ ，两者较为接近，且随深度的变化趋势基本一致，验证了本文提出的半解析解答的合理性。

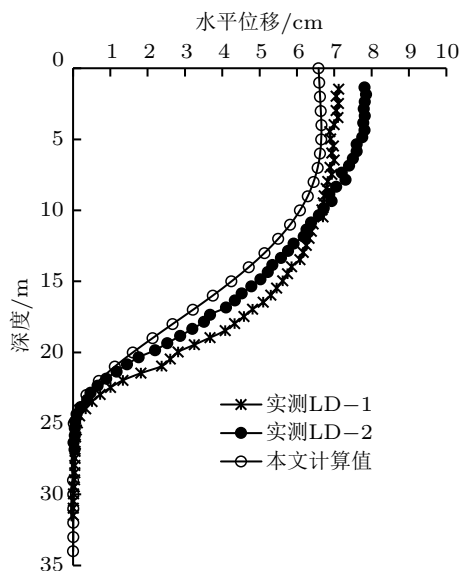


图 5 实测结果与计算结果比较图

为进一步考虑周边邻近建筑对基坑支护结构受力变形的影响，在该工程案例计算模型的基础上，计算地下室基底总应力分别为  $140 \text{ kPa}$ ， $280 \text{ kPa}$  和

$420 \text{ kPa}$  情况下的支护桩的水平位移和弯矩，如图 6 所示。为进一步将基坑内预留土横断面的尺寸对基坑支护结构受力产生的作用考虑在内，在本工程算例的前提下，保持预留土高度和坡度不变，分别计算了预留土上宽为  $4 \text{ m}$ ， $6 \text{ m}$ ， $8 \text{ m}$ ， $10 \text{ m}$  和  $12 \text{ m}$  时支护桩的水平位移和弯矩，见图 6(a) 和图 6(b)。可以看出，围护桩水平位移和弯矩均随着临近建筑地基基底应力的增加而增加，当临近建筑基底总应力由  $140 \text{ kPa}$  增加至  $280 \text{ kPa}$  时，桩身最大水平位移增加了约  $14.9\%$ ，其弯矩增加了约  $4.6\%$ ，说明临近建筑基底应力对围护结构受力变形的影响不容忽视。

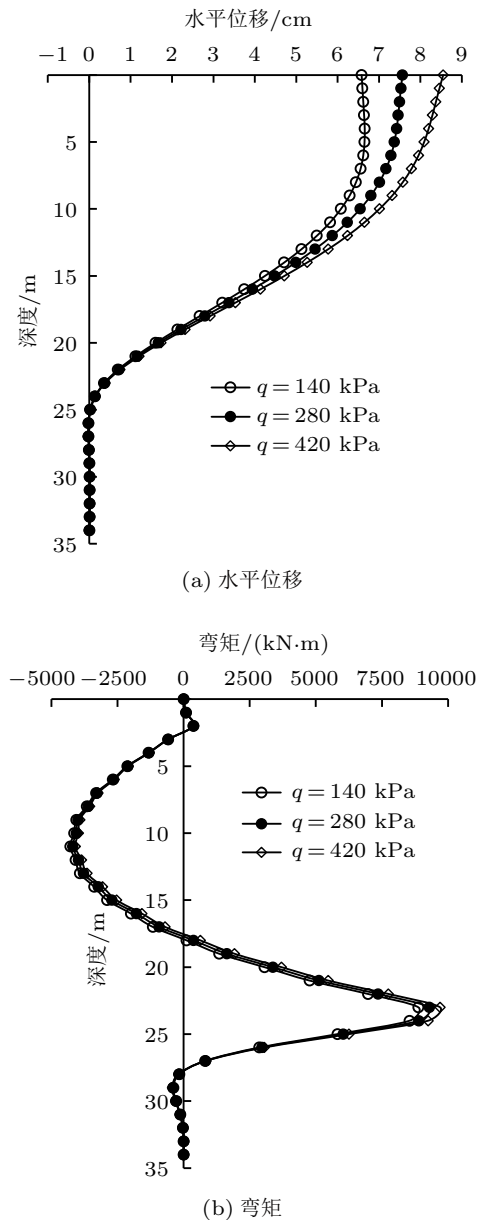
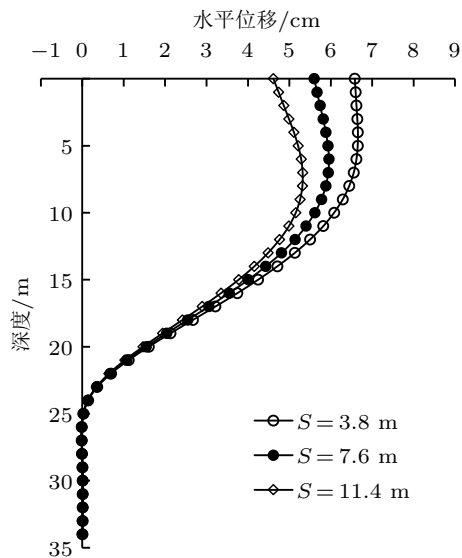
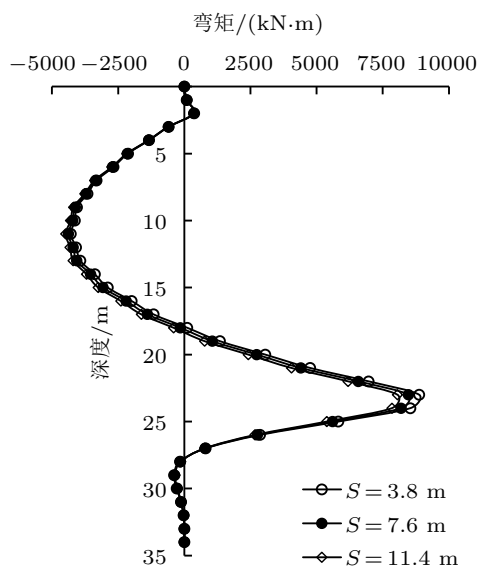


图 6 邻近建筑基底应力的影响

同时,在基底应力保持不变的情况下,考虑临近建筑地下室距围护结构距离的影响,计算距离  $S$  分别为 3.8 m, 7.6 m 和 11.4 m 情况下围护桩的内力变形,如图 7 所示。可以看出,当临近建筑物与围护结构之间的距离不断增加时,围护桩的水平位移和弯矩值均呈逐渐减小的变化趋势,但距离对围护桩水平位移的影响更为显著。例如,当距离由 3.8 m 增加到 7.6 m 和 11.4 m 时,桩身最大水平位移减小了约 10.5% 和 20%,且最大水平位移位置呈下移变化趋势;桩身最大弯矩减低了 4.6% 和 11.6%。这主要是因为随着临近建筑距围护桩距离的增加,基底应力的影响范围逐渐下移,且坑内内支撑的轴力相对较大。



(a) 水平位移



(b) 弯矩

图 7 临近建筑距离的影响

## 4 结论

针对工程实践中经常遇到的临近建筑影响下基坑支护结构上受力分布的问题,进行基坑支护结构受力变形相关的理论计算研究:

(1) 考虑临近建筑与支护结构间有限宽土体土压力、建筑基底压力等的影响,根据三参数弹性地基梁模型,得到支护结构合理的内力和变形的计算模型,并给出了较为合理的求解方法;

(2) 依托典型工程案例,采取预测值和现场实测数据进行对比研究的方法,检验了本文半解析解方法的合理性,可为类似建筑密集区基坑支护结构的设计计算提供借鉴;

(3) 案例与算例分析表明,临近建筑对基坑支护结构的受力响应明显,不容忽视,在设计阶段宜充分考虑。

## 参 考 文 献

- 1 Son M, Cording E.J. Evaluation of building stiffness for building response analysis to excavation-induced ground movements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(8): 995-1002
- 2 李志伟, 郑刚. 基坑开挖对邻近不同刚度建筑物影响的三维有限元分析. *岩土力学*, 2013, 34(6): 1807-1814  
Li Zhiwei, Zheng Gang. Finite element analysis of response of building with different stiffnesses adjacent to excavation. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(6): 1807-1814 (in Chinese)
- 3 张治国, 赵其华, 鲁明浩. 邻近深基坑开挖的历史保护建筑物沉降实测分析. *土木工程学报*, 2015, 48(z2): 137-142  
Zhang Zhiguo, Zhao Qihua, Lu Minghao. Analysis on settlement monitoring of historical protective buildings adjacent to deep foundation pit excavation. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(z2): 137-142 (in Chinese)
- 4 张治国, 杨轩, 赵其华等. 浅基础框架建筑受基坑开挖影响简化分析. *岩土工程学报*, 2017, 39(z2): 224-227  
Zhang Zhiguo, Yang Xuan, Zhao Qihua, et al. Simplified analysis of frame buildings with shallow foundation induced by excavation of adjacent foundation pit. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(z2): 224-227 (in Chinese)
- 5 王卫东, 徐中华. 预估深基坑开挖对周边建筑物影响的简化分析方法. *岩土工程学报*, 2010, 32(z1): 32-38  
Wang Weidong, Xu Zhonghua. Simplified analysis method for evaluating excavation-induced damage of adjacent buildings. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(z1): 32-38 (in Chinese)
- 6 金亚兵, 彭虹洋. 深基坑边坡超载计算方法探讨及其工程应用. *水文地质工程地质*, 2000, 2: 4-7



- Jin Yabing, Peng Hongyang. Calculation method of overload for deep foundation pit slop and its application. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2000, 2: 4-7 (in Chinese)
- 7 张莲花, 赵毅. 超载作用对深基坑支护设计影响的研究. *地质灾害与环境保护*, 2009, 20(1): 66-69
- Zhang Lianhua, Zhao Yi. The analysis of the influence caused by overloading action on the design of deep foundation pit retaining structure. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2009, 20(1): 66-69 (in Chinese)
- 8 张浩, 石名磊, 郭院成等. 不平衡堆载作用下邻近结构桩的侧向受力机制. *岩土工程学报*, 2016, 38(12): 2226-2236
- Zhang Hao, Shi Minglei, Guo Yuancheng, et al. Lateral mechanical behaviors of structural piles adjacent to imbalanced surcharge loads. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(12): 2226-2236 (in Chinese)
- 9 李峰, 郭院成. 基坑工程有限土体主动土压力计算分析研究. *建筑科学*, 2008, 24(1): 15-18
- Li Feng, Guo Yuancheng. Analytical study on active soil pressure from finite soil body in construction pit. *Building Science*, 2008, 24(1): 15-18 (in Chinese)
- 10 张浩, 郭院成, 石名磊等. 坑内预留土作用下多支点支护结构的变形内力计算. *岩土工程学报*, 2018, 40(1): 162-168
- Zhang Hao, Guo Yuancheng, Shi Minglei, et al. Calculation of deformation and internal force of multi-pivot retaining structure considering influence of earth berm. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(1): 162-168 (in Chinese)
- 11 Viggiani C. Ultimate lateral load on piles used to stabilize landslides. The 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, 1981

(责任编辑: 王永会)