

# 浅埋暗挖管棚超前预支护的受力分析

武建伟 宋卫东

(北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

**【摘要】** 以荷载—结构分析为主, 将管棚作为弹性地基梁考虑, 而将上部覆土单纯作为荷载考虑, 结合一般管棚支护作用下的地下工程开挖过程, 根据经典的 Winkler 模型初参数解, 全面动态分析开挖过程中管棚各段的受力过程, 提出了开挖过程中管棚全段的计算方程。以某一地下通道开挖为例, 通过解析计算和有限差分数值模拟两种方法比对, 得出了与工程经验较一致的结果, 对管棚法施工及设计具有一定的参考意义。

**【关键词】** 浅埋暗挖; 管棚; 弹性地基梁; FLAC 软件

**【中图分类号】** TU 433

## Mechanical Analysis on Pipe Roof Advanced Support in Shallow Excavation

Wu Jianwei Song Weidong

(School of Civil and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083 China)

**【Abstract】** Pipe roof method, one of the advanced support patterns in underground engineering, is often used in the construction of shallow excavation. During the period of construction, the responses and deformation of the pipe umbrella are complex, so the theoretical analysis and calculation of the pipe umbrella is necessary. Based on the loading-structure mode, which regards the pipe as an Winkler elastic foundation beam and the covering soil as the load, combined with the usual excavation way in the underground engineering under the pre-support of the pipe umbrellas, an overall analysis on every excavation step is given, and calculation equations of pipe responses for the whole pipe is put forward. Then, with the example of a certain shallow buried underpass, the analytic method and FDM numerical simulation is adopted respectively. Finally, the comparison of the results and practical experiences proves that the analytic method presented is reasonable and can be referred for the pipe proofing design and construction.

**【Key Words】** shallow excavation; pipe-roof; elastic foundation beam; FLAC software

### 0 引言

在浅埋暗挖地下工程施工时, 为避免因围岩过度松弛造成局部失稳坍塌, 并且有效地限制地表沉降, 在开挖之前进行地层预支护已成为一种行之有效的辅助措施。其中, 管棚超前预支护最为常见, 广泛应用于公路、铁路隧道, 城市地下铁道施工以及其他通过各种复杂地质与工程条件地段的暗挖施工中。

目前, 对于管棚的设计及工作机理的研究, 国内外学者提出了不同的假设。日本实施的管棚法<sup>[1]</sup>, 主要采用密排布置的大直径、大刚度钢管, 且两端支撑梁刚度较大, 管棚在实际工程中起筒支梁作用。文献[2]将管棚简化为连续梁讨论了管棚在岩石与土介质中对上覆土的抗弯性能。文献[3-4]将管棚简化为“一端固定, 一端筒支的受弯构件”或“承受均布荷载的两端固定梁结构”, 讨论了管棚的各项参数

的选择。本文基于弹性地基梁理论, 结合一般管棚预支护作用下的地下工程开挖过程, 根据经典的 Winkler 模型的初参数解, 全面动态分析开挖过程中管棚各段的受力过程, 提出了管棚全段的计算方程。最后, 以某一地下通道开挖为例, 通过解析计算和有限差分数值模拟两种方法比对, 得出了与工程经验较一致的结果, 对管棚法施工及设计具有一定的参考意义。

### 1 管棚受力模型

超前管棚就是在拟开挖的隧道、地下洞室等衬砌外周边钻设水平孔, 然后安装钢管, 再进行灌浆固结, 使拱顶形成加固的伞形保护环, 在该保护环的支撑下, 进行循环的掘进和支护施工。管棚支护作用下的一般地下工程开挖过程, 见图 1。在一个典型的施工循环步中, 根据土体所处状态, 可以将它分为

四个区段: 衬砌段( OA 段)、未衬砌段或衬砌尚未发挥作用段( AB 段)、掌子面前方土体受到扰动区域段( BC 段) 以及土体未受扰动段( DE)。

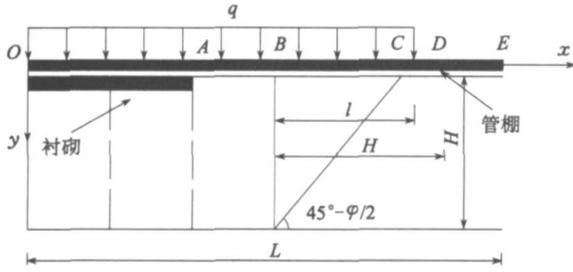


图 1 管棚预支护作用下的开挖过程

由于管棚的受力和土体状态密切相关, 因此, 相应地管棚也就分为四个区段。在建立计算模型时, 做出了如下假定:

1) 将管棚视为位于开挖土体上方受均布荷载的 Winkler 弹性地基梁( 见图 2), 其基本假设为: 地基表面任一点的沉降与该点单位面积上所受的压强成正比, 即

$$y = \frac{p}{k} \quad (1)$$

式中:  $y$  为地基的沉降;  $k$  为地基( 基床) 系数;  $p$  为单位面积上的压强强度。

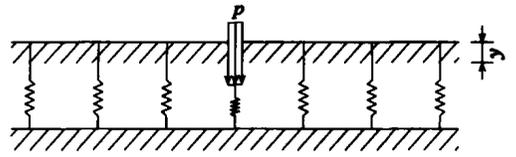


图 2 Winkler 弹性地基模型

2) 对于浅埋暗挖地下工程, 考虑到管棚间距, 可以将以管棚轴线为中心的、一个间距范围内的上方土体自重作为管棚上方荷载。

3) 假设掌子面沿开挖方向的破裂面的破裂角为  $45^\circ - \varphi/2$  ( 见图 1), 则掌子面前方垂直荷载沿纵向的作用范围( BC 段) 为:

$$l = H \cdot \tan(45^\circ - \varphi/2) \quad (2)$$

式中:  $H$  为开挖高度;  $\varphi$  为土体的内摩擦角。

4) 考虑到“掌子面效应”, 假定掌子面前方松弛区域为土体前方一个开挖高度范围, 即  $BD$  段长为  $H$ 。

5) 地基系数的确定<sup>[3]</sup>: 考虑到衬砌的影响, 因此  $OA$  段管棚下方土体地基基床系数应更换为新的组合基床系数  $k_2$ , 同时  $AB$  段管棚下方土体基床系数应为零,  $BD$  段仍为原土体基床系数  $k_0$ 。

根据以上假定, 管棚受力模型可以理想化为受分布荷载作用下的 Winkler 弹性地基梁模型, 根据弹性地基梁的初参数解<sup>[9]</sup>, 管棚各段的计算公式如下:

1)  $OA$  段:

$$\left. \begin{aligned} y_{OA}(x) &= y_0 \varphi_1 + \theta_0 \frac{1}{2\alpha_2} \varphi_2 - M_0 \frac{2\alpha_2^2}{bk_2} \varphi_3 - Q_0 \frac{\alpha_2}{bk_2} \varphi_4 + \frac{q}{bk_2} (1 - \varphi_1) \\ \theta_{OA}(x) &= -y_0 \alpha_2 \varphi_4 + \theta_0 \frac{1}{2\alpha_2} \varphi_1 - M_0 \frac{2\alpha_2^3}{bk_2} \varphi_2 - Q_0 \frac{2\alpha_2^2}{bk_2} \varphi_3 + \frac{q\alpha_2}{bk_2} \varphi_4 \\ M_{OA}(x) &= y_0 \frac{bk_2}{2\alpha_2^2} \varphi_3 + \theta_0 \frac{bk_2}{4\alpha_2^3} \varphi_4 + M_0 \varphi_1 + Q_0 \frac{1}{2k_2} \varphi_2 - \frac{q}{bk_2} \varphi_3 \\ Q_{OA}(x) &= y_0 \frac{bk_2}{2\alpha_2^2} \varphi_2 + \theta_0 \frac{bk_2}{4\alpha_2^3} \varphi_3 + M_0 \alpha_2 \varphi_4 + Q_0 \varphi_1 - \frac{q}{2\alpha_2} \varphi_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $y_{OA}$ 、 $\theta_{OA}$ 、 $M_{OA}$ 、 $Q_{OA}$  分别为  $OA$  段管棚的位移、转角、弯矩和剪力;  $y_0$ 、 $\theta_0$ 、 $M_0$ 、 $Q_0$  为初始截面 ( $x=0$ ) 处的挠度、转角、弯矩、剪力;  $q$  为分布荷载;  $b$  为管棚宽度;  $\alpha$  为反映梁和地基的相对刚度的综合参数, 称为特征系数, 见式(4);  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $\varphi_3$ 、 $\varphi_4$  为双曲线三角函数, 见式(5)。

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{bk}{EI}} \quad (4)$$

式中:  $E$  为管棚弹性模量;  $I$  为管棚截面轴惯性距。

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1(x) &= \begin{cases} \text{ch } \alpha x \cos \alpha x & (x \geq 0) \\ 1 & (x < 0) \end{cases} \\ \varphi_2(x) &= \begin{cases} \text{ch } \alpha x \sin \alpha x + \text{sh } \alpha x \cos \alpha x & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \\ \varphi_3(x) &= \begin{cases} \text{sh } \alpha x \sin \alpha x & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \\ \varphi_4(x) &= \begin{cases} \text{ch } \alpha x \sin \alpha x - \text{sh } \alpha x \cos \alpha x & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

注: 考虑到管棚起始端套拱的作用, 有

$$y_0 = \theta_0 = 0 \quad (6)$$

2) AB 段:

$$\left. \begin{aligned} y_{AB}(x) &= y_A + \theta_A(x - x_A) - \frac{M_A}{2EI} \varphi_3(x - x_A)^2 - Q_A \frac{(x - x_A)^3}{6EI} + q \frac{(x - x_A)^4}{24EI} \\ \theta_{AB}(x) &= \theta_A - M_A \frac{(x - x_A)}{EI} - Q_A \frac{(x - x_A)^2}{2EI} + q \frac{(x - x_A)^3}{6EI} \\ M_{AB}(x) &= M_A + Q_A(x - x_A) - \frac{q}{2}(x - x_A)^2 \\ Q_{AB}(x) &= Q_A - q(x - x_A) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中:  $y_A$ 、 $\theta_A$ 、 $M_A$ 、 $Q_A$  为 AB 段的初参数, 表示  $x_A$  处管棚的挠度、转角、弯矩与剪力, 根据变形连续条件, 有:

$$y_A = y_{OA}(x_A) \quad \theta_A = \theta_{OA}(x_A) \quad M_A = M_{OA}(x_A) \quad Q_A = Q_{OA}(x_A) \quad (8)$$

3) BD 段:

$$\left. \begin{aligned} y_{BD}(x) &= y_B \varphi_1(x - x_B) + \theta_B \frac{1}{2\alpha_0} \varphi_2(x - x_B) - M_B \frac{2\alpha_0^2}{bk_0} \varphi_3(x - x_B) - \\ &\quad Q_B \frac{\alpha_0}{bk_0} \varphi_4(x - x_B) + \frac{q}{bk_0} [\varphi_1(x - x_D) - \varphi_1(x - x_B)] \\ \theta_{BD}(x) &= -y_B \alpha_0 \varphi_4(x - x_B) + \theta_B \frac{1}{2\alpha_0} \varphi_1(x - x_B) - M_B \frac{2\alpha_0^3}{bk_0} \varphi_2(x - x_B) - \\ &\quad Q_B \frac{2\alpha_0^2}{bk_0} \varphi_3(x - x_B) - \frac{q\alpha_0}{bk_0} [\varphi_4(x - x_D) - \varphi_4(x - x_B)] \\ M_{BD}(x) &= y_B \frac{bk_0}{2\alpha_0^2} \varphi_3(x - x_B) + \theta_B \frac{bk_0}{4\alpha^3} \varphi_4(x - x_B) + M_B \varphi_1(x - x_B) + \\ &\quad Q_B \frac{1}{2k_0} \varphi_2(x - x_B) + \frac{q}{bk_0} [\varphi_3(x - x_D) - \varphi_3(x - x_B)] \\ Q_{BD}(x) &= y_B \frac{bk_0}{2\alpha_0^2} \varphi_2(x - x_B) + \theta_B \frac{bk_0}{4\alpha_0^3} \varphi_3(x - x_B) + M_B \alpha_0 \varphi_4(x - x_B) + \\ &\quad Q_B \varphi_1(x - x_B) + \frac{q}{2k_0} [\varphi_2(x - x_D) - \varphi_2(x - x_B)] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中:  $y_B$ 、 $\theta_B$ 、 $M_B$ 、 $Q_B$  为 BD 段的初参数, 根据变形连续条件, 有:

$$y_B = y_{BD}(x_B) \quad \theta_B = \theta_{BD}(x_B) \quad M_B = M_{BD}(x_B) \quad Q_B = Q_{BD}(x_B) \quad (10)$$

4) DE 段: 根据前面的假定, 认为 D 点以后土体未受扰动, 此段管棚相当于一个传力结构, 所受为平衡力, 因此没有变形。故对此段不予讨论。

值得说明的是, 当掌子面位于管棚支护的起始或中间区段, 此时有  $x_D \leq L$ , 存在 DE 段。但是随着掌子面的推进, 当掌子面位于管棚支护的末端时, 即  $x_D > L$  时, 这种情况下 DE 段不存在。因此, 分两种情况讨论管棚末端边界条件:

①  $x_D \leq L$ , 根据前面假定, 认为  $x = x_D$  处管棚无变形, 即

$$y_{BD}(x_D) = 0 \quad \theta_{BD}(x_D) = 0 \quad (11)$$

②  $x_D > L$ , 此时管棚末端没有未扰动土体约束, 相当于自由端, 即

$$M_{BD}(L) = 0 \quad Q_{BD}(L) = 0 \quad (12)$$

综上所述, 由式(3)一式(12), 就可求得未知的初参数  $M_0$ 、 $Q_0$ , 再回到到式(3)、式(7)、式(9)就可求得管棚上任一点在第  $n$  步循环中所产生的单步位移、转角、弯矩及剪力。

从理论上说, 管棚在第  $n$  步所产生的位移是在管棚第  $n-1$  步已经产生的位移的基础上叠加产生的。但是, 在上述的计算中, 每步开挖循环中都是将管棚当作一根新的直梁来考虑的, 根据一边开挖一边喷混凝土衬砌的施工方法, 上一步管棚的位移已被“凝固”在土体之中, 所以对于管棚上序号为  $j$  的某一点, 它在第  $n$  步循环完成后的累计挠度应按式(13)求得:

$$y_{n,j} = \sum_{i=1}^n y_{ij} \quad (13)$$

式中:  $y_{n,j}$  为管棚上  $j$  点  $n$  步循环完成后的累计挠

度,  $y_{ij}$  为管棚上  $j$  点第  $i$  步循环产生的单步挠度, 即利用式(3)、式(7)、式(9) 计算求得的挠度值。

同理, 对于转角也有类似关系。

但是对于剪力和弯矩则不具有上述关系, 因为管棚每步的平衡条件是独立的, 和管棚是直梁或弯梁并没有关系。因此, 由式(3)、式(7)、式(9) 计算直接可求得管棚上  $j$  点第  $n$  步循环完成后的弯矩和剪力。

## 2 算例

南京某地下通道主通道, 其结构断面见图 3, 埋深 2.5 m, 通道开挖宽度 7.2 m, 开挖高度 4.2 m, 长 30.0 m。通道采用复合式衬砌, 初支喷射 C25, 厚度 30 cm, 二次衬砌为 C30 砼, 厚 40 cm。由于埋深较浅, 为控制地表沉降, 采用超前管棚预支护、全断面开挖的方法。

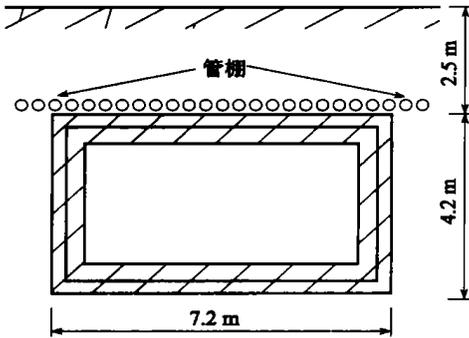


图3 地下通道结构断面图

管棚采用直径  $\phi 125$  mm、壁厚 6 mm、节长 3 m 或 6 m 的无缝钢管, 长度 30 m, 钢管环向间距 30 cm, 仰角  $1.5^\circ \sim 3.0^\circ$ , 接头搭距不小于 1.0 m。钢管内灌以水泥砂浆, 以增强管棚的刚度和强度。

### 2.1 解析计算

设计开挖分 15 步完成, 进尺 2 m, 考虑到开挖与初期支护建成并达到一定强度之前存在着时间差, 存在局部悬空面, 因而每次掌子面后方空出 1.0 m 的未支护区域。随着开挖的进行, 适时地将已支护区段的地基床系数由土体地基系数更换为新的组合地基系数以模拟衬砌的支护效果, 同时将掌子面后方 1 m 区段内的地基系数置零。采用解析计算和数值模拟计算两种方法:

#### 1) 解析计算

根据前面建立的管棚计算模型, 利用 Maple 数学软件强大的符号计算功能, 通过编辑函数可以计算出管棚在每一开挖循环步下其上任一点的挠度、转角、弯矩与剪力。计算参数见表 1。

表 1 解析法管棚计算参数

$b/m$	$k_0/(Pa \cdot m^{-1})$	$k_2/(Pa \cdot m^{-1})$	$EI/(N \cdot m^2)$	$q/(N \cdot m^{-1})$
0.125	$2.5 \times 10^7$	$1.0 \times 10^9$	$9.32 \times 10^5$	$1.36 \times 10^4$

注: 表中  $EI$  考虑了管棚注浆的影响, 计算方法见文献 [7]

#### 2) 有限差分数值模拟

采用 FLAC3D 数值模拟计算。由于全断面开挖, 计算模型取其一半, 模型尺寸为  $30 m \times 9.0 m \times 11.2 m$  (见图 4)。采用位移边界条件, 底部竖向固定约束, 前后两端纵向固定约束, 左右横向固定约束, 顶部无约束。由于二次衬砌只是作为长期安全储备, 施工阶段不承受荷载, 故建模时未考虑。

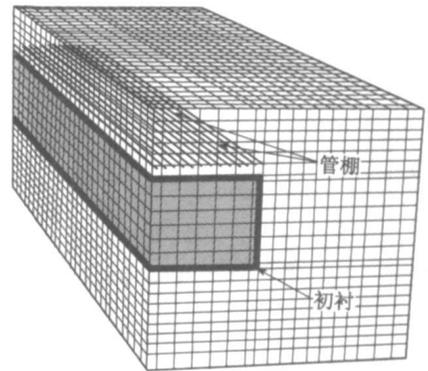


图4 数值计算模型

衬砌以实体单元来模拟, 管棚以 beam 单元来模拟。计算参数见表 2。

表 2 数值模拟计算参数

土体	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	$E/MPa$	$\mu$	$c/kPa$	$\varphi/(^\circ)$
素填土	$1.6 \times 10^3$	39.5	0.33	23.0	18.7
粉质粘土	$1.84 \times 10^3$	50.0	0.30	17.0	20.0
粉细砂、粉土	$1.88 \times 10^3$	91.0	0.19	36.0	31.0
初衬	$2.60 \times 10^3$	$3.0 \times 10^4$	0.20		

### 2.2 结果分析

分别采用解析法和数值法计算, 根据计算结果来比较分析管棚的挠度、转角、弯矩和剪力。

#### 2.2.1 挠度与转角

根据解析法计算的管棚各单步循环中挠度曲线见图 5 (为清晰表示, 图中只显示了第 1、5、10、14 步

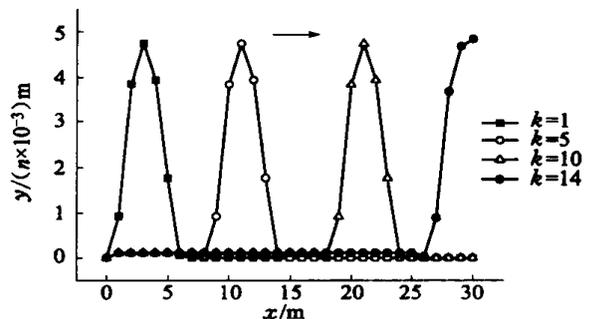


图5 管棚全段单步挠度曲线图

的挠度曲线)。由图可知,单步施工循环中掌子面附近管棚挠度增量最大,犹如一个波峰,随着掌子面的推进,波峰也随之向前移动。

图 6(a)、图 6(d) 为分别利用解析法和数值模拟

方法得出的管棚在第 1、5、10、15 步完成时,管棚的累计挠度。从图中可以看出二者的趋势是一致的,在管棚的中间区段,累计挠度几乎是一样的。转角也具有类似挠度的规律。

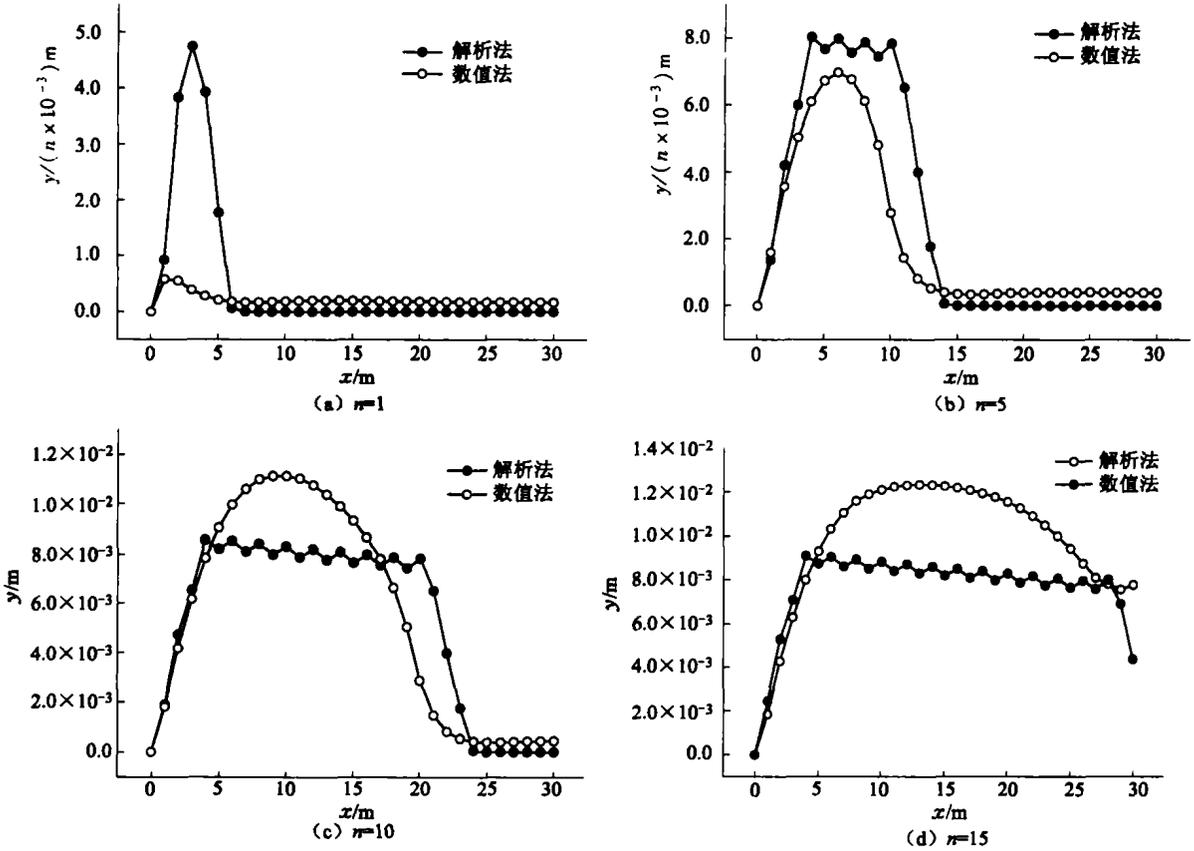


图 6 管棚累计挠度曲线图

2.2.2 弯矩和剪力

图 7 中为分别利用解析法和数值法的管棚在完成第 1、5、10、15 步循环时,管棚的弯矩图。

由图 7 可以看出,两种方法计算得出的弯矩的总体变化趋势是相同的,极值均出现在掌子面附近和管棚的起始端处,这和施工实际是相符合的。但是注意到两种方法在数值上有差异,这是由于以下两个方面的原因造成的:

1) 采用解析法计算时,式(7)和式(9)所表达的变形连续条件,在每步的计算中都是将管棚当作一个没有初始变形的“直管棚”,而忽略了此前的管棚上各点的挠度与转角。为了弥补这个累计的影响,在计算管棚的累计挠度时,采用式(12)。因此,图 6 所表达的两种方法计算的管棚的累计挠度比较接近。解析计算中,如果在变形连续中引入已存在的挠度和转角,那么最后需要求解一个迭代的方程组,而且随着开挖步数的增加,迭代的次数也在增加,求

解的难度也随之增加。

2) 解析法采用的是荷载-结构模式,没有考虑土体与结构的相互作用,只是将土体视为荷载加在管棚上;数值模拟采用有限差分,将管棚(beam 结构单元)分为有限段数,每段通过节点与土体相连接,其连接条件是位移分量为刚性、旋转分量自由<sup>[8]</sup>。

管棚的剪力也具有类似弯矩的规律。

3 结论

1) 单步开挖循环中,掌子面附近管棚的局部变形增量最大,占管棚总变形的 60% 以上。因此,在不影响施工的前提下,应尽量减少掌子面后方悬空距离,及时对掌子面附近进行封闭,这与减小拱顶沉降是一致的。

2) 单步开挖循环中,掌子面附近管棚的弯矩和剪力都比较大,说明管棚能够将上方荷载转移到掌子面附近一定范围内。另外,套拱处弯矩和剪力也较大。因此,施工时,应对这两处重点监测。

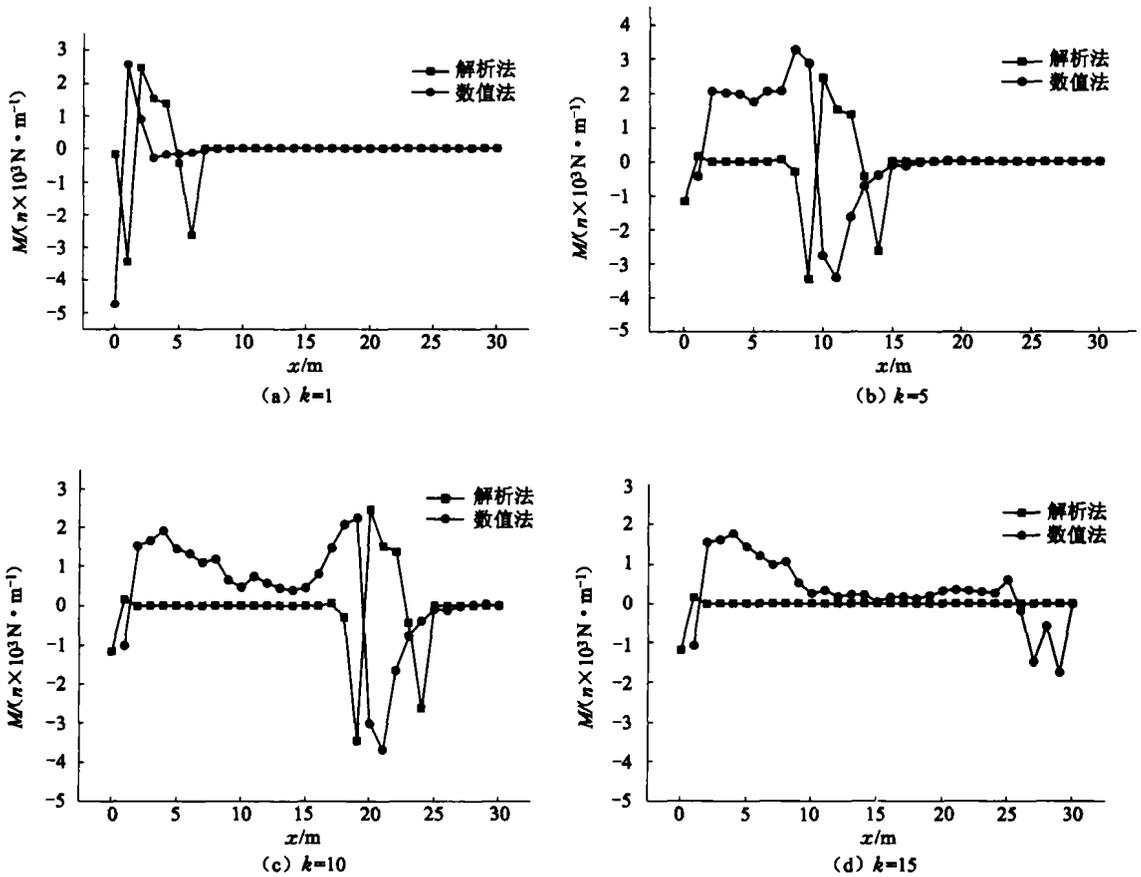


图7 管棚弯矩图

综上所述,在管棚预支护作用下的浅埋地下工程开挖中,将管棚视为 Winkler 模型的弹性地基梁,能够较好地反映管棚的受力机理,计算结果符合工程经验以及数值计算的结果,特别是对于管棚的挠度的计算有较高的精确度,可以用来评估拱顶的沉降,为施工及开挖设计提供参考。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 青山侑,古川公毅. [图解] 东京の地下技术[M]. 东京: 大日本印刷株式会社, 2001.
- [ 2 ] 彭宇民. 浅谈长管棚在土介质中的失效及其预防措施[J]. 隧道建设, 2001, 21(2): 29-31.
- [ 3 ] 杨春明. 地铁站过街通道管棚拉管法施工[J]. 铁道建

筑技术, 2005(2): 30-33.

- [ 4 ] 张川, 杨春满, 左永江. 松软地层水平管棚工艺参数的研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(6): 607-609.
- [ 5 ] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2004.
- [ 6 ] 朱合华, 张子新, 廖少明. 地下建筑结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [ 7 ] 樊晓, 陈忠范. 钢管混凝土抗弯刚度的分析及应用[J]. 常州工学院学报, 2005, 18(增刊): 64-68.
- [ 8 ] [s. n.]. FLAC-3D. Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions[M]. Minnesota: Itasca Consulting Group Inc, 2003.

收稿日期: 2006-11-21