

文章编号: 1000-7598-(2008)01-0161-06

盾构管片设计改进惯用法模型及其内力解析解

侯公羽¹, 杨悦², 刘波¹

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 黑龙江科技学院, 哈尔滨 150027)

摘 要: 管片设计一直是地铁设计中亟待解决的难题之一。管片计算模型的建立主要是考虑接头和土层抗力两种因素对结构的影响。对现有管片计算模型的接头简化进行了改进, 推导了改进惯用法模型的内力和位移求解公式; 并结合北京地铁 10 号线工程实例资料, 对惯用法模型及改进模型进行了对比分析, 与数值计算结果进行了综合验证分析。研究表明, 推导的公式是可靠的, 对地铁管片的设计和施工具有理论和实践意义。

关 键 词: 管片内力; 改进惯用法模型; 接头刚度折减; 解析解

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

Improved joint model with routine method and an analytical solution of its inner forces

HOU Gong-yu¹, YANG Yue², LIU Bo¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China;

2. Heilongjiang College of Technology, Harbin 150027, China)

Abstract: The design of segments is still one of biggest problems in the design of metro which are required to be solved. For building calculating model of segments, the effects of joint and ground reaction on the structure are considered mainly. We improve simplification of joint in the calculating model of segments, and deduce the formulae for solving inner forces and displacement problems in the improved model with routine method. Taking Beijing Metro Line No.10 for example, the routine method model is analyzed and compared with its improved model; and the results of numerical solution method are analyzed by comprehensiveness and verification. The study results show that the formulae derived are reliable, which are significant to the design and construction of tunnel segments in theory and practice.

Key words: segment inner force; improved routine method; joint stiffness reduction; analytical solution

1 引 言

地铁管片采用装配式衬砌时, 衬砌结构是由圆弧形管片拼装成环, 每环之间逐一连接而成的。管片与管片之间, 环与环之间通过螺栓连接, 对于如何估计管片接头的力学性态是一大难题^[1-4]。

目前, 在地铁管片设计中, 使用较多的是惯用法模型^[5]。惯用法模型是假定接头和管片的刚度相等、土层被动抗力按照假设分布。这种模型简化显然与实际工程状况不符。在不考虑整体稳定性时, 惯用法模型计算的内力偏大、变形偏小^[6]。

随着地铁建设的快速发展, 如何准确计算装配式衬砌管片的内力, 是管片设计的当务之急。

本文对目前广泛应用的惯用法模型的接头简化提出了改进模型, 即对接头部位的刚度进行有效的折减, 推导了改进惯用法模型的内力和位移求解公式。结合北京地铁 10[#] 线亮马河站至农展馆站区间段勘测与设计资料, 对惯用法模型及其改进模型进行了对比分析, 与数值计算结果进行了综合验证分析。结果表明, 本文推导的公式是可靠的, 其结果对地铁管片的设计和施工具有理论和实践意义。

2 现用的惯用法模型的内力解析解

目前, 设计中常用的惯用法模型及其修正模型如图 1 所示^[7]。其中, p_1 为垂直荷载; q_1 , q_2 为水平荷载; q_r 为水平抗力; p_g 为自重; EI 为衬砌圆

收稿日期: 2006-12-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50304012; 50674095); 教育部博士点基金 (No. 20060290014); 北京市优秀人才培养资助项目 (No. 20071D1600700414)。

作者简介: 侯公羽, 男, 1965 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程、岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: hgyht@sohu.com, hgyht@sina.com

环抗弯刚度。惯用法模型将管片的各个截面处刚度及其接头部位的刚度均按 EI 处理。修正惯用法模型考虑到接头刚度的降低对管片的影响, 将惯用法模型管片的各个截面处刚度及其接头部位的刚度 EI 均同等程度地降低到 $k_1 EI$ 。显然这两种模型对接头的简化处理与实际情况还相差甚远。

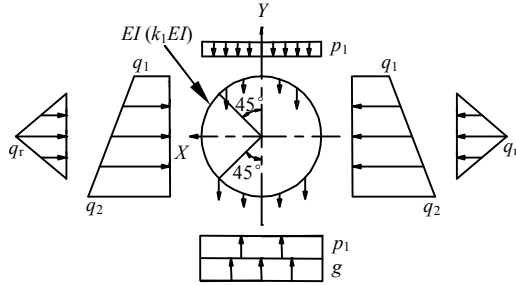


图 1 惯用法模型及其修正模型

Fig.1 Routine method model and its modified model

模型的内力计算公式如下^[7]:

荷载 p_1 引起的内力为

$$M_{p_1} = p_1 R_c^2 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{2} \sin^2 \varphi \right) \quad (1)$$

$$N_{p_1} = p_1 R_c \sin^2 \varphi \quad (2)$$

$$Q_{p_1} = -p_1 R_c \sin \varphi \cos \varphi \quad (3)$$

荷载 q_1 引起的内力为

$$M_{q_1} = q_1 R_c^2 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{2} \cos^2 \varphi \right) \quad (4)$$

$$N_{q_1} = q_1 R_c \cos^2 \varphi \quad (5)$$

$$Q_{q_1} = q_1 R_c \sin \varphi \cos \varphi \quad (6)$$

荷载 q_2 引起的内力为

$$M_{q_2} = \frac{1}{48} q_2 R_c^2 (6 - 3 \cos \varphi - 12 \cos^2 \varphi + 4 \cos^3 \varphi) \quad (7)$$

$$N_{q_2} = \frac{1}{16} q_2 R_c^2 (\cos \varphi + 8 \cos^2 \varphi - 4 \cos^3 \varphi) \quad (8)$$

$$Q_{q_2} = \frac{1}{16} q_2 R_c^2 (\sin \varphi + 8 \sin \varphi \cos \varphi - 4 \sin \varphi \cos^2 \varphi) \quad (9)$$

荷载 q_r 引起的内力为

$$M_{q_r} = q_r R_c^2 (0.234 6 - 0.353 6 \cos \varphi) \quad (0 \leq \varphi \leq \pi/4) \quad (10)$$

$$M_{q_r} = q_r R_c^2 (-0.347 8 + 0.5 \sin^2 \varphi + 0.235 7 \cos^2 \varphi) \quad (\pi/4 \leq \varphi \leq \pi/2) \quad (11)$$

$$N_{q_r} = 0.353 6 q_r R_c^2 \cos \varphi \quad (0 \leq \varphi \leq \pi/4) \quad (12)$$

$$N_{q_r} = q_r R_c^2 (-0.707 1 \cos \varphi + \cos^2 \varphi + 0.707 1 \sin^2 \varphi \cos \varphi) \quad (\pi/4 \leq \varphi \leq \pi/2) \quad (13)$$

$$Q_{q_r} = q_r R_c^2 0.353 6 \sin \varphi \quad (0 \leq \varphi \leq \pi/4) \quad (14)$$

$$Q_{q_r} = q_r R_c^2 (\sin \varphi \cos \varphi - 0.707 1 \cos^2 \varphi \sin \varphi) \quad (\pi/4 \leq \varphi \leq \pi/2) \quad (15)$$

荷载 g 引起的内力为

$$M_g = g R_c^2 \left(\frac{3\pi}{8} - \varphi \sin \varphi - \frac{5}{6} \cos \varphi \right) \quad (0 \leq \varphi \leq \pi/2) \quad (16)$$

$$M_g = g R_c^2 \left[-\frac{\pi}{8} + (\pi - \varphi) \sin \varphi - \frac{5}{6} \cos \varphi - \frac{\pi}{2} \sin^2 \varphi \right] \quad (\pi/2 \leq \varphi \leq \pi) \quad (17)$$

$$N_g = g R_c^2 \left(\varphi \sin \varphi - \frac{1}{6} \cos \varphi \right) \quad (0 \leq \varphi \leq \pi/2) \quad (18)$$

$$N_g = g R_c^2 \left[-(\pi - \varphi) \sin \varphi - \frac{1}{6} \cos \varphi + \pi \sin^2 \varphi \right] \quad (\pi/2 \leq \varphi \leq \pi) \quad (19)$$

$$Q_g = g R_c^2 \left(-\varphi \cos \varphi - \frac{1}{6} \sin \varphi \right) \quad (0 \leq \varphi \leq \pi/2) \quad (20)$$

$$Q_g = g R_c^2 \left[-R_c (\pi - \varphi) \sin \varphi - \frac{1}{6} \sin \varphi - \pi \sin \varphi \cos \varphi \right] \quad (\pi/2 \leq \varphi \leq \pi) \quad (21)$$

式中: R_c 为管片衬砌的半径; φ 为截面夹角位置。

3 改进的惯用法模型及其内力和位移公式推导

3.1 力学模型的建立

本文的改进惯用法模型是, 将管片的各个截面处刚度按管片材料 EI 处理, 将其接头部位的刚度按 k_θ 进行刚度折减处理, 如图 2。显然, 改进的惯用法模型更符合实际情况。为了计算方便, k_θ 取接头弯曲刚度系数 ($\text{kN} \cdot \text{m/rad}$)。

以实际工程为例, 整个衬砌环分为 6 块管片, 即 3 块标准块 (中心角 67.5°), 2 块邻接块 (中心角 67.5°), 1 块封顶块 (中心角 22.5°), 如图 3。由于荷载和结构均对称, 取其一半计算, 位移求解模型如图 4, 内力求解模型如图 5。

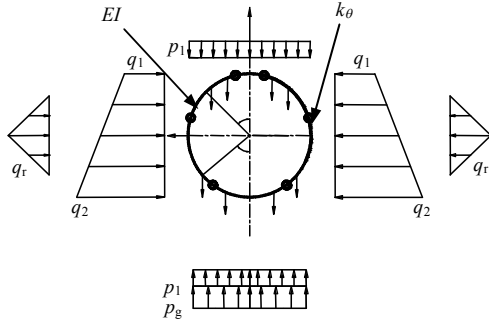


图2 本文改进的惯用法模型
Fig.2 Improved joint model in the context

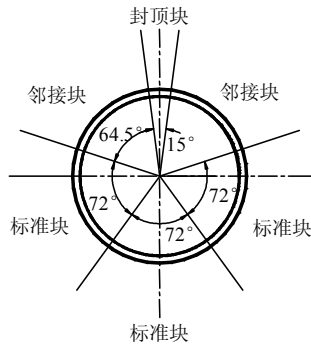


图3 管片拼装图
Fig.3 Segment erections diagram

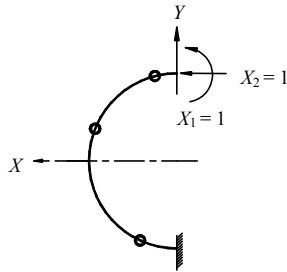


图4 位移求解模型
Fig.4 Model of solving displacement

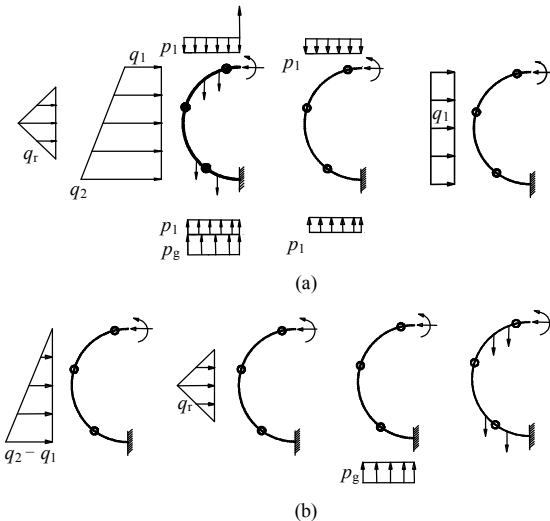


图5 内力求解模型
Fig.5 Model of solving inner forces

为了分析不均匀的弹性铰接圆形结构, 采用结构力学的力法求解内力。设坐标原点位于圆心, X 轴向左为正, Y 轴向上为正。极坐标表示时, 换算关系为 $x = R \sin \varphi$, $y = R \cos \varphi$, $ds = R d\varphi$, R 为管片衬砌的半径。内力符号约定, 弯矩 M 以使管片内侧受拉为正, 轴力 N 以使截面受拉为正, 剪力 Q 以使微段顺时针转动为正。

3.2 内力公式推导的结果

根据力法原理, 本文改进模型中 (图5) 荷载 i 作用下管片任意截面上的内力 M_i , N_i 和 Q_i 分别为

$$M_i = \overline{M}_1 X_1 + \overline{M}_2 X_2 + M_{P(i)} = X_1 + R(1 - \cos \varphi) X_2 + M_{P(i)} \quad (22)$$

$$N_i = \overline{N}_1 X_1 + \overline{N}_2 X_2 + N_{P(i)} = X_2 \cos \varphi + N_{P(i)} \quad (23)$$

$$Q_i = \overline{Q}_1 X_1 + \overline{Q}_2 X_2 + Q_{P(i)} = -X_2 \sin \varphi + Q_{P(i)} \quad (24)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq \varphi \leq \pi \\ M_{P(1)} &= -\frac{1}{2} p_1 R^2 \sin^2 \varphi \\ N_{P(1)} &= p_1 R \sin^2 \varphi \\ Q_{P(1)} &= p_1 R \sin \varphi \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq \varphi \leq \pi \\ M_{P(2)} &= -\frac{1}{2} q_1 R^2 (1 - \cos \varphi)^2 \\ N_{P(2)} &= -q_1 R (1 - \cos \varphi) \cos \varphi \\ Q_{P(2)} &= q_1 R (1 - \cos \varphi) \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq \varphi \leq \pi \\ M_{P(3)} &= \frac{1}{12} (q_2 - q_1) R^2 (1 - \cos \varphi)^3 \\ N_{P(3)} &= -\frac{1}{4} (q_2 - q_1) R (1 - \cos \varphi)^2 \cos \varphi \\ Q_{P(3)} &= \frac{1}{4} (q_2 - q_1) R (1 - \cos \varphi)^2 \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

$$\left. \begin{aligned} \pi/4 \leq \varphi \leq \pi/2 \\ M_{P(4)1} &= \frac{1}{12} k \delta R^2 \cdot \\ & (2\sqrt{2} \cos^3 \varphi + 6 \cos^2 \varphi + 3\sqrt{2} \cos \varphi - 1) \\ N_{P(4)1} &= -k \delta R \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \cos^3 \varphi - \cos^2 \varphi + \frac{\sqrt{2}}{4} \cos \varphi \right) \\ Q_{P(4)1} &= k \delta R \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \cos^2 \varphi - \cos \varphi + \frac{\sqrt{2}}{4} \right) \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

$$\left. \begin{aligned} \pi/2 \leq \varphi \leq 3\pi/4 \\ M_{P(4)2} &= -\frac{1}{12}k\delta R^2(1+6\cos^2\varphi+2\sqrt{2}\cos^3\varphi) \\ N_{P(4)2} &= -k\delta R\left(\cos\varphi+\frac{\sqrt{2}}{2}\cos^2\varphi\right)\sin\varphi \\ Q_{P(4)2} &= k\delta R\left(\cos^2\varphi+\frac{\sqrt{2}}{2}\cos^3\varphi\right) \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

$$\left. \begin{aligned} 3\pi/4 \leq \varphi \leq \pi \\ M_{P(4)3} &= -\frac{\sqrt{2}}{2}k\delta R^2\cos\varphi \\ N_{P(4)3} &= -\frac{\sqrt{2}}{2}k\delta R\cos\varphi \\ Q_{P(4)3} &= -\frac{\sqrt{2}}{2}k\delta R\sin\varphi \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

$$\left. \begin{aligned} \pi/2 \leq \varphi \leq \pi \\ M_{P(5)} &= -\frac{1}{2}p_g R^3(1-\sin\varphi)^2 \\ N_{P(5)} &= -p_g R(1-\sin\varphi)\sin\varphi \\ Q_{P(5)} &= -p_g R(1-\sin\varphi)\cos\varphi \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq \varphi \leq \pi \\ M_{P(6)} &= -gR^2(\cos\varphi+\varphi\sin\varphi-1) \\ N_{P(6)} &= gR\varphi\sin\varphi \\ Q_{P(6)} &= gR\varphi\cos\varphi \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

式中: δ 为衬砌水平直径处最终变形值。

各种工况下的 X_1, X_2 如下:

(1) 第 1 种工况

$$X_1 = \frac{1.232p_1R^4}{E^2I^2} + \frac{2.035p_1R^3}{Elk_\theta} + \frac{0.8395p_1R^2}{k_\theta^2} \quad (33)$$

$$X_2 = \frac{0.32p_1R^2}{Elk_\theta} + \frac{0.2728p_1R}{k_\theta^2} \quad (34)$$

(2) 第 2 种工况

$$X_1 = \frac{1.2325qR^4}{E^2I^2} - \frac{0.9973q_1R^3}{Elk_\theta} - \frac{0.8487q_1R^2}{k_\theta^2} \quad (35)$$

$$X_2 = \frac{4.93q_1R^3}{E^2I^2} + \frac{9.712q_1R^2}{Elk_\theta} + \frac{4.6933q_1R}{k_\theta^2} \quad (36)$$

(3) 第 3 种工况

$$X_1 = \left(\frac{0.5137(q_2-q_1)R^4}{E^2I^2} + \frac{0.86(q_2-q_1)R^3}{Elk_\theta} + \frac{0.3958(q_2-q_1)R^2}{k_\theta^2} \right) / A \quad (37)$$

$$X_2 = \left(-\frac{1.541(q_2-q_1)R^3}{E^2I^2} - \frac{3.007(q_2-q_1)R^2}{Elk_\theta} - \frac{1.4429(q_2-q_1)R}{k_\theta^2} \right) / A \quad (38)$$

(4) 第 4 种工况

$$X_1 = \frac{0.2261k\delta R^4}{E^2I^2} + \frac{0.7794k\delta R^3}{Elk_\theta} + \frac{0.4942k\delta R^2}{k_\theta^2} \quad (39)$$

$$X_2 = \frac{1.026k\delta R^3}{E^2I^2} - \frac{2.6861k\delta R^2}{Elk_\theta} - \frac{1.6657k\delta R}{k_\theta^2} \quad (40)$$

(5) 第 5 种工况

$$X_1 = \frac{0.2437p_gR^5}{E^2I^2} - \frac{0.3058p_gR^4}{Elk_\theta} - \frac{0.0853p_gR^3}{k_\theta^2} \quad (41)$$

$$X_2 = \frac{0.5234p_gR^4}{E^2I^2} + \frac{0.8195p_gR^3}{Elk_\theta} + \frac{0.2806p_gR^2}{k_\theta^2} \quad (42)$$

(6) 第 6 种工况

$$X_1 = \frac{2.4649gR^4}{E^2I^2} + \frac{3.7893gR^3}{Elk_\theta} + \frac{1.4447gR^2}{k_\theta^2} \quad (43)$$

$$X_2 = \frac{2.4649gR^3}{E^2I^2} - \frac{3.8258gR^2}{Elk_\theta} - \frac{1.3538gR}{k_\theta^2} \quad (44)$$

式中: $A = \frac{4.93R^2}{(EI)^2} + \frac{10.021R}{Elk_\theta} + \frac{4.9556}{k_\theta^2}$; k 为土层

抗力系数。

3.3 位移公式的推导

6 种工况下的总位移为 $\delta_A = \sum_{i=1}^6 \delta_{Ai}$ 。其中, δ_{Ai}

为第 i 种工况下的位移, 且

$$\delta_{A1} = \frac{2p_1R^4\cos\alpha}{3EI} + \frac{(0.33\cos\alpha - 0.007\sin\alpha)p_1R^3}{k_\theta} \quad (45)$$

$$\delta_{A2} = \frac{-q_1R^4(4\cos\alpha + 0.5\pi\sin\alpha)}{EI} + \frac{(1.25\sin\alpha + 1.19\cos\alpha)q_1R^3}{k_\theta} \quad (46)$$

$$\delta_{A3} = \frac{(q_2 - q_1)R^4}{EI} \left(\frac{3\pi}{32} \sin \alpha - \frac{1}{3} \cos \alpha \right) - \frac{(q_2 - q_1)R^3}{k_\theta} (0.39 \sin \alpha + 0.17 \cos \alpha) \quad (47)$$

$$\delta_{A4} = \frac{k\delta R^4}{EI} (0.266 \sin \alpha + 0.139 \cos \alpha) + \frac{k\delta R^3}{k_\theta} (0.42 \cos \alpha + 0.44 \sin \alpha) \quad (48)$$

$$\delta_{A5} = -\frac{P_g R^5}{EI} \left(\frac{1}{2} \sin \alpha + \frac{5}{6} \cos \alpha - \frac{\pi}{4} \cos^2 \alpha \right) - \frac{p_g R^4}{k_\theta} (0.05 \cos \alpha + 0.07 \sin \alpha) \quad (49)$$

$$\delta_{A6} = \frac{gR^3}{EI} \left(2 \cos \alpha - \frac{\pi^2 \cos \alpha}{4} \right) + \frac{gR^3}{k_\theta} (0.44 \sin \alpha - 0.29 \cos \alpha) \quad (50)$$

4 计算结果比较

4.1 工程实例

北京地铁10号线1期工程亮马河站至农展馆站区间(区间里程: k16+959.0~k17+645.3)段隧道工程物性参数如表1所示。地下水位标高为10.1 m, 隧道中心距离表面土层为33 m, 隧道直径为6.0 m。管片的拼装形式见图3。

表1 土层参数

Table1 Parameters of soils for Beijing Metro Line No.10

土层类型	标高 /m	重度 /kN·m ⁻³	弹性模量 /GPa	黏聚力 /kPa	摩擦角 /(°)	泊松比
人工填土	±0.00	17.0	10	10	8	0.4
粉质黏土	-1.50	20.0	10	38	15	0.3
黄色砂土	-10.10	20.5	30	10	30	0.25
黄色黏土	-13.40	19.5	15	50	20	0.33
黄色砂土	-21.50	20.5	30	10	30	0.25

4.2 模型及算例的基本参数

本文改进的惯用法模型如图2。管片材料为C50混凝土, 材料参数见表2。模型所受荷载见表3。接头的弯曲刚度系数取为 $k_\theta = 9\,800 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{rad}$ [6]。

表2 衬砌结构材料参数

Table 2 Material parameters of lining structure

单元类型	弹性模量 /GPa	泊松比	重度 /kN·m ⁻³	面积 /m ²	高度 /m	惯性矩 /m ⁴
BEAM3	34.5	0.3	2500	0.3	0.3	0.002 25

表3 衬砌结构承受荷载(单位: kPa)

Table 3 Loads acting on lining structure(unit: kPa)

土压力	水压力	水平土压力 矩形部分	水平土压力 三角形部分	水平侧向 抗力	自重反力
384	169	297	87	176	23.55

4.3 计算结果分析

将4.1节工程实例的荷载结构法和地层结构法数值计算结果^[4](取接头刚度折减为管片的1/10 000时的结果)、文献公式及本文推导公式在0°, 45°, 90°, 135°和180°等特殊截面处的内力计算结果整理如图6~8。

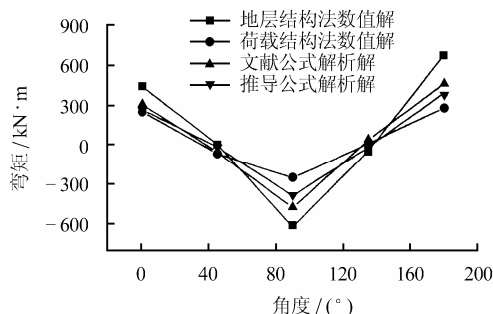


图6 弯矩值

Fig.6 Bending moment values

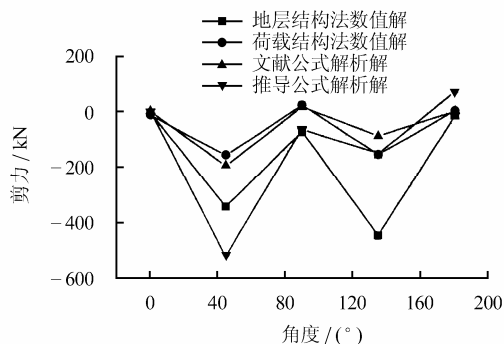


图7 剪力值

Fig.7 Shearing force values

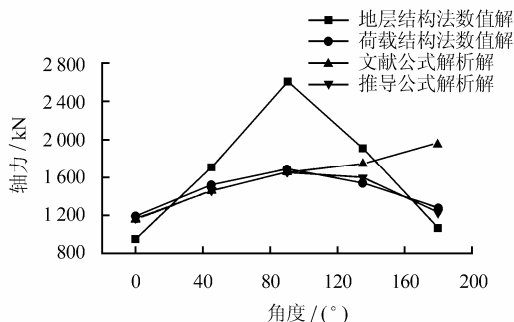


图8 轴力值

Fig.8 Axial force values

(1) 弯矩分析。由图 6 知, 两种数值解的弯矩值、文献公式计算的弯矩值及本文推导公式计算的弯矩值, 在衬砌各截面的变化趋势相同, 且同一截面处相差不大。在拱底截面上的弯矩绝对值从大到小的顺序是: 地层结构法的数值解、文献公式的计算结果、本文推导公式的计算结果、荷载结构法的数值解。这是由于接头的影响和周围地层抗力的不同假设引起的。

(2) 剪力分析。由图 7 知, 两种数值解的剪力值、文献公式计算的剪力值及本文推导公式计算的剪力值, 在衬砌各截面的变化趋势相同, 但与竖向夹角为 45° 和 135° 处数值相比相差较大, 这是由于接头处刚度较低以及对荷载处理技术不同所致。

(3) 轴力分析。由图 8 知, 两种数值解的轴力值、本文推导公式计算的轴力值, 在衬砌各截面的变化趋势相同。但与文献公式计算的轴力值相比, 在与竖向夹角 $90^\circ \sim 180^\circ$ 范围内的变化趋势是不同的。

综合比较 4 种计算结果, 初步判断为荷载结构法和地层结构法的数值解及本文推导公式求得的结果是可靠的, 其规律性是符合衬砌结构力学原理的, 现用的公式^[7]在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 范围内的计算结果可能存在问题。

(4) 由本文推导的位移公式计算的 0° , 45° , 90° , 135° 和 180° 截面处的实际位移如表 4 所示。由此可知, 本文推导的位移公式计算的 0° , 45° , 90° , 135° 和 180° 截面处的实际位移是符合现行规范要求的^[8]。

表 4 特殊截面处的位移 (取 $k_\phi = 9\,800\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$)
Table 2 Displacement in special cross-section
($k_\phi = 9\,800\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$)

角度/ $^\circ$	0	45	90	135	180
实际位移/m	0.460	0.289	0.233	0.152	0.075

5 结 论

(1) 本文对惯用法模型在管片接头部位的简化模型进行了改进, 考虑了管片接头部位刚度很小的工程事实, 并推导了改进模型的内力和位移计算公式。

(2) 文献中公式与数值解的计算结果相比较, 可以初步判定按本文改进模型推导的公式是可靠的。

(3) 本文推导的计算公式比文献中公式的形式稍微复杂些, 这是因为本文改进模型考虑了接头刚度的降低对衬砌内力的影响, 它比文献中的公式更符合实际。

(4) 初步研究结果表明, 文献计算的轴力值在与竖向夹角 $90^\circ \sim 180^\circ$ 范围内的计算结果可能存在问题, 有必要做进一步的研究、验证。

参 考 文 献

- [1] 蒋洪胜. 盾构法隧道管片接头的理论研究[博士学位论文 D]. 上海: 同济大学, 2000.
- [2] 朱世友. 国内地铁盾构区间隧道管片结构设计的现状与发展[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(6): 23—28.
ZHU Shi-you. Present status and development of segment design for the shield driven running tunnel of metro[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2002, 39(6): 230—28.
- [3] 朱伟, 胡如军, 钟小春. 几种盾构隧道管片设计方法的比较[J]. 地下空间, 2003, 23(4): 352—356.
ZHU Wei, HU Ru-jun, ZHONG Xiao-chun. Comparative study of several segment design methods for shield tunnels[J]. *Underground Space*, 2003, 23(4): 352—356.
- [4] 胡志平, 罗丽娟, 蔡志勇. 盾构隧道管片衬砌荷载模式比较分析[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(1): 19—22, 42.
HU Zhi-ping, LUO Li-juan, CAI Zhi-yong. Analysis of the different load models in the lining segments of shield tunnel[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2004, 18(1): 19—22, 42.
- [5] 夏明耀, 曾进伦. 地下工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [6] 杨悦. 盾构管片设计的内力计算模型研究[硕士学位论文 D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2006.
- [7] 程晓, 潘国庆. 盾构施工技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1999.
- [8] 首都规划建设委员会办公室. GB50157-92 地下铁道设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.