

文章编号: 1005-0523(2008)06-0016-05

不同荷载作用模式对盾构隧道管片内力的影响

黄小平¹ 杨新安¹ 雷震宇² 叶培旭¹ 王瑶¹

(1. 同济大学 城市轨道与铁道工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 200331)

摘要: 采用拱背非均布荷载作用模式, 利用理论计算公式结合弹性匀质圆环法对某城市地铁区间隧道衬砌管片进行内力计算。通过比较拱背均布荷载作用模式和非均布荷载作用模式的内力分布和计算配筋量可知, 两者内力分布存在较大差别, 前者的计算配筋量较后者大, 建议在今后的衬砌结构的设计和计算时采用拱背非均布荷载作用模式。

关键词: 非均布荷载; 均布荷载; 弹性匀质圆环法; 管片

中图分类号: U173

文献标识码: A

随着国民经济和人口密度的快速增长, 传统的地面交通系统已接近饱和, 无法解决日益增长的出行需求, 城市交通问题日渐突出。地铁以其运量大、速度快、安全性好、准时和节省能源等特点将成为城市公共交通的骨干。盾构法是在地面下暗挖隧道的一种施工方法, 是城市隧道工程的最主要施工方法。盾构法隧道设计的一个重要环节是采用合适的模型计算衬砌结构的内力。对于单圆盾构隧道来说, 较多采用弹性匀质圆环法进行内力计算。本文比较拱背均布荷载模式和非均布荷载模式的计算结果, 从中得出一些有价值的结论。

1 计算模型

1.1 弹性匀质圆环法

弹性匀质圆环法不考虑衬砌管片接头的刚度降低, 认为衬砌管片环是具有和管片主截面同样刚度且弯曲刚度的环。将接头部分弯曲刚度的降低, 评价为环整体的弯曲刚度的降低, 即管片环是具有 ηEI (η 为弯曲刚度有效率) 弯曲刚度均匀的环。进一步考虑到错接头部分弯矩的分配, 在从根据 ηEI 均匀弯曲刚度环计算出来的截面内力中, 对弯矩考虑一个增减 ξ (弯矩的提高率 $\xi \leq 1$) $(1 + \xi)M$ 为主截面的设计用弯矩, $(1 - \xi)M$ 为接头的设计用弯矩。管片为错缝拼装时的弯矩传递系数 ξ 、传递后的圆环刚度有效率 η 如表 1^[1]。

表 1 刚度有效率 η 和弯矩传递系数 ξ

管片种类	η	ξ
铸铁管片	0.9	0.1
复合管片	0.8	0.2
C 管片(箱型、平板型)	0.7	0.3

1.2 荷载作用模式

饱和软土地层中作用在圆形区隧道上的荷载包括圆环自重(g)、竖向地层压力(p)、地面超载、侧向水平地层压力(q)、侧向土体抗力(q_r)、地基反力(p_g)和静水压力(q_w)。

在以往采用弹性匀质圆环法计算结构内力时通常将拱背的地层压力近似地化成均布荷载^[1~3]。文献[1, 2]采用拱背均布荷载作用模式根据弹性中心法, 得出衬砌管片各截面内力计算, 结构内力计算荷载模型如图 1

收稿日期: 2008-09-25

作者简介: 黄小平(1984-), 女, 浙江温州人, 硕士研究生, 主要研究方向为交通隧道与地下工程。

所示。

国际隧道协会推荐的《盾构隧道管片衬砌设计指南》^[4]建议的拱顶均布土压力为 p_1 ; 拱背非均布土压力为 p_2 ; 拱底反力为均布力 p_g , 其总和等于结构自重 g 、结构上半拱圈所承受的土压力和上下水压力差之和。

本文认为应当考虑拱背非均布地层压力对结构内力计算的影响, 将这部分作用荷载记为 p_2 , 见图 2。

该结构为超静定结构, 内力计算采用弹性中心法计算。利用对称性取如图 3 所示的基本结构。由于结构和荷载对称, 拱顶剪力为零, 整个圆环为二次超静定结构。根据弹性中心处的相对角变位和相对水平变位等于 0 的条件, 可列出力法方程^[5]:

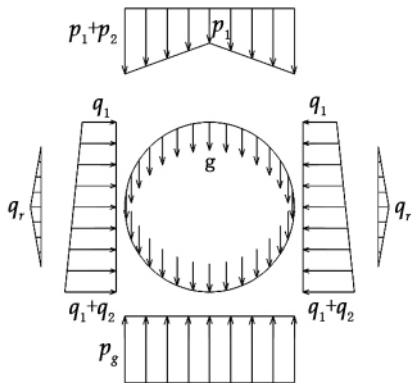


图 2 拱背非均布地层压力计算模型

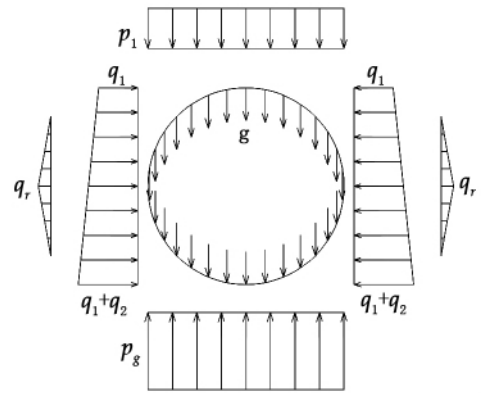


图 1 拱背均布荷载均布地层压力计算模型

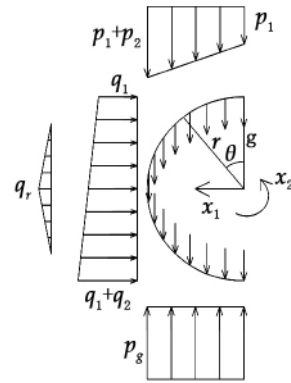


图 3 基本结构

$$\left. \begin{aligned} \delta_{11}x_1 + \Delta_{1p} &= 0 \\ \delta_{22}x_2 + \Delta_{2p} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= \frac{1}{EI} \int_0^\pi M_1^2 r d\theta = \frac{1}{EI} \int_0^\pi r d\theta = \frac{\pi r}{EI} \\ \delta_{22} &= \frac{1}{EI} \int_0^\pi M_2^2 r d\theta = \frac{1}{EI} \int_0^\pi (-r \cos\theta)^2 r d\theta = \frac{\pi r^3}{2EI} \\ \Delta_{1p} &= \frac{1}{EI} \int_0^\pi M_p r d\theta \\ \Delta_{2p} &= -\frac{r^2}{EI} \int_0^\pi M_p \cos\theta d\theta \\ M_\theta &= x_1 - x_2 \cos\theta + M_p \\ N_\theta &= x_2 \cos\theta + N_p \end{aligned}$$

M_p ——在基本结构中外荷载对圆环任意截面产生的弯矩;

M_θ ——圆环任意截面的弯矩;

N_θ ——圆环任意截面的轴力。

结构计算表明, 参考文献 [1_2] 中内力计算表中均布竖向地层压力一项应修改为拱顶均布竖向地层压力 p_1 和拱背非均布竖向地层压力 p_2 共同作用引起的弯矩和轴力计算公式。拱顶均布竖向地层压力 p_1 内力计算公式相同, 增加拱背非均布竖向地层压力 p_2 引起的内力, 计算公式见表 2。

表2 拱背非均布竖向地层压力 p_2 作用下内力计算表

内力形式	公式应用范围	内力	
		弯矩	轴力
非均布竖向地层压力 p_2	$\theta = 0 \sim \frac{\pi}{2}$	$p_2 r^2 \left(\frac{2}{9\pi} + \frac{1}{6\pi} \cos\theta - \frac{\sin^3\theta}{6} \right)$	$p_2 r \left(-\frac{1}{6\pi} \cos\theta + \frac{1}{2} \sin^3\theta \right)$
	$\theta = \frac{\pi}{2} \sim \pi$	$p_2 r^2 \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{3\pi} \cos\theta - \frac{1}{2} \sin\theta \right)$	$p_2 r \left(-\frac{1}{3\pi} \cos\theta + \frac{1}{2} \sin\theta \right)$

2 工程实例分析

2.1 工程概况

某城市地铁区间隧道上行线 794 m,下行线 770 m,隧道上覆土厚度最大约 10 m,最小约 3 m,属浅埋。盾构通过地层为第四层灰色淤泥质黏土,工程沿线地基土按其岩性、时代、成因及物理力学性质差异从上至下可划分为 7 层:(1)人工填土层;(2-1)褐黄色黏土;(2-2)灰色砂质黏土;(3)灰色淤泥质粉质黏土;(4)灰色淤泥质黏土;(5-1)灰色黏土;(5-2)灰色粉质黏土;(6-1)暗绿色黏土;(6-2)草黄色粉质黏土;(7-1)草黄色砂质黏土;(7-2)草黄色粉砂。各层的物理力学指标如表 3。

表3 土层物理力学性质

地层	层厚 (m)	含水量 (%)	容重 γ (kN/m ³)	空隙比 e	泊松比 μ	粘聚力 c (kPa)	摩擦角 φ (°)	压缩模量 (MPa)	变形模量 (MPa)
①杂填土	1.0				0.2	18.2	18	4.63	3.52
② ₁ 褐黄色黏土	1.5	34	18.7	0.967	0.2	17.7	17	4.21	3.37
② ₂ 灰色砂质黏土	3.5	33	18.7	0.917	0.2	6.3	21	11.03	6.87
③灰色淤泥质粉质黏土	2.5	45	17.6	1.241	0.2	13.2	9	2.21	1.38
④灰色淤泥质黏土	7.5	50	17.2	1.4	0.2	12.6	7.3	2.05	1.28
⑤ ₁ 灰色黏土	4.5	35	18.4	1.02	0.2	14.7	10	3.95	3.29
⑤ ₂ 灰色粉质黏土	2.0	35	18.2	1.02	0.2	15.3	9.6	3.99	3.53
⑥ ₁ 暗绿色黏土	3.0	24	20.1	0.667	0.2	25.0	19	7.20	6.31
⑥ ₂ 草黄色粉质黏土	1.0	26	19.5	0.769	0.2	17.1	20	6.93	5.78
⑦ ₁ 草黄色砂质黏土	7.0	30	18.9	0.853	0.2	2.5	24	10.41	9.25
⑦ ₂ 草黄色粉砂	12.0	28	19.3	0.781	0.2	2.0	25	13.75	12.38

该区间隧道由外径为 6 200 mm,内径为 5 500 mm 的预制钢筋混凝土衬砌管片通缝拼装而成。衬砌管片宽 1 000 mm,管片厚度 350 mm,每环分 6 块,1 块拱底块,2 块标准块,2 块邻接块和 1 块封顶块。预制衬砌混凝土标号 C50,抗渗标号 S8,衬砌管片纵环向联结螺栓共 (16 + 13) × 1 620 套,衬砌管片环缝及纵缝间防水采用弹性密封衬垫。

2.2 计算分析

2.2.1 荷载计算结果

分别计算最大覆土厚度和最小覆土厚度两种工况下隧道衬砌结构所承受的荷载值,见图 4 和图 5。弹性匀质圆环模型中,取刚度有效率 η 为 0.7。

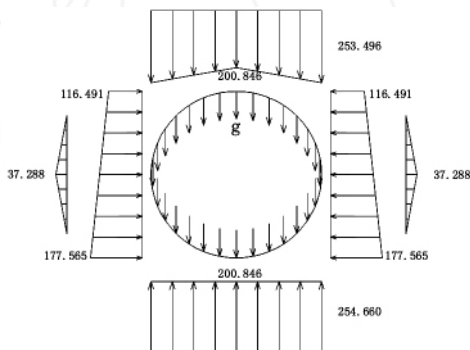


图4 最大埋深荷载分布图(单位 kN)

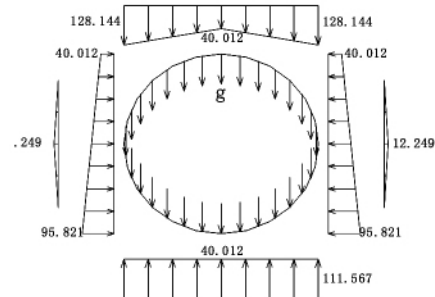


图5 最小埋深荷载分布图(单位 kN)

2.2.2 比较计算结果

用弹性匀质圆环模型分别采用拱背均布荷载模式和拱背非均布荷载模式对两种工况进行计算, 内力计算结果详见表 4 和图 6_7.

表 4 不同工况和荷载计算模型情况下的内力计算结果

θ (以垂直直径为 0° 量取的角度)	最小覆土厚度(工况一)				最大覆土厚度(工况二)			
	拱背均布荷载模式		拱背非均布荷载模式		拱背均布荷载模式		拱背非均布荷载模式	
	弯矩 (kN·m)	轴力 (kN)	弯矩 (kN·m)	轴力 (kN)	弯矩 (kN·m)	轴力 (kN)	弯矩 (kN·m)	轴力 (kN)
0	58	160	94	131	169	378	206	348
45	-5	216	7	209	-5	515	6	508
90	-30	264	-85	308	-97	631	-153	675
135	5	248	-17	286	5	549	-17	586
180	14	240	135	234	60	486	182	478

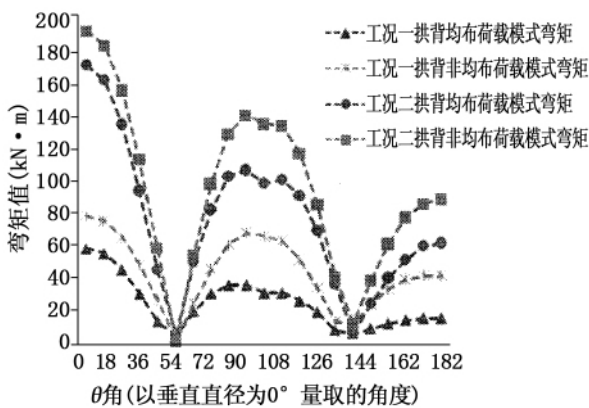


图 6 两种荷载模式不同工况的弯矩对比图

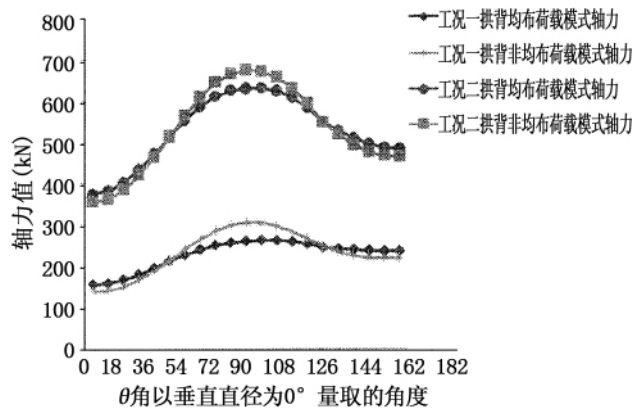


图 7 两种荷载模式不同工况的轴力对比图

由图 6 可以看出, 两种工况下拱背非均布荷载模式计算的弯矩值较拱顶均布荷载模式的弯矩值有所增加, 增加趋势和增加值较接近. 由图 7 可以看出, 两种工况轴力变化趋势接近. $\theta = 0 \sim 45^\circ$ 和 $\theta = 135 \sim 180^\circ$ 范围内轴力值略有减小, $\theta = 45 \sim 135^\circ$ 范围内轴力值增加幅度较大.

同比两种工况, 工况一的弯矩和轴力的变化比例都较工况二的大. 工况一弯矩的增量约占总弯矩的 20% ~ 60% 左右; 轴力的改变较弯矩小, 轴力的增量约占总轴力的 5% ~ 15% 左右, 在 $\theta = 90^\circ$ 位置达到最大. 工况二弯矩的增量约占总弯矩的 10% ~ 30% 左右, 在 $\theta = 45^\circ$ 位置达到最大; 轴力的改变较弯矩小, 轴力的增量约占总轴力的 3% ~ 6% 左右, 在 $\theta = 90^\circ$ 位置达到最大.

在取弯矩增大率 $\xi = 0.3$, 根据相关规范^[6-8]取荷载分项系数计算两组最不利内力组合(θ 为 0° 和 90°) 时的配筋量^[9], 计算结果见表 5.

表 5 配筋计算结果

工 况	计算模式	位置 θ	弯矩 (kN·m)	轴力 (kN)	配筋量 (mm ²)
最小覆土厚度 (工况一)	拱背均布荷载模式	0°	102	216	988.5
		90°	-53	356	700
	拱背非均布荷载模式	0°	165	177	1428.2
		90°	-149	415	913.6
最大覆土厚度 (工况二)	拱背均布荷载模式	0°	296	511	3004.3
		90°	-170	852	1071
	拱背非均布荷载模式	0°	362	470	3484
		90°	-268	912	1889.3

因为结构弯矩和轴力的改变, 使结构的受力状态发生改变, 从而导致结构的配筋量有所变化. 两种工况, 拱背非均布荷载模式计算的配筋量都大于拱背均布荷载模式计算的配筋量. 工况一在封顶块位置, 配筋量变化较大; 工况二在管片腰部位置配筋量变化较大. 根据拱背均布荷载模式计算得到的管片配筋量会偏小. 配

筋不足容易使结构无法承受现有的内力分布而造成结构的变形甚至破坏,造成巨大的经济损失。

3 结论

衬砌管片内力计算结果对管片结构设计具有重要的指导意义。地下结构的荷载分布计算是非常复杂的,通过比较拱背均布荷载模式和拱背非均布荷载模式结构内力的变化及配筋计算,得出以下结论:

- (1) 拱背不均匀荷载模式使结构的内力发生较大变化,结构的弯矩和轴力都较拱背不均匀荷载模式有所增加,弯矩增大较大。
- (2) 不同覆土厚度的区间隧道,弯矩和内力的变化趋势较接近,覆土厚度小的区间隧道变化幅度相对较大。
- (3) 拱背不均匀荷载模式计算的配筋量有所增加。覆土厚度较小的区间隧道,封顶块位置配筋量变化较大;覆土厚度较大的区间隧道,管片腰部位置配筋量变化较大。
- (4) 通过比较两种荷载模式的计算配筋量,建议结构设计计算中采用拱背非均布荷载模式进行计算。

参考文献:

- [1] 周顺华. 城市轨道交通结构工程[M]. 上海: 同济大学出版社, 2004. 173 - 186.
- [2] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991. 159 - 303.
- [3] 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): 20 - 42.
- [4] Working Group No. 2 International Tunnelling Association. Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(3): 303 - 331.
- [5] 李家宝. 结构力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999. 97 - 103.
- [6] GB50010 - 2002 混凝土结构设计规范[S].
- [7] GB50157 - 2003 地铁设计规范[S].
- [8] GB50009 - 2001 建筑结构荷载规范[S].
- [9] 郭玉海, 陈丹, 袁大军. 北京地铁盾构隧道管片设计合理性探讨[J]. 市政技术, 2006, 24(4): 244 - 247.

An Analysis on the Influence of Different Load Models on Internal Force of Shield Tunnel Linking

HUANG Xiao_ping¹, YANG Xin_an¹, LEI Zhen_yu², YE Pei_xu¹, WANG Yao¹

(1. Department of Urban Mass Rail Transportation and Railway Engineering, Tongji University, Shanghai 200092;
2. Institute of Railway and Urban Track, Tongji University, Shanghai 200331, China)

Abstract: The paper introduces uneven load in the arch_back to calculate the internal force in the linking of an interval tunnel for a metro line by theoretical formula and elastic uniform rigidity ring model. After comparing the distribution of internal force and the amount of reinforcing bars under two different load modes— even load and uneven load modes—in arch_back structure, there is a difference in the distribution of internal force. The even load mode needs more reinforcing bars, then the uneven load mode in the arch_back is suggested in the future calculation and design of tunnel structure.

Key words: uneven load; even load; elastic uniform rigidity ring model; linking

(责任编辑: 王全金)