

文章编号:1673-9469(2008)03-0026-04

盾构隧道管片衬砌内力计算方法对比分析

刘 琼¹, 吴雄志¹, 姚 捷², 袁洪升¹

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:论述了盾构隧道管片衬砌内力计算的梁-弹簧法和弹性匀质圆环法。结合一工程实例, 采用此两种方法对管片衬砌内力进行了计算, 并对计算的结果进行了对比分析。结果表明, 采用梁-弹簧法进行设计是安全的、经济的, 值得推广应用。

关键词:盾构隧道; 内力; 弹性匀质圆环法; 梁-弹簧法

中图分类号: O343

文献标识码: A

Comparison and analysis of methods of internal force calculations for shield tunnel lining

LIU Qiong¹, WU Xiong-zhi¹, Yao Jie², Yuan Hong-sheng¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The elastic-inhomogeneous-ring method and beam-spring methods of internal forces calculations for the shield tunnel lining are discussed in detail. As a traditional method of shield tunnel lining designing, the elastic-inhomogeneous-ring is safe but conservative. Combining with a practical engineering example, its internal forces were calculated respectively by the two methods. The results of these two methods were compared and analyzed, and drew the conclusion that the beam-spring method for the designing of the shield tunnel lining is safe and economical.

Key words: shield tunnel; internal forces; beam-spring method

近年来, 由于城市建筑、公共设施及各种交通日益繁杂, 地面拥挤的现象越来越严重, 地铁作为一种交通工具, 其发展规模越来越大, 但传统的施工方法已难以普遍使用, 因此, 盾构法以其独特的优势而得到越来越广泛的应用。目前盾构法隧道设计的一个重要环节是采用合适的方法计算衬砌结构的内力。

我国 20 世纪 90 年代多采用以经验性为主的简化模型的计算方法, 但简化模型因不能明示接头位置, 难以反映管片衬砌结构的实际受力状况。不过简化模型的计算方法操作方便, 可以用于初步确定盾构隧道管片参数。近年来, 我国西南交通大学和同济大学进行了管片力学模型的深入研究, 并利用梁-弹簧法进行盾构隧道的设计计算分析, 取得了很好的经济效益。目前, 地下结构的

设计方法有经验类比法、荷载结构法、地层结构法、收敛限制法。常用的是荷载结构法。其主要包括弹性匀质圆环法和梁-弹簧法。在工程实践中, 又多以弹性匀质圆环法为主。但弹性匀质圆环法在对实际情况假设时, 忽略了衬砌接头的影响, 并且土层抗力只考虑拱腰部分, 这使得计算结果偏于保守。而梁-弹簧法在衬砌全周都考虑了土层抗力, 是安全的、经济的^[1-2]。本文针对某地区地铁某区间盾构隧道, 用上述两种方法进行了内力计算, 并将计算结果进行了对比分析, 得出了一些对盾构隧道衬砌设计有参考价值的结论。

1 计算方法简介

1.1 弹性匀质圆环法

收稿日期: 2008-05-08

作者简介: 刘琼(1983-), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 从事岩土工程方面的研究。

弹性匀质圆环法是广大设计者广泛应用于盾构隧道结构设计的一种经典计算方法。该方法假定圆形衬砌在土体中为自由变形的弹性均质圆环,不考虑管片接头刚度变化的影响,将土层抗力假定为三角形分布荷载进行计算(在水平轴上下45°范围内),结构计算如图1,自由变形圆环内力求解采用弹性中心法^[3]。由于结构及荷载对称,拱顶剪力等于零,属二次超静定结构,取半结构进行计算。

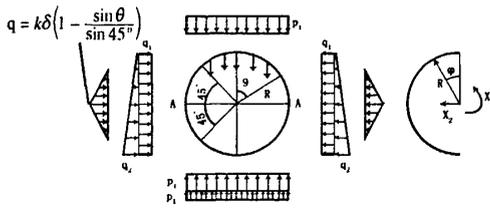


图1 结构计算简图

Fig.1 Structure calculation diagram

1.2 梁-弹簧法

梁-弹簧法用弹性地基弹簧来模拟衬砌与围岩的相互作用。梁-弹簧法将衬砌结构看成弹性地基上的圆环,当土体中管片衬砌产生变形时,衬砌周围的土体将阻止管片变形,即产生土体抗力。梁-弹簧法计算图式见图2。用有限元法,由于隧道纵向尺寸远大于环向截面尺寸,且沿纵向截面形式不变,因此简化为平面应变问题进行求解。在弹簧模型中,衬砌用梁单元模拟,围岩(土)与衬砌的共同作用用弹簧单元模拟,把衬砌结构离散为有限个梁单元。对于梁单元^[5],其单元刚度矩阵与结构力学中杆单元的单元刚度矩阵相同。在求得梁单元和弹簧单元刚度矩阵后,通过坐标变换和刚度集成,利用边界条件可求得梁单元和弹簧单元的内力、位移。

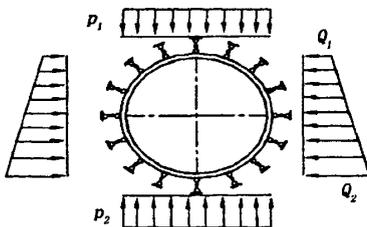


图2 梁-弹簧法计算简图

Fig.2 Calculation diagram of beam-spring method

2 荷载计算

在衬砌设计中必须考虑的荷载有土压力、水压力、静荷载(管片自重)、超载、地基反作用力。土压力分解为水平和垂直方向的土压力。计算土压力有两种方法:一种是将水压力作为土压力的一部分来考虑,另一种是将水压力和土压力分开计算,通常前者适用于黏性土,后者适用于砂质土。

垂直土压力作为作用于衬砌顶部的均布荷载,其大小宜根据隧道的覆土厚度、隧道的断面形状、外径和围岩条件来决定。如果覆土厚度小于隧道外径的两倍,为浅埋隧道,因不能获得土的成拱效果,故采用总覆土压力。当覆土厚度大于隧道外径两倍时,为深埋隧道,则需根据泰沙基理论^[6]计算出松动土柱高度,再计算隧道顶部竖向土压力:

$$B_1 = \frac{D}{2} \cot\left(\frac{\pi}{8} + \frac{\varphi}{4}\right)$$

$$h_0 = \frac{B_1 \left(1 - \frac{c}{B_1 \gamma}\right) [1 - \exp(-K_0 \frac{H}{B_1} \tan \varphi)]}{K_0 \tan \varphi} + \frac{p_0 \exp(-K_0 \frac{H}{B_1} \tan \varphi)}{\gamma} \quad (5)$$

$$p_e = \gamma h_0 \text{ 或 } p_e = \gamma' h_0$$

式中 D - 隧道外径(m); B_1 - 泰沙基隧道拱部松动区宽度之半(m); h_0 - 换算的土压力除以土的单位重度(m); K_0 - 侧向土压力与垂直土压力之比; H - 覆土厚度(m); φ - 土的内摩擦角(弧度); c - 土的粘聚力(kPa); γ - 土的重度(kN/m^3); γ' - 土的浮重度(kN/m^3); p_e - 松动土压(kPa); p_0 - 地面荷载(kPa)。

有关水平土压力、水压力、静荷载、地基反作用力等外荷载的计算方法详见文献[6]。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

某地区地铁某盾构区间隧道,隧道地面为东苑小区1~3楼,建于1993年,为8层框架结构住宅楼,该楼基础采用 $\Phi 480$ 沉管灌注桩,设计桩长为14m,为多桩承台。管片衬砌结构设计参数,混

凝土为 C50 高强混凝土,抗渗等级 S12。衬砌外径:6000mm、内径:5400mm、管片长度:1500mm、管片厚度:300mm。衬砌环由 1 块封顶块(K)、2 块邻接块(B、C)、3 块标准块(A1、A2、A3)组成,衬砌环采用错缝拼装,一般情况下,封顶块的位置偏离正上方 $\pm 18^\circ$ 。衬砌纵缝、环缝采用弯螺栓连接,其中每环纵缝采用 12 根 M24 螺栓,每个环缝采用 10 根 M24 螺栓。

根据地质钻孔资料可知,隧道地质分层从上到下有:①人工杂填土,厚 0.4~2.2m;②淤泥质粉质粘土,厚 2.6~4.6m;③冲-洪积土层,厚 3.4~4.0m;④花岗岩残积土,厚 8.6~15.2m;⑤花岗岩残积土,厚 7.0~18.0m;⑥花岗岩全风化层,厚 5.0~8.0m。此区间隧道埋深为 29.5m,根据规范^[7],本隧道为深埋隧道,Ⅴ级围岩,隧道顶部为⑤,洞身及底部为⑤及⑥。残积土④、⑤、花岗岩全风化⑥富水性弱,为不透水层。基岩裂隙水主要赋存于基岩强、中等风化裂隙中,透水性弱。

本段隧道主要地层的设计参数建议值见表 1。

3.2 计算分析

本文在内力计算的比较分析中,选用了统一的计算参数。主要包括:管片单位重量为 26kN/m³,管片的弹性模量取 3.47107 kN/m³,地下水位线:-7.5m, $H_w = 29.5 - 7.5 = 22.0\text{m}$ 。根据隧道周围的围岩主要是硬塑状花岗岩残积土⑤,隧道采取水土合算的方式,该盾构衬砌结构所受的荷载计算^[6]为竖直方向荷载:222kPa;衬砌自重荷载:24.49 kPa;下部地层抗力:246.49kPa;结构侧向顶部荷载:101.15kPa;结构侧向底部荷载:148.6 kPa;地基反作用力:110.295 kPa。

1)弹性匀质圆环法。根据上述弹性匀质圆环法的基本原理,采用 EXCEL 编制了相应的计算程序,对该段衬砌结构进行内力计算,得到了各砌块的结果为:封顶块:最大弯矩为 96.06(kN·m/m),对应的轴力为 991.51(kN/m);邻接块:最大弯矩为 122.67(kN·m/m),对应的轴力为 949.31(kN/m);标准块:最大弯矩为 108.67(kN·m/m),对应的轴力为 1067.01(kN/m)。计算结果如图 3

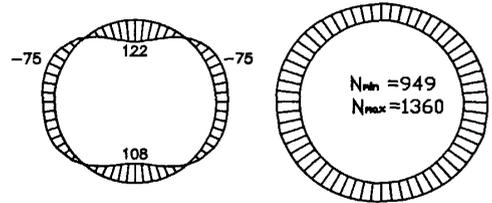


图3 弯矩与轴力图

Fig.3 Bending moment and axial force

2)梁-弹簧法。采用梁-弹簧模型进行计算,计算采用数值分析软件 PLAXIS 8.7 进行。梁的计算参数根据管片设计资料确定,而管片接头弹簧的抗弯刚度按照经验取正弯矩条件下为 50000kN·m/rad,负弯矩条件下抗弯刚度为 30000kN·m/rad。管片参数: $EI = 7.8e4$ (kN·m²/m), $EA = 1.035e7$ (kN/m),泊松比 $\mu = 0.167$ 。数值计算中模型尺寸取为 70m × 70m,隧道中心埋深为 32.5m。边界条件分为两类,一类为位移边界条件,一类为排水边界条件。位移边界条件中模型左右侧向边界只允许发生竖向位移,水平位移为零;模型底部位移为水平位移和双向位移均固定。排水边界条件中,隧道为不排水边界条件,地表为自由排水边界条件,其余为排水边界条件。计算结果见图 4。

表 1 土层分布及参数

Tab.1 Parameters and distribution of soil layers

土层	土层名称	天然重度 ρ (g/cm ³)	凝聚力 c (kPa)	内摩擦角 ϕ_c (°)	厚度 H (m)	压缩模量 MPa (E_{s-2})	变形模量 E_0 (MPa)	泊松比 (μ)	土的静止 侧压力系数 (ξ)	渗透系数 K_s (cm/s)
①	填土	1.86	12.00	24.3	2.6	5.59	4.0	0.35	0.54	1.42×10^{-6}
②	淤泥质土	1.74	4.60	5.3	3.6	2.17	1.1	0.40	0.67	3.38×10^{-5}
③	粉质粘土	1.86	11.90	13.6	3.7	4.46	15.0	0.35	0.54	1.90×10^{-6}
④	可塑残积土	1.80	20.00	23.6	11.9	4.04	20.0	0.32	0.47	2.34×10^{-5}
⑤	硬塑残积土	1.85	22.60	26.7	12.5	4.10	30.0	0.31	0.45	1.24×10^{-4}
⑥	全风化层	1.89	24.00	27.0	6.5	4.47	60.0	0.30	0.43	1.05×10^{-4}

计算结果,封顶块:最大弯矩为 $86.3(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m})$,对应的轴力为 $1010.8(\text{kN}/\text{m})$;邻接块:最大弯矩为 $109.2(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m})$,对应的轴力为 $1017.8(\text{kN}/\text{m})$;标准块:最大弯矩为 $97.3(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m})$,对应的轴力为 $1032.5(\text{kN}/\text{m})$ 。

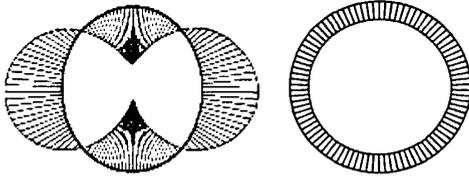


图4 梁-弹簧法弯矩和轴力图

Fig.4 Bending moment and axial force for beam-spring method

3) 对比分析

两种方法计算的结果比较如表2。

表2 计算结果比较

Tab. 2 Comparison of computational results

位置	弹性匀质圆环法		梁-弹簧法	
	最大弯矩 ($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$)	对应轴力 (kN/m)	最大弯矩 ($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$)	对应轴力 (kN/m)
标准块	108.67	1067.01	97.6	1032.5
邻接块	122.67	949.31	109.2	1017.8
封顶块	96.06	991.51	86.3	1010.8

由计算结果图可知,梁-弹簧法和弹性匀质圆环法计算得到的内力分布规律基本一致,正最大弯矩位置相同,均在圆环顶部,负最大弯矩位置也相同,均位于拱腰,最大轴力在拱腰。在两种计算方法中,弹性匀质圆环法计算得到的最大弯矩较梁-弹簧法稍大一些,其中标准块增加大约10%,邻接块增加大约11%,封顶块增加大约10%,其主要原因是由于弹性匀质圆环法只在拱腰部分考虑了隧道围岩(土层)的弹性抗力,衬砌

底部没有考虑。

4 结论

1)在弹性匀质圆环法和梁-弹簧法计算方法中,弹性匀质圆环法得到的最大弯矩较梁-弹簧法稍大一些,主要由于弹性匀质圆环法只在拱腰部分考虑了隧道围岩(土层)的弹性抗力,衬砌底部没有考虑。所以,从考虑隧道周边围岩(土层)弹性抗力的角度看,管片衬砌内力计算宜采用梁-弹簧法。

2)从定性角度看,两种方法计算结果比较吻合,只是各种方法计算结果的安全储备大小有差别,对于管片衬砌结构来说,其弯矩大是不利的。因此,采用弹性匀质圆环法进行盾构隧道设计偏于保守,造成钢材的浪费,而采用梁-弹簧法进行设计是安全的、经济的,值得推广应用。

参考文献:

- [1] 刘建航,侯学渊.盾构法隧道[M].北京:中国铁道出版社,1991.
- [2] 程晓,潘国庆.盾构施工技术[M].上海:上海科学技术文献出版社,1990.
- [3] 门玉明,王启耀.地下建筑结构[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [4] 朱伟.日本土木学会隧道标准规范(盾构篇)及解说[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [5] 丁军霞.盾构隧道衬砌管片内力计算[J].石家庄铁道学院学报,2004,17(2):66-69.
- [6] 王树理.地下建筑结构设计[M].北京:清华大学出版社,2007.
- [7] TB 10003-2005,铁路隧道设计规范[S].
- [8] 崔炜,韩宇,陈重华,等.输水隧洞近接沉箱桩施工的三维有限元分析[J].河北建筑科技学院学报,2006,23(2):20-23.

(责任编辑 闫纯有)