

# 盾构隧道管片内力变化规律分析及管片承载力确定

李国旺<sup>①</sup>

(中国葛洲坝集团市政工程有限公司, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 本文针对武汉地铁7号线过江区间盾构段, 选取江中最薄覆土断面和江堤最厚覆土断面, 分别按最高水位、最低水位和多年平均水位分析管片内力, 通过分析比对, 找出管片内力随有效土压力和静水压力(水位)变动时的变化规律, 得出一些有参考价值的结论, 降低管片结构设计安全风险。

**关键词:** 盾构管片; 有效土压力; 水压力变化; 弹性地基梁法; 管片承载力; 临界受压承载力; 素混凝土偏压

中图分类号: U455.43 文献标志码: A



随着地铁及越江穿河隧道的发展, 隧道埋深不断增大, 隧道管片所承受的土压、静水压力越来越大。隧道荷载的增大, 管片结构厚度和承载力如何按国内现行规范确定? 伴随有效土压力或水压力的不同, 隧道管片内力又遵循着什么变化规律?

本文通过比较分析, 找出其中规律, 为以后隧道设计起到借鉴作用, 力求隧道结构设计更安全、经济。

## 1 计算方法及设计理论

### 1.1 计算方法

目前国内常用的管片内力计算方法主要有: 修正惯用法; 弹性铰法; 弹性地基梁法等。

这里主要采用弹性地基梁法, 兼顾修正惯用法, 分析管片内力在伴随有效土压力和水压力变化时的分布规律和变化特性, 找出隧道结构的最不利受力工况。

### 1.2 设计理论

按荷载-结构模型分析管片内力。

有限元模型采用梁单元外加曲面弹簧(仅受压), 利用曲面弹簧的变形特性, 模拟管片变形受到周围土体的约束。

管片拼接纵缝对圆环抗弯刚度的削弱, 参照修正惯用法, 引进抗弯刚度折减系数 $\eta$  (0.5~0.8), 削弱后圆环的整体弯曲刚度为 $\eta \times E_i$ 。由于接头对圆环抗弯刚度的削弱, 接头和管片弯矩分配发生变化, 故引进系数 $\xi$  (0.2~0.4) 反映弯矩的变化情况, 接头弯矩 $M_j = (1-\xi) M_i$ , 管片弯矩 $M_z = (1+\xi) M_i$ , 抗弯刚度的削弱对轴力无影响。

## 1.3 荷载计算

### 1.3.1 荷载分类

本工程隧道荷载分为三类: 永久荷载(结构自重、土压力、静水压力等); 可变荷载(车辆、列车荷载、注浆荷载、水压变化等); 偶然荷载(地震荷载、爆炸、沉船、锚击等)。选择不同的荷载类别, 进行内力组合。

本文主要选取“有效土压力”和“静水压力”两种对管片内力起主导作用的荷载进行研究, 分析在静水压力(水位)发生变化时, 管片结构内力变化规律, 确定最不利工况, 确保隧道结构安全<sup>[1]</sup>。

### 1.3.2 荷载确定

有效土压力按照太沙基松动理论确定。当覆土厚度大于开挖松动土拱高度 $h_0$ 时, 为深埋隧道, 竖向有效土压力按土拱高度范围土柱压力确定; 当覆土厚度不大于开挖松动土拱高度 $h_0$ 时, 为浅埋隧道, 竖向有效土压力按照覆土厚度土柱荷载确定。

水土分算时, 静水压力按照隧顶和隧底实际水头高度确定。

隧道拱顶有效竖向土压力和静水压力之和, 对浅埋隧道, 尚不应小于2.0D覆土荷载。

按太沙基理论确定有效土压力:

松动半宽:

$$B_0 = D/2 \times \cot \theta = D/2 \times \cot (\pi/8 + \phi/4)$$

$$\text{松动高度: } h_0 = \frac{B_0(1 - \frac{c}{B_0\gamma})[1 - \exp(-K_0 \frac{H_1 \tan \phi}{B_0})]}{K_0 \tan \phi}$$

$$\text{覆土换算高度: } H_1 = (\sum h_{wi} \gamma'_{wi} + \sum h_{\gamma i} + P_0) / \gamma'$$

① 作者简介: 李国旺(1981—), 男, 汉族, 河南南阳, 工学学士, 一级注册结构工程师, 主要从事隧道及地下工程勘察设计与研究方面的工作。

式中:  $K_0$ ——静止侧压力系数;  
 $h_{wi}$ ——水位线以下各土层厚度;  
 $h_i$ ——水位线以上各土层厚度;  
 $\gamma_i$ ——水位线以上各土层天然重度;  
 $\gamma'_{wi}$ ——水位线以下各土层浮重度;  
 $\gamma'$ ——拱顶附近土层浮重度;  
 $P_0$ ——地面附加荷载。

## 2 管片承载力

### 2.1 管片接头承载力及厚度确定

(1) 弯矩使管片外侧受拉接头(边墙)

管片厚度按接头承载力确定为

$$N \leq \phi \times f_{cc} \times b (h - 2e_0) \Rightarrow h \geq \frac{N}{\phi \times f_{cc} \times b} + 2e_0$$

构造要求1(素混凝土偏心受压构造要求):

$$e_0 \leq 0.9h/2 \Rightarrow h \geq e_0/0.45$$

构造要求2(接缝防水要求):

保证接缝不张开,建议接头面0应力区按不超过30%确定,  $3(h/2 - e_0) \geq 0.7h \Rightarrow h \geq 15/4e_0$

(2) 弯矩使管片内侧受拉接头(拱顶、拱底)

由于螺栓设置在管片内侧,对拱顶、拱底弯矩使管片内侧受拉的部位,当管片厚度不满足接头素混凝土偏压承载力要求时,可将螺栓视为受拉钢筋,参与截面偏压承载力计算。

$$N \times e_s = \alpha_1 \times f_c \times b \times x (h_0 - x/2) \Rightarrow x = h_0 - \sqrt{h_0^2 - \frac{2N \times e_s}{\alpha_1 \times f_c \times b \times x}}$$

当  $e_0 > h/2 - x/2$  时,螺栓拉力:

$$N_t = \frac{N[e_i - (h - x)/2]}{h_0 - x/2}$$

螺栓个数:  $n \geq N / (N_t^b \times \cos \alpha)$ ;

当  $e_0 \leq h/2 - x/2$  时,说明螺栓所处位置受压,由于螺栓不能参与受压,按素混凝土偏心受压验算承载力(考虑进螺栓预加力),不满足时,需继续增加管片厚度,直至厚度满足素混凝土偏压承载力要求为止。

式中:  $e_0$ ——偏心距,  $e_0 = M_j / N$ ;  
 $\phi$ ——受压稳定系数,由管片长厚比确定;  
 $f_{cc}$ ——素混凝土轴心抗压设计值,  $f_{cc} = 0.85f_c$ ;  
 $f_c$ ——混凝土抗压强度设计值;  
 $b$ 、 $h$ ——管片截面宽度、厚度;  
 $a_s$ ——螺栓中心至管片受拉边缘距离;  
 $h_0$ ——管片截面有效高度,  $h_0 = h - a_s$ ;  
 $e_s$ ——轴力至螺栓中心换算距离,  $e_s = e_i + h/2 - a_s$ ;  
 $e_i$ ——初始偏心距,  $e_i = e_0 + e_a$ ;  
 $e_a$ ——附加偏心距,取  $h/30$  和  $20 \text{ mm}$  两者较大值;  
 $N_t^b$ ——单栓承载力;  
 $\alpha$ ——螺栓与轴力方向夹角。

### 2.2 配筋管片承载力

通用环形管片,通过转动调整最大环宽(最大楔形量)的位置,满足线路转弯和变坡要求。旋转过程中,管片各分块均有可能出现在最大正弯矩或最大负弯矩位置,管片可按偏心受压构件对称配筋设计。

对称配筋偏压混凝土截面临界受压承载力:

$$N_b = \alpha_1 \times f_c \times b \times \xi_b \times h_0$$

式中  $\xi_b$ ——临界相对受压区高度。

按管片厚度和混凝土级别,结合  $M$ 、 $N$  判断偏压情

况,选择最不利工况内力进行配筋。

### 2.3 螺栓承载力

管片连接螺栓,一般按C级粗制螺栓计算,单栓抗拉承载力计算如下:

$$N_t^b = \frac{\pi \times d_e^2}{4} \times f_t^b$$

单栓最大允许预加力(当预加力超出最大值时,单栓承载力将被削弱):

$$N_{p \max} = (f_y - f_t^b) \times \frac{\pi \times d_e^2}{4}$$

式中:  $f_t^b$ ——螺栓的抗拉强度设计值;

$d_e$ ——螺栓的等效直径;

$f_y$ ——螺栓的材料屈服强度。

单栓最小预加力应根据裂缝的正常使用极限状态要求确定:当  $e_0 \leq 0.55h$  时,螺栓仅起构造连接作用,预加力根据管片拼装固定要求确定;当  $e_0 > 0.55h$  时,应根据管片接缝宽度要求确定。

## 3 工程实例

### 3.1 工程概况

#### 3.1.1 地质概况及计算断面选取

工程所在地属长江河床及长江 I 级阶地,地势平坦开阔,相对高差一般小于  $1 \sim 4 \text{ m}$ ,地面高程  $22 \sim 26 \text{ m}$ 。历年最高水位  $27.545 \text{ m}$ ,历年最低水位  $7.895 \text{ m}$ ,多年平均水位  $16.785 \text{ m}$ 。

主要地层情况如下:

1-1杂填土(Q4 ml):杂色、褐黄~灰黄等色,松散~稍密,主要由碎石、碎砖、生活垃圾等组成,结构疏密不等;分布上部,层厚  $1.00 \sim 2.70 \text{ m}$ 。

3-2粉质黏土(Q4 al):灰~灰褐色,软塑,局部可塑,质不均,显水平层理,多间夹  $5 \sim 20 \text{ cm}$  厚的粉砂、粉土;层状分布,揭露厚度  $7.80 \sim 10.95 \text{ m}$ 。

4-2粉细砂(Q4 al):灰~灰黄色,饱和,中密状,成分以石英、长石为主;层状分布,厚度  $32.40 \sim 39.20 \text{ m}$ 。

15b-1弱胶结砾岩:灰色,砾状碎屑结构,层状构造,泥质弱胶结,岩质极软,钻进时易搅散,岩芯多呈散体状,卵砾石成分以灰岩、白云岩、砂岩为主,砾石坚硬。

选取江中 minimal 覆土断面和江堤最大埋深断面,按最高水位、最低水位和多年平均水位分别计算管片内力,再对不同有效土压力、不同静水压力情况下管片内力比较分析,找出变化规律<sup>[2]</sup>。

#### 3.1.2 管片结构

衬砌环采用通用环,标准环宽  $2 \text{ m}$ ,楔形量  $52 \text{ mm}$ ,内径  $13.9 \text{ m}$ ,管片厚度  $650 \text{ cm}$ ,连接采用斜直螺栓,错缝拼装。全环由“封顶块+左临块+右临块+7个标准块”,共计10块组成,最大单块起吊质量达  $16.5 \text{ t}$ 。

材料:混凝土为C60,钢筋采用HPB300、HRB400级热轧钢筋。

### 3.2 计算分析

#### 3.2.1 荷载计算

按静止侧压力系数算出的有效土压力,只考虑无水压情况下结构的内力分析,目的是与主动侧压力在无水压情况下的结构内力对比,找出结构内力随侧压力系数变化的规律。

对江中 minimal 覆土断面, 由于江底附有一层 3-2 粉质黏土, 透水性差, 故将水深范围内水压作为施加在河床表面的附加荷载  $P_0$ , 单独作为一种工况, 分析水压变化对结构内力的影响。江中 minimal 覆土断面荷载见表 1, 江堤最大覆土断面荷载见表 2。

表1 江中 minimal 覆土断面荷载

断面	工况	有效土压力 kPa			水压 kPa	
		竖向土压	顶部侧压	底部侧压	顶部水压	底部水压
		$p_1$	$q_1$	$q_2$	$qw_1$	$qw_2$
江中 minimal 覆土断面	最高水位	112.94	74.31	136.59	470.30	590.30
	多年平均水位	112.94	74.31	136.59	362.70	482.70
	最低水位	112.94	74.31	136.59	237.80	357.80
	只考虑有效土压力	112.94	74.31	136.59	0.00	0.00
	视水压为 $p$ 加荷载	112.94	307.54	369.82	116.70	236.70

表2 江堤最大覆土断面荷载

断面	工况	有效土压力 kPa			水压 kPa	
		竖向土压	顶部侧压	底部侧压	顶部水压	底部水压
		$p_1$	$q_1$	$q_2$	$qw_1$	$qw_2$
江堤最大覆土断面	最高水位	270.48	177.98	240.25	470.30	590.30
	最低水位	321.71	211.68	273.96	237.80	357.80
	不考虑地下水 ( $K_a$ )	551.00	362.56	484.71	0.00	0.00
	不考虑地下水 ( $K_0$ )	551.00	214.89	291.00	0.00	0.00

### 3.2.2 各工况内力分析对比

全环弹簧刚度均按照 4-2 地层  $K=32$  MPa/m 取用; 0.65 m 厚 C60 管片, 抗弯刚度  $\eta \times E_i$ ,  $\eta=0.75$ ,  $E=3.6 \times 10^4$  MPa。管片模型按 1 m 宽等刚度圆环梁+仅受压弹簧。江中 minimal 覆土断面内力汇总表 3, 江堤最大覆土断面内力汇总表 4。

表3 江中 minimal 覆土断面内力汇总

断面	工况	部位/内力	拱顶	边墙	拱底
江中 minimal 覆土断面	最高水位	M (kN×m)	149.83	250.6	125
		N (kN)	4892	5827.4	6046.8
	多年平均水位	M (kN×m)	149	235.8	122.9
		N (kN)	4077.2	5010.5	5232.1
江中 minimal 覆土断面	最低水位	M (kN×m)	147.9	218.7	120.4
		N (kN)	3131.4	4062.2	4286.4
	只考虑有效土压力	M (kN×m)	151.8	247.1	133.3
		N (kN)	1239.5	2172.6	2392.9
	河床以上水压作为 $P_0$ , 不考虑河床至结构水压	M (kN×m)	418.4	705.7	380.2
	N (kN)	3985	6280	6645.4	
河床以上水压作为 $P_0$ , 考虑河床至结构水压	M (kN×m)	411.2	665.3	364.3	
N (kN)	4956.8	7247.5	7619.1		

表4 江堤最大覆土断面内力汇总

断面	工况	内力\部位	拱顶	边墙	拱底
江堤最大覆土断面	最高水位	M (kN×m)	310.7	485.7	255.4
		N (kN)	2422.3	3498.4	4435.5
	最低水位	M (kN×m)	345.6	560.9	278.8
		N (kN)	2821.8	4026.6	4897.6
江堤最大覆土断面	最高水位	M (kN×m)	285.7	456.5	246.1
		N (kN)	6074.9	7142	8085.3
	最低水位	M (kN×m)	311.9	501.7	265.2
		N (kN)	4715.3	5906.4	6788
	不考虑地下水	M (kN×m)	499.9	807.5	442.5
	(主动侧压力系数 $K_a$ )	N (kN)	4672.2	6375	7651.1
不考虑地下水	M (kN×m)	918.4	1238	423.3	
(静止侧压力系数 $K_0$ )	N (kN)	4016.2	6215.1	7705.6	

## 4 结束语

(1) 管片的弯矩和轴力随着静水压的增大均呈增加趋势, 轴力增加的幅度远远大于弯矩增加的幅度。

(2) 管片弯矩和轴力随着“有效土压力”的增加均呈增加趋势, 弯矩增加的幅度大于轴力增加的幅度。

(3) 静水压与有效土压相比, 较小时, 在两者共同作用下, 弯矩随着静水压的增加缓慢减小, 当静水压超过一定水位时, 弯矩又呈缓慢增长; 轴力随着静水压的增加一直呈快速增长趋势。

(4) 隧道位于水底且河床表面有不透水层时, 将水深作为附加荷载  $P_0$  施加于河床面, 内力计算结果通常起控制作用。

(5) 管片轴力随侧压力系数增大而增大, 弯矩随侧压力系数增大却大幅减小。侧压力系数越大, 说明土的流动性越好, 土的性质越接近水 (水侧压力系数为 1.0), 管片内力变化呈现出与水压变化时的类似规律<sup>[3]</sup>。

(6) 管片厚度和混凝土级别确定时, 管片临界受压承载力  $M_b$  确定。随着水压的变化, 管片偏压承载力和接头素混凝土偏压承载力基本呈如下规律:

$N > M_b$  时, 水压越大越不利, 有效土压越大越不利;

$N \leq M_b$  时, 水压越小越不利, 有效土压越大越不利。

(7) 随着水压的增大或侧压力系数的增加, 满足管片接头承载力所需螺栓数量及满足接头张开量所需螺栓预加力均大幅度减小。

随着有效竖向土压力的增加或侧压力系数的减小, 接头所需螺栓数量及满足张开量要求的预加力增加。

(8) 管片厚度应根据弯矩使外侧受拉的截面 (边墙), 按照素混凝土偏心受压承载力确定。

弯矩使内侧受拉的截面 (拱顶、拱底), 可将螺栓视为预应力受拉筋, 参与截面偏压承载力计算, 厚度不够时, 可通过增加螺栓数量、直径或减小螺栓边距来处理。

(9) 控制接头 0 应力区范围, 除结构防水要求外, 还可防止管片在接头位置, 截面发生倾覆破坏。对软土地层, 管片环相当于铰接非静定结构, 建议取小值; 对硬土地层可适当取大值。0 应力区控制在 15%~45%, 对应的管片厚度  $h \geq 60/13e_0 \sim 60/19e_0$ 。本文管片厚度, 0 应力区按 30% 考虑, 管片厚度  $h \geq 15/4e_0$ 。

注: 本文管片承载力结合国内规范按“极限状态法”确定。对重要工程, 建议先按“极限状态法”计算管片厚度、螺栓参数和配筋面积, 再结合相关规范, 采用“允许应力法”进行安全性检算, 并对管片承载力进行工程试验验证。

## 参考文献

- [1] 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 (1): 19-22, 42.
- [2] 张建刚, 孟庆明, 李围, 等. 不同接触并存的管片接头力学分析[J]. 隧道建设 (中英文), 2019, 39 (10): 1594-1600.
- [3] 肖明清, 封坤, 张力, 等. 盾构隧道管片接头抗弯承载力计算模型研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52 (11): 108-119.