

文章编号: 1000-7598-(2004) 08-1302-05

考虑荷载工况组合的盾构衬砌横向受力分析

官林星, 朱合华, 于 宁

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 在盾构隧道衬砌受力分析中需要按最不利的荷载组合方式进行验算, 这无疑加大了工程设计人员的工作量。正是基于这种状况, 提出了考虑荷载工况组合的衬砌受力分析。首先建立了盾构隧道衬砌的结构分析模型, 根据施工过程对荷载进行分类, 依据规范对不同的工况进行荷载组合, 得到衬砌内力包络图。并编制相应的计算程序进行了验证, 对一典型盾构隧道截面进行了实例分析。

关 键 词: 盾构隧道; 荷载组合; 包络图; 荷载分布

中图分类号: TU 554

文献标识码: A

Analysis of internal force of shield lining in cross-section considering load combination

GUAN Lin-xing, ZHU He-hua, YU Ning

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: During the analysis of cross-section forces of shield lining, the project must be checked by the method of the most unfavorable combination of the loads and it is doubtless to increase the workload of the designers. In light of the condition, an analytical method considering load combination is put forward. First, the structural analysis model of shield tunnel lining is established and different kinds of loads are classified on the basis of construction process and combined according to the design code for different working cases. Finally, the internal force envelope diagram is acquired. In the meantime, the computation program is accomplished and used in a project.

Key words: shield tunnel; load combination; envelope diagram; load distribution

1 引 言

目前在盾构隧道衬砌受力分析中, 主要采用两种计算方法: 一种是将周围土层对衬砌的作用转化为衬砌的结点力施加于隧道周围, 即荷载结构法; 另一种是将一定计算范围内的土层与隧道看作一个整体, 形成土体-盾构衬砌有限元模型, 即地层-结构法。对于地层-结构法, 可以采用有限元施工分析的应力释放系数来模拟不同施工工况下的荷载作用。但是, 对于普遍采用的荷载-结构法, 现有的设计规范^[1]中明确指出, 需要按最不利工况进行荷载组合。而设计人员在具体的设计过程中, 常常忽视了某些关键荷载作用下的衬砌受力问题, 如施工过程中的注浆压力荷载。现场的量测数据表明^[2], 盾

构隧道衬砌受力往往比水土压力荷载要大。因此, 工程设计人员必须考虑施工和运营过程中每个阶段的荷载组合, 盾构隧道横断面的设计荷载必须以作为设计对象的隧道区间最不利的条件为基础进行确定。这实际上是一个寻求盾构隧道衬砌受力包络图的过程。由于盾构隧道的建造是多步骤复杂施工过程, 且在运营阶段的荷载工况与施工阶段也有不同, 因此, 出现了几种荷载的组合情况, 这无疑加大了工程设计人员的工作强度。

近年来, 也有学者提出了将预应力应用于盾构隧道^[3], 而包络图的绘制为这种技术思路提供支持。本文正是基于以上状况, 提出了考虑施工和运营状况过程的盾构隧道衬砌受力分析方法, 依据同济曙光软件(GeoFBA)的开发研制平台编制相应的计算

程序和绘图后处理程序, 为工程设计人员提供了更为方便的计算工具。

2 盾构衬砌的结构分析模型

2.1 管片的离散化

盾构隧道衬砌结构通常属管片-接缝构造体系, 其在隧道横断面上为若干管片通过螺栓连接成管片环, 在隧道纵向上为管片环通过纵向螺栓连接, 呈通缝或错缝拼装而成。在盾构隧道管片受力分析中, 可将管片模拟成梁, 假设隧道管片材料处于弹性受力状态, 对管片的离散有直梁和曲梁两种形式, 文[4]指出: 直梁模型是曲梁模型的一种特殊形式。数值计算结果表明, 当剖分单元取得足够小时, 完全可以由直梁模型代替曲梁模型, 将复杂问题简单化。所以, 可将管片离散化为二结点六自由度的梁单元, 如图1所示, 图中: x_a, y_a 为整体坐标系下节点位移; $\bar{x}_a, \bar{y}_a$ 为局部坐标系下的节点位移; M_a 为节点所受弯矩 ($a=i, j$)。

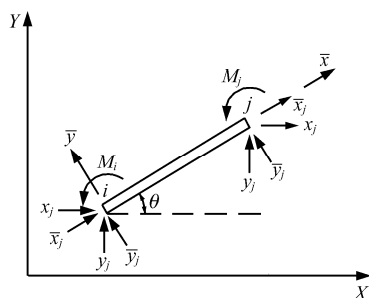


图1 直梁单元
Fig.1 Straight-beam element

2.2 管片接头模拟

盾构隧道是由若干管片组成的, 因此衬砌本身存在固有不连续接缝或接头。为了模拟管片接头的作用, 宜引入以考虑点与点接触为特征的接头单元模拟管片间接头的不连续性, 如图2所示。图中, α_i 为梁单元的起点切线方向角(逆时针转); φ 为两相邻梁单元夹角的 1/2; $\gamma = \alpha_i - \varphi$ ($i=1, 2$)。管片接头的局部坐标定义如下: s 为沿两梁单元间的等分角方向, 正向指向洞内; n 为与 s 正交的方向, 正向为逆时针转。

在整体坐标系中接头单元的整体刚度^[5]为

$$[K_G] = \begin{bmatrix} A_1 & A_3 & 0 & -A_1 & -A_3 & 0 \\ A_2 & 0 & -A_3 & -A_2 & 0 & 0 \\ & k_\theta & 0 & 0 & 0 & -k_\theta \\ & & A_1 & A_3 & 0 & 0 \\ & & A_2 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & k_\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $A_1 = k_n \sin^2 \gamma + k_s \cos^2 \gamma$; $A_2 = k_n \cos^2 \gamma + k_s \sin^2 \gamma$; $A_3 = (k_s - k_n) \cos \gamma \sin \gamma$; k_n, k_s, k_θ 分别为接头单元的轴向、切向和转动方向的刚度; γ 如图2所示。根据管片接头的受力特点, 可将接头的本构关系分为线性, 双线性和非线性。

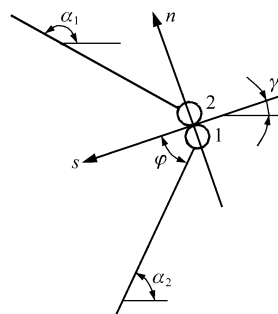


图2 直梁-接头元模型
Fig.2 Straight beam-joint element model

3 衬砌所受荷载

3.1 荷载分类

衬砌的设计不仅要满足隧道投入使用后, 而且必须满足施工过程中的安全性和功能性要求, 从这种观点出发, 列举了设计时应考虑的荷载类别, 如表1所示^[6]:

表1 荷载分类
Table 1 Load category

荷载类型	编号	描述
永久荷载	1	结构自重
	2	地层压力
	3	水压力及浮力
	4	上覆荷载
	5	地基抗力
可变荷载	1	内部荷载
	2	施工荷载
	3	温度变化影响
偶然荷载	1	地震荷载
	2	邻近施工的影响
	3	平行隧道的影响

永久荷载为设计时所必须考虑的基本荷载; 可变荷载为在施工中或竣工后作用在结构上的荷载, 是根据隧道的使用目的、施工条件以及周围环境变化考虑的荷载; 偶然荷载是根据围岩条件、隧道的使用目的和施工条件所必须特殊考虑的荷载。

3.2 荷载计算及分布假设

对永久荷载的认识比较清楚, 理论比较完善, 也有相应的规范^[1]加以明确规定, 设计者可以根据相应的地层条件及隧道埋深选用合适理论来计算。

对于可变荷载, 由于影响因素较多, 存在着多种考虑方法, 本文重点考虑。而对于偶然荷载项, 由于盾构隧道施工的周围环境状况各不相同, 也很复杂, 要对具体问题加以分析论证。

(1) 内部荷载。是指隧道竣工后作用于衬砌内侧的荷载, 隧道的使用目的决定着内部荷载的大小。对于盾构隧道, 铁路车辆、人群等作用于衬砌底部的内部荷载由于壁后注浆材料已经硬化, 除了特别软弱的地基以外, 可以认为是由周围的地基直接支承的, 一般可以不计^[1]。

(2) 施工荷载。从管片组装开始到盾尾间隙中壁后注浆材料的硬化为止, 作用在衬砌上的临时荷载称为施工荷载。主要有千斤顶推力、壁后注浆压力、管片拼装机的操作荷载。由于壁后注浆压力在管片注浆孔周围形成一个暂时偏心荷载^[7], 对管片环内力的影响很大, 为此, 采用图 3 所示的计算简图。假设单孔注浆压力对称分布在注浆孔的周围, 成等腰三角形分布形式作用于管片环的周围。设计中根据实际注浆孔的位置和数量将荷载对应施加在结构上。

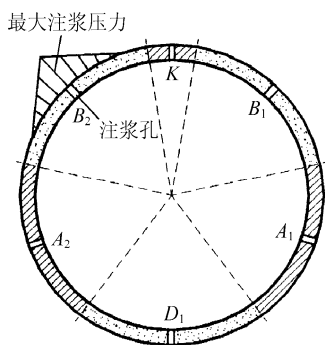


图 3 单孔注浆压力计算简图

Fig. 3 Calculation diagram for grouting pressure of single hole

(3) 地震荷载。地震对隧道结构的影响可以分为剪切错位和振动。靠隧道结构抵抗由于地震引起的剪切错位几乎是不可能的, 因此, 隧道结构的地震作用分析, 仅局限于假定土体不会丧失完整性的前提下考虑其振动效应。采用荷载-结构模型进行盾构隧道的静、动力计算时, 对地震荷载的计算采用拟静力法^[8], 即是将随时间变化的地震力或地层位移用等代的静地震荷载或静地震位移代替, 然后, 再用静力计算模型, 分析地震荷载或强迫地层位移作用下的结构内力。等代的静地震荷载包括: 结构本身和洞顶上方土柱的惯性力以及主动侧向土压力增量。

对于圆形盾构隧道, 如图 4 示洞顶上方土柱的水平惯性力为 F_2 , 结构的惯性力为

$$F_1 = \eta_c K_h \frac{mg}{D} \quad (2)$$

式中 η_c 为综合影响系数, 与工程重要性, 隧道埋深, 土层特性有关; K_h 为水平地震系数; m 为衬砌质量; D 为衬砌外直径; g 为重力加速度。

主动侧向土压力增量的确定^[8]。地震时地层的内摩擦角要发生变化, 由原来的 φ 值减少为 $(\varphi - \beta)$, 其中 β 为地震角, 因此, 结构一侧的主动侧向土压力增量为

$$\Delta e_i = (\lambda_a - \lambda'_a) q_i, \quad i = 1, 2; \quad \left. \begin{aligned} \lambda_a &= \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right); \quad \lambda'_a = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi - \beta}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 q_1 为隧道顶部所受的垂直土压力; q_2 为隧道底部所受的地层抗力。

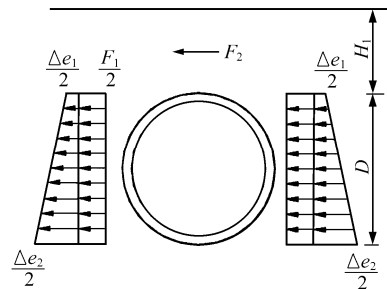


图 4 盾构隧道地震荷载图式

Fig. 4 Pattern of seismic load in shield tunnel

(4) 荷载分布模式假设。在荷载计算方法中, 也有将反分析技术应用于荷载计算中^[9], 利用由现场获得的衬砌结构内力实测数据来做水土压力荷载分量的反演分析, 这也从另一方面获得作用在结构上的水土压力。在设计计算程序过程中, 考虑到荷载计算理论的多样性和复杂性^[10, 11], 假设作用于管片衬砌上的压力存在着几种模式; Y 方向线性分布, X 和 Y 方向均为线性分布, X 和 Y 方向均为抛物线分布。如图 5 所示, p_{ei} ($i = 1, 2, 3, 4$) 为衬砌所受垂

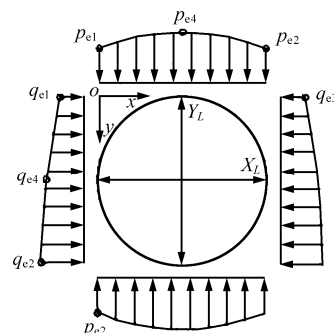


图 5 荷载分布模式

Fig. 5 Pattern of load distribution

直土压力, q_{ei} 为衬砌所受水平土压力。用户可以选择荷载分布模式, 输入用相应的计算理论得到的荷载设计值。其中常数模式, 即是圆环受均布围压的情况, Y 方向线性分布模式是在修正惯用法中的荷载假设, X 和 Y 方向均为线性分布即是荷载在水平和垂直方向为梯形分布, 抛物线分布更能模拟实际的土压力, 在有实测资料的情况下建议采用。

(5) 荷载组合。在荷载组合的处理上存在着两种方法, 一种是先将荷载按照分项系数进行组合, 然后作用在结构上, 求解结构内力; 另一种方法为分别计算单个荷载引起的结构内力, 然后叠加结构内力。在盾构隧道衬砌横向内力分析中, 考虑到管片接头的本构关系存在线性、双线性、非线性三种模式, 当在处理接头的双线性、非线性问题时, 两种处理方法得到的结果是有差别的, 在程序分析中采用了第一种方法。荷载组合中的分项系数在《地铁设计规范》^[1] 中并没有明确指定, 而是参考《建筑荷载设计规范》来确定, 按承载能力极限状态对荷载效应组合。

4 程序设计思路

针对工程设计人员所考虑荷载组合的方法和所应用隧道施工工况的多样性, 计算程序设计中采用了由用户填入施工过程, 并指定相应的每一步的荷载组合情况。采用 Visual C++ 编写用户界面, 达到人机对话, 容易操作的目的。程序流程图如下:

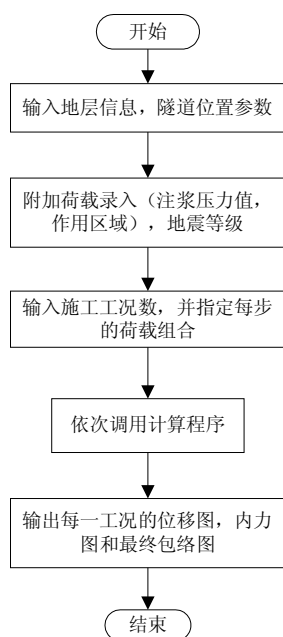


图6 程序设计思路

Fig. 6 Scheme of program design

5 实例分析

以上海某地铁隧道典型设计断面为例。采用的计算模型为直梁-接头模型, 接头采用线性模式, 为考虑错缝拼装效应, 采用纵向剪切模型。永久荷载、可变荷载、偶然荷载组合依据地铁设计规范^[1]确定, 对结构整体或构件可能出现的最不利组合进行计算。各个计算参数^[9]如下: (1) 管片材料: 弹性模量 $E=3.5 \times 10^4 \text{ MPa}$, 转动惯量 $I=3.16 \times 10^{-3} \text{ m}^4$, 截面面积 $A=0.336 \text{ m}^2$; (2) 管片接头: 采用线性接头模式, 正弯曲转动刚度 $k_{\theta}^+=3.4 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$, 负弯曲转动刚度 $k_{\theta}^-=8.28 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$, 轴向压拉刚度 $k_n^+=k_n^-=1 \times 10^4 \text{ kN/m}$, 剪切刚度 $k_s=2.1 \times 10^4 \text{ kN/m}$; (3) 环间接头: 纵向连接螺栓的环向和径向刚度分别为 $k_{nq}=k_{sq}=3.9 \times 10^4 \text{ kN/m}$; (4) 地层弹簧系数: 法向刚度 $K_n=2.4 \times 10^4 \text{ kN/m}$, 切向刚度 $K_s=1.2 \times 10^4 \text{ kN/m}$; (5) 注浆压力: $p_{\max}=200 \text{ kPa}$; (6) 地震荷载: 依据抗震规范上海地区取为Ⅶ度, 水平地震系数 $K_h=0.1$; 地震角 $\beta=1^\circ 30'$; (7) 荷载组合与分项系数包括: 第1工况只有基本荷载作用, 其中永久荷载分项系数取为 1.35; 第2工况为基本荷载+地震荷载, 其中永久荷载分项系数取为 1.0, 地震荷载分项系数取为 1.0; 第3工况为基本荷载+施工荷载 (注浆压力), 其中, 永久荷载分项系数取为 1.2, 施工荷载取为 1.4。

计算结果如图7~图10所示。

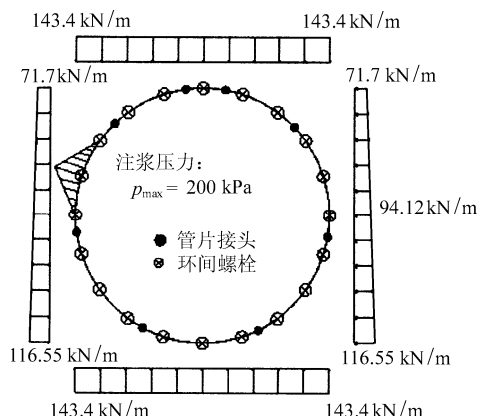


图7 接头位置与基本荷载, 单孔注浆荷载图

Fig. 7 Position of joint, basic load and grouting pressure

比较图8和图9可以看出, 当盾构衬砌受到偏心压力时, 对衬砌的受力是最不利的, 最大弯矩的位置、弯矩图的形状, 会随着注浆压力的作用范围而发生变化。在基本荷载作用下, 拱顶拱底的弯矩最大, 在注浆荷载作用下, 由于地层弹簧的约束作

用,拱底的受力状况有所改善,而在注浆压力作用的区域,弯矩发生急剧变化。这就要求在施工过程中,要设计好注浆的位置,不断的优化设计施工参数。图 10 的弯矩包络图表明,在某些位置正负弯矩对应于不同荷载工况而存在,这不同于单一工况下的衬砌受力情况,在进行管片的配筋时而应予以分别考虑。

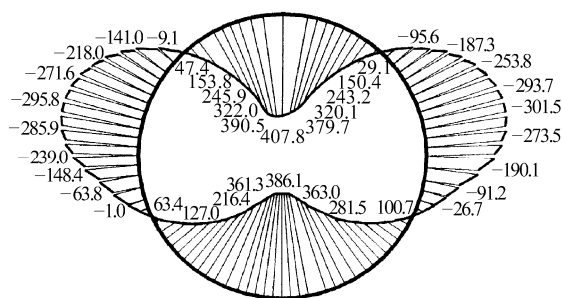


图 8 基本荷载作用下弯矩图 (单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

Fig. 8 Diagram of segment bending moment subjected to basic load(unit: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

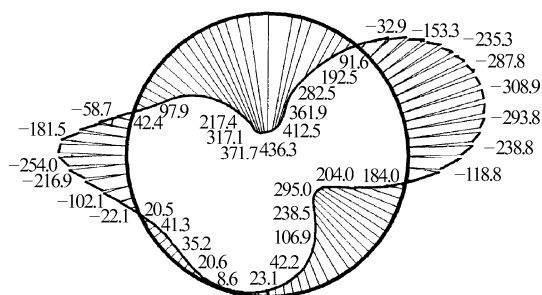


图 9 基本荷载与单孔注浆压力作用下弯矩图(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

Fig. 9 Diagram of segment bending moment subjected to basic load and grouting pressure(unit: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

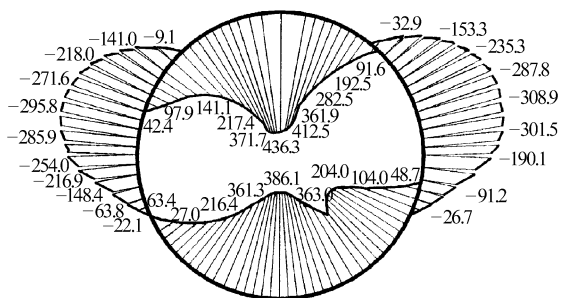


图 10 弯矩包络图 (单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

Fig. 10 Envelope diagram of segment bending moment (unit: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

6 结语

本文引进了盾构隧道衬砌受力包络图的概念,考虑了盾构隧道施工和运营各个工况下的不同荷载组合,强调施工过程中盾构衬砌受力的变化,这有助于工程设计人员更好地认清衬砌受力分析的本

质,作出合理、经济的工程设计。计算机技术的发展使计算机辅助设计(CAD)成为改进结构设计方法,提高效率和设计质量的重要途径。

但是,在盾构隧道设计过程中存在着很多难以评价的因素如:管片装配器的操作荷载,注浆压力的分布形式,由地形、土性原因而对隧道产生的偏心荷载等,这也需要作进一步的研究。

参考文献

- [1] GB50157-2003, 地铁设计规范[S].
- [2] 程晓, 张凤祥. 土建注浆施工与效果检测[M]. 上海: 同济大学出版社, 1998.
- [3] Nisigikawa K, Yasuda M, Sugimoto M, Kondo J. Development of a precast concrete lining technique using prestressed concrete structures[J]. *Modern Tunnelling Science and Technology*, 2001, 657—662.
- [4] 朱合华, 陶履彬. 盾构隧道衬砌结构受力分析的梁-弹簧系统模型[J]. *岩土力学*, 1998, 19(2): 26—32.
Zhu Hehua, Tao Lubin. Study on two beam-spring models for the numerical analysis of segments in shield tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1998, 19(2): 26—32.
- [5] 朱合华, 杨林德, 陈清军, 等. 盾构隧道管片接头衬砌系统的两种受力设计模式[J]. *工程力学*, 1996(增刊), 395—399.
ZHU He-hua, YANG Lin-de, CHEN Qin-jun, et al. Two design models for segment joint of lining system in shield tunnel[J]. *Engineering Mechanics Supplement*, 1996, 395—399.
- [6] 日本土木学会. 隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 朱伟译, 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [7] Working Group 2. International tunnelling association. guidelines for the design of shield tunnel lining[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2000, 15(3): 303—331.
- [8] 施仲衡, 张弥, 王新杰, 等. 地下铁道设计与施工[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
- [9] 朱合华, 崔茂玉, 杨金松. 盾构衬砌管片的设计模型与荷载分布的研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(2): 190—194.
ZHU He-hua, CUI Ma-yu, YANG Jin-song. Design model for shield lining segments and distribution of load[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(2): 190—194.
- [10] 蒋洪胜, 侯学渊. 软土地层中的圆形隧道荷载模式研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(4): 651—658.
JIANG Hong-sheng, HOU Xue-yuan. Study of the loading pattern on circular tunnel in soft ground[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(4): 651—658.