

隧洞衬砌静力分析力学模型的研究^{*}

王亚红, 李宗利, 于志秋

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 以文克尔弹性地基梁理论为基础, 建立了隧洞衬砌静力分析的杆系结构力学模型, 使其可考虑底部为弹性转动约束的情况, 并对该模型进行了实例验证。研究结果表明, 考虑弹性转动可使拱顶及边墙顶部截面受拉边缘处的应力增加。

[关键词] 隧洞衬砌; 静力分析; 力学模型; 弹性转动

[中图分类号] U 452 2; TU 311 1

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)10-0127-04

我国现行隧洞设计规范(SL 279-2002)^[1]中规定, 隧洞衬砌计算时, 按各设计阶段要求, 根据衬砌结构特点、荷载作用形式、围岩和施工条件等, 可选用结构力学法(如衬砌边值法、假定抗力法、弹性地基梁法等)、弹性力学法及有限单元法等进行静力分析。传统的杆系结构力学模型概念简单、清晰, 易于被工程设计人员接受, 且适用范围广泛, 但对杆系结构力学模型的应用还需进一步研究和完善。本研究以水工隧洞设计规范推荐的力学法为基础, 利用平面框架有限元建立一种适用于各种隧洞衬砌断

面、荷载及不同约束情况的杆系结构力学模型, 并进行了实例验证, 以期隧洞衬砌静力分析提供参考。

1 隧洞衬砌静力分析的力学模型

用结构力学法进行隧洞衬砌静力分析时, 可按文克尔弹性地基梁理论分析, 因此, 文克尔弹性地基梁的计算模型就是本研究方法的理论基础。

1.1 文克尔弹性地基梁的计算模型

图1(a)表示一弹性地基梁, 受集中荷载 P 的作用。利用对称性, 其计算简图如图1(b)所示。

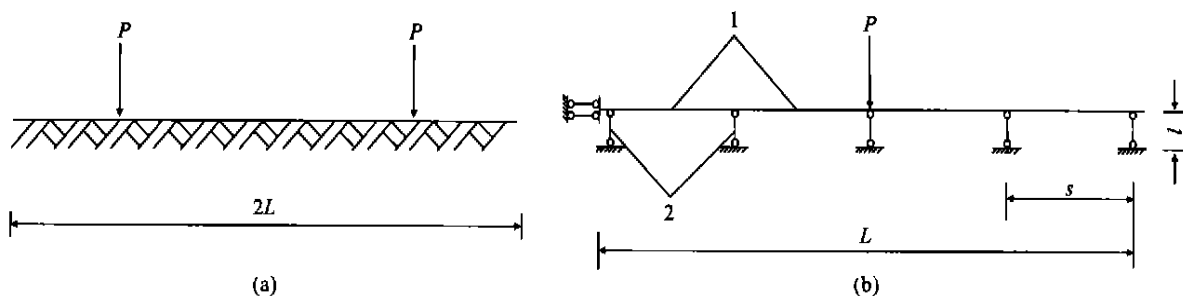


图1 文克尔弹性地基梁计算模型

(a). 文克尔弹性地基梁; (b). 地基梁的计算模型; 1. 模拟地基梁的梁元; 2. 模拟地基作用的桁元

Fig 1 Calculation model of Winkler's beam on elastic foundation

(a). Winkler's beam on elastic foundation; (b). Calculation model of Winkler's beam on elastic foundation;

1 Beam element analogue beam on elastic foundation; 2 Truss element analogue foundation action

计算时, 文献[2, 3]用梁单元模拟地基梁, 用桁元模拟地基对梁的作用, 在文克尔弹性地基变形理论假定前提下, 以工程力学为基础, 推导出模拟地基桁元的弹性模量与地基弹性抗力系数之间的计算公式:

$$E = \frac{bs}{A} l k \quad (1)$$

式中, E 为模拟地基桁元的弹性模量(kN/m^2); b 为弹性地基梁宽度(m); s 为两根桁元之间的距离(m); A 为模拟地基桁元截面的面积(m^2); l 为模拟

* [收稿日期] 2003-09-04

[基金项目] 西北农林科技大学青年专项基金资助项目

[作者简介] 王亚红(1967-), 女, 陕西蒲城人, 副教授, 硕士, 主要从事力学与水工结构研究。

地基桁元的长度(m); k 为地基的弹性抗力系数(kN/m^3)。

经对比计算^[2], 其结果表明, 按本模型计算的弹性地基梁与初参数法的结果几乎完全一致。

1.2 不考虑围岩弹性抗力的隧洞衬砌计算

隧洞衬砌计算可分为不考虑围岩弹性抗力和考虑围岩弹性抗力 2 种情况。若不考虑围岩弹性抗力的隧洞衬砌, 则衬砌体与围岩无关, 衬砌体可简化成“折线多边形”的形式^[2,3], 计算时只要荷载已经确定, 其计算方法与平面刚架或无铰拱的计算方法^[4]完全相同, 此不再赘述。

1.3 考虑围岩弹性抗力的隧洞衬砌计算

考虑围岩弹性抗力用平面框架有限元程序^[4]进行隧洞衬砌计算时, 关键是处理好利用桁元模拟围岩弹性抗力的作用。文献[2, 3]已建立了计算模型, 其基本假设和步骤为:

假定衬砌周围的地层是弹性的, 其作用力与位移符合文克尔弹性地基梁的基本假定, 即有

$$P = ky \quad (2)$$

式中, P 为荷载作用下产生的径向力(kN/m^2); k 为围岩的弹性抗力系数(kN/m^3); y 为荷载作用下产生的径向位移(m)。

用有限个长度较小的直线梁元近似地代替曲线衬砌体, 将曲线衬砌体简化成“折线多边形”的结构形式, 见图 2。

用有限个从“折线多边形”顶点引出、垂直于衬砌轴线的桁元, 模拟围岩与衬砌的相互作用, 桁元的弹性模量根据围岩的弹性抗力系数 k 由式(1)求得。

模拟围岩与衬砌的相互作用时, 桁元只传递压力或粘结强度范围内的轴向拉力。

模拟地基两端的桁元, 其控制的地基面积仅为中间桁元的一半, 故取桁元截面面积为中间桁元的一半。

当考虑围岩与衬砌体之间的摩擦力时, 结点处的摩擦力可按式计算

$$T_i = \mu N_i \quad (3)$$

式中, T_i 为衬砌轴线上任一结点 i 与围岩接触处所受的摩擦力; μ_i 为结点 i 处所受的摩擦系数; N_i 为结点 i 处桁元所受的轴向压力。

以按式(3)求得的摩擦力 T_i 作为结点荷载加到结点 i 处, 方向与变位方向相反, 作用线为该点衬砌轴线的切线或割线方向。式(3)中的 μ_i 在不同点可取不同的值, 当 N_i 为轴向拉力时, 则不考虑 i 结点

处的摩擦力。

在上述基本假定和步骤下建立如图 2 所示的计算模型, 利用平面框架有限元程序可求得衬砌内力, 当求得桁元承受拉力时取消该桁元, 重新计算直到所有桁元承受压力或承受粘结强度范围内的拉力为止。

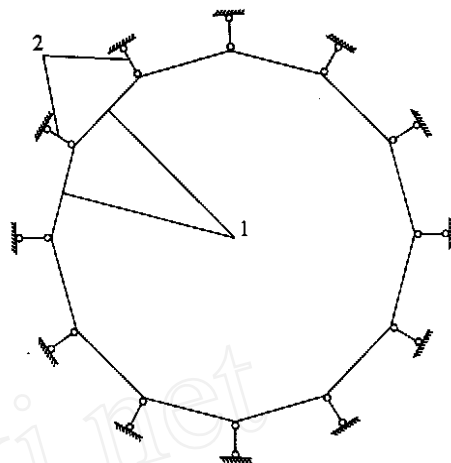


图 2 隧洞衬砌静力分析模型

1 模拟衬砌体的梁元; 2 模拟围岩作用的桁元

Fig 2 Tunnel lining static analysis model

1 Beam element analogue lining body;

2 Truss element analogue surrounding rock action

2 考虑弹性转动时的隧洞衬砌静力分析力学模型

隧洞衬砌静力分析时, 对非封闭式圆拱直墙型、马蹄型等断面衬砌, 其计算简图的底部约束可以简化成固定、简支或弹性转动约束等^[5,6]。在工程中, 计算模型的底部约束简化成弹性转动约束更能反映实际情况。当衬砌底部按弹性转动约束考虑时, 仍可利用上述步骤建立的力学分析模型, 但需采用迭代方法求解衬砌内力, 具体步骤如下:

按底部约束为固定求出拱脚截面转角 $\theta = 0$ 时的弯矩 M_1 ;

再给拱脚截面施加强迫位移 θ , 求得相同荷载条件下拱脚截面处的弯矩 M_2 ;

在第三次迭代计算时, 拱脚截面的强迫位移 θ 不能任意给定, 可根据直线内插原理按下式计算:

$$\theta = \frac{M_1 - \beta \theta}{kI + \beta} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{M_2 - M_1}{\theta - \theta} \quad (5)$$

式中, k 为拱脚截面处围岩的弹性抗力系数(kN/m^3); I 为拱脚截面处衬砌的惯性矩(m^4)。

计算时弯矩、角位移均以顺时针为正, 如此迭代计算直至拱脚截面处的弯矩满足下式:

$$M = - \quad kI\theta$$

(6)

式中各符号意义同前。根据计算经验, 按上述方法计算, 一般经三四次迭代就能收敛。底部约束为弹性转动约束时, 一般认为不产生法向位移。上述处理弹性转动约束时, 未考虑切向位移的影响。当具有切向位移时, 除满足上述施加强迫位移外, 尚需设置一支撑杆件, 该杆件的弹性模量由(1)式求得, 其所受压力大小满足(2)式。

3 模型验证

某隧洞工程采用等厚度的圆拱直墙式断面, 顶拱圆心角 120°; 边墙净高 4 m, 洞身净宽 4 m, 顶拱衬砌轴线半径 2 508 m, 衬砌采用 C15 混凝土, 衬砌厚度 0 4 m, 山岩压力系数 $s_x = 0\ 54, s_y = 0$, 围岩弹性抗力系数 $k = 5 \times 10^5\ \text{kN}/\text{m}^3$, 考虑底部弹性转动时隧洞衬砌内力的计算简图如图 3 所示, 计算结果见表 1。从表 1 可以看出, 按本研究提出的力学计算模型得到的结果, 与规范^[1]推荐的衬砌边值法计算

结果吻合相当好, 说明本研究提出的模型是合理的。

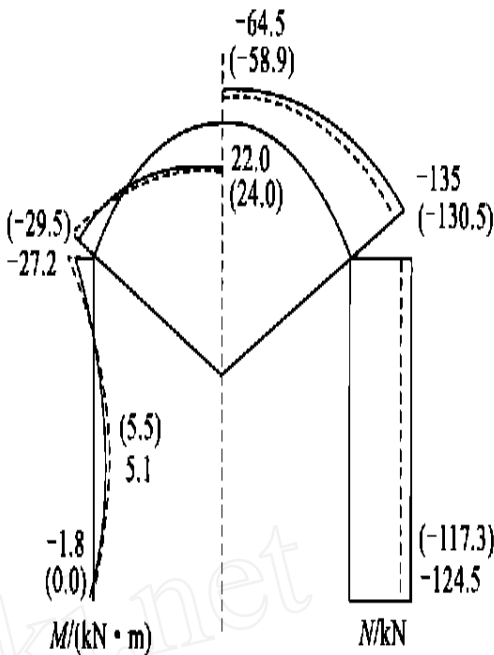


图 3 某隧洞工程计算模型

Fig 3 A tunnel lining static analysis model

表 1 本研究方法与衬砌边值法计算结果比较

Table 1 Calculation result comparison

断面位置 Section position	本研究方法 Tested method			衬砌边值法 Lining boundary value method		
	M/(kN·m)	N/kN	V/kN	M/(kN·m)	N/kN	V/kN
0°	24 0	- 58 9	0 0	24 3	- 58 4	0 0
36°	- 6 5	- 94 4	- 29 7	- 6 4	- 94 1	- 30 1
60°	- 29 5	- 130 5	- 7 5	- 29 8	- 130 8	- 6 9
墙顶 Lining wall top	- 29 5	117 3	59 9	- 29 8	- 116 7	59 5
1 6 m	6 1	- 117 3	0 1	6 2	- 116 7	0 0
2 4 m	4 4	- 117 3	- 2 8	4 4	- 116 7	- 2 8
墙底 Lining wall bottom	0 0	- 117 3	- 2 8	0 0	- 116 7	- 2 8

对侧墙底部分别按固定端和弹性转动约束进行对比计算, 其结果见图 4。

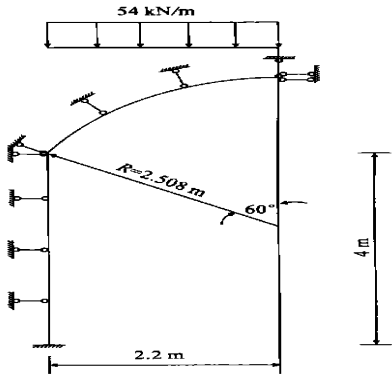


图 4 衬砌内力分布图

-----: 弹性转动端; ———: 固定端

Fig 4 Distribution graph of lining inner force

-----: Elastic rotation end; ———: Fixed end

图 4 结果表明, 考虑弹性转动影响时, 在拱顶和边墙顶部截面处, 其内力弯矩分别增加了 9 1% 和 8 5%, 而轴向压力分别减小了 8 7% 和 3 3%, 这将导致受拉边缘应力增加。这与文献[6]的结论基本一致。

4 结 论

本研究使得所建隧洞衬砌静力分析力学模型的应用范围更加广泛, 可以适用于各种隧洞断面型式、荷载、围岩情况, 可以考虑底部不同约束情况。使应用更加方便, 计算结果更符合实际工程。当底部为弹性转动约束时, 其拱顶截面处和边墙顶部截面处受拉边缘应力增加。

[参考文献]

- [1] SL 279- 2002 水工隧洞设计规范[S]. 北京: 水利电力出版社, 2003
- [2] 王亚红 隧洞衬砌静力分析的杆系结构力学模型[J]. 西北农业大学学报, 1994, 22(增刊): 55- 59
- [3] 王亚红 用平面框架有限元程序进行隧洞衬砌静力分析及若干问题的研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 1992
- [4] 于志秋 平面桁架、框架有限元静力分析程序 P4D 使用简介[J]. 人民珠江, 1993, 76(3): 25- 28
- [5] 汪胡桢 水工隧洞设计理论和计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990
- [6] 熊启钧, 高昌侠 隧洞[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989

Study on the structural mechanical model for tunnel lining

WANG Ya-hong, LI Zong-li, YU Zhi-qin

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract Based on Winkler's beam on elastic foundation, the system bar model of structural mechanism for tunnel lining static analysis was proposed, which can be applied in situation of elastic rotation ends at bottom of lining. The proposed model was also proved through the analysis and contrast with another method of one practical project. The result showed that the lining arch top and wall top stress was increased by considering the effect of elastic rotation restraint.

Key words: tunnel lining; static analysis; mechanical model; elastic rotation

· 简 讯 ·

欢迎订阅 2005 年《西北农林科技大学学报(自然科学版)》

《西北农林科技大学学报(自然科学版)》是国内外公开发行的综合性农业科学学术期刊, 创刊于 1936 年, 是西北地区创办最早的农业学术期刊, 其前身是《西北农业大学学报》。本刊立足学校, 面向社会, 主要刊登农业科学、林业科学、植物保护、资源与环境科学、园艺科学、动物科学与动物医学、食品科学、农业水利与建筑工程、机械与电子工程、生物技术与基础学科等方面具有创新性或适用性的学术论文、研究简报、文献综述以及反映最新科研成果的快报。读者对象为国内外农林科技工作者、高等院校教师、研究生和农林管理干部。本刊为中国自然科学核心期刊、全国综合性农业科学核心期刊和中国科学引文数据库核心期刊, 论文被国内外多家权威性数据库和文摘期刊固定转载和收录。1994 年以来, 本刊连续进入“被引频次最高的中国科技期刊 300 名排行表”; 在全国和陕西省科技期刊综合质量评比中, 先后 20 余次获奖, 其中 1997 年获第二届全国优秀科技期刊二等奖, 1999 年获全国优秀自然科学学报及教育部优秀科技期刊一等奖、陕西省高校“十佳学报”及陕西省科技期刊“十佳期刊”, 2001 年入选“中国期刊方阵”。在促进学术交流、发展学科理论、推动科技进步等方面做出了较大贡献。

《西北农林科技大学学报(自然科学版)》为月刊, A4, 160 页, 每月 25 日出版。每期定价 10 元, 全年 120 元。邮发代号为 52-82, 全国各地邮局均可订阅, 亦可直接向本刊编辑部订阅。国外总发行为中国出版对外贸易总公司。

编辑部地址: 陕西杨凌 西北农林科技大学西农校区 40 号信箱

邮 编: 712100 电 话: 029-87092511

E-mail: xb2511@yahoo.com.cn xb2511@yeah.net

网址: <http://XBNY.chinajournal.net.cn> <http://xbnydxxb.periodicals.net.cn>