

# 隧道施工数值模拟及衬砌强度安全系数分析

王 勇

(北京交通大学土建学院, 北京 100044)

**【摘 要】** 以某隧道为背景, 采用二维弹塑性有限元分析方法, 模拟隧道开挖和支护过程, 计算衬砌和围岩内力及衬砌的强度安全系数, 研究衬砌厚度变化对其安全系数和结构稳定性的影响, 探讨最小衬砌安全厚度, 为类似隧道设计施工提供科学依据。

**【关键词】** 隧道; 有限元方法; 数值模拟; 强度安全系数

**【中图分类号】** TU 94

## Numerical Simulation on Tunnel Construction and Security Analysis of the Lining Structure Strength

Wang Yong

(College of Civil and Architecture Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044 China)

**【Abstract】** By using the 2D-FEM of elastic-plasticity, simulation of tunnel excavation is carried out, and the internal force and safety coefficient of the lining is calculated to inspect structure security. Then the thesis discusses the effect of thickness changing on lining safety coefficient and structure stability, thus offers guidance and reference for the design and construction of similar highway tunnel.

**【Key words】** tunnel; FEM; numerical simulation; safety coefficient

### 0 引言

隧道衬砌的投资约为隧道全部投资的  $1/4 \sim 1/3$ 。由于各种人为和客观因素, 建成的实态衬砌结构与理想设计条件下的结构相差很大, 特别表现在因各种施工因素而引起的衬砌厚度的变异性上。据有关资料<sup>[1]</sup>显示, 二次衬砌各截面的厚度能全部严格达到设计要求的隧道仅占 50% 左右, 这不仅降低二衬的安全储备能力, 影响隧道使用寿命, 更危及隧道和行车安全, 隐患相当严重。隧道二次衬砌厚度不足引起的隧道病害情况越来越为人们所重视。因此探讨隧道衬砌厚度对隧道结构可靠性的影响, 评价衬砌强度的安全性, 是当前亟待解决的问题。

传统观念认为对于复合式衬砌的隧道结构, 在较坚固的地层中, 二衬可仅作为安全储备, 其厚度达到施工允许的最小厚度即可, 但在不低于施工允许最小值时, 改变二衬厚度对结构强度安全有何影响, 二衬厚度与其强度安全系数间存在怎样的关系, 如何确定衬砌的最小安全厚度, 这些问题无论是定性说明, 还是定量评价都有待进一步的探讨和研究。

为掌握衬砌厚度变化引起的围岩和支护结构的力学状态, 特别是衬砌厚度变化与其自身内力和强度安全系数的关系, 本文以某隧道为背景, 通过有限元数值模拟的方法, 对隧道结构的开挖和支护过程进行二维弹塑性分析<sup>[2]</sup>, 并通过改变模型衬砌厚度, 探讨衬砌厚度变化与隧道结构变形、内力的关系, 计算衬砌强度安全系数, 并以此对隧道衬砌安全性进行评价, 探讨最小衬砌安全厚度, 从而为隧道衬砌设计和施工的安全可靠性提供科学依据和技术指导。

### 1 隧道模型及计算结果分析

根据某隧道的初步设计资料, 该隧道为单洞双车道, 隧道穿越地段围岩多为 II 类, 支护结构为曲墙式带仰拱复合衬砌。隧道二衬厚度设计值为 35 cm, 但因施工原因, 二衬实测厚度在全里程内有较大变化, 实测值从 15 ~ 40 cm 均有涉及, 其中约一半区间段厚度低于设计值。本次有限元模拟计算根据实际隧道衬砌厚度和不足情况、隧道围岩类型以及埋深大小等因素, 建立模拟隧道空间开挖的二维有限元模型进行分析, 通过改变模型衬砌厚度, 计

算隧道结构变形和内力,分析衬砌厚度和其强度安全系数的关系,并对该隧道衬砌安全性进行评价。为方便起见,仅建立了二衬厚度为 15 cm、20 cm、25 cm、30 cm、35 cm、40 cm 六个模型探讨其变化规律。

### 1.1 隧道模型

根据地质和设计资料,该区段共含有两种岩层: I 层为残积层,厚约 8 m; II 层为隧道所在地层,为弱风化层。因有限元计算中,边界约束条件对计算结果影响较大,为减少此不利影响,有限元模型所取地层范围如下:水平方向长度为洞跨的 7 倍,即 80 m;垂直方向由隧道到底部边界为洞跨的 3 倍,即 40 m;上部为根据实际高程模拟地表的自由边界。模型左、右和下部边界均施加法向约束,地表为自由边界,未受任何约束。

所有的有限元分析均由 ANSYS 软件<sup>[3]</sup>完成。计算过程中,围岩和隧道结构初次衬砌均采用 4 节点平面单元(PLANE42)加以模拟,二次衬砌采用梁单元(BEAM3)加以模拟,模型共划分了 608 个单元(见图 1 图 2)。

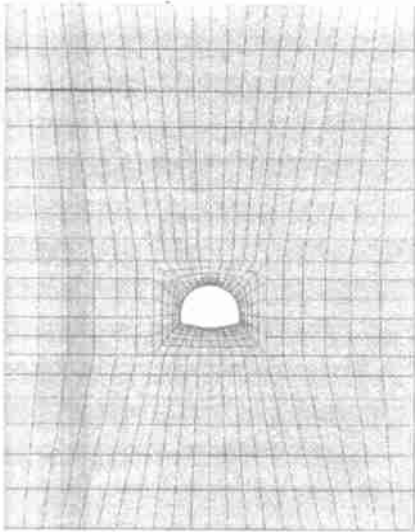


图 1 二维有限元计算模型图(开挖后)

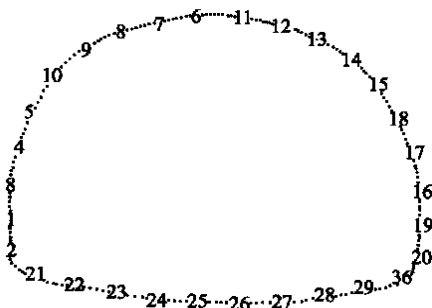


图 2 二次衬砌单元模型及编号图

### 1.2 计算参数

计算采用二维弹塑性分析,围岩材料采用 Drucker-Prager 模型。各个地层及衬砌的物理力学参数根据隧道勘测和设计资料中的实际力学参数确定。计算中采用的力学参数见表 1。

表 1 材料参数

| 类别      | 容重 $\gamma$ /<br>( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 弹性模量<br>$E$ /GPa | 泊松比  | 粘聚力<br>$c$ /MPa | 内摩擦角<br>$\varphi$ ( $^\circ$ ) |
|---------|--|------------------|------|-----------------|--------------------------------|
| 地层 I    | 22.6   | 1.3              | 0.35 | 0.2             | 27                             |
| 地层 II   | 24.1   | 5                | 0.3  | 0.7             | 39                             |
| C25 混凝土 | 25   | 28.5             | 0.16 | —               | —                              |

### 1.3 隧道开挖模拟

用 ANSYS 程序提供的单元进行“生死”处理的功能来模拟隧道的分步开挖和支护过程。所谓单元的“死”,并不是将其从模型中删除,而是将该单元的刚度矩阵乘以一个很小的因子(estif),死单元的载荷、质量等效果将设为 0;单元的“生”并不是将单元加到模型中去,而是在计算过程中将杀死的单元在适当的载荷步中重新激活,并按照单元当前所代表的材料类型重新设定单元的刚度、质量、载荷等数值。所以,当初次和二次衬砌还未施工的时候,其对应单元处于“死”的状态,当衬砌施作之后,单元被激活,处于“生”的状态,参与模型的运算。

因围岩多为 III 类,采用了上下断面开挖方式。计算时首先计算岩体的自重应力,然后再根据上述方法模拟开挖过程。整个模拟步骤如下:①开挖洞室上部,用杀死单元来模拟;②对洞室上部进行初期支护,用激活单元并改变单元材料属性来模拟;③开挖洞室下部;④对洞室下部进行初期支护;⑤做隧洞仰拱和二次衬砌。计算中通过设置二衬梁单元厚度,分别计算了衬砌厚度为 15 cm、20 cm、25 cm、30 cm、35 cm、40 cm 六个模型的结构内力。

### 1.4 计算及结果分析

#### 1) 变形、塑性区及内力

通过模拟分析,开挖引起的最大地表沉降发生在隧道拱顶正上方地表处;开挖引起的地层最大水平位移发生在二次衬砌拱腰处,并且随衬砌厚度增大,沉降和水平位移呈减小趋势。二次衬砌的最大竖向位移发生在拱顶处;最大水平位移发生在拱腰处。

因开挖引起的隧道和围岩塑性区集中在拱脚附近,二衬厚度变化对塑性区范围影响不是太大。围岩塑性区见图3。

梁单元可直接绘制内力图,以下仅列出了二衬

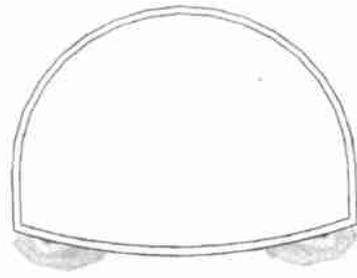


图3 围岩塑性区位置分布图

厚度为 20 cm、30 cm、40 cm 3 种情况时的弯矩和轴力图(见图4图5图6)。

由图4~图6可见,二衬的最大正、负弯矩均发生在拱脚附近,且随着二衬厚度增大弯矩值也逐渐增加,衬砌厚度为40 cm时最大正、负弯矩达到最大值,此时最大正弯矩数值为338.95 kN·m,最大负弯矩为338.85 kN·m。

二衬拱顶、拱腰和拱脚轴力多为压力,仰拱中部出现较小的拉力。二衬最大受压轴力集中在两侧边墙处,且随着二衬厚度增大最大轴力值也逐渐增加,衬砌厚度为40 cm时最大轴力达到最大值,其数值为3.74 MN;最大受拉轴力为0.299 MN,发生在仰拱中部。

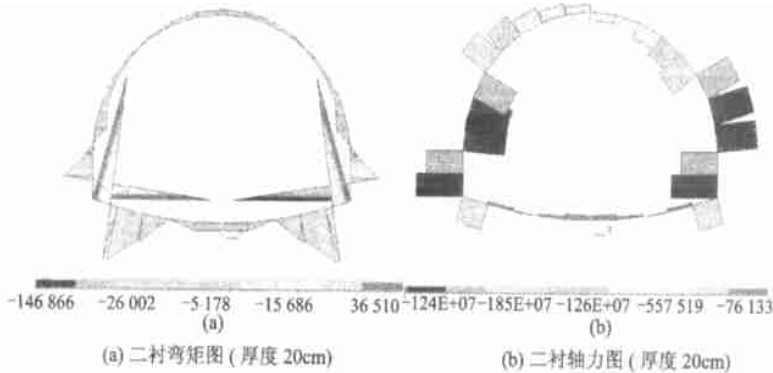


图4 二衬弯矩和轴力图(厚度 20 cm)

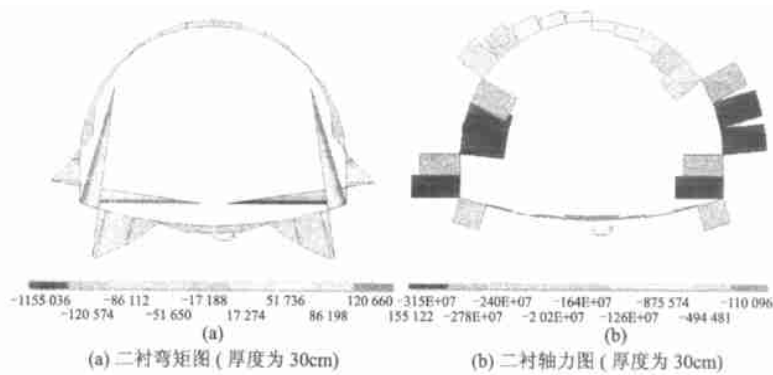


图5 二衬弯矩和轴力图(厚度 30 cm)

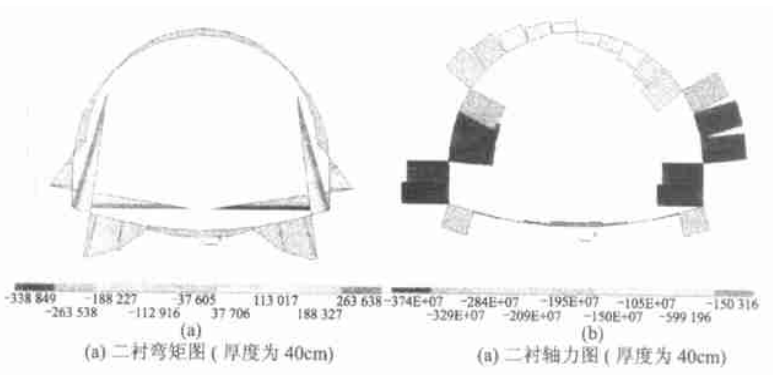


图6 二衬弯矩和轴力图(厚度 40 cm)

## 2) 衬砌强度安全系数计算

为分析衬砌厚度变化对其安全性的影响, 根据上述内力结果计算衬砌结构的安全系数, 对衬砌的安全性能进行检验。根据《公路隧道设计规范》(JTJ 026-90)<sup>[4]</sup> 规定, 混凝土偏心受压构件按破坏阶段进行强度验算。具体计算方法为根据材料的极限强度, 计算出偏心受压构件的极限承载力  $N_{\text{极限}}$ , 与实际内力相比较, 得出截面的抗压 (或抗拉) 强度安全系数, 检查其是否满足文献 [4] 的要求, 即:

$$K = N_{\text{极限}} / N \geq K_{\text{规}} \quad (1)$$

当由抗压强度控制, 即  $e = M / N \leq 0.2h$  时:

$$N_{\text{极限}} = \varphi \alpha R_a b h \quad (2)$$

式中:  $\varphi$  为构件纵向系数, 隧道衬砌取 1;

$R_a$  为混凝土极限抗压强度;

$\alpha$  为轴力的偏心影响系数, 按以下经验公式

$$\alpha = 1 - 1.5^\circ e / h \text{ 确定};$$

$b$  为截面宽度, 取 1 m;

$h$  为截面厚度。

当由抗拉强度控制, 即  $e = M / N \geq 0.2h$  时

$$N_{\text{极限}} = \varphi \frac{1.75 R_1 b h}{\frac{6e}{h} - 1} \quad (3)$$

式中:  $R_1$  为混凝土极限抗拉强度。

采用以上公式, 对隧道拱圈单元的安全系数进行了计算。根据以上数据列表统计了拱脚、拱腰、拱顶单元的安全系数、全部单元安全系数的平均值及检验通过比例, 并绘制了单元强度安全系数图 (见表 2 和图 7)。

表 2 安全系数统计表

| 二衬厚度/cm | 安 全 系 数  |          |          |        | 检验通过比例/% |
|---------|----------|----------|----------|--------|----------|
|         | 拱脚 1 号单元 | 拱腰 10 单元 | 拱顶 6 号单元 | 安全系数均值 |          |
| 15      | 2.218    | 2.817    | 12.054   | 4.347  | 50       |
| 20      | 2.313    | 2.956    | 11.375   | 4.362  | 60       |
| 25      | 2.400    | 3.092    | 10.915   | 4.401  | 80       |
| 30      | 2.483    | 3.226    | 10.592   | 4.456  | 80       |
| 35      | 2.561    | 3.358    | 10.359   | 4.521  | 100      |
| 40      | 2.638    | 3.487    | 10.191   | 4.592  | 100      |

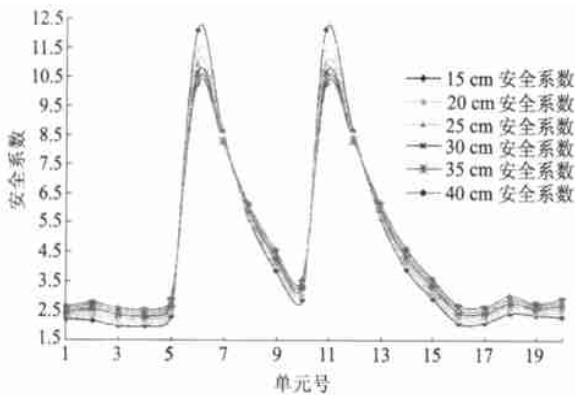


图 7 安全系数图

由表 2 和图 7 可见, 随着二衬厚度增加, 衬砌强度安全系数呈非线性趋势增长; 拱脚和拱腰因应力集中是低安全系数的危险区, 当衬砌厚度为规范规定的最小厚度 20 cm 时, 在未考虑实际拱脚、边墙处加厚加固处理的情况下, 仅有 60% 面积衬砌强度达标; 当衬砌厚度为 25 cm 时, 检验通过比例达到了 80%, 且未通过区域也主要在两侧拱脚和边墙, 其安全系数距规范规定的 2.4 限值较近, 如考虑加固加厚处理, 其单元应该可以全部通过强度检验, 故一

般情况下, 25 cm 可作为二衬施工的最小参考厚度。

该隧道因 90% 以上面积二衬厚度均高于 25 cm, 故虽大面积低于设计厚度, 但其结构安全性还是有一定保障的, 对低于 25 cm 厚度的区域应该注意监测、补强、加厚, 尤其是拱脚和边墙位置。

## 2 结 论

通过以上二维有限元数值模拟分析, 得出以下主要结论:

1) 随着二衬厚度增加, 二衬各项内力均呈上升趋势, 但弯矩的增大幅度大于轴力, 造成偏心影响系数减小, 但其对极限轴力的影响远小于厚度增加的影响, 从而造成二衬强度安全系数增大, 可见二衬厚度是影响其强度安全系数的一个重要因素。

2) 二衬强度安全系数的增加呈非线性趋势, 通过对全部单元安全系数均值的回归, 安全系数  $K$  与厚度  $h$  (cm) 之间存在如下关系:

$$K = 0.0003h^2 - 0.0051h + 4.358$$

3) 拱脚和边墙因内力较大是低安全系数的危险区, 在考虑实际对拱脚加厚加固处理的情况下, 可以将 25 cm 作为二衬施工的最小参考厚度。

4)同时可以看出,用有限元数值方法对隧道开挖支护进行模拟能较真实地反映隧道结构的内力和变形情况,也可以用于对二次衬砌结构安全性能进行评价。

#### 参 考 文 献

1 聂智平,朱少华,等.关于某隧道群病害原因分析及结构安全性评估.华中科技大学学报,2003,20(3):42~45

- 2 潘昌实.隧道力学数值方法.北京:中国铁道出版社,1995
- 3 刘涛.精通ANSYS.北京:清华大学出版社,2002
- 4 中华人民共和国行业标准.JTJ 026-90.公路隧道设计规范,1990

收稿日期:2004-07-12

(上接第251页)

由图1钻孔夯底灌注素混凝土桩荷载试验曲线可知,静荷载试验曲线基本呈弹性变形,在最大荷载800 kN时,沉降量仅为7.43 mm,可见其承载力提高和控制沉降的效果是很明显的。钻孔夯扩挤密灰渣土桩复合地基在最大荷载范围内没有出现比例极限值,因此按相对沉降确定承载力标准值,经计算多元桩复合地基承载力满足结构设计要求。

#### 7 结 论

在类似情况下,采用钻孔夯扩挤密灰渣土桩和钻孔夯扩底灌注桩——下部为钻孔夯扩挤密桩、上部为混凝土灌注桩,这种相当于三元桩的方法进行地基处理是经济上合理、技术上可行的。

#### 参 考 文 献

- 1 陈强,黄志义,左人宇,等.组合型复合地基的特性及其FEM模拟研究.土木工程学报,2001,34(1):50~55
- 2 黎良杰,程学军,等.二元桩复合地基的应用研究.探砂工程,2003(增刊):25~27
- 3 王步云,赵秀芹.砂石桩与低强度混凝土桩组合型复合地基在软土地基中的应用(一).岩土工程技术,1997(1):8~14
- 4 王步云,赵秀芹.砂石桩与低强度混凝土桩组合型复合地基在软土地基中的应用(二).岩土工程技术,1997(2):3~5

收稿日期:2004-09-01

## 公 告

《岩土工程技术》杂志《期刊出版许可证》2004年年检后,《岩土工程技术》杂志的分类号“TC”变更为“TU”,国内统一连续出版物号CN 11-3813/TC变更为CN 11-3813/TU,中国标准连续出版物号ISSN 1007-2993/CN 11-3813/TC变更为ISSN 1007-2993/CN 11-3813/TU,主管单位:中国兵器工业集团公司 变更为 中国兵器工业总公司。本刊的版权页等已作了变更。

特此公告

《岩土工程技术》编辑部

2004-09-09