

# 软土隧道纵向剪切传递效应的 三维数值模拟分析

廖少明, 侯学渊, 彭芳乐

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 采用三维空间模型对软弱地层中隧道衬砌结构进行数值模拟分析计算, 针对隧道施工及使用阶段可能遇到的荷载及变形作用两类典型受荷状态, 对比分析了这两种作用、不同作用方式下, 隧道纵向剪切传递规律及其对纵横向内力的影响, 找到了隧道纵向不均匀变形引起的纵向剪切传递的机理以及变形不同区段的隧道横向变形受力特征, 证实了纵向剪切传递是导致隧道横向内力变化的关键因素, 得到了纵向剪切传递对隧道横向结构及接头变形的抑制作用以及与隧道横断面最大附加内力的线性相关性、与隧道原始内力正负叠加效应等重要结论, 对隧道横向设计中考虑纵向变形的影响具有重要参考价值。

**关键词:** 隧道工程; 纵向沉降; 纵向剪切传递; 三维数值模拟

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2005)增 1 - 5054 - 06

## 3D MODELING OF LONGITUDINAL SHEAR TRANSFERENCE OF TUNNEL IN SOFT GROUND

LIAO Shao-ming, HOU Xue-yuan, PENG Fang-le

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

**Abstract:** With regard to the two typical states of loading and unloading actions of tunnel encountered in soft ground during construction and service stages, three-dimensional numerical method is applied to analyze the longitudinal shear transference of segment tunnel lining. The influence of the two types of actions on internal forces of tunnel cross-section and their characteristics are presented, which verify that the longitudinal shear transference is closely correlated with the key factor of influencing on the internal forces of tunnel cross-section caused by longitudinal loading and unloading action on the tunnel. It is concluded that the longitudinal shear transference restrains the unequal deformation of tunnel cross-section, and leads to more bearing load on tunnel lining and less bearing load on ground in the meanwhile. The additional internal forces of tunnel cross-section caused by longitudinal actions vary linearly with longitudinal shear transference and its superposition forms with significant original forces variation along the longitudinal axis of tunnel. The positive superposition occurs at the passive deformation part and is the critical control state of design. These results are obtained for the first time and will be benefit to the cross-section design of tunnel in soft soil while considering the effect of unequal longitudinal load and settlement.

**Key words:** tunneling engineering; longitudinal settlement; longitudinal shear transference; 3D modeling

**收稿日期:** 2004 - 03 - 29; **修回日期:** 2004 - 05 - 31

**基金项目:** 国家及上海市重点学科建设基金资助项目

**作者简介:** 廖少明(1966 -), 男, 博士, 1988年毕业于同济大学地下建筑专业, 现任副教授、硕士生导师, 主要从事盾构隧道设计计算理论与信息化施工控制技术方面的教学与研究工作。E-mail: liaosm@online.sh.cn.

## 1 引言

隧道的纵向不均匀变形作用引起的隧道结构纵横向效应实质上是一个三维空间效应的问题。在纵向不均匀变形条件下,沿隧道纵向不同截面处产生的附加作用是变化的,因而产生的隧道内力也是不同的,其剪切力的大小沿纵向变化也较大,在这种情况下,静态研究某一截面的剪切影响不能了解隧道纵向内力变化的全貌<sup>[1]</sup>。

隧道的三维空间效应,主要取决于隧道的纵向刚度,即隧道环间接头的连接刚度,如果环间连接刚度相对衬砌刚度很低,隧道可以看作一个单一的横向平面问题来处理;如果刚度达到一定程度,则在一定作用范围内,隧道纵向对横向将具有明显的空间约束作用,对隧道横断面内力影响较明显。通缝拼装的管片隧道纵向刚度较弱(具有榫槽接头情况除外),一般情况下可以看作平面问题对待;而对于错缝拼装的管片隧道,隧道纵向刚度接近于匀质隧道,在局部荷载和变形作用下,任一横断面在荷载平衡中,将受到相邻两侧截面的剪切约束作用,使得隧道横断面的弯曲变形减小。由此看来,如果以匀质隧道来计算隧道的空间效应,应该具有较好的代表性。

本文建立的模型以匀质隧道为计算模拟对象,来考察隧道横截面内力分布情况,通过三维模拟计算,进一步分析论证隧道纵向剪切荷载的分布及其与横断面内力的关系。

## 2 计算模型及工况

### 2.1 计算模型与计算方法

由于隧道衬砌的厚度较小,所以对隧道衬砌可以采用空间壳单元模拟。边界条件按弹性地基考虑,沿隧道设置全纵向、全圆周弹簧,地基按单向压缩弹簧模拟,当结构与地基接触并发生指向地基的位移时,弹簧发生作用,此时地基弹簧受压,反之地基弹簧将受拉,地基弹簧失效。计算过程采用反复叠代方式计算,直至所有地基弹簧处于非受拉状态。单向压缩弹簧的单元刚度矩阵如下

$$[K_i] = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} C & 0 & 0 & -C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -C & 0 & 0 & C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\frac{AE}{L}$  为弹簧线刚度;  $C$  为常数,且有

$$C = \begin{cases} 1.0 \times 10^{-6} & (\text{单元受拉时}) \\ 1 & (\text{单元受压时}) \end{cases} \quad (2)$$

计算采用 ANSYS5.0 进行建模和分析。建模过程中,利用该软件内植的应用程序开发语言 APDL 进行编程,对各种工况进行模拟计算。有限元模型如图 1 所示。

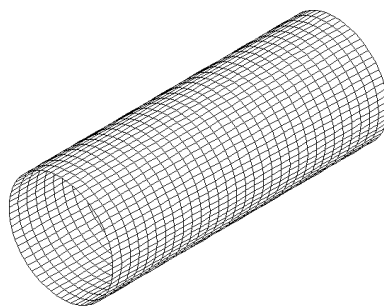


图 1 隧道三维有限元网格划分  
Fig.1 3D FEM analysis model of tunnel

### 2.2 计算工况及参数

隧道在运营过程中遇到 2 种典型的工作状态:加载与卸载。位于地层中的隧道在加载情况与卸载情况下的受荷(作用)模式是不同的:在加载情况下,荷载(或其他作用)往往指向结构表面;卸载情况下,荷载(或其他作用)背离结构表面<sup>[2]</sup>。显然这两种作用方式下,隧道的受力状态有较大区别。一般情况下,隧道承受的上覆土荷载和其他超载或地层初始应力场为加载模式。而对于隧道所处地基发生主动变形下沉或隧道下卧层发生水土流失时,则隧道处于卸载状态。本文将针对这两种主要工况条件按照其作用范围,分别进行 5 种工况下的计算分析,以分析不同作用范围及不同变形曲线特征条件下隧道结构的空间效应,从而进一步探讨隧道纵横向内力联系及纵向剪切传递规律。计算域取隧道纵向长度  $L=100$  m,地基基床系数  $k=10\,000$  kN/m<sup>3</sup>。

(1) 加载条件下的工况,如图 2 所示,加载大小  $q=20$  kPa。隧道空间加载区域为以下作用域内隧道拱顶上半圆周:

- ① 荷载作用范围为全部计算域( $L$ ) (工况 A1);
- ② 荷载作用范围为  $L/2$  (工况 B1);
- ③ 荷载作用范围为  $L/4$  (工况 C1);
- ④ 荷载作用范围为  $L/6$  (工况 D1);
- ⑤ 荷载作用范围为  $L/8$  (工况 E1)。

(2) 变形条件(或卸载条件)下的工况,如图 3 所

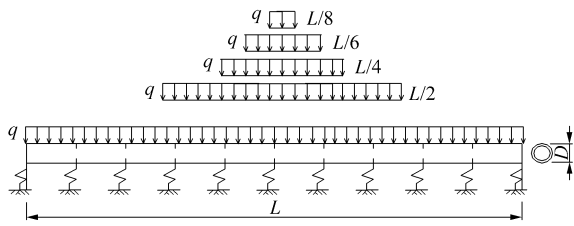


图2 隧道三维计算的荷载作用(加载)工况示意图  
Fig.2 Schematic diagram of load action (loading) cases for three-dimensional calculation of tunnel

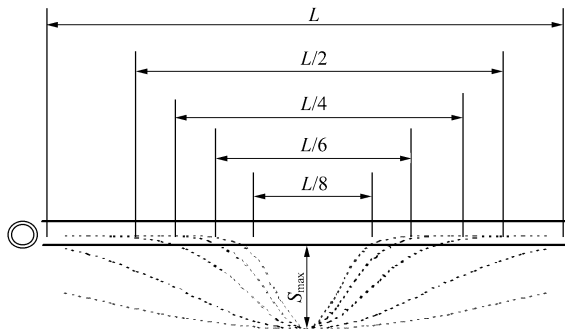


图3 隧道三维计算的变形作用(卸载)工况示意图  
Fig.3 Schematic diagram of deformation action (unloading) cases for three-dimensional calculation of tunnel

示, 采用高斯变形曲线(Peck 曲线<sup>[3]</sup>), 最大变形值  $S_{max}=10\text{ mm}$ 。隧道空间变形作用区域为以下作用域内隧道下半周:

- ① 变形作用范围为全部计算域(L) (工况 A2);
- ② 变形作用范围为  $L/2$  (工况 B2);
- ③ 变形作用范围为  $L/4$  (工况 C2);
- ④ 变形作用范围为  $L/6$  (工况 D2);
- ⑤ 变形作用范围为  $L/8$  (工况 E2)。

### 2.3 三维数值分析结果的内力换算

为了与一维弹性地基梁或平面问题计算结果相对应, 三维计算结果的内力与变形必须经过转换才能与之进行对比分析, 例如一维计算得到的隧道纵向变形为隧道的整体变形, 并不包括横断面的局部变形, 三维计算中得到的则为横断面各点的变形, 需要将其进行转换为对应的整体变形, 即隧道形心的变形; 对于纵向弯矩而言, 由于隧道纵向变形引起的隧道板壳纵向弯矩是相对较小的, 所以本文主要关注的是隧道纵向整体弯矩, 由隧道横断面不均匀纵向轴应力构成的。对于横断面弯矩则只需将其沿纵向单位长度进行积分即可得到横断面各点沿纵向单位长度的弯矩。

- (1) 由隧道板壳变形换算纵向整体变形  
设由三维计算得到隧道纵向某横断面各点的径

向及切向变形分别为  $u_i, v_i$ , 其竖向变形分量为

$$S_{yi} = u_i \sin \theta + v_i \cos \theta \quad (3)$$

则隧道横断面形心的竖向变位为

$$S_{yc} = \frac{\int_0^L S_{yi} dl}{L_c} \approx \frac{\sum_{i=1}^n S_{yi} \Delta l_c}{L_c} \quad (4)$$

式中:  $n, \Delta l_c, L_c$  分别为单元数、单元长度及隧道周长(以下同)。

若数值分析中, 单元长度相等, 则

$$S_{yc} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{yi} \Delta l_c}{L_c} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{yi}}{L_c / \Delta l_c} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{yi}}{n} = \overline{S_{yi}} \quad (5)$$

即隧道横断面整体变形(隧道横断面形心的变位)为横断面内各点变形的算术平均值。

- (2) 由隧道板壳弯矩换算纵向整体弯矩<sup>[10]</sup>

设由三维计算得到隧道纵向某横断面内各点的纵向轴应力为  $T_{yi}$ , 则纵向整体弯矩应为整个横断面内各点纵向轴应力绕隧道横断面形心转动的力矩之和(如图4所示)为

$$M_z \approx \sum_{i=1}^n [T_{yi} \Delta l (y - y_c)] \quad (6)$$

由于计算中设定坐标原点为隧道形心, 所以  $y_c = 0$ , 则有

$$M_z \approx \Delta l \sum_{i=1}^n (T_{yi} y) \quad (7)$$

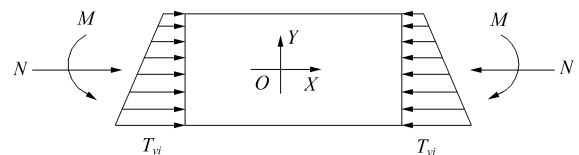


图4 纵向整体弯矩与横截面轴向应力的关系  
Fig.4 Correlation of overall bending moments and longitudinal axial stresses

- (3) 由隧道板壳剪切力换算横断面剪切荷载<sup>[10]</sup>

设由三维计算得到隧道纵向某横断面内各点的切向剪应力为  $\tau_i$ , 则整个横断面沿竖向的总剪切力为

$$Q_y = 2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \tau_i r \cos \theta d\theta \quad (8)$$

式中:  $r$  为隧道半径。则剪切荷载按照相邻截面剪切力的差值平均值计算为

$$P = \frac{Q_y(i+1) - Q_y(i)}{\Delta Z} \quad (9)$$

式中:  $\Delta Z$  为计算单元的相邻两截面的距离(单位长度或环宽)。

### 3 荷载作用模式下的隧道纵向剪切传递效应分析

#### 3.1 荷载作用引起的剪切荷载传递分析

隧道横断面承受的剪切荷载与环面剪切力不同,前者为隧道横断面相邻环截面产生的不平衡剪切力,后者为隧道纵向不同环截面的总剪力。其计算结果分别见图 5, 6。从环面剪切力的分布来看,其主要反映隧道纵向荷载及内力的平衡,与隧道横断面的内力关系不是很直接。环面剪切力在某一横断面两侧产生的不平衡力是使隧道横断面产生横向弯曲的主要因素。环面剪切力从数值上看比剪切荷载要大得多,且与后者的纵向分布也大不相同。同时,由图 5 可知,隧道横断面剪切荷载由于地基抗力的存在向远端传递,从而影响到隧道纵向荷载作用区以外的各个断面。

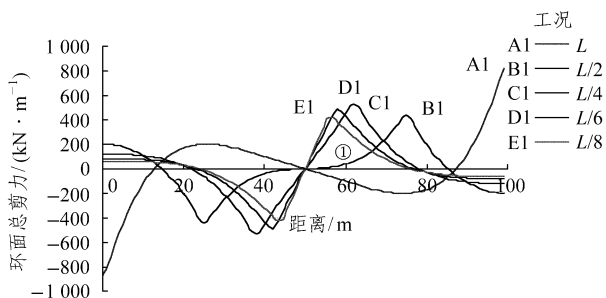


图 5 工况 A1~E1 隧道环面剪切力的纵向分布

Fig.5 Circumferential shear force under cases of A1~E1

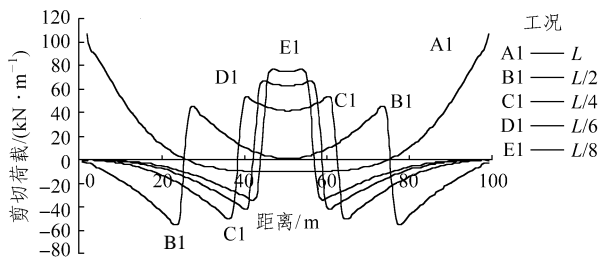


图 6 工况 A1~E1 隧道横断面剪切荷载的纵向分布

Fig.6 Shear loads on tunnel cross section under cases of A1~E1

从计算结果可以看出,对于荷载作用区而言,沿隧道纵向任意单位长度隧道横断面总荷载为 124 kN/m,而剪切荷载最大约为 75 kN/m(发生在最小作用域工况 E1),约占总外荷的 60%,剩余 40%则由地基抗力分担。在不同作用域工况条件下,剪切荷载与地基抗力的荷载分担是变化的。作用范围越大,剪切荷载分担的比例越小,而地基分担的荷载越大(荷载作用方向),隧道横向受弯越严重,反之亦然。

#### 3.2 剪切传递作用引起的横向附加内力

不同荷载工况条件下,沿隧道纵向典型横断面的最大内力计算结果见图 7。从计算结果可以得知,不同荷载工况下,沿隧道纵向不同截面均呈现横向受压弯曲状态,其弯曲内力大小随着荷载作用范围的变化而变化。荷载作用范围较小时,对荷载作用区域内某一横断面而言,受到来自相邻截面的空间作用越明显,这种空间作用主要体现在剪切荷载的作用。从图 7 可以看出:在荷载作用区内,这种剪切作用明显加大,对隧道横断面的横向弯曲起到了较大抑制作用。随着荷载作用范围的增大,剪切荷载的减小,来自相邻截面的空间作用明显减小,沿纵向各横断面逐步接近平面变形状态,其承担的荷载将全部由地基承担,从而形成明显的横向受压状态,产生较大的弯曲应力与变形。

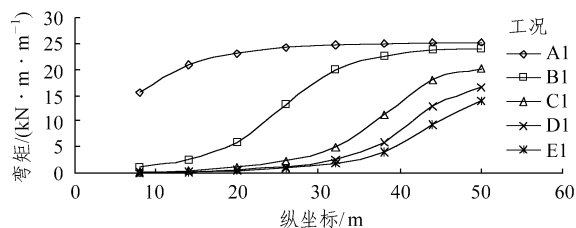


图 7 工况 A1~E1 隧道典型横断面最大弯矩的纵向分布

Fig.7 Maximal moment of cross-section under different load action cases A1~E1

从内力大小的分布来看,荷载作用中心处隧道横断面的内力最大,越靠近边界,内力值越小,这与边界提供的剪切荷载有关。

从图 7 可明显看出,不同荷载工况条件下(同等荷载大小,不同作用范围),隧道横断面的内力有较大不同;A1 工况(全纵向均布荷载)下,隧道纵向各断面内力变化很小,接近于平面受力状态,且横断面内力值达到最大。随着作用范围的减小,隧道横断面内力的最大值减小,且沿纵向分布很不均匀,衰减很快,呈现明显的空间作用状态,其对应的剪切荷载趋向大而集中,如图 6 所示。

### 4 变形作用模式下的纵向剪切传递效应分析

地基的纵向变形作用模式采用典型的高斯曲线模拟,地基最大变形  $S_{max}=10\text{ mm}$ ,以下根据不同作用范围确定的不同工况条件,对隧道纵向变形给横断面内力产生的影响进行分析。

#### 4.1 横向剪切荷载传递分析

从图 8, 9 中可以看出, 剪切力与剪切荷载的分布有较大区别, 其中剪切荷载与变形作用的分布密切相关, 反映隧道纵向各截面相互之间的作用。从图 9 可知, 随着变形作用范围的加大, 剪切荷载逐渐减小。当变形作用范围达到满布时(A2 工况), 沉槽中心剪切荷载几乎为 0, 且当变形作用范围较小时, 在拐点附近隧道出现较大的反向剪切荷载。由图 10 可知, 剪切荷载与横断面附加弯矩大体呈线性关系。

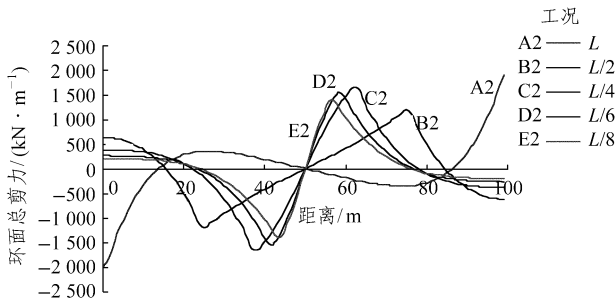


图 8 工况 A2~E2 隧道环面剪切力的纵向分布  
Fig.8 Circumferential shear force under cases of A2~E2

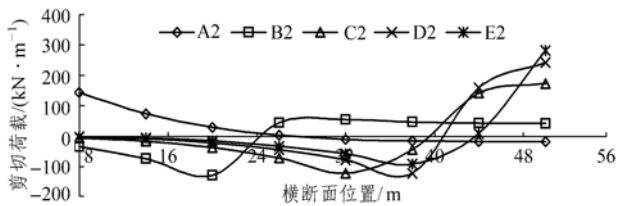


图 9 工况 A2~E2 隧道横断面剪切荷载的纵向分布  
Fig.9 Shear load on cross-section under cases of A2~E2

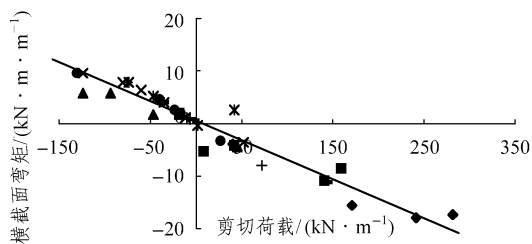


图 10 隧道横断面剪切荷载与横断面最大弯矩的相关性  
Fig.10 Correlation of shear loads and maximal bending moment of tunnel cross-sections

### 4.2 剪切传递引起的横向附加内力

不同变形作用工况条件下, 沿隧道纵向典型横断面的最大内力计算结果见图 11。

从计算结果可以得知, 不同变形作用工况下, 沿隧道纵向不同截面呈现横向受压弯曲与竖向拉伸变形状态的变化: 在主动变形区(或称卸载区), 隧道横断面呈现竖向拉伸变形, 而在被动加载区, 隧道横断面呈现横向压扁变形(见图 12)。在与隧道原

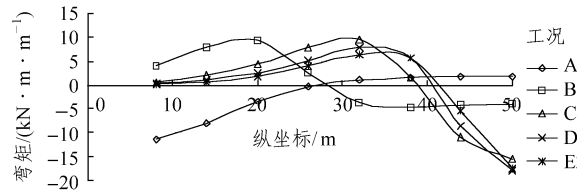


图 11 不同工况下隧道典型断面最大弯矩纵向分布  
Fig.11 Maximal bending moment of tunnel cross-sections under cases of A2~E2

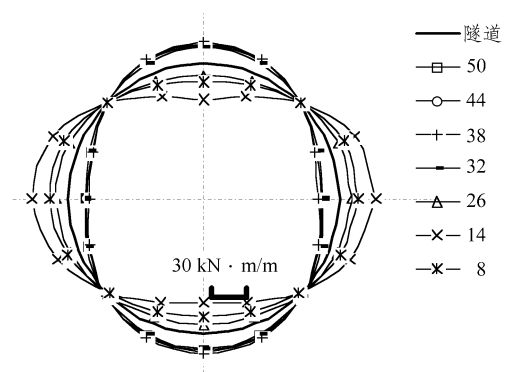


图 12 工况 B2 下隧道纵向各典型断面弯矩分布  
Fig.12 Bending moment of cross-section under case of B2

有内力(地层水土压力作用)进行叠加时, 主动区为负叠加, 被动加载区为正叠加, 所以变形作用区以外的被动加载区隧道更为不利。横断面弯曲内力大小随着变形作用范围的变化而变化; 变形作用范围较小时, 对变形作用区域内某一横断面而言, 受到来自相邻截面的空间作用越明显, 这种空间作用主要体现在剪切荷载的作用, 从图 11 可以看出, 在主动变形作用区这种剪切作用明显加大, 对隧道横断面的横向弯曲起到了较大抑制作用; 随着变形作用范围的增大, 剪切荷载的减小, 来自相邻截面的空间作用明显减小, 沿纵向各横断面逐步接近平面变形状态, 其承担的荷载将全部由地基承担, 从而形成明显的横向受压状态, 产生较大的弯曲应力与变形。

从图 11 可以看出, 在沿隧道全纵向变形作用下, 在沉槽中部, 隧道变形曲率较小, 横断面的弯矩很小, 其纵向传递的剪切荷载很小。

与荷载作用工况不同的是: (1) 变形作用工况下隧道横断面内力的最大值所在工况为 C2, 即作用域为 1/4 计算域的工况, 既不是全纵向作用工况, 也不是最小作用范围的工况。此工况条件下(C2)的内力为各种变形工况条件下的内力最大值, 即 18 kN · m/m; (2) 从内力大小的分布来看, 变形作用工况的内力存在两个峰值点, 一个位于变形作用中心, 一个位于变形曲线拐点附近。其中变形作用中

心处隧道横断面的内力最大, 越靠近边界, 内力值越小。

## 5 结 论

(1) 由于隧道衬砌厚度相比隧道尺寸而言较小, 模拟计算中采用壳单元处理, 由此得到的计算结果表明隧道横断面剪切力的分布主要是切向分布, 横断面剪切荷载也主要以切向剪切荷载的作用为主, 这种剪切作用对隧道横断面受力变形总体是有利的。

(2) 剪切荷载与隧道横断面内力具有很强的线性相关性, 隧道剪切荷载对隧道横断面内的影响较大。

(3) 当作用范围较小时, 对作用区域内某一横断面而言, 受到来自相邻截面的空间作用越明显, 这种空间作用主要体现在剪切荷载的作用, 在荷载作用区这种剪切作用明显加大, 对隧道横断面的横向弯曲起到了较大抑制作用; 随着作用范围的增大, 剪切荷载的减小, 来自相邻截面的空间作用明显减小, 沿纵向各横断面逐步接近平面变形状态, 其承担的荷载将全部由地基承担, 从而形成明显的横向受压状态, 产生较大的弯曲应力与变形。

(4) 在不同荷载作用工况条件下, 剪切荷载与地基抗力的荷载分担是变化的。作用范围越大, 剪切荷载分担的比例越小, 而地基分担的荷载越大(荷载作用方向), 隧道横向受弯越严重, 反之亦然。对于荷载作用区而言, 最大剪切荷载约占总外荷的 60%, 剩余 40% 则由地基抗力分担。

(5) 对变形作用工况, 从与隧道原始内力的叠加情况来看, 由于主动下沉区为负叠加, 被动加载区为正叠加, 所以变形作用区以外的被动加载区隧道受力变形更为不利。

## 参考文献(References):

- [1] 廖少明, 侯学渊. 软土盾构法隧道设计与施工的最新研究进展[J]. 地下空间, 1998, 18(5): 406 - 412.(Liao Shaoming, Hou Xueyuan. The recent developments in design and construction of shield tunnel in soft soil[J]. Chinese Journal of Underground Space, 1998, 18(5): 406 - 412.(in Chinese))
- [2] 姜启元, 叶 蓉. 软土盾构隧道纵向变形分析[J]. 地下工程与隧道, 1999, 4: 2 - 6.(Jiang Qiyuan, Ye Rong. Longitudinal deformation analysis of shield tunnel in soft soil[J]. Chinese Journal of Underground Engineering and Tunnel, 1994, 4: 2 - 6.(in Chinese))
- [3] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.(Liu Jianhang, Hou Xueyuan. Shield Tunnel[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991.(in Chinese))
- [4] Muir A M. The circular tunnel in elastic ground[J]. Geotechnics, 1975, 25(1): 115 - 127.
- [5] 上海市政工程管理局. 软土市政地下工程施工技术手册[M]. 上海: [s. n.], 1990.(Shanghai Municipal Engineering Administrative Bureau. Technical Manual of Underground Construction in Soft Soil[M]. Shanghai: [s. n.], 1990.(in Chinese))
- [6] 村上博智, 小泉淳. 二次覆工された千鳥組セグメントリングの挙動について [R]. 土木学会論文報告集, 1991. 135 - 141.(in Japanese)
- [7] Sing Y, Nagpal A K. Negative shear lag in framed-tube buildings[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(11): 103 - 114
- [8] 张厚美, 过 迟, 付德明. 圆形隧道装配式衬砌接头刚度模型研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 25 - 31.(Zhang Houmei, Guo Chi, Fu Deming. Study on joint stiffness model of assembled lining of circular tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 25 - 31.(in Chinese))
- [9] 西野健三, 吉田和夫, 小泉淳. シールドトンネル縦断方向の現場載荷試験とその考察[R]. 土木学会論文報告集, No.379, 1987.(in Japanese)
- [10] 宋子康, 蔡文安. 材料力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1998.(Song Zikang, Cai Wen'an. Material Mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1998.(in Chinese))