

# 应力路径对特大断面隧道围岩压力的影响

严宗雪<sup>1, 2</sup>, 房莹光<sup>1</sup>, 刘庭金<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510641; 2. 广州市公路开发公司, 广东 广州 510080)

**摘要:** 介绍4车道公路隧道的建设状况, 分析目前4车道公路隧道的设计、施工等研究进展。结合广州龙头山双向8车道高速公路隧道, 利用现场监测数据和不同开挖方式对应的围岩荷载的数值计算结果, 分析和讨论应力路径对特大断面隧道围岩荷载的影响, 并验证4车道特大断面隧道施工的围岩松弛范围。引入过程荷载影响系数 $\kappa_{ij}$ , 对导洞的荷载影响系数进行修正, 在与普氏理论、公路隧道设计规范、曲海峰提出的荷载公式进行计算对比后, 提出特大断面隧道更为合理的过程荷载计算公式。

**关键词:** 隧道工程; 特大断面; 松弛区; 应力路径; 数值模拟

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2009)11-2228-07

## EFFECT OF STRESS PATH ON SURROUNDING ROCK PRESSURE OF SUPER LARGE-SECTION TUNNEL

YAN Zongxue<sup>1, 2</sup>, FANG Yingguang<sup>1</sup>, LIU Tingjin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China; 2. Guangzhou Highway Development Corporation, Guangzhou, Guangdong 510080, China)

**Abstract:** The construction of the situation of four-lane tunnel is introduced, and then its developments of design and construction at present are analyzed. Supported by Longtoushan bidirectional expressway tunnel with 8 lanes in Guangzhou, the effect of stress path of rock pressure on large-section tunnel is fully studied and discussed by making use of site measured data and numerical results of rock load with different excavations; meanwhile, the range of rock loose area of large-section tunnel with 4 lanes is verified. The load effect-coefficient of guide hole is modified by the coefficient of  $\kappa_{ij}$ . After that, the results calculated by the formula compared with that calculated by M. M. Promojyifakonov Theory, design specifications of highway tunnel and the formula proposed by H. F. QU, a new formula is proposed to calculate the process load of large section tunnel.

**Key words:** tunnelling engineering; super large section; loose area; stress path; numerical simulation

## 1 引言

随着我国高等级公路建设的迅速发展和交通运输需求的迅猛增长, 开始建设大断面隧道, 四车道隧道的兴建也开始出现。我国先后修建了4条单洞4车道公路隧道, 包括: 贵州大阁山隧道(宽为21.04 m、高为11.45 m(不含仰拱)), 沈大高速公路韩家寨隧道<sup>[1]</sup>(宽为21.24 m、高为15.52 m), 深圳雅

宝隧道<sup>[2]</sup>(宽为20.90 m、高为13.48 m), 广州市龙头山隧道<sup>[3]</sup>(宽为21.6 m、高13.58 m)。

目前国内外已修建的4车道隧道还较少, 通常是进行类比设计, 还未形成成熟的设计理论, 如确定隧道围岩荷载计算仍然参考2车道隧道进行。在公路隧道设计规范和公式<sup>[4~10]</sup>中均有规定, 但其计算结果与实际相差较大。万明富等<sup>[1, 11]</sup>对4车道隧道的开挖进行了模型试验; 耿峦峰等<sup>[12, 13]</sup>对单拱4车道隧道开挖力学特性进行了分析; 张丙强等<sup>[14~17]</sup>

**收稿日期:** 2009-07-01; **修回日期:** 2009-08-09

**作者简介:** 严宗雪(1976-), 男, 2000年毕业于长安大学建筑工程专业, 现为博士研究生, 主要从事地下及隧道工程方面的技术管理与研究工作。E-mail: johnyzyx@163.com

对 4 车道隧道进行了数值分析和计算, 曲海峰<sup>[18]</sup>曾进行特大断面隧道施工过程围岩荷载模式的研究, 取得了一定进展, 其认为左右导洞的荷载影响系数相等, 即  $\eta_1 = \eta_2$ 。

由于特大断面隧道大多是按照双侧壁导洞进行开挖, 侧壁及中部核心土的开挖必将多次扰动左右导洞围岩, 使围岩应力不断改变。以致引起围岩应力随应力路径改变而不断重分布, 同时导致塑性区不断扩展和变化, 由此引起左右导洞围岩松弛区的不同, 围岩的过程荷载的不同, 从而使左右导洞的荷载影响系数  $\eta_1, \eta_2$  不同, 有必要对大断面隧道的导洞之间的荷载影响作进一步研究。

## 2 围岩松弛区变形测试与分析

本文结合广州龙头山大断面隧道施工过程(见图 1), 对围岩松动区的移位进行测量, 以确定松动区的范围, 为大断面隧道围岩荷载计算提供依据, 同时为分析应力路径对围岩荷载的影响提供实测数据。广州龙头山隧道是国内第一条双向 8 车道高速公路长隧道, 单洞总长为 2 016 m, 隧道最大埋深为 98 m。

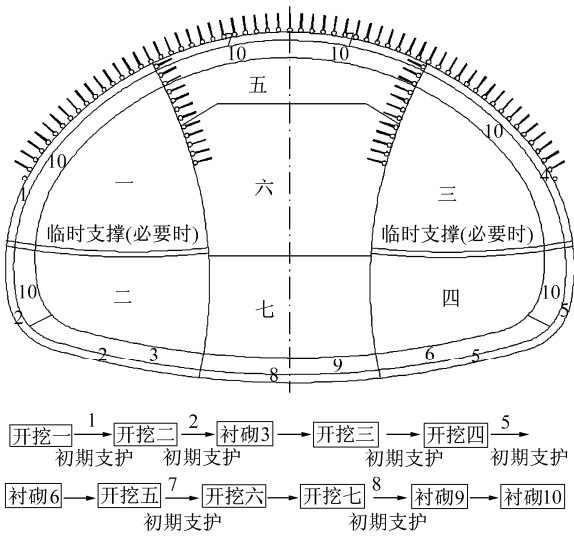


图 1 V 级围岩施工工序示意图  
Fig.1 Excavation process of the grade V surrounding rock

在进口左线 ZK5+870 处布置了多点位移计观测断面, 从地表钻孔至距离隧道开挖线 1.5 m 处, 放入多点位移计, 每隔一定距离设置 1 个测点, 测量该点的位移变化。通过 2 点之间的相对位移变化值与 2 点之间距离的拉应变是否达到 0.5‰ 来判定该区域是否松动。

岩石的极限拉应变值可通过岩石的单轴抗拉强度  $R_{拉}$  与弹性模量  $E$  的比值确定, 即

$$[\varepsilon] = \frac{R_{拉}}{E} \quad (1)$$

式中:  $[\varepsilon]$  为岩石的极限拉应变;  $E$  为岩石的弹性模量, 强风化二长花岗岩的弹性模量  $E = 3.42 \text{ GPa}$ ;  $R_{拉}$  为岩石的单轴抗拉强度, 其值为 1.5~2.0 MPa, 取  $R_{拉} = 1.75 \text{ MPa}$ 。由此可求得强风化花岗岩的极限拉应变约为 0.5‰。

于 K5+870 断面处共埋设了 3 套(孔)多点位移计, 第一套因埋设不成功。多点位移计的具体埋设情况如图 2 所示(图 2 中①~③)。

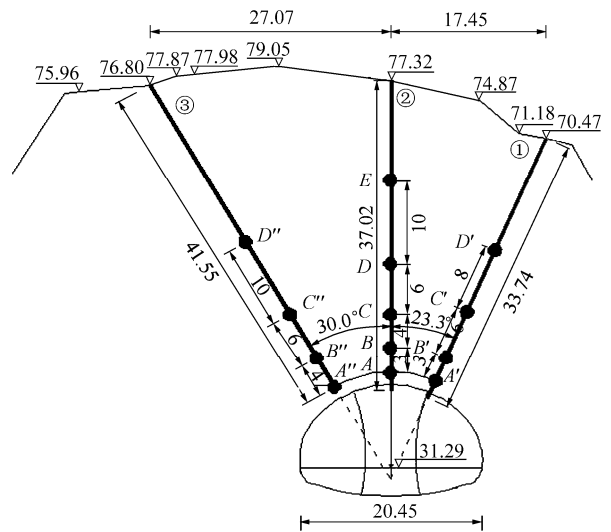
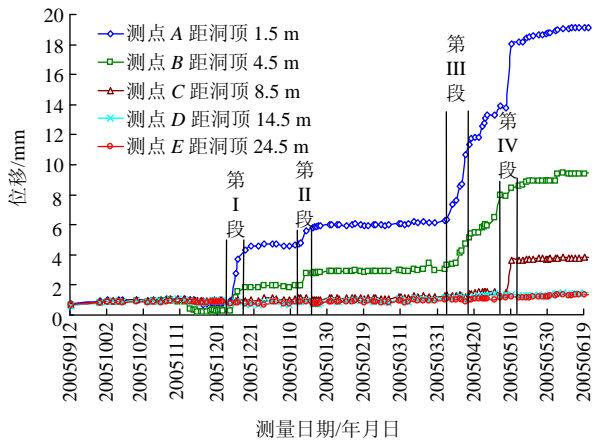


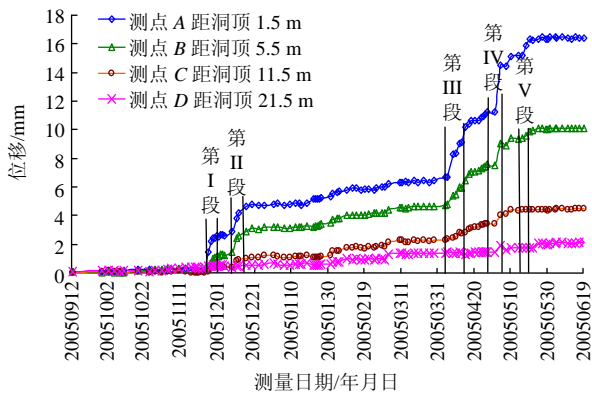
图 2 多点位移计测试布置图(单位: m)  
Fig.2 Arrangement of multipoint displacement meter (unit: m)

利用所埋设的多点位移计根据图 1 表示的施工工序过程对围岩位移进行时程测量。第二套(垂直布置)和第三套(120°布置)多点位移计测得的位移时程曲线如图 3 所示。

图 3(a)所示的实测的位移 - 时间曲线清晰地记录了大断面隧道围岩松动位移产生和发展过程。由图 3 中可见, 位移 - 时间曲线出现 4 处明显突变段(见图 3(a)中第 I~IV 段), 这 4 处位移突变段是隧道开挖掌子面到达测量断面的时段。其中, 第 I, II 段是由右导洞上台阶处于位移测量断面下方的掌子面先后 2 次开挖引起的位移突变。第 I 段的位移突变是当右导洞上台阶掌子面推进至 K5+873 断面附近(2005 年 12 月 23 日)时产生的; 之后停止施工, 直到 2006 年 1 月 18 日该掌子面重新开始施工而引起



(a) 第二套



(b) 第三套

图3 多点位移计测得的位移-时间曲线

Fig.3 Curves of displacement with time measured by multipoint displacement meters

了第 II 段的位移突变。第 III 段位移突变是由左导洞下台阶掌子面开挖推进至位移测量断面附近时引起的位移突变；而第 IV 段位移突变是由核心土掌子面开挖推进至位移测量断面附近时引起的位移突变。从围岩位移时程曲线可看出，除位移突变段以外，围岩位移数据变化不大，由此可知围岩的松动位移主要是由围岩下方的掌子面开挖产生的，而稍远的掌子面开挖产生的围岩松动位移是比较有限的。根据量测方向围岩位移变化来确定拉应变是否达到或超过围岩拉应变极限值作为松动区边界的判断准则，来确定围岩松动区边界。根据表 1 所示物理力学参数，设定在这一围岩条件下的极限拉应变值为 0.5‰。依此，通过现场实测数据的统计分析确

表 1 围岩的物理力学参数<sup>[19]</sup>

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock<sup>[19]</sup>

容重 $\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	泊松比 $\mu$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角/ $^\circ$
20	5.0	1.875	0.333	500	32

定，在核心土开挖后围岩的松弛范围为 10~12 m。

围岩松动区范围的大小是影响围岩荷载的主要因素，隧道开挖施工过程使围岩应力不断重分布而产生复杂的应力路径，由此围岩松动区的位移随之变化，导致围岩塑性区不断扩展和改变，最终使围岩荷载随施工过程变化，即施工产生的复杂应力路径将引起围岩荷载的变化。左右导洞不同的开挖方法，将导致围岩松弛区不对称分布，相应地导致左右导洞围岩有不同的过程荷载，即左右导洞的荷载影响系数也将有所不同。

### 3 围岩松动区变形的数值计算与分析

为较全面和深入地分析大断面隧道围岩松动区的变形情况，本节采用 Marc 有限元软件对围岩变形位移进行模拟计算。计算几何模型取隧道左右侧各为 4 倍洞径，埋深取 2 倍洞高范围作网格离散，网格单元共计 5 807 个，具体离散网格模型如图 4 所示；围岩作为服从 Mohr-Coulomb 屈服准则的弹塑性介质。

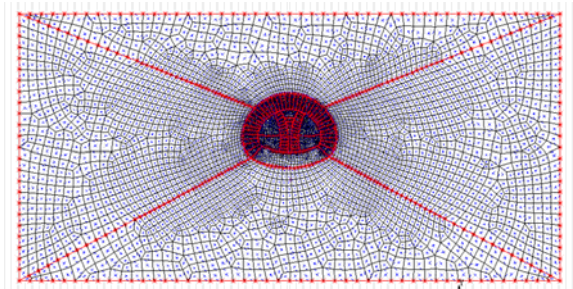


图 4 计算模型

Fig.4 Calculation model

具体对如下 3 种开挖方法的施工过程的围岩松动区变形作出计算(开挖方法 1 为设计方法)：

(1) 开挖方法 1：左上导洞开挖→左下导洞开挖→右上导洞开挖→右下导洞开挖→核心土上部开挖→核心土中部开挖→核心土下部开挖。

(2) 开挖方法 2：右上导洞开挖→右下导洞开挖→左上导洞开挖→左下导洞开挖→核心土上部开挖。

(3) 开挖方法 3：核心土上中部开挖→核心土下部开挖→左上导洞开挖→左下导洞开挖→右上导洞开挖→右下导洞开挖。

(4) 为了便于围岩松动区变形分析，选取 7 条测线(见图 5)上的围岩应变进行了着重计算，利用这些测线上的应变计算结果分析松动区范围。按设定

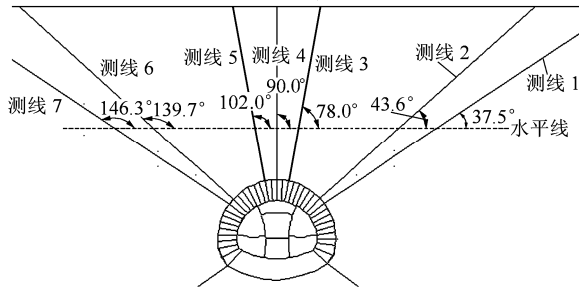
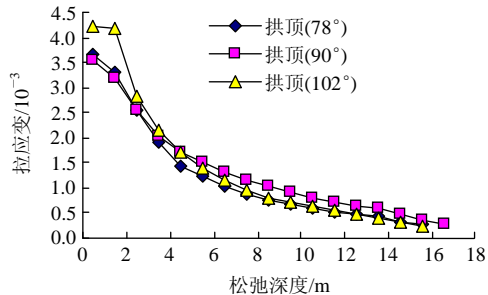


图 5 松动区测线布置

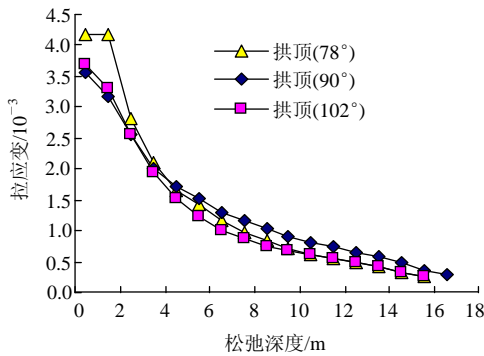
Fig.5 Arrangement of testing lines for loose area

围岩的极限拉应变值为 0.5‰ 的条件来确定围岩松动区的边界。

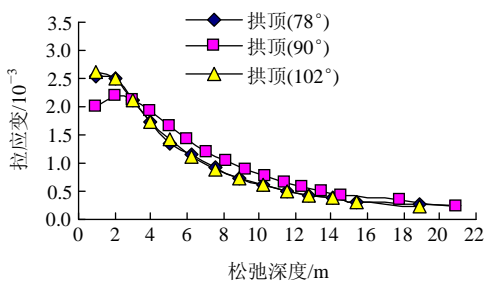
将拱顶测线 3, 4, 5(78°, 90°, 102°)在 3 种开挖方法下的拉应变和松弛深度进行拟合后, 分别得到在开挖核心土后的拱顶围岩拉应变 - 松弛深度的关系曲线如图 6 所示。



(a) 开挖方法 1



(b) 开挖方法 2



(c) 开挖方法 3

图 6 拱顶围岩拉应变 - 松弛深度曲线

Fig.6 Curves of tension strain with loose depth for the vault surrounding rock

从图 6(a), (b)可以看出, 设定极限拉应变为 0.5‰ 确定的围岩松动区深度为 13~14 m, 与测试结果大致吻合。从图 6(c)可以看出, 先开挖核心土其松弛深度为 10~12 m。其他测线上的拉应变与松弛深度的关系由表 2~5 给出。

表 2 开挖方法 1, 2 的左导洞松弛区对比

Table 2 Comparison of loose area in the left guide tunnel between the first and second method

测线	开挖方法 1: 左导洞开挖后的左导洞松弛区			开挖方法 2: 左导洞开挖后的左导洞松弛区		
	深度/m	拉应变/10 <sup>-3</sup>	松弛深度/m	深度/m	拉应变/10 <sup>-3</sup>	松弛深度/m
6	8.372	0.529	8.693	9.496	0.541	10.024
	9.496	0.429		10.620	0.453	
7	7.256	0.589	7.927	8.384	0.536	8.769
	8.384	0.440		9.512	0.430	

表 3 开挖方法 1, 2 的右导洞松动区对比

Table 3 Comparison of loose area in the right guide tunnel between the first and second method

测线	开挖方法 1: 左导洞开挖后的右导洞松弛区			开挖方法 2: 右导洞开挖后的右导洞松弛区		
	深度/m	拉应变/10 <sup>-3</sup>	松弛深度/m	深度/m	拉应变/10 <sup>-3</sup>	松弛深度/m
1	8.384	0.592	9.222	7.256	0.641	8.236
	9.512	0.468		8.384	0.479	
2	9.500	0.580	10.443	8.375	0.550	8.938
	10.625	0.484		9.500	0.450	

表 4 开挖方法 1, 3 的拱顶松动区对比

Table 4 Comparison of loose area on the vault surrounding rock between the first and third method

测线	开挖方法 1: 核心土上部开挖后的拱顶松弛区			开挖方法 3: 核心土上部开挖后的拱顶松弛区		
	深度/m	拉应变/10 <sup>-3</sup>	松弛深度/m	深度/m	拉应变/10 <sup>-3</sup>	松弛深度/m
3	12.80	0.537	13.691	10.20	0.512	10.386
	14.10	0.483		11.50	0.431	
4	13.49	0.584	14.277	11.37	0.568	12.312
	14.55	0.471		12.43	0.492	
5	12.80	0.545	13.823	10.20	0.503	10.252
	14.10	0.488		11.50	0.425	

采用开挖方法 1, 由表 2, 4 得出左导洞开挖后的左导洞平均松弛深度为 8.31 m, 右导洞开挖后右导洞平均松弛深度为 9.83 m。采用开挖方法 1 或 2 在核心土上部开挖后, 均可得出拱顶平均松弛深度

表 5 开挖方法 2 的拱顶松动区

Table 5 Loose area on the vault surrounding rock for second method

测线	深度/m	拉应变/ $10^{-3}$	松弛深度/m
3	12.80	0.545	13.677
	14.10	0.479	
4	13.49	0.585	14.300
	14.55	0.474	
5	12.80	0.548	14.021
	14.10	0.497	

为 13.90 m，同实际监测得出的 14.00 m 接近。

据此，绘制开挖过程松弛区如图 7 所示。由图 7 可以看出，即使同样尺寸的导洞，先开挖和后开挖引起的松动范围明显不同。不同的开挖方法将引起明显不同的围岩松动区范围，导致左右导洞不同的荷载影响系数，由此将导致围岩荷载发生变化。

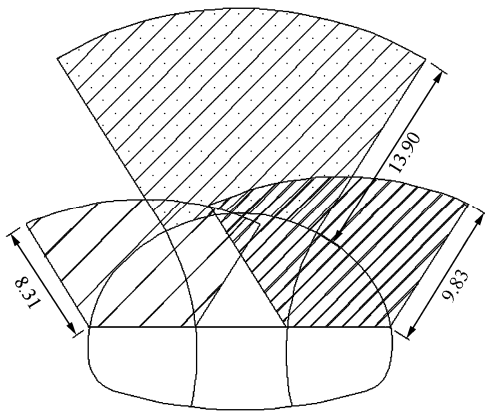


图 7 松动区(单位: m)

Fig.7 Loose areas(unit: m)

不同的施工方法引起不同的荷载影响系数，实质上是在施工产生塑性区而导致围岩松动区的情况下，由不同开挖方法产生的应力路径所导致的。由此可以推知，当施工过程不出现围岩松动区，即不出现塑性区的情况下，不同的开挖方法产生的应力路径将不会导致不同的荷载影响系数。

## 4 大断面隧道过程荷载的修正

### 4.1 现有的过程荷载计算

曲海峰<sup>[18]</sup>曾对深埋大跨隧道的荷载计算模式进行了研究，得出了基于普氏理论和公路隧道规范的过程荷载公式，当采用的导洞数量为 3 时，其相

应的计算公式为：

(1) 基于普氏理论推导公式：

$$q_0 = [\gamma \eta_1^2 b_1 (b_1 / 2 + h_1 \tan \beta)^2 + \eta_2^2 b_2 (b_2 / 2 + h_2 \tan \beta)^2 + \eta_3^2 b_3 (b_3 / 2 + h_3 \tan \beta)] / [f \eta_1 b_1 (b_1 / 2 + h_1 \tan \beta) + \eta_2 b_2 (b_2 / 2 + h_2 \tan \beta) + \eta_3 b_3 (b_3 / 2 + h_3 \tan \beta)] \quad (2a)$$

其中，

$$\beta = 45^\circ - \varphi / 2 \quad (2b)$$

式中： $f$  为围岩坚固性系数； $\gamma$  为容重； $b_1, b_2, b_3$  分别为各开挖截面宽度； $h_1, h_2, h_3$  分别为各开挖截面高度； $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  均为后行开挖面对先行开挖面的荷载影响系数； $\varphi$  为内摩擦角。

(2) 基于公路隧道规范推导公式：

$$q_0 = 0.45 \times 2^{s-1} \gamma \{ \eta_1^2 b_1 [1 + i(b_1 - 5)]^2 + \eta_2^2 b_2 [1 + i(b_2 - 5)]^2 + \eta_3^2 b_3 [1 + i(b_3 - 5)]^2 \} / \{ \eta_1 b_1 [1 + i(b_1 - 5)] + \eta_2 b_2 [1 + i(b_2 - 5)] + \eta_3 b_3 [1 + i(b_3 - 5)] \} \quad (3)$$

$$\eta = \begin{cases} \frac{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3}{\alpha_4 \alpha_5} & (\eta \geq 1) \\ 1.0 & (\eta < 1) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\alpha_1$  为导洞之间距离的影响指标，由导洞距离与后行导洞跨度之比确定； $\alpha_2$  为后行导洞几何形状(高跨比)的影响指标； $\alpha_3$  为地下水、地表水、初始应力场等因素的影响指标； $\alpha_4$  为先行导洞的支护参数的影响指标； $\alpha_5$  为围岩条件的影响指标； $s$  为围岩级别； $i$  为开挖宽度每增减 1 m 时的围岩压力增减率<sup>[4]</sup>。

曲海峰<sup>[18]</sup>对过程荷载影响系数  $\eta$  进行了深入讨论<sup>[15]</sup>，认为当龙头山隧道采用 3 导洞开挖时， $\eta_1 = \eta_2, \eta_3 = 1$ 。但经本文数值计算分析结果表明，先、后开挖的左右导洞其松弛范围明显不同，特别是先行开挖的侧导洞对后行开挖的中部核心土的松弛范围影响较大，因此，需要对其过程荷载公式进行修正。

### 4.2 过程荷载影响系数 $\kappa_{ij}$ 分析

为便于讨论不同开挖方法引起的松弛区对围岩荷载的影响，本文引入参数  $\kappa_{ij}$  表示第  $i$  步开挖对第  $j$  步开挖(先行开挖面对后行开挖面)的荷载影响系数，定义为

$$\kappa_{ij} = \frac{H_j}{H_i} \quad (5)$$

式中： $H_i$  和  $H_j$  分别表示在第  $i$  和  $j$  步开挖时，在某

测线上引起的围岩松弛深度;  $j=i+1(i=1, 2)$ , 且  $\kappa_{11} = 1$ 。

根据节 3 对 3 种不同开挖方法的模拟计算结果, 修正系数  $\kappa_{ij}$  计算如表 6 所示。

表 6 不同开挖方法下的拱顶松动区的荷载影响系数  
Table 6 Load coefficients of vault loose area by different excavation methods

测线	荷载影响系数	开挖方法 1, 2 时, 左导洞松驰区	开挖方法 1, 3 拱顶松驰区	开挖方法 2, 3 拱顶松驰区
1	$\kappa_{12}$	1.12		
2	$\kappa_{12}$	1.17		
3	$\kappa_{23}$		1.318	1.317
4	$\kappa_{23}$		1.160	1.162
5	$\kappa_{23}$		1.348	1.367
6	$\kappa_{12}$	1.15		
7	$\kappa_{12}$	1.11		

$\kappa_{12}$  为先行侧导洞对后行侧导洞的荷载影响系数, 从表 6 中测线 1, 2, 6, 7 的结果可以看出,  $\kappa_{12} = 1.11 \sim 1.17$ 。

同理, 由开挖方法 1, 3 得  $\kappa_{23}$ , 其为先行侧导洞对后行中导洞的荷载影响系数, 从表 6 测线 3, 4, 5 的结果可以看出,  $\kappa_{23} = 1.16 \sim 1.37$ 。

### 4.3 修正后的过程荷载计算公式

由于导洞数量为 3, 因此过程荷载计算公式变为如下形式:

(1) 普氏理论修正

$$q_0 = [\gamma k_{11}^2 \eta_1^2 b_1 (b_1 / 2 + h_1 \tan \beta)^2 + k_{12}^2 \eta_2^2 b_2 (b_2 / 2 + h_2 \tan \beta)^2 + k_{23}^2 \eta_3^2 b_3 (b_3 / 2 + h_3 \tan \beta)] / [fk_{11} \eta_1 b_1 (b_1 / 2 + h_1 \tan \beta) + k_{12} \eta_2 b_2 (b_2 / 2 + h_2 \tan \beta) + k_{23} \eta_3 b_3 (b_3 / 2 + h_3 \tan \beta)] \quad (6a)$$

其中,

$$\beta = 45^\circ - \varphi / 2 \quad (6b)$$

(2) 公路隧道规范修正

$$q_0 = 0.45 \times 2^{s-1} \gamma \{ \kappa_{11}^2 \eta_1^2 b_1 [1 + i(b_1 - 5)]^2 + \kappa_{12}^2 \eta_2^2 b_2 [1 + i(b_2 - 5)]^2 + \kappa_{23}^2 \eta_3^2 b_3 [1 + i(b_3 - 5)]^2 \} / \{ \kappa_{11} \eta_1 b_1 [1 + i(b_1 - 5)] + \kappa_{12} \eta_2 b_2 [1 + i(b_2 - 5)] + \kappa_{23} \eta_3 b_3 [1 + i(b_3 - 5)] \} \cdot \frac{\kappa_{12}^2 \eta_2^2 b_2 [1 + i(b_2 - 5)]^2 + \kappa_{23}^2 \eta_3^2 b_3 [1 + i(b_3 - 5)]^2}{\kappa_{12} \eta_2 b_2 [1 + i(b_2 - 5)] + \kappa_{23} \eta_3 b_3 [1 + i(b_3 - 5)]} \quad (7)$$

式中:  $\kappa_{11} = 1$ ,  $\kappa_{12}$  可近似取 1.13,  $\kappa_{23}$  可近似取 1.33。

### 4.4 荷载对比

为了进一步分析 2 种算法的差异, 对龙头山隧道 V 级围岩深埋段的垂直压力进行了计算, 选取的计算参数如表 7 所示<sup>[19]</sup>。

表 7 V 级围岩参数<sup>[19]</sup>

Table 7 Parameters of surrounding rock of grade V<sup>[19]</sup>

总跨度 B/m		总高度 H/m		容重 $\gamma$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	坚固 系数 $f$	埋深 /m						
20.87		13.34		18	1.1	60						
洞内宽度/m		导洞高度/m		摩擦角	安全系数		荷载影响系数					
$b_1$	$b_2$	$b_3$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$	$k_{11}$	$k_{12}$	$k_{23}$	
7.3	7.3	10.0	10.9	10.9	12.7	25	1.2	1.2	1.0	1	1.14	1.33

采用普氏理论、公路隧道规范, 曲海峰<sup>[18]</sup>推导的过程荷载模式及本文的修正公式进行了计算, 结果如表 8 所示。

表 8 各种公式所得的围岩压力对比

Table 8 Comparison of surrounding rock pressures obtained by various formulas

计算公式	垂直压力/kPa	荷载所占比例/%	
		相比普氏理论	相比公路隧道设计规范
普氏理论	311.9	-	-
曲海峰式(2a)	210.6	67.5	-
本文式(6)	252.2	80.0	-
公路隧道设计规范	335.3	-	-
曲海峰式(3)	192.6	-	57.4
本文式(7)	230.1	-	68.6

从表 8 可以看出, 相比普氏理论和隧道设计规范, 荷载分别减少 20.0% 和 31.4%; 相比曲海峰所推导式(2), (3), 荷载增加了 20.0%。

## 5 结 论

采用现场实测和数值模拟相结合的方法, 对特大断面隧道在不同开挖方法的围岩变形进行了分析, 给出了相应围岩松驰区范围的计算, 验证了 4 车道隧道的合理松驰范围。通过对特大断面隧道围岩荷载应力路径影响的数值计算和实测结果的对比、分析, 得出如下结论:

(1) 不同开挖方式产生不同的围岩应力路径, 导致不同的围岩荷载, 文中引入过程荷载影响系数  $\kappa_{ij}$  表征应力路径对隧道围岩荷载的影响, 并以其修正特大断面隧道过程荷载计算公式, 得出考虑应力

路径的特大断面隧道的过程荷载计算公式。

(2) 对于特大断面隧道施工, 开挖方式产生的应力路径对围岩荷载的影响尤为显著, 采用考虑应力路径的围岩荷载计算方法影响能更合理可靠地作出隧道施工设计。

### 参考文献(References):

- [1] 万明富, 海洪, 刘斌. 单洞四车道隧道开挖室内模型试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(2): 266 - 269. (WANG Mingfu, HAI Hong, LIU Bin. Investigation on excavating a 4-lane road tunnel through indoor model test[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2007, 28(2): 266 - 269.(in Chinese))
- [2] 黄伦海, 秦峰, 龚世强. 雅宝双洞八车道公路隧道设计[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(4): 5 - 8.(HUANG Lunhai, QIN Feng, GONG Shiqiang. Design of the twin bore 8-lane Yabao road tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2005, 42(4): 5 - 8.(in Chinese))
- [3] 黄成造, 严宗雪. 龙头山双洞八车道公路隧道的设计与施工[J]. 铁道建筑, 2007, (1): 52 - 55.(HUANG Chengzao, YAN Zongxue. Design and construction of longtoushan separate type expressway tunnel with 8 lanes[J]. Railway Engineering, 2007, (1): 52 - 55.(in Chinese))
- [4] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG D70 - 2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTG D70 - 2004 Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))
- [5] 中华人民共和国行业标准编写组. TB10003 - 2005 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 铁道出版社, 2005.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. TB10003 - 2005 Code for design of tunnel of railway[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.(in Chinese))
- [6] 中华人民共和国行业标准编写组. DL/T5195 - 2004 水工隧洞设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2004.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. DL/T5195 - 2004 Specification for design of hydraulic tunnel[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.(in Chinese)).
- [7] BARTON N, LIEN R, LUNDE J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1974, 6(4): 183 - 236.
- [8] BIENIAWSKY Z T. Engineering Rock Mass Classification[M]. Znc: John Wiley and Sons, 1989: 1 - 105.
- [9] GOEL R K, JETHWA J L. Prediction of support pressure using RMR classification[C]// Proceedings of Indian Geotechnical Conference. India: [s.n.], 1991: 48 - 52.
- [10] SINGH B, GOEL R K, JETHWA J L. Support pressure assessment in arched underground openings through poor rock masses[J]. Engineering Geology, 1997, 48(1 - 2): 59 - 81.
- [11] 黄伦海, 刘伟, 刘新荣. 单洞四车道公路隧道开挖的模型试验[J]. 地下空间, 2007, 24(4): 10 - 15.(HUANG Lunhai, LIU Wei, LIU Xinrong. Model test on single 4-lane highway tunnel excavation[J]. Underground Space, 2007, 24(4): 10 - 15.(in Chinese))
- [12] 耿峦峰. 单拱四车道公路隧道全断面开挖力学特性分析[J]. 山西建筑, 2009, 35(4): 324 - 325.(GENG Luanfeng. Analysis of mechanical properties of full section excavation of single arch four-lane highway tunnel[J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(4): 324 - 325.(in Chinese))
- [13] 吴梦军, 黄伦海. 四车道公路隧道动态施工力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 3 057 - 3 062.(WU Mengjun, HUANG Lunhai. Research on dynamic construction mechanics of 4-lane highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 3 057 - 3 062.(in Chinese))
- [14] 张丙强, 蔡雪峰, 李俐勋. 单洞四车道公路隧道优化研究[J]. 华东公路, 2007, (4): 57 - 60.(ZHANG Bingqiang, CAI Xuefeng, LI Lixun. Optimization study of single arch 4-lane highway tunnel[J]. East China High Way, 2007, (4): 57 - 60.(in Chinese))
- [15] 宫成兵, 张武祥, 杨彦民. 大断面单洞四车道公路隧道结构设计与施工方案探讨[J]. 公路, 2004, (6): 177 - 182.(GONG Chengbing, ZHANG Wuxiang, YANG Yanmin. Discussion on structural design and construction schemes for four-lane section in each separated hole of highway tunnel[J]. Highway, 2004, (6): 177 - 182.(in Chinese))
- [16] 刘彤, 刘伟, 刘新东. 高速公路特大断面隧道施工过程数值分析[J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33(3): 210 - 213.(LIU Tong, LIU Wei, LIU Xindong. Numerical analysis of construction process for four-lane section tunnel[J]. Sichuan Building Science, 2007, 33(3): 210 - 213.(in Chinese))
- [17] 李志刚, 丁文其, 杨重存, 等. 扁平特大断面公路隧道核心土模拟与分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 627 - 632.(LI Zhigang, DING Wenqi, YANG Zhongcun, et al. Simulation and analysis of core soil in flat and large span highway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(4): 627 - 632.(in Chinese))
- [18] 曲海峰. 扁平特大断面公路隧道荷载模式及应用研究[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2006.(QU Haifeng. Study on load mode of road tunnel with extra-large cross-section and low flat-ratio and its application[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2006.(in Chinese))
- [19] 中交第一公路勘察设计院. 龙头山隧道施工设计图[R]. 西安: 中交第一公路勘察设计院, 2005.(China Communication First Highway Consultants. Construction drawing of Longtoushan Tunnel[R]. Xi'an: China Communications First Highway Consultants, 2005.(in Chinese))