

# 浅埋小净距偏压隧道施工工序的数值分析

杨小礼, 眭志荣

(中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙, 410075)

**摘要:** 采用双侧壁导坑法, 对浅埋小净距双洞六车道偏压公路隧道在不同开挖顺序下进行施工力学数值模拟。分析不同开挖顺序时的围岩位移、应力、地表位移以及塑性区的变化, 并进行比较。数值结果表明: 先开挖深埋一侧隧道, 围岩塑性区较小, 左洞拱顶不会出现围岩拉裂区, 右洞拱顶塑性区较小; 先开挖各洞外侧, 拱顶和中间岩柱的应力、位移较小; 后行隧道开挖对先行隧道围岩的受力变形有很大影响, 后行隧道开挖导致先行隧道洞周位移和应力大幅度增大; 中间岩柱、侧墙和拱顶均是施工中应重点关注的部位。

**关键词:** 小净距; 偏压隧道; 数值模拟; 中间岩柱

中图分类号: U455

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2007)04-0764-07

## Numerical simulation of construction sequence for shallow embedded bias tunnels with small clear distance

YANG Xiao-li, SUI Zhi-rong

(School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** The numerical simulation of construction sequence was studied for shallow embedded bias tunnels with small clear distance using the method of double side excavation. The change of plastic zone, displacement and stress of surrounding rock were analyzed and compared for different excavating sequences. The results show that when the deep tunnel is excavated earlier than the shallow one, the plastic zone is smaller and on the crown of left tunnel there will not appear tensile failure. The displacement and stress of crown and middle rock pillar are smaller if tunnel's lateral is excavated before tunnel's inside. It has an important effect on the antecedence tunnel and results in displacement and stress increase when the later tunnel is excavated. The middle rock pillar, lateral wall and the tunnel crown are key places that must be noticed.

**Key words:** small clear distance; bias tunnel; numerical simulation; middle rock pillar

随着我国交通运输量的日益递增, 需在公路、铁路上修建越来越多的大断面隧道。小净距隧道是一种介于分离式隧道和连拱隧道之间的隧道结构形式, 由于该结构形式不受地形、地貌等条件的限制, 又比连拱隧道施工工艺简单, 易于防水处理, 造价易于控制, 越来越受到建设部门的青睐<sup>[1]</sup>。小净距隧道净距小于规范规定的最小净距要求, 一般小于单孔隧道开挖洞

径的 1.5 倍。近年来, 一些研究者对小净距隧道进行了研究, 如李云鹏等<sup>[2-3]</sup>对 3 车道小净距隧道的开挖施工过程和围岩流变损伤进行了数值模拟研究, 得到了不同围岩级别小净距隧道的合理净距、洞周粘弹塑性变形规律和中间岩柱的变形规律; 王明年等<sup>[4-5]</sup>通过模型试验对软弱围岩下 3 孔小净距浅埋暗挖隧道地表沉降控制技术和施工力学进行研究, 对不同的围岩预加

收稿日期: 2006-12-25

基金项目: 交通部西部建设科技资助项目 (200631878557)

作者简介: 杨小礼(1970-), 男, 安徽安庆人, 教授, 博士生导师, 从事交通基础工程的教学与科研工作

通讯作者: 眭志荣, 男, 硕士研究生; 电话: 13723870352; E-mail: suizr@126.com

固强度和施工进尺进行了评价; 姚勇等<sup>[6-10]</sup>采用二维和三维弹性、弹塑性数值计算方法, 对小净距隧道中间岩柱受力、变形特点、小导管注浆加固效果及复合衬砌力学效应进行分析研究; 靳晓光等<sup>[11-12]</sup>通过二维、三维弹塑性有限元数值仿真模拟, 研究了小净距偏压公路隧道台阶法施工开挖顺序的优化问题; 刘艳青等<sup>[13]</sup>对我国第1座超小净距隧道——招宝山隧道进行施工状态的数值模拟。尽管如此, 目前人们对小净距隧道的研究仍处于探索阶段。在此, 本文作者在这些研究基础上<sup>[1-15]</sup>, 以某市浅埋小净距偏压隧道为工程背景, 利用有限元软件, 对浅埋小净距偏压隧道的施工开挖顺序进行仿真模拟, 得出双侧壁导坑法的合理开挖顺序, 为该类小净距隧道设计和现场施工提供参考。

### 1 不同工法模型

所研究的隧道为一双洞六车道小净距隧道, 围岩级别为IV级, 其物理力学参数根据工程地质勘察报告并参照文献[16], 具体取值见表1。隧道开挖洞径  $B=15.4\text{ m}$ , 洞高  $H=10.85\text{ m}$ , 隧道净距为  $3\text{ m}$ , 偏压为  $15^\circ$ , 其计算模型见图1。水平  $x$  方向从隧道外侧起选取洞径的3~4倍作为计算范围, 竖直  $y$  方向围岩上边界取至地表, 隧道底板向下取洞径的3~4倍, 即分析范围为  $120\text{ m} \times (57.85\sim 90)\text{ m}$ 。模型的左右边界水平位移约束, 顶部为自由面, 底部竖向位移约束。根据隧道围岩特征, 数值模拟采用弹塑性本构模型、Mohr-Coulomb 屈服准则以及大应变变形模式, 由围岩自重形成初始地应力场。

隧道开挖方法采用双侧壁导坑法, 对不同开挖顺序进行模拟, 开挖步骤如图2所示, 分别是工法1(开挖顺序为①②③④⑤⑥⑦⑧), 工法2(开挖顺序为⑥⑤

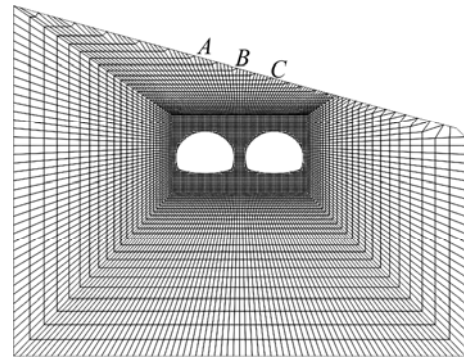


图1 隧道计算模型

Fig.1 Computation model of tunnel

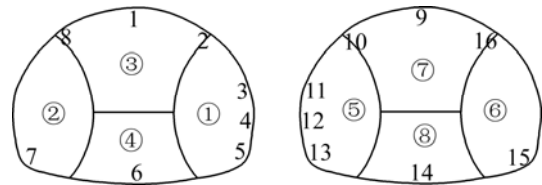


图2 隧道开挖步骤和计算点位置

Fig.2 Excavating step and calculation dot location of tunnel

⑦⑧②①③④), 工法3(开挖顺序为②①③④⑥⑤⑦⑧)。工法1和工法3都是采取先开挖左洞后开挖右洞、先上后下的开挖顺序, 区别在于: 工法1是先开挖内侧后开挖外侧, 而工法3是先开挖外侧后开挖内侧; 工法2是采取先开挖右洞后开挖左洞、先上后下的开挖顺序, 施工过程包括初始地应力场的模拟, 无支护时分9步模拟, 有支护时分17步模拟。应力释放为: 毛洞开挖释放应力: 施加锚杆释放应力: 喷混凝土释放应力=0.50:0.25:0.25。初期支护的参数见表1。系统锚杆长为  $3\text{ m}$ , 环向间距为  $1\text{ m}$ , 纵向间距为  $0.8\text{ m}$ 。对拉锚杆贯穿中间岩柱, 施加预张拉力为  $50\text{ kN}$ , 一端固定, 一端张拉。

表1 隧道围岩及初期支护的计算参数

Table 1 Computation parameters of surrounding rock and primary lining of tunnel

围岩参数	弹性模量/GPa	泊松比	密度/( $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$ )	粘聚力/MPa	内摩擦角/( $^\circ$ )
	2.2	0.32	2.3	0.5	33
锚杆参数	弹性模量/GPa	截面积/ $\text{m}^2$	外径/mm	长度/m	抗拉屈服强度/MPa
	210	$4.91 \times 10^{-4}$	25	3.0	0.5
喷射混凝土参数	弹性模量/GPa	泊松比	厚度/m		
	21	0.20	0.2		

## 2 塑性区分布规律

围岩在隧道洞室开挖后的塑性区分布见图 3。据图 3 可以定性地判定围岩的受力性态和破坏机理。在毛洞开挖结束时, 3 种工法的塑性区分布规律大体是一致的, 主要集中在隧道的顶部、底部和中间岩柱左右两侧。对于单孔隧道, 在隧道底部范围内, 靠近中间岩柱的拱脚位置塑性区一般比另一侧拱脚的塑性区大; 在两侧紧靠中间岩柱一侧的塑性区要比远离中间岩柱一侧的塑性区大。这主要是剪切应力屈服所致。

对于工法 1 和工法 3, 毛洞的塑性区分布基本一致, 中间岩柱两侧塑性区有相互贯通的趋势, 但尚未贯通, 两洞拱顶、拱肩部位出现大面积塑性区, 尤其是左洞, 底板也有一定范围的塑性区。对于工法 3, 加初期支护后, 塑性区得到了很好的抑制, 右洞拱顶未出现塑性区, 左洞拱顶和中间岩柱仅出现很小范围的塑性区, 说明初期支护发挥了作用, 因而, 采取一定的加固措施可以保证围岩稳定。

将工法 2 与工法 1 和工法 3 相比较, 发现工法 2 中, 中间岩柱基本上处于塑性状态, 且两侧塑性区呈贯通趋势, 隧道拱顶和拱肩部位塑性区大大增加, 且

右洞塑性区发展到地表, 有发生坍塌的可能。左洞左右拱肩还出现一定范围的围岩拉裂区。

如果仅仅从毛洞塑性区大小来判断开挖方法的优劣, 工法 1 和工法 3 要明显优于工法 2。因此, 对于浅埋小净距偏压隧道施工, 应先开挖深埋一侧隧道。

综合分析 3 种工法, 可以得出小净距偏压隧道具有以下特点: 中间岩柱、拱顶和墙脚是小净距隧道施工中应重点关注的部位, 根据塑性区的分布区域, 在小净距偏压隧道施工中, 拱顶围岩稳定要比中间岩柱的稳定重要。

## 3 洞周位移分析

采用工法 1 和工法 3 双洞开挖后的洞周位移如图 4 所示, 部分计算点位移见表 2。从图 4 可以看出, 工法 1 和工法 3 这 2 种工法的洞周位移变化规律基本一致, 左洞拱顶的竖向位移最大, 而右洞左拱肩水平位移最大; 底板都向上隆起, 但是左洞隆起的幅度要大于右洞隆起的幅度; 中间岩柱的上部水平方向位移向右, 下部水平向左, 出现错动现象。必要时, 可以考虑采用小导管注浆来加固中间岩柱。

比较表 2 中 2 种工法的拱顶、底板和中间岩柱的位移, 发现工法 3 中大部分点处的位移均略小于工法

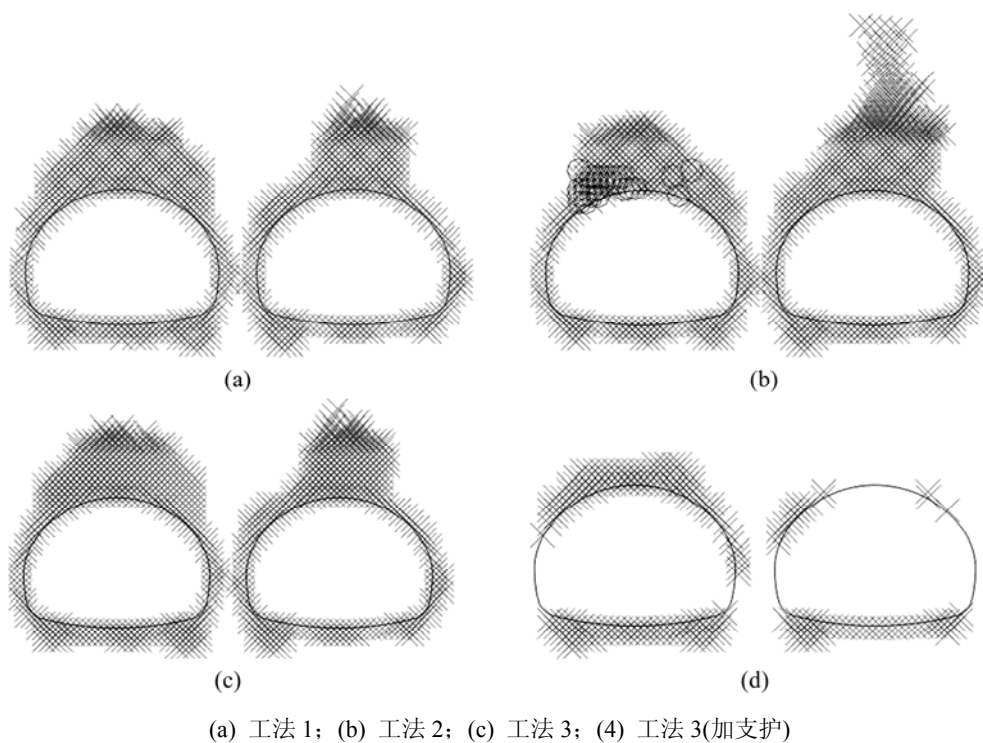
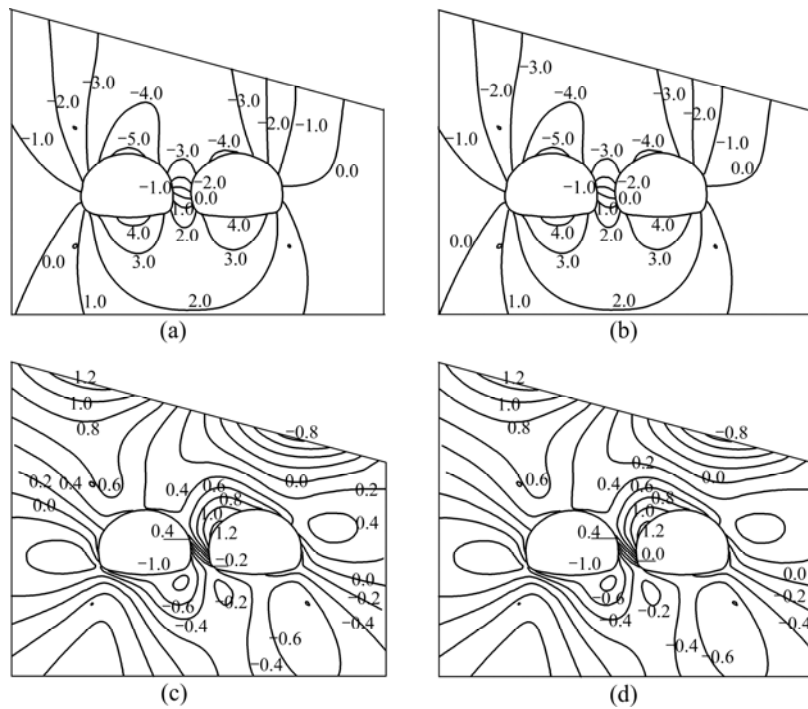


图 3 隧道围岩塑性区分布图

Fig.3 Plastic zone distribution around tunnel

表2 洞周计算点位移

计算点	Table 2 Displacements of surrounding calculation dot							
	工法1				工法3			
	开挖左洞位移		开挖右洞位移		开挖左洞位移		开挖右洞位移	
	x 方向	y 方向	x 方向	y 方向	x 方向	y 方向	x 方向	y 方向
1	0.379 6	-3.929 0	0.428 8	-5.917 0	0.365 1	-3.905 0	0.415 5	-5.898 0
3	-0.130 0	-0.422 6	0.252 7	-1.773 0	-0.129 3	-0.423 3	0.251 0	-1.774 0
4	-0.358 0	0.655 6	-0.543 0	0.456 0	-0.336 5	0.654 7	-0.524 0	0.454 5
5	-0.362 9	1.390 0	-0.757 0	1.611 0	-0.354 3	1.390 0	-0.749 8	1.611 0
6	-0.449 9	4.041 0	-0.735 0	4.313 0	-0.447 7	4.041 0	-0.731 6	4.316 0
9	0.212 7	-0.065 3	0.884 6	-4.054 0	0.212 4	-0.065 4	0.883 4	-4.056 0
11	0.219 5	-0.028 8	1.198 0	-2.225 0	0.219 0	-0.029 1	1.196 0	-2.226 0
12	0.116 5	0.267 2	0.775 8	-0.455 3	0.116 0	0.266 9	0.771 1	-0.454 6
13	0.007 5	0.443 0	0.161 8	0.997 2	0.007 4	0.442 9	0.158 5	0.997 5
14	0.039 4	0.131 7	-0.466 0	3.987 0	0.039 5	0.131 7	-0.460 5	3.989 0



(a) 工法1, y 方向位移; (b) 工法3, y 方向位移;  
 (c) 工法1, x 方向位移; (d) 工法3, x 方向位移

图4 洞周围岩位移曲线 (单位: mm)

Fig.4 Displacement curves of surrounding rock tunnel

1 中的位移。因而, 工法3 要略优于工法1。

将工法3 中单洞和双洞形成时的位移进行分析, 发现双洞开挖完毕后, 左洞拱顶水平位移增加 13.8%, 竖直位移增加 51%; 中间岩柱靠左洞一侧计算点3 的水平位移增大 2.94 倍, 竖直位移甚至增大 3.19 倍, 且该点受到往返的变形, 围岩多次扰动, 对其稳定很不利。结果表明: 后行隧道开挖对先行隧道洞周位移有

很大影响, 在后行隧道开挖之前, 先行隧道便已处于基本稳定的偏压状态, 而后行隧道的开挖扰动加剧了这种偏压趋势。从点 11, 12 和 13 左洞开挖结束时的位移 x 可以发现, 中间岩柱靠右一侧围岩没有产生向左洞挤压的变形, 并没有出现一般分离式隧道和小净距隧道的围岩向开挖洞室挤压变形的现象, 这应该是偏压所致。

## 4 围岩应力分析

工法 1 和工法 3 的最大主应力和最小主应力如图 5 所示, 部分计算点的应力见表 3。可见, 这 2 种工法的应力集中分布规律大体一致, 均出现在中间岩柱和左洞外侧墙底。因此, 在施工中, 要及时对中间岩柱进行支护, 防止围岩失稳。

比较表 3 中 2 种工法中间岩柱的应力发现, 对点 11, 工法 3 的最小主应力大于工法 1 的最小主应力, 对其余点, 都是工法 3 的主应力小于工法 1 的主应力。通过比较发现, 工法 3 略优于工法 1。结果表明, 在大跨度小净距偏压隧道施工中, 先开挖各洞外侧优于先开挖内侧, 说明中间岩柱越晚形成对围岩的受力和

稳定越有利。

将工法 3 中单洞和双洞形成时的应力进行分析, 发现右洞开挖后, 计算点 3 和 4 的最大主应力比左洞开挖时分别增大 36%和 44.8%。结果说明后行隧道的开挖对先行隧道的围岩受力有很大影响。

以上分析结果表明, 中间岩柱和左洞侧墙应是关键部位, 在小净距偏压隧道施工中, 当开挖后行隧道时, 必须加强对先行开挖隧道关键部位的监控, 掌握围岩变化情况, 保证施工安全。

## 5 地表位移分析

双洞开挖结束后, 地表计算点 A, B 和 C 的位移见表 4, 其布置位置见图 1。从表 4 可以发现, 工法 1

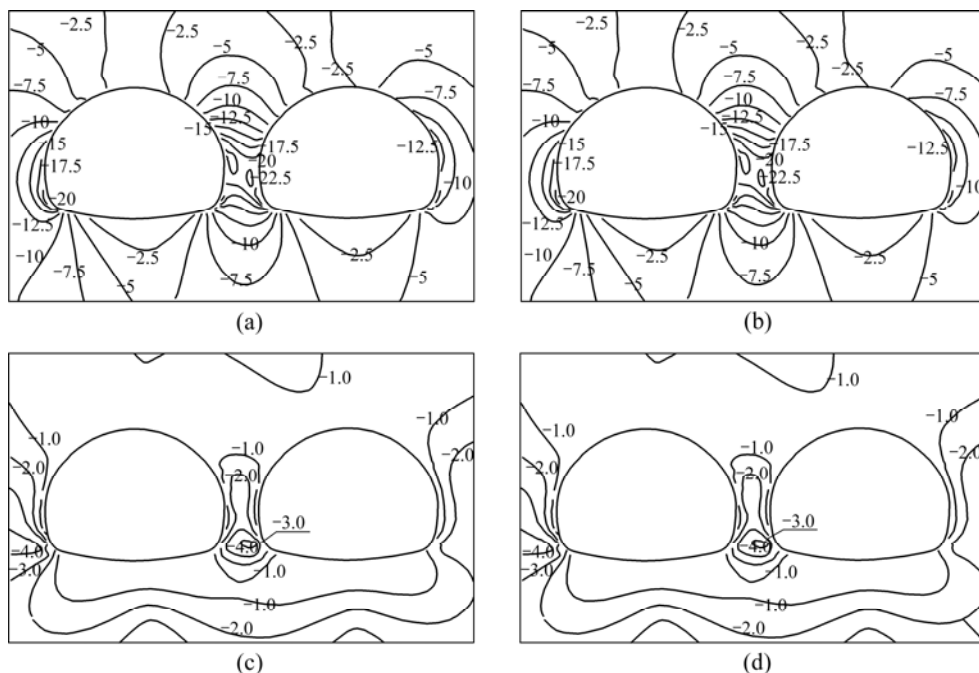
表 3 洞周计算点主应力

Table 3 Primary stresses of surrounding calculation dot

$10^5 \text{ Pa}$

计算点	工法 1				工法 3			
	开挖左洞		开挖右洞		开挖左洞		开挖右洞	
	最大主应力	最小主应力	最大主应力	最小主应力	最大主应力	最小主应力	最大主应力	最小主应力
3	-15.380	-0.550	-20.880	-0.747	-15.340	-0.530	-20.860	-0.742
4	-14.310	-0.494	-20.740	-0.717	-14.300	-0.488	-20.700	-0.705
5	-17.490	-0.862	-22.020	-1.192	-17.380	-0.844	-21.93	-1.160
11	-8.679	-2.783	-17.820	-0.972	-8.679	-2.781	-17.820	-0.991
12	-9.197	-2.819	-20.740	-0.701	-9.197	-2.815	-20.730	-0.699
13	-8.630	-2.790	-24.410	-1.957	-8.630	-2.791	-24.410	-1.957

注: 应力以受压为负。



(a) 工法 1 最大主应力; (b) 工法 3 最大主应力; (c) 工法 1 最小主应力; (d) 工法 3 最小主应力

图 5 洞周围岩主应力图(单位:  $10^5 \text{ Pa}$ )

Fig.5 Primary stresses of surrounding rock

表4 地表计算点位移

Table 4 Displacements of ground surface

mm

工法	A		B		C	
	x 方向位移	y 方向位移	x 方向位移	y 方向位移	x 方向位移	y 方向位移
工法 1	0.852 0	-3.529 0	0.062 1	-3.668 0	-0.593 9	-2.910 0
工法 3	0.852 3	-3.527 0	0.062 6	-3.668 0	-0.593 9	-2.911 0
工法 3(加支护)	0.620 2	-2.499 0	0.069 7	-2.502 0	-0.369 5	-1.934 0

和工法 3 的地表位移变化规律基本一致, 左、右洞上部地表水平位移方向相反, 左洞上部地表位移普遍大于右洞上部地表位移, 且左洞上部地表有向右下方运动的趋势。这说明先行隧道上部地表位移大于后行隧道上部地表位移。对于工法 3, 加初期支护后, 地表位移得到了很好的控制, 说明初期支护发挥了作用。鉴于左洞上部地表有向右下方运动的趋势, 在施工中要注意加强地表坡面防护, 防止滑坡发生。

## 6 结 论

a. 先开挖深埋一侧隧道, 围岩塑性区较小, 左洞拱顶不会出现围岩拉裂区, 右洞拱顶塑性区较小。

b. 先开挖各洞外侧, 隧道拱顶和中间岩柱的应力、位移较小。

c. 后行隧道开挖对先行隧道洞周位移以及应力有很大影响, 在后行隧道开挖之前, 先行隧道便已处于偏压状态, 而后行隧道的开挖扰动加剧了这种偏压趋势。

d. 中间岩柱、侧墙和拱顶均是重点关注的部位, 在小净距偏压隧道施工中, 当开挖后行隧道时, 必须加强对先行开挖隧道关键部位的监控。

e. 先行隧道上部地表位移大于后行隧道上部地表位移, 左洞上部地表有向右下方运动的趋势, 在施工中要注意加强地表坡面防护, 防止滑坡发生。

f. 浅埋小净距偏压隧道修建关键是保证中间岩柱、侧墙和拱顶围岩的稳定, 在施工中应尽量减少对围岩的扰动, 并采取一定的加固措施, 以确保其稳定和支护结构的安全。

### 参考文献:

[1] 姚 勇, 田志宇. 并设小净距隧道中岩墙力学特征及加固措施研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(4):57-60.  
YAO Yong, TIAN Zhi-yu. Study on mechanical behavior and

reinforcing measures of middle rock wall of parallel tunnel with small interval[J]. Industrial Construction, 2006, 36(4): 57-60.

[2] 李云鹏, 王芝银, 韩常领. 不同围岩类别小间距隧道施工过程模拟研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 11-16.

LI Yun-peng, WANG Zhi-yin, HAN Chang-ling. Simulating study on construction process of tunnels with small spacing for difference classes of surrounding rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(1): 11-16.

[3] 李云鹏, 王芝银, 韩常领. 考虑地震影响的小间距隧道围岩流变损伤[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(2): 51-56.

LI Yun-peng, WANG Zhi-yin, HAN Chang-ling. Rheologic damage and earthquake influence on surrounding rock of small spacing tunnels[J]. Journal of Changan University: Natural Science Edition, 2006, 26(2): 51-56.

[4] 王明年, 李志业, 关宝树. 3 孔小间距浅埋暗挖隧道地表沉降控制技术[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 821-824.

WANG Ming-nian, LI Zhi-ye, GUANG Bao-shu. Research on controlling measures for ground surface settlement of three little distance parallel shallow embedded tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 821-824.

[5] 王明年, 李志业, 刘智成. 软弱围岩 3 孔小间距平行浅埋隧道施工力学研究[J]. 铁道建筑技术, 2002(4): 11-14.

WANG Ming-nian, LI Zhi-ye, LIU Zhi-cheng. A study on construction mechanics of three parallel shallow tunnels with small spacing in weak surrounding rock[J]. Railway Construction Technology, 2002(4): 11-14.

[6] 姚 勇, 晏启祥, 周俐俐. 小净距隧道在不同开挖方式下的力学效应分析[J]. 西南科技大学学报, 2005, 20(2): 53-56.

YAO Yong, Yan Qi-xiang, ZHOU Li-li. Study on mechanics effect of small-distance tunnels located at soft ground[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2005, 20(2): 53-56.

[7] 姚 勇, 何 川, 晏启祥. 董家山隧道小净距段爆破控制的数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(Suppl.2): 501-506.

YAO Yong, HE Chuan, YAN Qi-xiang. Numerical simulation of blasting control for small clear distance zone of Dongjiashan tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Suppl.2): 501-506.

[8] 晏启祥, 何 川, 姚 勇. 小净距隧道施工小导管注浆效果的数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(Suppl.2): 239-242.

- YAN Qi-xiang, HE Chuan, YAO Yong. Numerical simulation analysis of little tremie grouting effect while construction of going into portal at small-distance tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(Suppl.2): 239–242.
- [9] 晏启祥, 何川, 姚勇. 软岩隧道施工特性及其动态力学行为研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(3): 572–577.
- YAN Qi-xiang, HE Chuan, YAO Yong. Study on construction characteristic and dynamic behavior of soft rock tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(3): 572–577.
- [10] 晏启祥, 何川, 姚勇. 软岩小净距隧道施工力学效应研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2005, 1(5): 693–697.
- YAN Qi-xiang, HE Chuan, YAO Yong. Study on mechanical effect of small-distance tunnels located at soft ground[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2005, 1(5): 693–697.
- [11] 靳晓光, 刘伟, 郑学贵. 小净距偏压公路隧道开挖顺序优化[J]. *公路交通科技*, 2005, 22(8): 61–64.
- JIN Xiao-guang, LIU Wei, ZHENG Xue-gui. Optimization of excavating sequence for closely spaced bias double-tube tunnels[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2005, 22(8): 61–64.
- [12] 刘伟, 靳晓光, 陈少华. 高速公路小净距隧道合理净距的探讨[J]. *地下空间*, 2004, 24(3): 380–385.
- LIU Wei, JIN Xiao-guang, CHEN Shao-hua. Investigation on reasonable clear interval of small-interval tunnel for the freeway[J]. *Underground Space*, 2004, 24(3): 380–385.
- [13] 刘艳青, 钟世航, 卢汝绥. 小净距并行隧道力学状态的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(9): 590–594.
- LIU Yan-qing, ZHONG Shi-hang, LU Ru-sui. Experimental study on mechanical characteristics of twin tunnels with small spacing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(9): 590–594.
- [14] 杨小礼, 张丙强, 王志斌. 浅埋大跨度连拱隧道地震反应分析[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2006, 37(5): 991–996.
- YANG Xiao-li, ZHANG Bing-qiang, WANG Zhi-bin. Earthquake response of large span and double-arch shallow tunnel[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2006, 37(5): 991–996.
- [15] 杨小礼, 李亮, 刘宝琛. 偏压隧道结构稳定性评价的信息优化分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(4): 484–488.
- YANG Xiao-li, LI Liang, LIU Bao-chen. Evaluation on structure stability of asymmetrically loaded tunnels using the theory of information optimization analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(4): 484–488.
- [16] JDG D70—2004, 公路隧道设计规范[S].
- JDG D70—2004, Code for design of road tunnel[S].