

文章编号:1671-6833(2009)04-0030-05

## 隧道超前小导管对掌子面稳定性影响分析

张 蓓,王建鹏,王复明,董新平

(郑州大学 水利与环境学院,河南 郑州 450001)

**摘 要:**以河南省济(源)邵(原)高速公路王坑隧道为工程背景,利用 ANSYS 软件建立无超前小导管支护和有超前小导管超前支护两种工况下隧道三维有限元计算模型,通过隧道开挖模拟计算分析超前小导管对掌子面稳定性影响。计算结果表明:相对于无超前小导管工况,在有超前小导管工况下掌子面竖向的荷载和竖向应力以及掌子面水平方向位移都有一定程度的减少;改变超前小导管的环向分布范围和管径能够影响超前小导管的支护效果从而改善掌子面的受力情况。以上结果分析表明:超前小导管的存在增强了隧道掌子面的稳定性,使隧道的开挖过程更加安全。

**关键词:**隧道;超前小导管;开挖模拟;掌子面稳定性

**中图分类号:** U 451 **文献标识码:** A

### 0 引言

隧道超前预支护是指在隧道开挖之前,在掌子面前方的地层里,沿隧道横断面设置一个类似拱壳的连续体或加固体,用以加固掌子面前方的地层,保证掌子面及围岩的稳定,控制围岩的变形,形成一个超前的支护体系<sup>[1]</sup>。在隧道施工中,主要的预支护方法有:插板法、地表锚杆注浆法、小导管法、水平旋喷法、冷冻法、管幕工法、管棚工法等<sup>[2-5]</sup>。

超前小导管注浆是沿隧道纵向在拱上部开挖轮廓线外一定范围内向前上方倾斜一定角度的密排注浆钢管管。小导管预注浆的注浆施工工艺相对简单,支护技术在很小的空间内利用简单的工具即可进行钻眼及布管工作,遇到地层变化时可随时调整施工方案,经济效益显著。小导管注浆技术因其适应性强而得到广泛的应用<sup>[6]</sup>。

笔者以济(源)邵(原)高速公路王坑隧道为工程背景,建立有超前小导管支护和无超前小导管超前支护两种工况下隧道三维有限元计算模型,进行隧道开挖模拟计算,以研究超前小导管对掌子面的稳定性影响。

### 1 工程概况

#### 1.1 工程地质情况

河南省济(源)邵(原)高速公路王坑隧道属侵蚀剥蚀低山丘陵区,隧道轴线通过处最高海拔约 605 m,最大相对高差约 95 m。隧道区地下水水量贫乏,水文地质条件较简单,隧道区围岩为粉质泥岩、砂岩及未胶结的砾岩,抗风化能力较弱,隧道左线(ZK49+200~ZK50+120)全长 920 m,Ⅳ级围岩 494 m,Ⅴ级 426 m;右线(YK49+245~YK50+095)全长 850 m,Ⅳ级围岩 505 m,Ⅴ级围岩 345 m。

#### 1.2 超前小导管设计参数

小导管管长与管径参数是根据围岩的地质资料及围岩的压力确定的,本工程处于易塌方地带,围岩松散,采用管长 6 m,直径 42 mm 的热轧无缝钢管加工制成小导管。小导管前部钻注浆孔。孔径 6~8 mm,孔间距 20 cm,呈梅花形布置。前端加工成锥形,尾部长度 80 cm,作为不钻孔的预留止浆段,小导管制作示意图如图 1 所示。

环向沿拱顶 132°圆心角范围内打入小导管,小导管环向间距 40 cm,外插角 10°。小导管环向布置图如图 2 所示,注浆材料为水泥浆,水灰比为 1:0.5~1:1,注浆压力 0.5~1.0 MPa。注浆前先

收稿日期:2009-03-30;修订日期:2009-07-14

基金项目:河南省重大公益性科研项目(081100911200);河南省创新型科技人才队伍建设工程资助项目(074200510006)

作者简介:张 蓓(1968-),女,河南南阳人,郑州大学教授,博士,主要从事基础工程反演理论与无损检测技术研究,E-mail:beizhang@126.com.

进行现场注浆试验,注浆参数通过现场试验按实际情况修改设计参数,以利于施工。

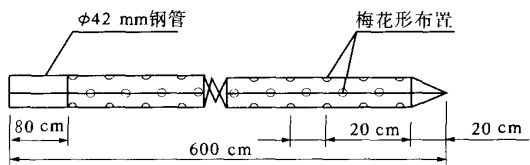


图 1 小导管制作示意图  
Fig. 1 Making sketch of small pipe

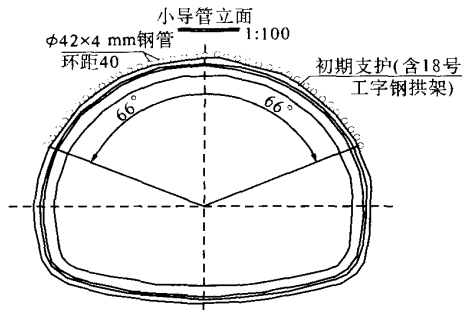


图 2 小导管环向布置图  
Fig. 2 Ring arrangement sketch of small pipe

2 隧道有限元模型建立

2.1 有限元计算模型的选取

根据圣维南原理<sup>[7]</sup>,地下洞室开挖后的应力和应变,仅在洞室周围距洞室中心 3~5 倍开挖宽度的范围内有实际影响,在这个边界上,可以认为开挖引起的位移为零。选取隧道左洞 ZK49+760~ZK49+800 段建立模型。模型计算范围为:沿洞轴方向取 40 m,向上取 45 m,向下取至洞跨的 4 倍,横向取洞跨的 8 倍。整个模型尺寸长(隧洞轴线方向)40 m,宽 80 m,高 90 m。由于隧道本身的对称性和地质条件的对称性,隧道的受力基本上也是对称的。利用有限元软件 ANSYS 建立如图 3 所示  $\frac{1}{2}$  有限元模型。

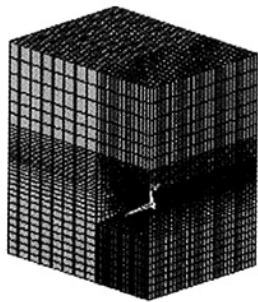


图 3 隧道  $\frac{1}{2}$  有限元模型  
Fig. 3 Half finite element model of tunnel

模型的边界条件为:左侧、右侧及后侧水平约束,保证水平方向位移为 0;下部约束竖向位移;上部取为自由边界。围岩采用 8 节点实体单元 SOLID45,初支采用壳单元 SHELL63,钢管采用管单元 PIPE16。本模型管单元通过与初支共节点创建。整个模型共划分 26 374 个实体单元,540 个管单元,1 200 个壳单元,共计 28 114 个单元。

2.2 模型材料物理参数的选取

根据《公路隧道设计规范》(JTG D70-2004),各种材料的物理参数取值如表 1 所示,并作如下假设:①所有材料为均质、连续、各向同性;②考虑岩体材料的非线性,围岩采用 Drucker-Prager 屈服准则,围岩不考虑体积膨胀;③初始应力场只考虑重力场,不考虑构造应力场。钢材及混凝土按线弹性材料计算。

表 1 材料物理参数统计表					
Tab. 1 Material physical parameters statistics					
材料种类	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹模 $E/\text{Pa}$	泊松比 $\nu$	黏聚力 $c/\text{Pa}$	摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
V 级围岩	2 000	$5 \times 10^8$	0.4	$2 \times 10^5$	30
初支	2 500	$2 \times 10^{10}$	0.2		
钢管		$2 \times 10^{11}$	0.3		

3 超前小导管对掌子面竖向影响分析

根据建立的有限元模型计算结果,取每次开挖后掌子面周围节点作为研究对象,通过对比无超前小导管与有超前小导管两种工况下掌子面拱顶、拱腰、起拱线的荷载和应力的变化情况,分析超前小导管对掌子面稳定性的影响。

设开挖从 K0+00 处开始,每次开挖 1 m,总共开挖 12 m。下面分别从掌子面的竖向节点荷载和竖向应力分析掌子面的受力情况。

图 4、图 5 为掌子面拱顶和拱腰在有、无超前小导管两种工况下的荷载和应力随隧道开挖进行的变化情况。从图中看出:

(1)无小导管和有小导管两种工况下掌子面周围节点的竖向荷载和竖向应力的变化趋势基本一致,随着隧道开挖的进行,隧道掌子面周围竖向节点荷载和节点应力都呈现逐渐增加的趋势。这与实际较为相符,表明所建模型的合理性。

(2)在有超前小导管工况下,掌子面周围的竖向节点荷载和节点应力相对于无超前小导管工况都有一定程度的降低。

(3)超前小导管的存在对拱顶的影响最大,

即小导管的存在对拱顶的竖向荷载和竖向应力减少最多;超前小导管对拱腰的影响相对于拱顶有一定的减少.

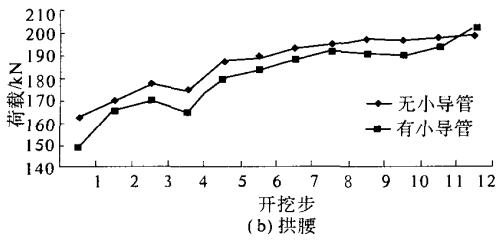
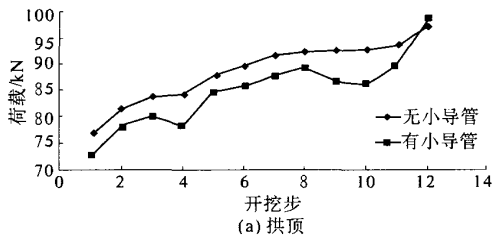


图 4 掌子面竖向荷载对比图

Fig. 4 Comparison of tunnel face's vertical load

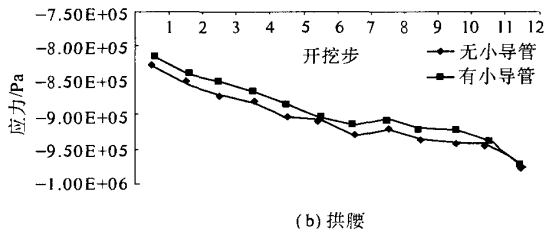
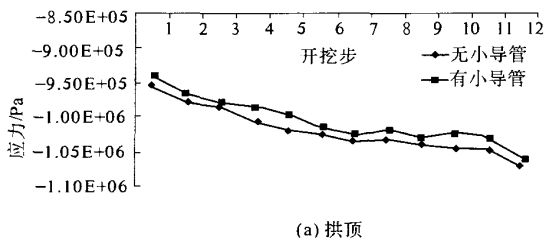
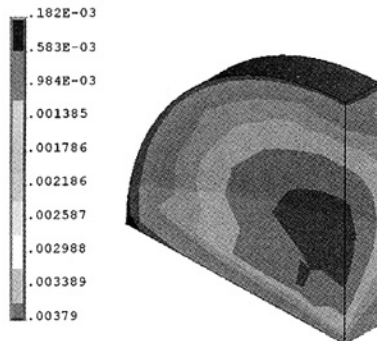
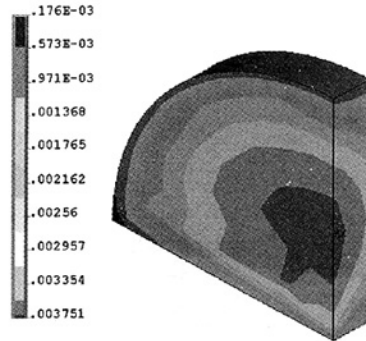


图 5 掌子面竖向应力对比图

Fig. 5 Comparison of tunnel face's vertical stress



(a) 无超前小导管工况



(b) 有超前小导管工况

图 6 掌子面水平方向位移对比图

Fig. 6 Comparison of tunnel face's horizontal displacement

通过分析可知:超前小导管的存在能够将隧道开挖释放的荷载向前传递给掌子面前方的围岩,向后传递给刚度较大的初支,从而减少掌子面承担的荷载.这说明小导管起到了超前预支护的作用,有利于隧道掌子面的稳定,使得隧道的开挖过程更加安全.

#### 4 超前小导管对掌子面水平方向影响分析

在隧道开挖过程中,掌子面由开挖前的三维受力状态变为开挖后的二维受力状态,并且在开挖过程中掌子面变形较大,围岩松弛,掌子面的荷载承受能力降低,从而发生水平方向的位移,这是在软弱围岩中隧道掌子面发生塌方的主要原因.因此,控制掌子面的水平方向位移能够有效地预防塌方事故的发生.

以下选取开挖第四步时掌子面的水平方向位移为研究对象,分析超前小导管在掌子面水平方向上作用形式和作用效果.

图 6 为无超前小导管和有超前小导管两种工况下在开挖第四步时掌子面水平位移云图.通过图 6 可以看出:在无超前小导管工况下掌子面水平位移最大值为 3.790 mm,在有超前小导管工况下掌子面水平位移最大值为 3.751 mm,减少了 0.039 mm.从整个掌子面看,在有超前小导管支护的工况下,掌子面的水平方向位移相对于没有超前小导管支护工况都有一定程度的减少.以上数据分析表明:超前小导管的存在能够约束隧道掌子面水平正方向的位移,增强隧道掌子面的稳定性,防止塌方事故的发生,有利于隧道施工的安全.

## 5 超前小导管参数对掌子面稳定性影响分析

### 5.1 超前小导管环向分布范围的影响分析

以开挖第四步时掌子面为研究对象,在小导管管径(取 42 mm)、初支弹性模量(取 25 GPa)、地层弹性模量(取 0.8 GPa)等物理参数一定的情况下,分别以环向的圆心角为 35°、40°、45°、50°、55°、60°、65°、70°时,对模型模拟计算,通过分析不同开挖步长时的模拟计算结果,讨论在有超前小导管预支护情况下不同的小导管布置范围对隧道掌子面稳定性的影响。

图 7 为掌子面在不同的超前小导管环向分布范围下的荷载和位移变化图,由图中可以看出:随着超前小导管分布范围的扩大,掌子面周围节点的竖向荷载和竖向位移都逐渐减少,这说明超前小导管分布范围的增大能够减少掌子面的受力,有利于掌子面的稳定。

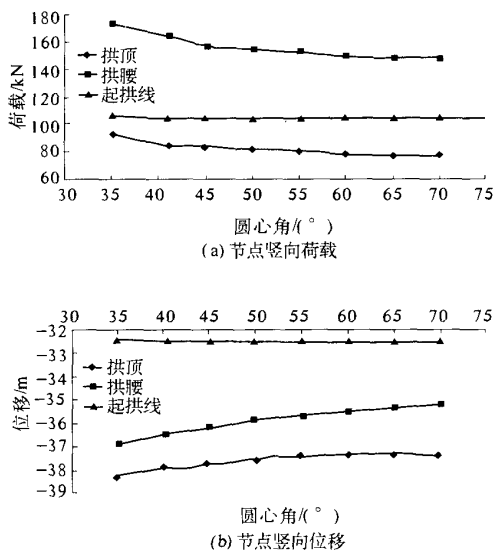


图 7 不同分布范围下掌子面荷载和位移变化图

Fig.7 Changes of tunnel face's load and stress in different distribution range

另外考虑经济因素,应选择合理的小导管分布范围.本模型中拱顶、拱腰的受力变化幅度较大,大都集中在超前小导管环向圆心角为 35°到 55°之间,而圆心角 60°以后拱顶、拱腰的荷载、位移、应力变化都较小.因此得出,在本模型中超前小导管的合理环向分布范围为:沿拱顶环向圆心角为 60°。

### 5.2 超前小导管管径的影响分析

以开挖第四步时掌子面为研究对象,在开挖

步长(取 1 m)、初支弹性模量(取 25 GPa)、地层弹性模量(取 0.8 GPa)等物理参数一定的情况下,超前小导管直径分别取 30 mm、42 mm、54 mm、60 mm,对计算模型进行计算,通过分析不同管径时模拟计算的结果,讨论超前小导管直径对隧道掌子面稳定性的影响。

图 8 为不同管径下掌子面荷载和位移的变化图,由图可以看出:超前小导管管径对掌子面的竖向荷载和位移的影响较小,管径的增大并不能改善掌子面的受力.这主要是由于超前小导管的长度、直径、刚度都较小,即超前小导管本身承受荷载较小,而在超前小导管注浆中主要起到荷载传递的作用,将隧道开挖释放的荷载由掌子面传递给衬砌,因此改变超前小导管的管径对掌子面的受力影响很小.但是在超前小导管预注浆施工中,管径的变化对注浆效果有明显的作用,超前小导管在注浆的过程中起到浆液通道的作用<sup>[6]</sup>,管径的增大有利于浆液的扩散,有利于注浆的加固效果,因此超前小导管管径的增加依然有利于掌子面的稳定性。

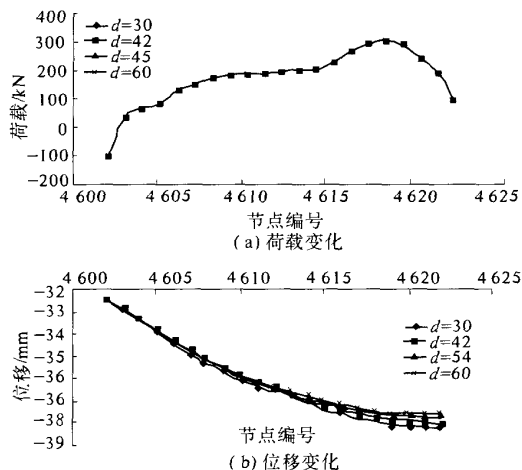


图 8 不同管径下掌子面荷载和位移变化图

Fig.8 Changes of tunnel face's load and stress in different pipe diameter

## 6 结论

(1)超前小导管的存在能够将隧道开挖释放的荷载向前传递给掌子面前方的围岩,向后传递给刚度较大的初支,从而减少掌子面承担的荷载,有利于隧道掌子面的稳定,使得隧道的开挖过程更加安全。

(2)超前小导管的存在能够约束隧道掌子面

水平正方向的位移,能够增强隧道掌子面的稳定性,防止塌方事故的发生,有利于隧道施工的安全。

(3)超前小导管的环向分布范围的扩大能够减少掌子面承担的隧道开挖释放荷载,增强掌子面的稳定性。

(4)超前小导管的管径对于掌子面的受力影响较小,但增大管径有利于浆液扩散,同样能够增强掌子面的稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 黄成光.公路隧道施工[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [2] 王新线,牟亚洲.软弱围岩浅埋暗挖法大跨度隧道施工技术[J].铁道标准设计,2002,(2):20-46.
- [3] 晏启祥.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(增刊):239-242.
- [4] 徐利锋.小导管超前注浆法在隧道塌方段施工中的应用[J].铁道建筑,2002,(2):5-7.
- [5] 陈荣典,林爱芬.长大管棚在杨梅岭隧道浅埋段的施工技术[J].公路隧道,2002,(4):19-22.
- [6] 李河玉.小导管注浆技术及在隧道和地下工程中的应用[D].成都:西南交通大学,2002.
- [7] 杨林德,张向霞.岩土本构模型的研究与讨论[J].河北建筑科技学院学报,2005,22(4):26-31.

### Analysis of Tunnel Leading Conduit Affecting the Stability of Tunnel Face

ZHANG Bei, WANG Jian-peng, WANG Fu-ming, DONG Xin-ping

(School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Taking the project of Wangkeng tunnel of Jishao expressway in Henan province as the background, 3D finite element models of the tunnel are established and the tunnel leading conduit effect of tunnel face stability by simulation of tunnel excavation is analyzed. From the calculated results, in the condition of leading conduit, the tunnel face's vertical nodal load, vertical nodal stress and horizontal displacement have been reduced; changing the distribution range and pipe diameter of leading conduit can affect the support effect, so it can improve the force condition of the tunnel face. The results show that: the leading conduit improves the stability of tunnel face and makes the tunnel excavation process safer.

**Key words:** tunnel; leading conduit; tunnel excavation simulation; tunnel face stability

(上接第29页)

### Study on "Strong Column - Weak Beam" Failure Mode of Composite Frame Composed of SRC Columns and Steel Beams

CHU Liu-sheng<sup>1</sup>, GAO Dan-ying<sup>2</sup>, ZHAO Geng-q<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; School of Environment and Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Based on the result of shaking table test and Pushover analysis of SRC frame, the problem that strong column - weak beam failure mechanism is difficult to realize in practical composite frame is studied from two aspects: the regulations incoordination on strong column - weak beam between reinforced concrete frame and steel frame and the seismic properties difference between steel beam and SRC column, basic defect and deficiency of norm provision on internal force adjustment is demonstrated. Suggestions about internal force adjustment coefficient for strong column-weak beam realization of composite frame and the imulation of SRC members are proposed.

**Key words:** composite frame composed of steel beams and SRC columns; strong column - weak beam; failure mechanism