

# 三维非线性有限元分析在地下管棚支护中的应用

程小彬, 刘建民

(西北工业大学力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:**结合某地下隧道管棚支护设计及施工方案,采用三维非线性有限元对该洞库的开挖与支护过程进行了模拟,得出的结论是:管棚支护对于控制地表沉降、侧墙水平位移和塑性变形作用明显;不同管径和管间距对位移最大值影响有限,但对管钢内应力有较大影响;不同开挖进尺、不同注浆加固厚度对围岩变形及支护结构的影响较大。该数值分析结果与以往现场实测结果相一致,可作为相关工程设计和现场施工的理论指导。

**关键词:**地下工程;管棚支护;有限元;三维数值模拟

**中图分类号:**U455 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2007)06-0059-04

**The 3-Dimension FEM Analysis on Pipe Shed Support Technology in Underground Structure Engineering/CHENG Xiao-bin, LIU Jian-min** (Northwestern Polytechnic University, Xi'an Shanxi 710072, China)

**Abstract:**Based on an actual construction project, a tunnel construction procedure with pipe shed support is simulated with three-dimension nonlinear FEM. The conclusion is: the pipe shed support have very tangible influence on controlling ground settlement, horizontal displacement of the side wall and plastic deformation. The influence of pipe diameters and spaces is limited on the displacement maximum, but has greater effect on the pipe internal stress. The influence of excavation lengths and the thickness of grout strengthening on tunnel structure are more obvious. The actual monitoring results demonstrated that the numerical simulation results are reliable and can be used as design and construction reference for pipe shed support engineering.

**Key words:** underground structure engineering; pipe shed support; FEM; three-dimensional numerical simulation

## 0 引言

管棚支护是地下工程施工中通过软弱破碎岩体、塌方段等不良地质层时的一种超前支护手段,其特点是可改善松散破碎岩层的物理力学性质,在拟开挖段上方形成具有较强承载能力的整体排架式加固拱圈,起到超前支护的作用。目前,对管棚支护作用问题的理论研究仍多采用平面有限元,对管棚的加固作用采用提高管棚影响范围内的围岩  $c$ 、 $\varphi$  值<sup>[1]</sup>或通过施加初期支护或临时支护<sup>[2]</sup>的方法进行简化;尚未看到单独设置钢管单元的研究;实际管棚加固施工方案的确定仍多采用工程类比方法。

本文采用三维弹塑性非线性有限元方法,对管棚支护与开挖不同方案进行模拟分析,探讨了管棚支护力学机制及其支护效应,可为地下工程管棚支护设计、施工提供理论指导。

## 1 工程概况

某地下洞室为直墙半圆拱形,其跨度为 6 m,洞高为 9 m,洞室埋深自底板标高算起为 27 m,围岩类

别为 V 类,结构松散,稳定性极差,由于本工程对地面沉降要求高,拟采用管棚支护。管棚设计注浆层厚度为 0.6 m,钢管直径 89 mm,钢支撑取 1 m 间距。为分析方案的科学性,分未加管棚注浆,管棚支护下不同开挖(支护)进尺、不同石质、不同管径、不同加固厚度、不同管间距等 6 种工况分别计算。

## 2 有限元计算及结果

### 2.1 建模加载计算

假设地应力仅由岩土自重产生,岩层为连续介质,不考虑地下水活动的影响。根据现场提供的地质资料,围岩类别为 V 类,围岩的物理力学参数选用低值,以确保工程安全。根据圣维南原理,对于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存在实际影响,在 3 倍宽度外的应力变化约在 10% 以下,在 5 倍宽度范围外的应力变化一般小于 3%<sup>[3]</sup>,所以计算边界可确定在 3~5 倍开挖宽度,在这个边界上,可以认为开挖引起的位移为零。按此确定的计算范围为:沿

收稿日期:2006-12-13

**作者简介:**程小彬(1974-),男(汉族),陕西宝鸡人,西北工业大学硕士研究生、工程师,结构工程专业,从事地下工程的施工及管理工作,陕西省西安市,13572130248,chengxiaobin666@163.com;刘建民(1962-),男(汉族),陕西西安人,西北工业大学副教授,结构工程专业,博士,从事岩土工程及建筑施工的教学及研究工作,13609282836,jianmin-liu@163.com。

洞轴方向取 12 m, 向上取至地面, 下部取至洞跨的 3 倍, 横向取洞跨的 7 倍。整个模型尺寸长(隧洞轴线方向) × 宽 × 高 = 12 m × 42 m × 45 m。边界条件为: 前后左右水平约束, 下部垂直约束, 上部取自由边界。为了节省计算工作量, 利用对称性, 取模型的 1/2 进行计算, 考虑岩体材料的非线性, 围岩采用 Drucker-Prager 屈服准则, 表达式<sup>[4]</sup>为:

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - H = 0$$

材料参数  $\alpha$  和  $H$  一般通过拟合摩尔 - 库仑屈服条件来确定。当 Drucker-Prager 圆与库仑六边形的外顶点重合时, 可得:

$$\alpha = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)}, H = \frac{6c\cos\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)}$$

式中:  $I_1$ ——应力张量的第一应力不变量;  $J_2$ ——应力偏张量的第二应力不变量;  $c$ 、 $\varphi$ ——岩石的粘聚力、内摩擦角。

岩土采用 8 节点块体单元 SOLID45, 注浆混凝土采用 SOLID65 混凝土单元的分离式模型, 钢管采用 PIPE20 塑性管单元, 钢支撑采用 BEAM4 单元。

由于钢支撑刚度大, 在荷载作用下变形较小, 故按线弹性材料计算。整个模型共划分 14280 个块单元, 144 个管单元, 468 个钢支撑单元。计算荷载只考虑岩体的自重应力。使用 ANSYS 的单元生死功能来模拟开挖和支护施工, 具体步骤为: 建立岩体模型和支护结构模型; “杀死”钢支撑单元, 施加约束; 计算初始地应力; “杀死”开挖部位内的单元, 同时激活钢支撑单元, 模拟岩体内洞室全段面一次开挖、支撑, 之后循环计算。有限元分析的围岩支护结构物理力学参数见表 1。

表 1 有限元计算的物理力学参数

类别	变形模量 /GPa	泊松比 $\mu$	密度 /(t·m <sup>-3</sup> )	内摩擦角 /(°)	粘聚力 /MPa
围岩	0.8	0.4	20	23	0.15
注浆混凝土	20	0.2	20		
钢管	200	0.25			
钢支撑	200	0.25			

## 2.2 有限元计算结果分析

表 2 为不同工况对管棚支护结果影响的计算结果。

表 2 不同工况对管棚支护结果影响的计算结果

工 况	地表沉降 最大值/m	侧墙位移 最大值/m	钢管等效力 最大值/Pa	塑性变形 最大值/m	注浆层等效力 最大值/Pa	钢支撑等效力 最大值/Pa	
未加管棚支护时, 不同开挖进尺	每 1 m 开挖	0.01573	0.00636	0.002147			
	每 2 m 开挖	0.01576	0.00633	0.002237			
	每 3 m 开挖	0.01580	0.00647	0.002237			
不同钢管直径 (每次 2 m) 开挖	Ø42 mm × 6 mm	0.01319	0.00498	0.616E+7	0.00133	0.796E+7	0.210E+9
	Ø89 mm × 6 mm	0.01319	0.00498	0.688E+7	0.001329	0.796E+7	0.210E+9
	Ø159 mm × 8 mm	0.01319	0.00498	0.741E+7	0.001327	0.797E+7	0.210E+9
同一管径(Ø89 mm), 不同开挖 (支撑)进尺	每 1 m 开挖支撑	0.013216	0.005043	0.755E+7	0.001505	0.809E+7	0.210E+9
	每 2 m 开挖支撑	0.013357	0.005229	0.873E+7	0.001542	0.961E+7	0.235E+9
	每 3 m 开挖支撑	0.013473	0.005341	1.010E+8	0.001811	1.030E+8	0.243E+9
不同管距(每 2 m 开挖, 1 m 支护)	1/8 拱	0.01319	0.004974	0.648E+7	0.001336	0.741E+7	0.208E+9
	1/10 拱	0.01319	0.004976	0.688E+7	0.001329	0.796E+7	0.210E+9
	1/20 拱	0.01319	0.004976	0.695E+7	0.001328	0.796E+7	0.210E+9
不同注浆加固厚 度(每 2 m 开挖, 1 m 支护)	0.3 m	0.01328	0.004988	1.50E+8	0.002317	1.05E+8	0.244E+9
	0.6 m	0.01319	0.004976	0.688E+7	0.001329	0.796E+7	0.210E+9
	1.2 m	0.01307	0.004971	0.445E+7	0.000553	0.639E+7	0.205E+9
不同石质(每 2 m 开挖, 1 m 支护)	IV 类	0.011235	0.000691	0.152E+7		0.413E+7	0.101E+9
	V 类	0.01241	0.001383	0.317E+7	0.001278	0.574E+7	0.127E+9
	VI 类	0.01319	0.004976	0.688E+7	0.001329	0.796E+7	0.210E+9

图 1~6 给出了一种典型围岩各种典型工况下各方向位移的等值线图。其中图 1 为计算模型开挖至中部时 X 方向位移等值线图, 最大位移值发生在侧墙中部; 图 2 为模型开挖至中部时 Y 方向位移等值线图, 最大值位移发生在模型底部; 图 3 为模型开挖至中部时地层变形图, 最大位移发生在开挖端; 图 4 为模型挖通后地层变形图, 地表下沉均匀; 图 5 为

模型挖通后 X 方向位移等值线图, 最大值发生在侧墙中部; 图 6 为模型挖通后 Y 方向位移等值线图, 最大值发生在模型底部。

## 3 对计算结果的讨论

由以上计算结果可见:

(1) 加管棚支护后地表沉降、侧墙水平位移和

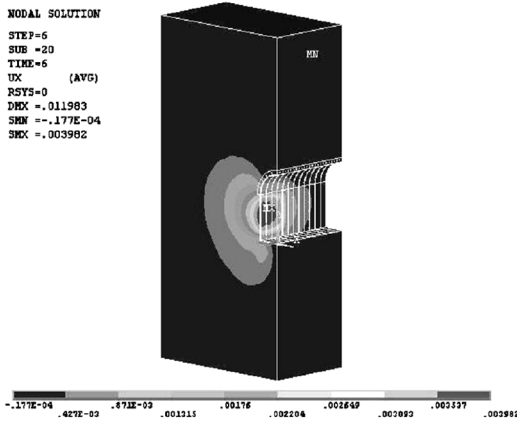


图 1 开挖至中部时 X 向位移等值线图

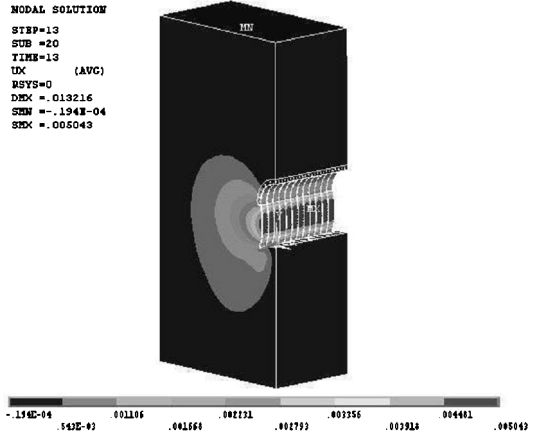


图 5 挖通后 X 向位移等值线图

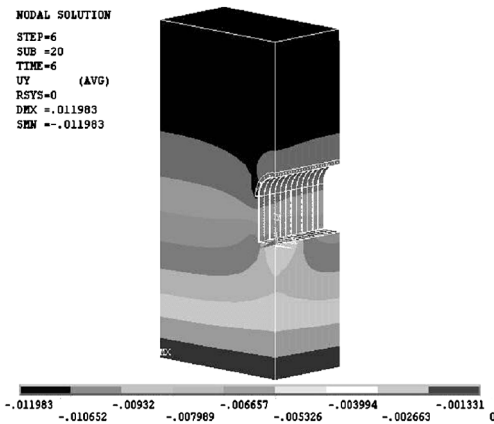


图 2 开挖至中部时 Y 向位移等值线图

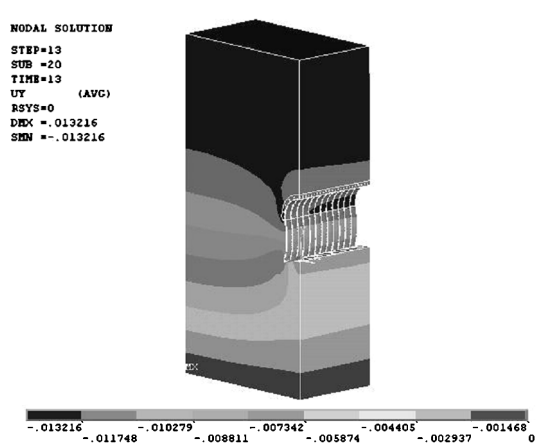


图 6 挖通后 Y 向位移等值线图

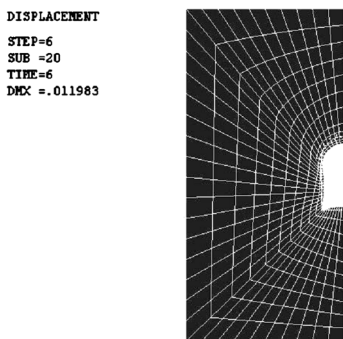


图 3 开挖至中部时地层变形图

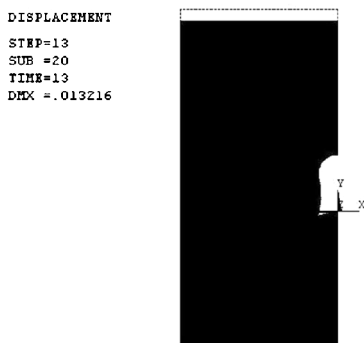


图 4 挖通后地层变形图

塑性变形明显减小,其最大值与未加管棚支护相比分别减小约 16%、22% 和 38%。

(2)管径分别为 42、89、159 mm 时,钢管等效应力最大值分别为  $0.616E+7$ 、 $0.688E+7$ 、 $0.741E+7$  Pa,塑性变形最大值分别为 0.00133、0.001329、0.001327 m;管距为 1/8 拱、1/10 拱、1/20 拱时,钢管内等效应力最大值分别为  $0.648E+7$ 、 $0.688E+7$ 、 $0.695E+7$  Pa,塑性变形最大值分别为 0.001336、0.001329、0.001328 m。水平及垂直变形最大值在不同管径和管距下变化很小,可见不同管径和管间距对变形最大值影响不大,但对钢管内应力有较大影响,管径和管间距增大,管内应力也随之增大,而塑性变形最大值随管间距的减小而减小。

(3)注浆层厚度分别为 0.3、0.6、1.2 m 时,地表沉降最大值分别为 0.01328、0.01319、0.01307 m,钢管等效应力最大值分别为  $1.50E+8$ 、 $0.688E+7$ 、 $0.445E+7$  Pa,塑性变形最大值分别为 0.002317、0.001329、0.000553 m,注浆层等效应力最大值分别为  $1.05E+8$ 、 $0.796E+7$ 、 $0.639E+7$  Pa。说明不同

注浆加固厚度对支护结构的影响较大,随注浆层厚度增大,地表沉降最大值、管内应力最大值、塑性变形最大值、注浆层等效应力最大值均有明显的减小,但当厚度过大时,对支护效果的进一步提高并不显著。

(4)当石质分别为Ⅳ类、Ⅴ类、Ⅵ类时,钢管等效应力最大值分别为 $0.152E+7$ 、 $0.317E+7$ 、 $0.688E+7$  Pa,塑性变形最大值分别为 $0$ 、 $0.001278$ 、 $0.001329$  m,可见不同石质下,管内等效应力最大值、塑性变形最大值随石质变差而增大。

(5)当开挖尺寸分别为 $1$ 、 $2$ 、 $3$  m时,地表沉降最大值分别为 $0.01322$ 、 $0.01336$ 、 $0.01347$  m,钢管等效应力最大值分别为 $0.755E+7$ 、 $0.873E+7$ 、 $1.010E+8$  Pa,塑性变形最大值分别为 $0.001505$ 、 $0.001542$ 、 $0.001811$  m,说明不同开挖进尺对围岩变形及管棚内应力的影响较大,地表沉降、管内应力、塑性变形均随开挖进尺增大而有较大增长。

实际施工中,在每 $3$  m开挖支撑工况时,钢管内等效应力最大值达到 $1.010E+8$  Pa,远小于钢管材料的强度值,不会发生强度破坏。钢管应力最大值一般出现在开挖断面部位的钢管底部;塑性变形最大值一般位于拱角及上半侧墙的位置,水平位移最大值一般位于侧墙中部位置。该洞室经管棚支护后,开挖安全顺利,经监测,地表沉降最大值 $<2$  cm,有效地控制了地表沉降,实现了设计目标。可见,应用ANSYS计算管棚结构内力与变形情况与实际施工情况基本符合,计算结果可用于管棚支护设计与施工指导。

#### 4 结论

管棚注浆支护技术能显著改善软弱破碎围岩的物理力学性质,在隧道开挖轮廓上部形成刚度较大、整体性较好,且具有较强承载能力的注浆加固带,其分担了围岩的大部分松动变形荷载,使得隧道周边变形比较均匀,应力集中、拱顶及地面下沉现象得到了有效的控制。

本文的计算分析得出如下结论:

(1)在管棚支护设计和施工时,以往加大管径、加密管间距的设计方法是不科学和不经济的,应针对不同情况合理设计;

(2)不同开挖进尺对围岩变形及管棚内应力的影响较大,开挖进尺越小,围岩变形及钢管、注浆层、钢支撑内应力越小,因此,应尽量控制好开挖进尺,不宜过大;

(3)由于注浆厚度对支护结构的影响较大,故设计和施工时应确保注浆质量,否则对管棚支护效果会有很大的影响。

#### 参考文献:

- [1] 唐晓松.大型地下硐室工程整体稳定性的有限元模拟分析[J].采矿技术,2003,(2):70-72.
- [2] 潘昌实.隧道力学数值方法[M].北京:中国铁道出版社,1995.
- [3] 孙钧,等.地下结构有限元法解析[M].上海:同济大学出版社,1988.
- [4] 周维垣.岩石力学数值计算方法[M].北京:中国电力出版社,2005.
- [5] 郝文化.ANSYS土木工程应用实例[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [6] 关宝树.隧道工程设计要点集[M].北京:人民交通出版社,2003.

## 国家863计划“天然气水合物勘探开发关键技术”重大项目在京启动

中国地质调查局网站消息 “天然气水合物勘探开发关键技术”重大项目日前宣布正式启动,各项研究工作已经展开。2007年5月21日,科技部召开了项目启动仪式,国家863计划海洋技术领域办公室闫金主任出席了会议并讲话,鼓励广大科研人员要科学严谨地工作,勇于创新,不怕失败,争取为国家能源的发展做出更大的贡献。

天然气水合物勘探开发关键技术是国家中长期科技发展规划纲要中的一项重要内容,被列入国家“十一五”国家高技术研究发展计划(863计划)海洋技术领域重大项目,重点开发天然气水合物成矿区带的高精度地球物理和地球化学勘探技术,自主研发水合物钻探取样技术与装备,为天然气水合物开发作技术储备。预期通过5年的攻关,在天然气水合物矿体的三维与海底高频地震联合探测、海底电磁探测、热流原位探测、流体地球化学现场快速探测、原位地球化学探测、重力活塞式保真取样器研制及样品后处理、钻探取心关键技术等方面取得突破,获得一批自主专利技术,培养一支天然气水合物科技研发队伍。本项目2006年面向全国公开发布了课题申请指南,采用自由申报、专家评审、公平竞争、滚动发展的原则,择优确定了9

个课题及其承担单位。

中国地质调查局的广州海洋地质调查局、矿产资源研究所等单位通过竞争,获得了“天然气水合物矿体的三维与海底高频地震联合探测技术”等4项课题资助,重点任务是开发海域天然气水合物矿体目标的三维地震与海底高频地震(HF-OBS)联合探测技术、水合物成矿区带的流体地球化学探测技术,以及水合物成矿区带的高精度海洋人工源电磁探测技术及海底热流原位探测技术,实现水合物成矿区带的高效综合勘探技术系列,为我国海域天然气水合物成矿区带勘探提供高技术支撑。

海洋技术领域办沈建忠副主任主持了启动仪式,总体专家组组长、中国地质调查局科技外事部主任彭齐鸣教授主持了各课题的汇报,领域办李清副处长、项目总体专家组出席了会议。中国21世纪议程管理中心、广州海洋地质调查局、中国地质大学(北京)、浙江大学、中国石化集团胜利石油管理局、中国石油大学(北京)、中海石油研究中心等单位有关专家30多人出席会议。中国地质调查局科技外事部、基础调查部有关人员参加。