管道隧道开挖过程数值模拟分析

胡文君¹,马 红²

(1.中国石油工程设计有限公司西南分公司,四川 成都 610017;2.中国石油大学(华东)土木系,山东 青岛 266555)

摘 要:对西气东输二线上河沿隧道开挖过程及其采用的支护方式采用 ANSYS进行数值 模拟,结合现场的实测数据和数值模拟结果进行了对比分析,从而判断初期支护参数的选择是 否合理,以确保隧道及地下工程施工的安全进行,从而指导西气东输二线东段隧道的设计与施 工。

关键词:西气东输二线;ANSYS;隧道开挖;数值模拟 文章编号:1006-5539(2010)01-0049-05 文献标识码:A

0 前言

西气东输二线管道西起新疆的霍尔果斯,经西 安、南昌,南下广州,东至上海,由1条干线及8条支 线组成,共设置隧道40余座。隧道结构比较复杂, 特别是处在不良地质条件下的隧道,用常规的方法 进行有限元分析时很难精确模拟,并且费时费力。 而ANSYS强大的实体建模能力可以快速精确地模 拟复杂的隧道结构,通过功能完善的网格划分工具 即可生成理想的有限元网格,并且其计算精度较高。 隧道开挖是个复杂的系统工程,在隧道围岩非常复 杂的条件下进行ANSYS有限元开挖模拟是非常必 要的。在参数选择合理的情况下,ANSYS软件可以 很好地模拟初期支护,围岩的变形,拱顶下沉等,这 对开挖施工工艺的确定,选择合理的支护结构等方 面具有重要的意义。

1 工程概括

西气东输二线上河沿隧道工程行政区划隶属于 中卫市常乐镇上河沿村。隧道在石炭系粉砂岩、粉 砂质泥岩和炭质泥岩、粒状砂岩中穿越,隧道洞身地 段不受断层的影响,但发育的褶皱对其是有影响的。 隧址区岩体中节理、裂隙极发育,地下水为层状基岩 裂隙潜水,含水层为石炭系砾状砂岩、粉砂岩。岩体 破碎,节理、裂隙发育,地下水补给条件较差,含水层 富水性也差,钻孔受深度所限未见地下水位。隧道 最大埋深超过 60 m,隧道的净断面尺寸满足管道安 装、检修、施工和各种安全间隙等要求。上河沿隧道 仅考虑西气东输二线输气管道的安装,采用直墙圆 弧拱形,设计隧道净宽 3.2 m、净高 3.2 m,隧道长度 为 393 m,隧道设计坡度 9.5%,隧道横断面见图 1。



收稿日期: 2009-08-24

作者简介:胡文君(1980-),男,湖南怀化人,助理工程师,硕士,主要从事结构设计及研究工作。电话:(028) 86014520。

2.1 工程地质条件及计算参数

根据岩石坚硬程度和岩体完整程度,结合隧道 顶板厚度、岩石饱和抗压强度、岩体结构及涌、突水 等环境工程地质特征,上河沿隧道围岩基本分级划 分为 、V级两类。本文主要对设计里程 K0 + 34.06~K0 + 101.59段进行分析,计算所用参数见 表 1~2。

表 1 围岩物理力学参数^[1]

围岩 类别	弹性模量 <i>E_s /</i> MPa	泊松 比	内聚 力 C /kPa	内摩擦 角 /()	抗拉 强度 /MPa	容重 /kN・m ⁻³
泥岩	1 289. 2	0.33	600	31	0.3	24. 7
砂岩	1 461. 4	0.17	1 250	35	0.92	24. 3

表 2 隧道初期支护结构力学参数

项目	理性模 量 E _s /MPa	泊松 比 μ	强度 /MPa	容重 /kN ·m	。 备注
22砂浆锚杆 喷砼初衬	170 000 30 000	0.3 0.2	300(抗拉) 11.9(抗压)	79.59 25	L=2 5m 100厚 C2
			AN.	Xv	

2.2 有限元模型的建立

2.2.1 计算条件及计算范围

计算过程中不可取一个无限体来分析,由工程 经验得知,计算模型左右边界取隧道跨度的 3~4 倍^[2],本文计算模型左右水平计算范围均取 15 m (大于隧道跨度的 3倍),垂直计算范围向上取至地 表,向下取 15 m (大于隧道高度的 3倍)。由于隧道 断面较小,采用全断面进行开挖,模拟选取的单元见 表 3。

表	3	模拟选取的单元	
	-		

项目	围岩	锚杆	初喷混凝土
单元类型	plane42	link1	beam3

222 边界条件及网格划分

计算模型两侧的边界条件为限定水平移动的滑动支座,底部的边界条件为限定垂直位移的滑动支座,上部为自由边界,网格划分见图 2,初期支护单元划分见图 3。

223 围岩的本构关系^[4]

根据隧道围岩的物理力学性质,在本次有限元 计算中,采用弹塑性的非线性有限元。围岩材料的





图 3 锚杆及初期支护单元划分

本构关系采用德鲁克 - 普拉格 (D - P)模型,以计算 隧道结构与地层在开挖过程中发生的非线性变形特 征。

弹塑性理论认为物体在弹塑性变形阶段的应变 "可包括两部分:弹性应变""和塑性应变"",应变 增量的表达式为:

$$\mathbf{d}_{ij} = \mathbf{d}_{ij}^{e} + \mathbf{d}_{ij}^{p} \tag{1}$$

弹性应变增量 d[°]_i可以用广义胡克定律计算, 其表达式为

$$d_{ij}^{e} = \frac{dI_{1}}{9K}_{ij} + \frac{dS_{ij}}{2G}$$
(2)

式中 1 ——应力张量第一不变量;

*S*_{*ii}</sub> ——应力偏张量;</sub>*

K, G —— 体积变形模量和剪切模量。

塑性应变增量 d[°];可以根据流动准则确定,对 服从相关流动准则的材料,有:

$$d_{ij}^{p} = d \frac{\partial f}{\partial_{ij}}$$
(3)

式中 *f*——为屈服函数;

d ——为比例因子。

224 屈服准则^[4]

泥岩和砂岩是塑性较强的弹塑性岩质材料,土 的性质比较突出,在材料达到屈服极限后,可产生较 大的塑性流动。对该类材料选用摩尔 - 库仑 (Mohr-Coulomb)屈服准则来对其进行模拟。

其屈服准则函数式为:

$$F = {}_{m}\sin + J_{2}\cos - \frac{1}{3}\sin \sin - c\cos \frac{1}{3}\sin \frac{1}{3}$$

$$= 0$$
(4)

$$\overrightarrow{U}_{1} \sin + J_{2} \cos - \frac{1}{2} \sin \sin = c \cos$$

(5)
式中
$$I_1$$
 — 应力第一不变量; $I_1 = _{kk}$;
 J_2 — 应力偏张量的第二不变量。
 $J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ji}, S_{ij} = _{ij} - _{m \ ij}$ (6)
为 Lode 角, $= \frac{1}{3} \arcsin - \frac{3}{2} \frac{3}{(J_2)^{3/2}}$,

6

2.3 隧道开挖的模拟过程

6

隧道中被挖岩体通过程序提供的"单元生死" 技术来实现。ANSYS单元"死 效果并不是将杀死 的单元从模型中删除^[3],而是将其刚度(或传导,或 其他分析特性)矩阵乘以一个很小的因子 [ESTIF]. 因子的缺省值为 1e - 6.可以根据需要而修改。 "死 单元的单元载荷将为 0.从而不对载荷向量生 效,但仍然在单元载荷的列表中出现。同样,"死" 单元的质量、阻尼、比热和其他类似效果也设为 0 值。"死 单元的质量和能量将不包括在模型求解 结果中,单元的应变在"杀死的同时也变为0。类 似,单元的"出生"并不是把单元加到模型中,而是 将原本存在的"死"单元激活。所有单元(包括以后 操作中要"杀死 和激活的单元)必须在 PREP7中 生成,求解器中不能生成新单元。要加入一个单元. 必须在 PREP7中生成,在求解器中先"杀死",然后 在需要的载荷步中重新激活。单元被激活以后,其 刚度、质量、单元载荷等将恢复其原始数值,并且没 有应变记录和热量存储等。对于隧道的开挖与支 护,采用此项技术即可有效的模拟开挖和支护过程。

隧道开挖模拟的建模及计算过程: a 启动 ANSYS程序; b 材料、实常数和单元类 型定义; c 建立几何模型; d 创建网格模型(创建不 开挖的围岩 plane42单元,创建开挖掉的围岩 plane42单元,并赋予围岩的材料属性;创建喷射混 凝土的 beam3单元,并赋予混凝土的材料属性;创 建锚杆的 link1单元,并赋予锚杆的材料属性;创 建锚杆的 link1单元,并赋予锚杆的材料属性。); e 加载与自重应力求解(Tine1:先将 beam3单元和 link1单元杀死,赋予死属性,自重应力求解。); f 隧 道开挖模拟(Tine2:激活自重应力求解时杀死的 beam3单元和 link1单元,杀死开挖掉的围岩 plan42 单元,重新求解。); g 后处理,提取计算结果。

2.4 计算结果

只考虑岩体的自重应力,忽略其构造应力,在分 析的第一步:首先计算岩体的自重应力场,支护和锚 杆处于"杀死"状态,对计算不起作用,约束左右两 侧 *x*方向位移、底侧 *Y*方向位移,图 4~5分别为土 体在自重作用下的竖向位移与竖向应力云图。本模 型有上下两个岩层,上层为泥岩,高度 9 m,密度 2 475 kg/m³,下层为砂岩,高度 24.5 m,密度 2 438 kg/m³。





围岩的自重应力求解:

NODAL SOLUTION -0.497E-03 STEP=9999 (AVG) -0.347E-03 UY RSYS=0 -0.198E-03 DMX=0.846E-03 脱离区 SMN=-0.497E-03 -0.491E-03 SMX=0.846E-03 0.100E-03 0.249E-03 底鼓 0.398E-03 0.548E-03 0.697E-03 0.846E-03 图 6 开挖后竖向方向位移 -0.119E-03 NODAL SOLUTION STEP=9999 -0.923E-04 (AVG) RSVS=0 -0.659E-04 DMX=0.846E-03 SMN=-0.119E-03 -0.395E-04 弹性压缩工 SMX=0.119E-03 -0.132E-04 14 0.132E-04 0.395E-04 0.659E-04 0.992E-04 0.119E-03

图 7 开挖后水平方向位移

表 4 拱顶沉降观测成果表^[6]

观测时间	2008-08-17	2008-08-18	2008-08-19	2008-08-20	2008-08-24	2008-08-28	2008-09-01	2008-09-05
沉降值 /mm	0	0.2	0.1	0.2	0.4	0.4	0	0
累计沉降值 /mm	0	0. 2	0.3	0.5	0. 9	1. 3	1. 3	1. 3

-0.110E-07

-974885

-852241

-729598

-606955

-484311

-361668

-239025

-116381

6262

表 4为上河沿隧道设计里程 K0 + 70处拱顶测 点的实测值,累计沉降 1.3 mm,沉降速度为 0.118 mm/d,隧道开挖 11 d后沉降趋于稳定。

图 8表明在隧道的开挖过程中,整个地层大部 分区域都是受压的,只是在隧道附近一个很小的区 域范围内出现拉应力。最大压应力出现在直墙的下



图 8 隧道开挖后的第一主应力图

端部,为1MPa左右,初期支护采用100厚 C25混凝 土,轴心抗压强度设计值 *f*_c =11.9 MPa,满足要求。

锚杆对隧道稳定性的维护起着重要作用,图 9 为锚杆轴力图,拱顶脱离区为拉力,锚杆轴力最大。 抗力区锚杆受压,但受力较小。直墙段锚杆对初期 支护起一定的稳定作用,支护往隧道内变形越大,相



式中

力场。

(7)

 $_{i}h_{i}$

v =

 h_i ——为第 *i*层土体的高度 , m_o

 $_{i}$ ——为第 i 层土体的重度 , kN / m^{3} ;

有限元计算解为 0.801 3 MPa,可见解析解与数值解

基本吻合,利用此有限元模型能较好的模拟地层应

应力变化情况及初期支护的受力状态。隧道采用全断面开挖,隧道开挖后马上施加初期支护,初期支护

的施加通过"激活"第一步中"杀死"的锚杆及支护

单元来实现。图 6~7为开挖后土体的竖向和水平

方向位移云图。隧道开挖引起拱顶围岩发生向着地

下结构的变形和松动,支护约束围岩且随围岩发生

了一定的变形,图 6显示拱顶围岩下沉,形成脱落

区,隧道底部发生了底鼓现象,竖向最大变形很小,

为 0.8 mm 左右,与文献资料^[5]基本吻合,与表 4提

供的实测值相比,沉降偏小。围岩受压缩产生对支

护的弹性抗力,图 7显示初期支护发生向着围岩的

水平位移,两侧边墙最大水平位移为 0.2 mm 左右,

与文献资料^[5]基本吻合。

可得最大竖向应力为 0.8037MPa,图 5所示的

在分析的第二步:计算隧道开挖时引起的地层

____为垂向应力, kPa;

3 验算

3.1 锚杆承载力验算

3.1.1 锚杆截面积验算

应用《建筑边坡工程技术规范》^[7]推荐的公式:

 $A_{s1} = {0 \cdot N_a \atop 2 \cdot f_y}$;求得 $A_{s1} = 1.574 \times 10^{-4} \text{ m}^2$,因为, A_s > A_{s1} ,所以所选锚杆满足承载力要求。锚杆截面 积计算参数,见表 5。 3.1.2 锚杆锚固体与围岩的锚固长度验算

应用《建筑边坡工程技术规范》^[7]推荐的公式: $l_{i} = \frac{N_{ak}}{1 \cdot D \cdot f_{tb}} = 0.369 \text{ m}$,因为 $L > l_{i}$,所以锚 固体与地层锚固长度满足要求。锚杆锚固体与围岩 的锚固长度计算参数 .见表 6。

3.1.3 锚杆钢筋与锚固砂浆间的锚固长度验算

应用《建筑边坡工程技术规范》^[7]推荐的公式:

 $b_{a} = \int_{3}^{0} \cdot N_{a} = 0 \quad 137 \text{ m}$,因为 $L > b_{a}$,所以钢筋与砂浆锚固长度满足要求。锚杆钢筋与锚固砂浆间的锚固长度计算参数,见表 7。

项目	锚杆拉力设计 值 <i>N _ /</i> kN	锚杆直径 	锚杆截面积 A_s/m^2	钢筋抗拉强度设 计值 <i>f、/</i> MPa	锚筋抗拉工作条 件系数 ₂	工程重要 性系数 。
数 量	16.29	22	3. 8 $\times 10^{-4}$	300	0. 69	2
		表 6 锚杆链	首体与围宕的	間面长度计算参数		
项目	锚杆拉力标准 值 N _{ak} /kN	锚杆锚固体与 粘结条件系数	·围岩 锚 枚 1	固体直径 粘 <i>D /</i> mm	結强度特征 值 _{f,b} /kPa	锚固长度 <i>L /</i> m
数 量	12 53	1	chu	60	180	2 5
		1.11	52.			
		表 7 锚杆钢角	的与锚固砂浆间]的锚固长度计算参数	 牧	
项目	锚杆拉力设计 值 N _a /kN	锚杆钢筋与砂浆 粘结条件系数 3	锚固体直径 <i>D /</i> mm	钢筋与砂浆粘结 度设计值 _{fb} /kl	强 锚固长度 Pa <i>L/</i> m	工程重要 性系数 ₀
数量	16. 29	0.6	60	2 100	2 5	2
	- P					

表 5 锚杆截面积计算参数

3.2 砂浆锚杆实测拉拔力试验

上河沿隧道设置的系统锚杆为 22水泥砂浆 锚杆, *L* = 2.5 m, 间距 1 m, 呈梅花形布置, 钻孔直径

= 60 mm。隧道施工期间,现场对设计里程 K0 + 25~K0 + 70范围的系统锚杆进行了拉拔试验,锚杆 长度取两种,分别为 3.0 m 和 2.5 m,各 3根,试验 结果见表 8。

表 8 砂浆锚杆拉拔试验结果^[8]

编号	1	2	3	1	2	3
锚杆长度 /m	3. 0	3. 0	3. 0	2.5	2 5	2 5
拉拔力 /kN	78.6	96	102	91.8	70.3	76.9
平均拉拔力 /kN		92.2			79.7	

根据文献^[9]附录 M可知,系统锚杆的承载力为 35.15 kN,大于数值模拟计算值 16.29 kN,设计满足 要求。因为实测段围岩为泥质砂岩,呈半胶状状态, 造孔困难,易坍塌,砂浆锚杆注浆饱满程度不易保 证,再加上围岩极为软弱,水泥砂浆与围岩的摩阻力 很小,现场的实测数据比文献^[10]中的数据偏小。

4 结论

a. 通过计算分析上河沿隧道初期支护参数的选择是合理的。

h 计算结果可以显示,隧道收敛与实际情况相 比略偏小。相比隧道内的其他位置,拱顶和拱肩部 位置收敛较大,与现场施工情况一致,可供西气东输 二线东段隧道施工期间布置施工测点参考。

c从隧道的应力图可以看出,随着隧道的开挖, 整个地层大部分区域都是受压的,只是在隧道底板 及拱顶附近一个很小的区域范围内出现拉应力。

d 围岩的脱落区出现拉应力,该区域处于围岩的加固范围以内。围岩的加固范围由系统锚杆的长度决定。根据验算结果可知本隧道的设计中所采用的锚杆形式和长度是合理有效的。

(下转第 56页)

话初始协议)协议来实现,即 SIP FXO和 SIP FXS的 软件网关协议共同运行;

d 强插、强拆:优先权高的控制中心调度员,一 旦有重要通知和命令下达,通过桌面的显示屏查看 站场调度员的分机状态,可立即通过鼠标或按键中 断其通话并接与中心调度员的通话,并且中心调度 员还可在通话的同时向其它暂时不在位的调度员发 送留言;

e 录音电话:分机之间的通话可以自动被设置 在后台的存储服务器所记录,所录的内容可被随时 调出,所录的时间也可设置成月、年、若干年等,由于 采用的是数字技术,录音效果和时间远远优于在 PABX调度话机上的模拟录音技术;

f 会议电话:通过点击鼠标,即可启动会议电话,并且还可以召开视频会议电话,一旦需要扩大参 会人员,也可灵活地通过密码设置进入。

除了这些传统调度电话功能以外,还有其它非 常灵活和有效的新功能,比如:

a.移动性多机性:调度分机振铃的同时调度员的手机也可同步振铃,也可在调度员临时离开的时间内设置任何一部就近电话暂时作为调度电话使用;

b 号码管理:调度员对重要和常用的管道生产 和管理人员的电话、手机号码、邮箱地址等,可按照 自己的习惯在桌面上进行编辑,一旦急需通知,迅速

(上接第 53页)

e由于实际工程地质条件比较复杂,计算过程 中有限元模型相比实际情况比较简单,没有考虑初 期支护中的钢筋网和钢格栅的作用,使得计算结果 和量测结果存在偏差,这也进一步体现了地下工程 围岩稳定问题的不确定性。因此,运用理论与实际 经验相结合的方法,结合现场监控量测数据,灵活的 指导设计施工非常必要。

参考文献:

- [1] 康 胜. 西气东输二线管道工程第 6标段山岭隧道岩 土工程勘察 [Z]. 廊坊:西气东输二线管道工程设计联 合体,2008
- [2] 李 围. 隧道及地下工程 ANSYS实例分析 [M]. 北 京:中国水利水电出版社,2008

从桌面上点击,免去了翻找号码本的时间;

с呼叫日志:调度员可对当天值班进行的所有 呼叫进行编辑和分类,并可随时查找呼叫记录,作为 电子邮件保存到网络硬盘中以便日后查找。

4 小结

近几年,随着继西气东输管道工程之后新一轮 管道建设大量地开展,管道已向网状发展,已成立的 油气调控中心作为管道集中调度和控制的管理中 心,对油气资源的集中调运和统筹分配已是日常生 产中的例行工作。调度电话是作为调度员的生产工 具,伴随着通信技术的发展,其功能应该是满足生产 为目标,以现代化的手段来进一步实现方便、快捷、 可靠。

另外应该说明,本文强调的调度电话,仅局限于 应用在中国石油内部的专用网络,即传输和交换都 是不对外开放和经营业务的专用网络,否则,将会因 为以太网这种开放性很强的特点而降低其安全性。

参考文献:

- [1] GB 50253 2006,输油管道工程设计规范 [S].
- [2] GB 50251 2003,输气管道工程设计规范 [S].
- [3] Franklin D. Ohrtman, J R. 软交换技术 [M]. 李晓东,
 许 刚译.北京:电子工业出版社, 2003, 66-84.
- [3] 陈先国. 隧道结构失稳及判据研究 [D]. 西南交通大 学博士学位论文,2002
- [4] 高 红,郑颖人,冯夏庭. 材料屈服与破坏的探索[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(12):2515-2522
- [5] 王齐林,陈静曦,柯鹏振,等. 基于 ANSYS的铁路隧道 开挖过程的三维仿真分析 [J],岩土工程界, 2007, 10 (1): 52-54.
- [6] 仲继春.上河沿隧道内沉降观测成果 [Z].中卫:中铁 十三局集团有限公司,2008.
- [7] GB 50330 2002,建筑边坡工程技术规范 [S].
- [8] 仲继春.上河沿砂浆锚杆拉拔试验成果 [Z].中卫:中 铁十三局集团有限公司,2008
- [9] GB 50007 2002,建筑地基基础设计规范 [S].
- [10] 张立德,周小兵,赵长海,等.软岩隧洞设计与施工技术 [M].北京:中国水利水电出版社,2006