

文章编号: 0451-0712(2006)02-0176-05

中图分类号: U445.4

文献标识码: B

# 黄土连拱隧道施工技术研究

张家新<sup>1</sup>, 孙 辉<sup>2</sup>

(1. 中铁四局七公司 合肥市 230035; 2. 重庆大学土木工程学院 重庆市 400045)

**摘 要:** 黄土连拱隧道断面大、技术要求高、施工难度大, 确定合理的施工方案和开挖方法, 是确保隧道施工顺利实施的关键。结合我国第一座黄土连拱隧道——离石隧道, 采用数值模拟分析, 确定合理的施工方案, 文中介绍施工过程及其重点难点问题, 并根据全程监测结果, 进行了分析, 最后总结黄土连拱隧道施工的一些经验。

**关键词:** 黄土; 连拱隧道; 施工; 数值模拟

随着西部大开发战略的实施, 我国道路建设越来越多地修建在多山地区, 复杂条件下隧道工程也越来越多, 而在某些条件下, 必须采用连拱隧道。连拱隧道相对于分离隧道, 施工中不可避免地存在着对围岩的多次扰动, 围岩与衬砌结构受力十分复杂, 因此连拱隧道施工有相当大的难度。目前我国连拱隧道设计理论及施工技术均处于探索、积累阶段。黄土是一种特殊的岩土体, 无地下水时壁立性良好, 遇水膨胀, 黄土连拱隧道防水也是一个施工难题。

位于山西省离石市的离石隧道是青岛~银川国道主干线的汾柳高速公路上的重点工程, 是国内首条黄土连拱隧道, 是交通部重点科研项目。结合该工程, 采用新奥法思想和数值模拟, 对黄土连拱隧道的施工技术进行了探讨。

## 1 工程概况

该隧道位于晋陕丘陵区, 微地貌为黄土梁。第四

系中更新统离石组( $Q_2^1$ )构成隧道围岩主体, 褐色坚硬状, 均匀、密实, 质地坚硬, 抗侵蚀力强, 夹杂零星姜片石, 具有柱状节理, 属于Ⅲ类围岩。上更新统马兰组( $Q_3^m$ )分布在隧道顶部, 灰黄色坚硬状, 结构疏松, 柱状节理发育。隧道围岩范围内无地下水分布, 主要受大气降水影响, 围岩天然含水率为9%~12%。

隧道全长180 m, 其中暗洞长166 m, 为带中墙的整体式双连拱结构。隧道单跨净宽为9.75 m, 净高为7.05 m, 单跨为单心圆, 中墙亦是曲线, 中墙最小宽度为3 m, 隧道净宽24.1 m。隧道埋深浅, 最大埋深35 m。进出口均在冲沟内, 埋深不足10 m, 浅埋特征明显。隧道斜穿黄土梁, 地势左高右低形成自然偏压, 其中进出口围岩覆盖层较薄, 出口处厚仅3 m, 进口处右洞边界的覆盖层也很薄, 偏压明显, 见图1所示。

## 2 开挖顺序

由于连拱隧道的结构受力很复杂, 同时作为国

收稿日期: 2005-10-16

小导管注浆, 采用双液注浆固结堵水。

## 5 几点体会

(1) 对坍方的处理应选择合理的技术方案, 及时封闭掌子面, 防止坍腔进一步扩大, 稳固坍塌体后, 再采取其他有效措施处理坍方。

(2) 通过采取“先排水, 弱爆破, 短进尺, 管超前, 严注浆, 强支护, 早封闭, 勤量测”的技术手段, 保证了安全通过涌水坍塌段, 恢复了正常施工, 为隧道的尽早贯通提供了宝贵的时间, 同时由于开挖支护后

临空面增加, 增加了后期治水的难度。

(3) 处理涌水段时, 应加强隧道内的监测, 如拱顶下沉、周边收敛等, 以确保施工安全。

(4) 在对前方地质情况进行分析后, 采用超前支护、加强初期支护的刚度, 及时封闭成环等措施, 对于裂隙水及小压力断层水等破碎带带水开挖是有效的。

## 参考文献:

- [1] 公路隧道施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 刘华, 胡志勇, 何沁, 等. 野猫岗隧道不良地质段施工[J]. 公路, 2004, (8).

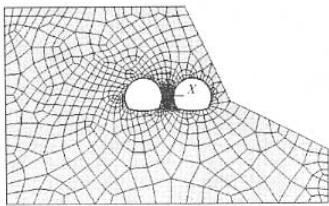
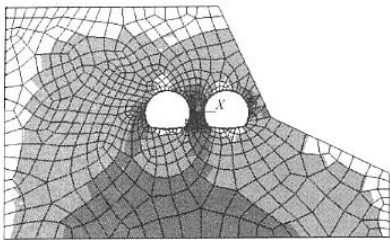


图1 隧道有限元分析模型网格

内首例黄土连拱隧道,有必要进行数值模拟,以分析施工过程中结构与围岩的受力情况,优化施工方案,确定合理的开挖顺序。而在软弱围岩中修建连拱隧道,目前采取比较多的开挖顺序是三导洞法和上下台阶法。采用有限元程序ANSYS,根据围岩条件建立了数值计算模型,对这两种开挖顺序进行模拟、比较,其中,这两种方法开挖完成后的围岩应力场和位移场见图2、图3所示。

1  
ELEMENT SOLUTION

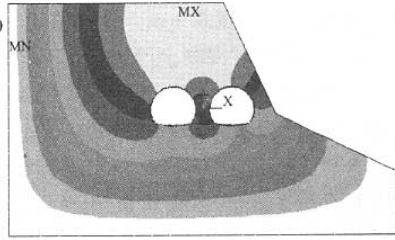
STEP=1  
SUB=7  
TIME=1  
SY (NOAVG)  
RSYS=0  
DMX=0.002503  
SMN=-313116  
SMX=0.350×10<sup>7</sup>



(1) 围岩应力场

1  
NODAL SOLUTION

STEP=1  
SUB=7  
TIME=1  
UY (AVG)  
RSYS=0  
DMX=0.002503  
SMX=0.002389

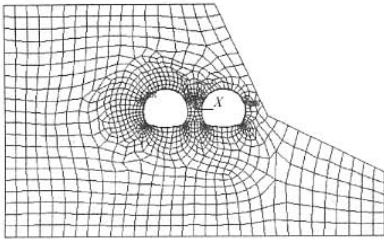


(2) 围岩位移场

图2 三导洞法开挖完成后的围岩应力场和位移场

1  
ELEMENT SOLUTION

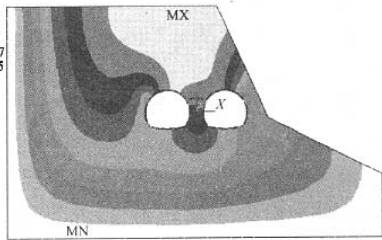
STEP=1  
SUB=7  
TIME=1  
SI (NOAVG)  
DMX=0.001437  
SMX=0.265×10<sup>6</sup>



(1) 围岩应力场

1  
NODAL SOLUTION

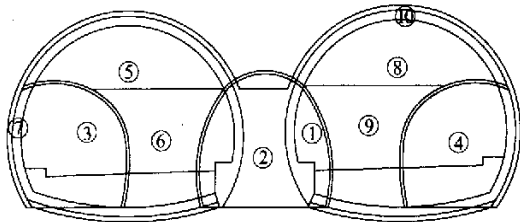
STEP=1  
SUB=7  
TIME=1  
UY (AVG)  
RSYS=0  
DMX=0.001437  
SMX=0.001435



(2) 围岩位移场

图3 上下台阶法开挖完成后的围岩应力场和位移场

三导洞法和上下台阶法引起的拱顶下沉位移稳定后的最大值分别是21.23 mm和25.78 mm。中墙承受的压力变化比较复杂,两种开挖顺序在钢拱架安装在中墙一侧时,中墙均出现了偏压,其最终的压应力值分别是2.278 MPa和3.167 MPa。结合整个施工过程的模拟,可以认为,从这两种开挖顺序对围岩的扰动和初期支护承受的荷载、从施工力学角度以及施工工序等方面考虑,三导洞法优于上下台阶法。最终确定按图4所示的施工顺序及表1所示的支护参数进行施工。



①中导坑开挖支护;②中墙衬砌;③左侧导开挖支护;④右侧导开挖支护;⑤左主洞上台阶开挖支护;⑥下台阶及仰拱开挖支护;⑦左洞二衬混凝土施工;⑧右洞上台阶开挖支护;⑨下台阶及仰拱开挖支护;⑩右洞二衬混凝土施工

图4 施工顺序

表 1 支护设计参数

Ⅰ类围岩	超前支护	初 期 支 护				二次衬砌	其他
	φ50 小导管	φ22 砂浆锚杆	支 撑	φ8 钢筋网	C25 喷射混凝土	C25 混凝土	
中导坑	长 4.0 m 间距 40 cm	长 3.5 m 1.0 m×1.0 m	φ25 格栅 间距 80 cm	20 cm×20 cm	15 cm		进出口 φ108 大管棚
侧导坑	长 4.0 m 间距 40 cm	长 3.5 m 1.0 m×1.0 m	φ25 格栅 间距 80 cm	20 cm×20 cm	15 cm		
主 洞	长 4.5 m 间距 40 cm	长 3.5 m 1.0 m×1.0 m	20a 工字钢 间距 80 cm	20 cm×20 cm	25 cm	45 cm(厚度)	

### 3 施工过程及重点

#### 3.1 导坑开挖支护

中导坑高 6.4 m, 宽 6.8 m。设计采用钢格栅支护, 间距为 80 cm, 喷射混凝土厚 15 cm。砂浆系统锚杆长 3.5 m, 间距按 1.0 m×1.0 m 布置。φ50 注浆小导管超前支护, 导管长 3.5 m, 搭接 2.0 m。中导坑分上下台阶开挖, 上台阶高 3.5 m。由于围岩较差, 上台阶开挖后掌子面经常与开挖面成 75° 滑落, 只有预留核心土上开挖。上下台阶距离保持在 5 m 左右。下台阶左右错开施工, 防止落拱。中导坑人工配合机械开挖, 支护紧跟开挖面, 历时两个月, 日进尺在 3.0 m 左右。

由于断面小, 支护紧跟, 中导坑开挖对隧道围岩影响较小。隧道开挖后拱顶、地表下沉量在 2 cm 左右, 拱脚收敛亦不超过 2 cm。

在中导坑贯通后开挖左侧导(下行线)。为保证机械通行, 将侧导坑扩宽至 4.5 m, 拱部改为弧形, 高度为 5.5 m。中侧导坑之间核心土厚度 3.5 m。侧导坑开挖方式同中导坑, 曾尝试全断面开挖, 由于掌子面经常塌方, 后恢复上下台阶开挖, 还是塌方。中导坑开挖对围岩扰动影响较大, 侧导坑分布在中导坑应力场内。侧导坑收敛值较中导坑大, 在 2.5~3.2 cm 之间。

侧导坑开挖对中导坑支护的影响明显。在侧坑开挖后, 中导坑洞口段下台阶处出现 2 道对称的裂缝, 高度在 2.0 m 左右, 收敛值突变 2.0 cm 左右。拱顶地表发生第 2 次沉降, 一般下沉量在 4 cm 左右。

在中墙基础底变更增加了 40 cm 的二八灰土, 宽度为 4.66 m。开挖灰土基础时, 在侧导坑已施工段, 中导坑初期支护发生变形破坏, 进口 50 m 段下台阶均开裂(超前侧导坑 20 m), 裂缝间距在 3.0 m 左右, 扩展高度为 2.0~3.0 m, 裂缝局部宽度达到 5 mm, 并有继续扩大的趋势。后通过观测, 地表、拱顶增加到 7 cm 左右, 收敛值达到 5 cm。

分析事故原因: 由于中导坑开挖后, 下台阶底部被回填一部分, 经过机械碾压, 强度提高, 限制中导

坑下台阶格栅收敛变形, 具有临时仰拱的作用。侧导坑开挖后, 支护受力进一步增大, 拱脚处应力集中, 同时开挖基础, 约束被解除, 支护迅速发生开裂变形。

由此可以看出, 仰拱对黄土隧道的作用。隧道开挖后支护受侧压力大, 施工中应尽量限制拱脚处支护的变形。中导坑初期支护裂缝发生后及时将土方回填起来, 迅速碾压。同时经业主同意, 在中导坑底每 5 m 增加两榀格栅, 与初期支护形成闭合环。经过处理后, 变形被控制下来。

#### 3.2 主洞开挖

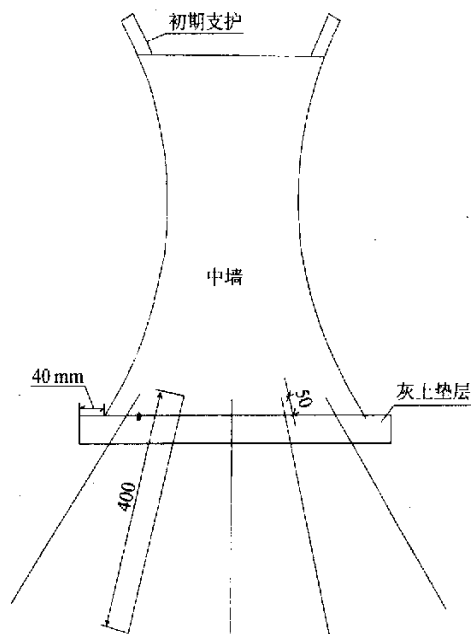
主洞核心分三步施工: 上台阶开挖支护、下台阶开挖、仰拱开挖支护。

上台阶跨度大, 开挖必须预留核心土。由于拱部围岩较好, 采取机械开挖, 人工修整, 一个工班进尺可达到 1.6 m。下台阶采取装载机铲除。仰拱落后开挖面 30~50 m, 分左右幅开挖, 一次开挖长度为 15 m。在不影响机械施工的情况下, 临时支护应尽量晚拆除。侧导坑支护拆除落后开挖面 5~10 m, 中导坑格栅在开挖仰拱时拆除, 保证拆除格栅时支护达到一定的强度。

#### 3.3 中墙施工

离石隧道原设计采用整浇曲中墙, 后经过变更改为三片浇注曲中墙。如图 5 所示。中墙分 3 层施工, 以克服连拱隧道易从中墙接头漏水的难题, 同时由于中间核心部分没有外观要求, 节省了一套定型钢模, 为施工提供了方便。

考虑在施工中主洞工字钢坐落在中墙拱顶, 中墙受力大, 而且两侧不对称施工, 中墙受到先施工一侧的水平推力。为保证中墙的稳定, 中墙底增加了一层 40 cm 厚的二八灰土, 碾压密实, 增加基础承载力。然后在灰土基础上施工地面锚杆, 间距为 80 cm, 一环 5 根, 对称中墙轴线呈放射状布置。锚杆长 4.0 m, 锚固 3.5 m, 尾部 0.5 m 与中墙钢筋焊接, 浇注在中墙混凝土内, 增加中墙抗倾覆能力。



单位:cm  
图5 中墙

中墙模板采用小型建筑钢模拼装,用型钢定型、加固。首先在中墙底浇注一层20 cm厚的调平层,方便立模板,同时从模板缝中渗出的离析水可以从调平层上排出洞外,防止浸泡软化地基。

中墙从进口向出口施工,这样可以节省主洞开挖时间。拱顶回填采用木模板与中导坑初期支护接触紧密,两端堵头,泵送混凝土入模。从拆模的情况看,回填两边与中导初期支护接触紧密,但拱部仍有10 cm左右的空隙。施工中每5 m设一处注浆孔,在混凝土凝固后压注水泥浆,保证拱顶回填密实。浇注中墙时将中墙主筋延长30 cm,与回填混凝土一起浇注,以增加中墙的整体性。

### 3.4 偏压处理方案

#### 3.4.1 管棚施工

针对进口偏压与出口浅埋的地质特征,采用大管棚进洞。进口30 m,出口20 m。管棚采用 $\phi 108$ 钢管,壁厚5 mm,每节长6.0 m,通过套管焊接。通过潜孔钻机成孔,由于管棚长度较长,在钻头、冲击器自重的影响下,钻孔实际成抛物线形。在开口时钻杆与洞身轴线成 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 比较合适,并根据长度进行调整。同时由于钻孔弯曲,钻孔应相应放大,在开始施工时,采用 $\phi 110$  mm的钻头,成孔在112 mm左右,钢管无法送入,后改为 $\phi 135$  mm的钻头。钢管借助挖掘机送入,现场通过 $\phi 100$ 的套管焊接接头。钢管

打孔注浆,注浆初始压力控制在0.5~1.0 MPa,终压为2.0 MPa。

管棚通过掌子面及后支护支撑下,形成梁式结构,对防止围岩松动、坍塌相当有效。管棚施工以后地表沉降迅速被控制下来,出口浅埋段未采取其他加固措施。

#### 3.4.2 右侧土钉墙加固

右洞基本处在斜坡体内,最薄覆盖层不足2.0 m,而且右侧坡脚比隧道基础低。右洞施工难度相当大,稍有不慎就有滑坡、塌方的危险。针对右侧覆盖层薄,而且又离民房太近,无法采用挡墙、回填的处理方案,右侧边坡采用土钉加固。

首先清除坡面表层植被及表层虚土,然后采用喷射混凝土封闭坡面,同时做好坡面排水设施,防止雨水冲刷坡面。

土钉采用 $\phi 22$ 的钢筋,长度根据坡面覆盖层厚度进行调整。间距为1.2 m,梅花形布置。人工采用洛阳铲开挖成孔,孔径为108 mm,角度尽量垂直于坡面。孔内注高标号砂浆。

土钉穿透土层与洞内支护焊接形成整体,防止坡体下滑。同时通过砂浆置换土体,提高围岩等级。

#### 3.4.3 洞内加强支护

洞口段采用人工开挖。严格遵循短进尺、强支护的原则,开挖一榀,支护一榀。同时将钢支撑间距调整到50 cm,在右侧拱脚处增加一环砂浆锚杆,以增加洞内支护的稳定性。

## 4 施工监测

结合交通部科研项目,对隧道施工进行了全程跟踪监测,主要监测项目为地表下沉、拱顶下沉、洞身收敛、支护受力。通过分析监控量测数据,可得出以下结论。

中导坑断面较小,开挖对围岩的影响较小,地表下沉、收敛均在2 cm左右,围岩、支护均比较稳定。

侧导坑开挖后对中导坑影响较大,地表、拱顶下沉均有一个突变的过程,地表下沉达到5~7 cm,拱顶下沉也有5 cm左右。侧导坑自身的变化亦比中导坑大,主要表现为洞身收敛。在左导坑开挖时,地表仰坡断面出现细微的裂缝,洞口段中导坑支护也发生了破坏。

主洞开挖后地表、拱顶下沉变化比较缓慢,但经历的时间长,最终地表下沉达到12 cm左右,局部断面达到15 cm,拱顶下沉达到8 cm。在隧道轴线左侧

地表出现 1 道贯通的裂缝,宽度达到 5~8 cm。

通过中墙变形观测发现,中墙表现为整体下沉,下沉量有 2 cm,偏转只有几毫米,说明中墙的施工方案是合理的。中墙自身能够主动抵抗开挖时的不平衡推力,故未对中墙采取特殊的保护措施。

左洞支护的受力比右洞的大,右洞初期支护中的工字钢的应力最大处仅为 -30 MPa 左右,而左洞的则达到了 -100 MPa;二次衬砌中钢筋的应力也是左洞的大,左洞  $\times \times \times$  里程的钢筋应力最大为 -98 MPa,右洞钢筋只有 -3 MPa 和 11 MPa。

支护在左洞左边墙墙角处的受力最大,初期支护中工字钢应力达到 -100 MPa,二次衬砌钢筋应力达到 -97 MPa,其次是靠近中墙的拱腰处,拱顶的应力不大,但有的断面出现了拉应力。

初期支护与二次衬砌之间的压力,拱腰处较大,拱顶最小,边墙次之。

## 5 结语

在黄土地区修建隧道,工艺比较成熟,但修建黄土连拱隧道还是第一次,相关的经验比较少,只有在施工中不断摸索,积累经验。

黄土自身的特点很鲜明,是一种软弱围岩,在黄土中修建连拱隧道,需要根据围岩条件进行分析,优选施工方案;支护必须紧跟开挖面,应尽量减小围岩

变形,控制松动圈的扩大。在设计施工中应注意仰拱的作用,在施工中仰拱应尽量紧跟掌子面,不可在变形稳定、支护成为受力主体后,再开挖扰动围岩。在黄土隧道开挖中,由于核心土能很好地防止掌子面塌方,应尽量预留核心土;同时上下台阶距离不能太长,以控制在 5~10 m 为宜。水对黄土的破坏较大,施工中应处理好。监控量测是一种行之有效的手段,对指导施工,险情预报相当有效,在施工中必须坚持。

## 参考文献:

- [1] 唐亮. 双连拱隧道施工方法[J]. 重庆交通学院学报, 2004, 23(2).
- [2] 贾永刚, 王明年. 连拱隧道两种工法的施工力学分析[J]. 隧道建设, 2004, 24(1).
- [3] 王志军. 大跨度黄土隧道施工技术[J]. 军民两用技术与产品, 2004, (9).
- [4] 陈鹤, 乔春生. 富水黄土隧道初期支护监控及分析[J]. 西部探矿工程, 2003, (1).
- [5] 林刚. 何川连拱隧道施工全过程地层沉降三维数值模拟[J]. 公路, 2004, (3).
- [6] 王伟, 黄娟, 彭立敏, 胡自林. 不同施工顺序对偏压连拱隧道结构稳定性的影响分析[J]. 西部探矿工程, 2004, (10).
- [7] 张华兵, 倪玉山, 赵学勤. 黄土隧道围岩稳定性粘弹塑性有限元分析[J]. 岩土力学, 2004, (增 2).

# A Study on Construction Technology of Double-Arch Tunnel in Loess

ZHANG Jia-xin<sup>1</sup>, SUN Hui<sup>2</sup>

(1. The Seventh Engineering Co. Ltd., Fourth Bureau of Civil Engineering Group, Hefei 230035, China;

2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** The construction of multi-arch tunnels in loess is complex and difficult. On the basis of the case of the first multi-arch tunnel in loess in China—Lishi Tunnel, the construction technology of it is discussed. The optimal construction scheme is determined by using the numerical simulation analysis. The key point in the construction is introduced in detail. The whole construction is monitored, and the monitoring data are analyzed. Then some conclusions on the construction technology are given.

**Key words:** loess; multi-arch tunnel; construction; numerical simulation