

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.02.033

# 非对称超浅埋大偏压三层衬砌双连拱 隧道施工方案优化

王云隆, 侯哲生, 徐 锋, 郑书笛  
(烟台大学 土木工程学院, 山东 烟台 264000)

**摘 要:** 为优化双连拱隧道施工方案降低围岩沉降量,以荣乌高速公路黄土岭隧道为依托,采用岩土分析软件 GTS NX 模拟黄土岭隧道的施工过程,定量分析了多种复杂情况下双连拱隧道在采用不同施工方案时围岩的应变情况,说明了隧道偏压情况下先开挖偏压较大一侧洞室有利于降低隧道围岩变形量以及三层衬砌中第一次初支较第二次初支对降低围岩变形量的影响更大,得出的优化方案可为今后相关的双连拱隧道施工提供科学依据与技术指导。

**关键词:** 非对称连拱隧道;三层衬砌;浅埋偏压;数值模拟

中图分类号: U455.4

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)02—0179—05

## Construction Scheme Optimization of Asymmetric Super-shallow Buried Double-arch Tunnel with Large Eccentric Pressure and Three-layer Lining

WANG Yunlong, HOU Zhesheng, XU Feng, ZHENG Shudi

(School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai, Shandong 264000, China)

**Abstract:** In order to optimize the double-arch tunnel construction scheme to reduce the settlement of surrounding rock, based on the Huangtuling tunnel of Rongwu Expressway, the geotechnical analysis software GTS NX was used to simulate the construction process of the Huangtuling tunnel, and the double-complexity under various complicated conditions was quantitatively analyzed. The strain of the surrounding rock in the arch tunnel with different construction schemes shows that the tunnel with the bias of the tunnel is biased, which is beneficial to reduce the deformation of the tunnel surrounding rock and the first initial branch of the three-layer lining. Compared with the second initial branch to reduce the deformation of surrounding rock, the optimized scheme can provide scientific basis and technical guidance for the construction of related double-arch tunnels in the future.

**Keywords:** asymmetric continuous arch tunnel; three-layer lining; shallow buried bias; numerical simulation

随着我国公路交通事业的迅猛发展,连拱隧道在山区公路的修建中得到了越来越多地应用,然而连拱隧道的修建过程中存在多次扰动围岩,施工工法复杂,开挖工序较多,围岩应力变换和结构受力复杂等问题<sup>[1-2]</sup>。因此优化特殊情况下连拱隧道的施工方案有利于今后相关连拱隧道保障施工安全、降低工程造价和提高施工效率。

国内学者对连拱隧道进行了大量研究,基于现场试验、数据模拟和理论分析等方法的研究均取得了丰硕的成果。刘涛等<sup>[3]</sup>对偏压连拱隧道围岩的稳

定性进行了模型试验和数值分析,对偏压连拱隧道的塑性区分布,偏压对隧道拱部、边墙、中墙的影响情况进行了研究。申玉生等<sup>[4]</sup>对连续隧道施工偏压力学特征进行了检测和分析,指出了在隧道由单侧施工到双侧施工时最不利于隧道结构受力,中墙弯矩的方向一般是由后施工洞室向先施工洞室偏移。王军等<sup>[5]</sup>对左右洞室不对称的连拱隧道进行了检测和研究,指出了不对称的连拱隧道围岩和支护系统的变形及受力特点。王亚琼等<sup>[6]</sup>针对浅埋偏压连拱隧道施工中出现的受力非对称问题,通过有限

收稿日期:2018-11-07

修稿日期:2018-12-04

基金项目:山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2010SF028)

作者简介:王云隆(1994—),男,山东莱阳人,硕士研究生,研究方向为隧道工程。E-mail:wangyunlongqq@163.com

元分析与现场监测,分析浅埋偏压连拱隧道非对称支护结构的受力性状,采用非对称设计方法对支护结构进行优化。邓华<sup>[7]</sup>以罗家隧道为例,通过有限元分析与现场监测来检测了三层衬砌在高应力软岩隧道中的受力性状。赖金星等<sup>[8]</sup>以某黄土隧道为依托,采用钢弦式传感器对围岩压力、初衬与二衬接触压力、二衬钢筋轴力、二衬混凝土应变、钢拱架应力等进行了系统测试与分析。这些研究成果推动了连拱隧道修建技术的进步,但目前隧道施工情况复杂化和多样化,鉴于此,有必要对多种复杂情况下双连拱隧道的修建技术进行应用研究,因此以荣乌高速公路黄土岭隧道为依托,对非对称、超浅埋、偏压及三层衬砌下连拱隧道的开挖与支护进行模拟分析优化施工方案,提高隧道施工水平。

## 1 工程概况

### 1.1 黄土岭隧道概述

荣乌高速公路黄土岭隧道位于河北省保定市涞源县黄土岭村东北侧,隧道上方为河北省省级文物保护单位黄土岭口古长城,左侧紧邻黄土岭战役纪念馆。黄土岭隧道为一座上下线合建四车道(与路基同宽)高速公路连拱隧道,隧道起讫桩号 K86 + 082—K86 + 165.259,长度为 83.259 m。其中进口设置 7.000 m 明洞,出口设置 6.259 m 明洞,左洞建筑界限净宽 15.25 m,建筑界限净高 5.0 m,右洞建筑界限净宽 12.25 m,建筑界限净高 5.0 m,洞门为端墙式。根据新奥法施工原理,初期支护由喷射混凝土、钢筋网、型钢钢架等构成,与二次模筑混凝土形成复合型衬砌隧道拟建于山体斜坡中上部,所通过山体自然坡度较大;隧址区岩层为第四系上更新统残坡积土,粉质黏土,黄褐色,硬塑,土质不均,含有少量石英颗粒;基岩为中生界燕山期中期花岗岩,灰白色,块状构造,节理裂隙发育岩心破碎,呈短柱状,锤击声哑,手可掰碎(如图 1 所示)。

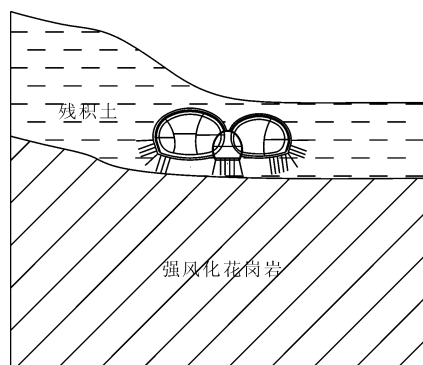


图 1 地质剖面图

### 1.2 黄土岭隧道开挖与支护设计方案

黄土岭隧道采用双连拱设计,支护结构采用三层衬砌(如表 1 所示),上下台阶法开挖中导洞,左侧洞室采用双侧壁导坑法,右侧洞室采用单侧壁导坑法(如图 2 所示),施工步骤:①→②→③→④→⑤→⑥→⑦→⑧→⑨。施作原则:(1)左右主洞外侧壁导坑建议在中导洞开挖支护 15 m 后同步进行施工<sup>[9]</sup>;(2)上下台阶法开挖按两拱架间距为一循环进尺,下台阶与上台阶间距应不小于 10 m;(3)左洞右导坑开挖支护 10 m 后左洞上台阶方可施工;(4)第一次初支与第二次初支步距 5 m,具体施作时间可根据现场情况进行调整;(5)综合分析初支监测量测结果后适时施作二次衬砌。

表 1 支护参数

支护结构	支护参数
第一次初支	C25 喷射混凝土 28 cm, 双层 A8 钢筋网(20 cm × 20 cm), HK200C 型钢拱架支撑, 纵向间距 50 cm
第二次初支	C25 喷射混凝土 30 cm, A28(24 cm × 24 cm) 格栅钢架支撑, 纵向间距 50 cm
二次衬砌	模筑 C30 防水钢筋混凝土厚 80 cm
钢管管	外径 A42 mm, 壁厚 4 mm 钢管管, L = 4.5 m, 横向间距 120 cm, 纵向间距 50 cm

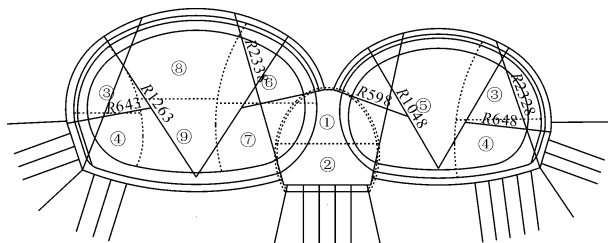


图 2 隧道尺寸示意图

## 2 隧道模型与参数

### 2.1 建立模型

根据黄土岭隧道桩号 K86 + 115—K86 + 155 的地质模型通过 MIDAS/GTS NX 软件建立了三维隧道分析模型(如图 3 所示)。

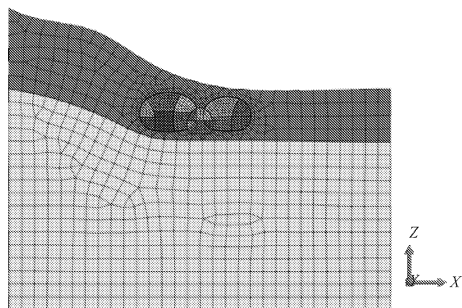


图 3 有限元计算模型

计算模型网格尺寸划分:隧道及支护结构网格尺寸均按 1 m 划分(如图 4 所示),岩层网格尺寸按 4 m 划分,岩层与隧道接触部分网格尺寸为自动匹配。计算模型边界范围:横向( $X$  方向)取 60 m,竖向( $Z$  方向)下部边界取距离隧道底部 55 m,上部边界最高点取距离隧道拱顶 35 m,最低点取距离隧道拱顶 1 m,纵向( $Y$  方向)取 40 m。计算模型约束条件:下部边界完全约束,两侧边界水平位移约束<sup>[10-13]</sup>。隧道围岩材料弹塑性模型均采用 Mohr - Coulomb 准则,根据弹性模型计算支护结构<sup>[14]</sup>。

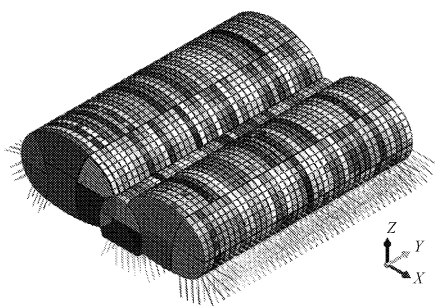


图 4 隧道及支护结构模型图

### 2.2 计算参数

按照《公路隧道设计规范》<sup>[15]</sup>(JTG D70—2004)

及《公路隧道设计细则》<sup>[16]</sup>(JTG/T D70—2010)确定岩土层及支护材料的计算参数(如表 2 所示)。

表 2 计算参数

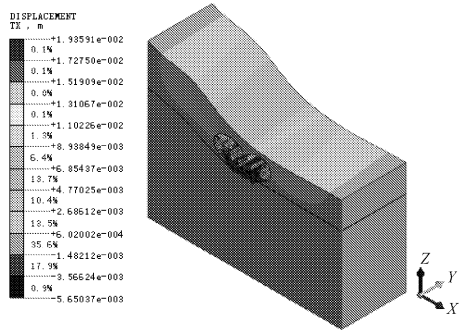
材料类别	$\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$E$ /GPa	$\mu$	$c$ /Pa	$\Phi$ /( $^\circ$ )
残积土	16	0.2	0.45	50	20
强风化花岗岩	20	0.5	0.40	80	30
初支	25	28.0	0.20	—	—
钢花管	78	206.0	0.30	—	—
钢拱架	78	206.0	0.30	—	—

## 3 方案优化与数值模拟

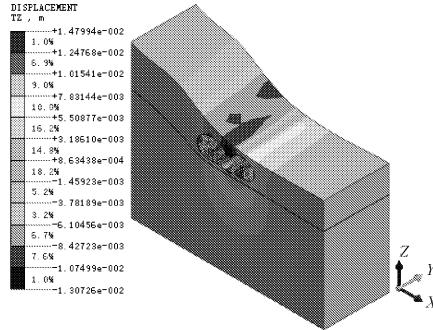
### 3.1 不同开挖顺序时隧道数值模拟情况

为了验证在山体偏压情况下隧道洞室不同开挖顺序对隧道整体稳定性的影响,分别研究了先开挖偏压较小洞室(右洞)与先开挖偏压较大洞室(左洞)时围岩的变形情况。

以隧道  $X$  方向及  $Z$  方向的位移值作为重要的参考指标(如图 5、图 6 所示)。

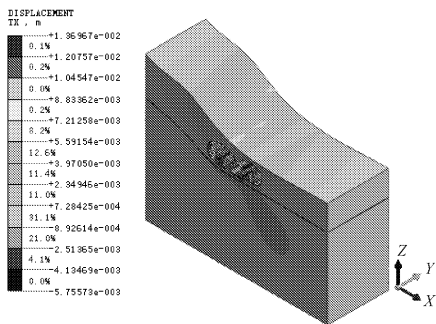


(a) X方向位移

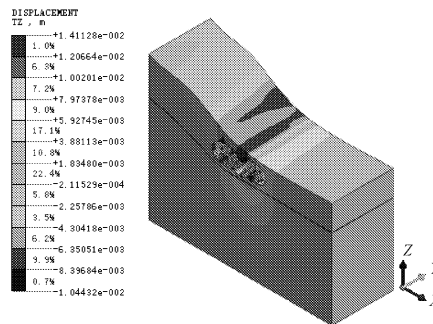


(b) Z方向位移

图 5 先行开挖右洞时的位移云图(单位:m)



(a) X方向位移



(b) Z方向位移

图 6 先行开挖左洞时的位移云图(单位:m)

由图 5 可知,先开挖右洞时隧道贯通后最大竖

向位移值为 13.1 mm,发生在中导洞拱顶位置;最大

水平位移值为 5.7 mm, 发生在中导洞下部位置。由图 6 可知, 先开挖左洞时隧道贯通后最大竖向位移值为 10.4 mm, 发生在中导洞偏右洞位置; 最大水平位移值为 4.1 mm, 发生在中导洞偏右侧位置。

图 5 与图 6 是不同施工顺序情况下隧道所有施工步骤完成后围岩的位移分布情况, 先开挖左洞相对于先开挖右洞的竖向位移量减少 21%, 水平位移量相对减少 26.7%。以上数值说明在隧道开挖过程中先行开挖山体偏压较大一侧的洞室可降低隧道围岩的竖向和水平位移值。

### 3.2 不同支护方案下隧道数值模拟情况

为验证三层衬砌中第一次初支与第二次初支在改善隧道开挖后围岩稳定性中的作用, 本文将在维持第一次初支与第二次初支喷混总体厚度不变的情

况下, 数值模拟不同第一次初支喷混厚度与第二次初支喷混厚度情况下围岩的变形情况。

以隧道  $X$  方向及  $Z$  方向的位移值作为重要的参考指标(如图 7、图 8 所示)。

由图 7 可知, 第一次初支厚度为 28 cm 时隧道贯通后最大竖向位移值为 13.1 mm, 发生在中导洞拱顶位置; 最大水平位移值为 5.7 mm, 发生在中导洞下部位置。由图 8 可知, 第一次初支厚度为 29 cm 时隧道贯通后最大竖向位移值为 12.4 mm, 发生在中导洞拱顶位置; 最大水平位移值为 5.7 mm, 发生在中导洞下部位置。由图 9 可知, 第一次初支厚度为 30 cm 时隧道贯通后最大竖向位移值为 11.7 mm, 发生在中导洞拱顶位置; 最大水平位移值为 5.6 mm, 发生在中导洞底部左侧位置。

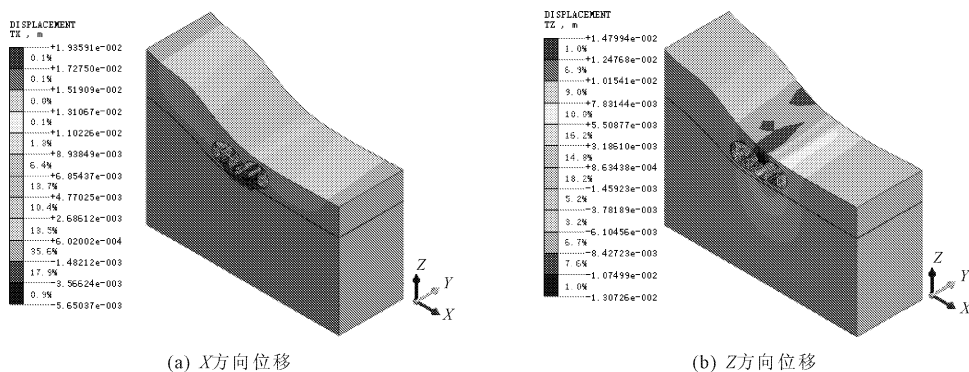


图 7 第一次初支厚度 28 cm 的位移云图(单位:m)

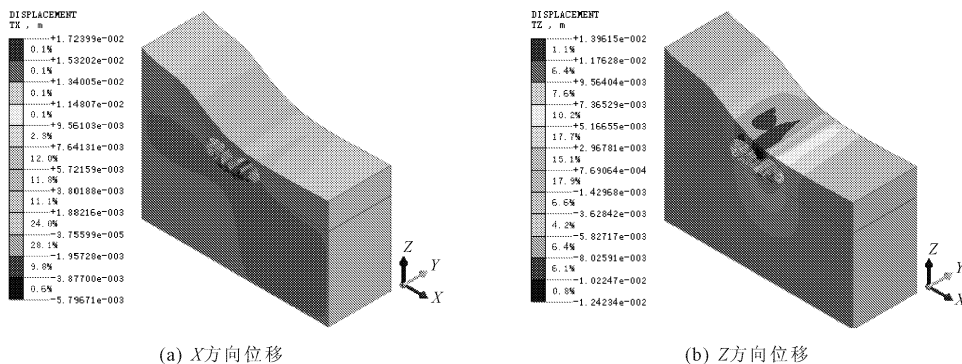


图 8 第一次初支厚度 29 cm 的位移云图(单位:m)

图 7、图 8 与图 9 是不同第一次初支厚度时隧道所有施工步骤完成后围岩的位移分布情况, 说明在隧道建造过程中第一次初支相较于第二次初支对降低隧道围岩变形量更加重要, 故增厚第一次初支厚度更有利于提高隧道围岩稳定性。

## 4 结 论

(1) 在修建山体偏压隧道的过程中应先开挖山

体偏压较大一侧洞室, 可防止因开挖山体偏压较小一侧洞室而破坏偏压山体原有的应力平衡, 避免因偏压较小一侧洞室施工引起的松动荷载对偏压较大一侧洞室的施工产生影响。本文通过模拟计算, 验证了山体偏压隧道的开挖过程中应在围岩未受扰动的前提下先行开挖山体偏压较大一侧洞室, 可一定程度降低围岩的竖向与水平位移值。

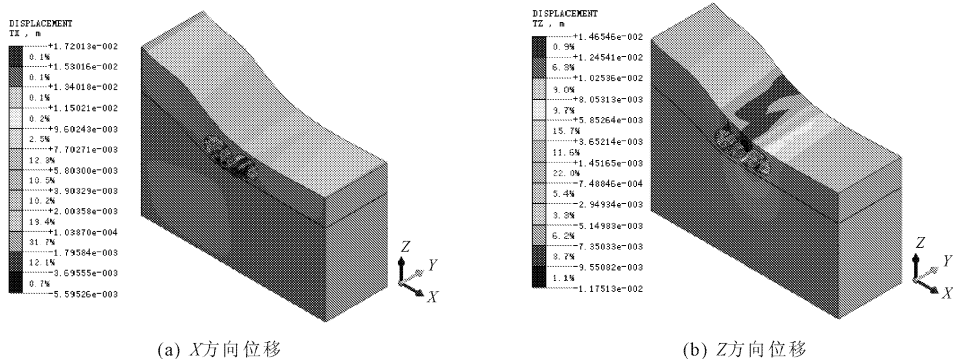


图 9 第一次初支厚度 30 cm 的位移云图(单位:m)

(2) 浅埋隧道在支护中采用三层衬砌时应尽可能的增厚第一次初支的喷混厚度,有利于提高初支应对因施工引起的应力变化的能力并减少上覆岩土层因开挖所导致的变形量,防止围岩由于变形失去自稳能力,同时也可降低第一次初支的变形为后续的第二次初支以及二衬的施工提供便利。通过本文的模拟计算,验证了在隧道施工完成后第一次初支比第二次支护对降低开挖后围岩的竖向沉降量有着更加重要的作用。

#### 参考文献:

[1] 方心怡.连拱隧道施工坍塌事故风险分析及防控措施[J].福建建材,2018(10):95-96,101.  
 [2] 韦庭昌.双连拱隧道施工技术 with 风险控制策略研究[J].西部交通科技,2018(1):118-120.  
 [3] 刘涛,沈明荣,袁勇.偏压连拱隧道围岩稳定性模型试验与数值分析[J].同济大学学报(自然科学版),2008,36(4):460-465.  
 [4] 申玉生,高波.双连拱隧道施工偏压力学特性的监测与分析研究[J].岩土力学,2006,27(11):2061-2065.  
 [5] 王军,夏才初,朱合华,等.不对称连拱隧道现场监测与分析研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(2):267-271.

[6] 王亚琼,张少兵,谢永利,等.浅埋偏压连拱隧道非对称支护结构受力性状分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S1):3265-3272.  
 [7] 邓华.三层衬砌在高应力软岩隧道支护中的应用研究[J].矿冶工程,2016,36(2):28-31.  
 [8] 赖金星,牛方园,樊浩博,等.浅埋黄土隧道三层支护结构力学特性现场测试[J].岩土力学,2015,36(6):1769-1775,1783.  
 [9] 吴迪.隧道施工参数对地表沉降的影响研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(2):131-134.  
 [10] 韩吉,侯哲生,顾洋.深埋隧道软弱围岩管棚处理效果研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(2):86-91.  
 [11] MIDAS 理论指南[M].北京:北京迈达斯技术有限责任公司,2005.  
 [12] 王海涛.MIDAS/GTS 岩土工程数值分析与设计[M].大连:大连理工大学出版社,2013.  
 [13] 陶云平.软弱围岩隧道变形破坏机制及处治措施研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2016,37(1):69-72.  
 [14] 陈明祥.弹塑性力学[M].北京:科学出版社,2010.  
 [15] 中华人民共和国交通部.公路隧道设计规范:JTG D70—2004[S].北京:人民交通出版社,2004.  
 [16] 中华人民共和国交通部.公路隧道设计细则:JTG/T D70—2010[S].北京:人民交通出版社,2010.

(上接第 82 页)

[8] 丁选明,范玉明,刘汉龙,等.现浇 X 形桩低应变动力检测足尺模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(S2):4290-4296.  
 [9] 尹锋,刘汉龙,陈育民,等.不同车速下高速公路 X 形桩网复合地基动力特性研究[J].岩土工程学报,2018,40(3):546-553.  
 [10] 王雪亮,夏梦然.现浇 X 形桩成桩过程充盈系数研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(1):229-235.  
 [11] 韩永强,朱雪珂.CFG 桩复合地基承载特性的研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(6):77-81.  
 [12] 郅彬,李戈,王永鑫,等.CFG 桩复合地基承载性

状试验研究[J].建筑结构,2017,47(23):100-102.  
 [13] 田利勇,张雨剑,鄢亚军.刚性桩复合地基沉箱挡土结构数值模拟分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(5):194-201.  
 [14] Bhasi A, Rajagopal K. Numerical study of basal reinforced embankments supported on floating/end bearing piles considering pile-soil interaction[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2015,43(6):524-536.  
 [15] 王勇,蔡智,屈洋,等.CFG 桩复合地基加筋褥垫层作用机理数值分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(1):96-100.