

# 风积砂地层浅埋隧道暗洞明做盖挖法施工 安全性分析

熊华涛

中铁十六局集团铁运工程有限公司, 河北 高碑店  
Email: 124967643@qq.com

收稿日期: 2020年11月3日; 录用日期: 2020年11月18日; 发布日期: 2020年11月25日

---

## 摘要

单线铁路横山黄土隧道埋深浅, 地质复杂, 围岩稳定性很差。本文采用数值方法模拟分析了围护桩 + 冠梁 + 横撑结构的稳定性及明洞结构的受力特征。对比分析围护桩的位移监测结果, 可以看出围护桩强度满足规范要求, 护拱结构最大裂缝宽度为0.19 mm, 围护桩和护拱变形量小, 安全可靠。分析结果表明, 暗洞明做盖挖工法有效地保证了隧道施工安全, 解决了隧道安全出洞的难题, 可为类似工程提供参考。

## 关键词

明洞结构, 围护结构, 暗洞明做盖挖工法, 数值分析

---

# Safety Analysis of Open Dark Cave and Cover-Cut Excavation Method for Dark Holes for Shallow Tunnel in Aeolian Sand Stratum

Huatao Xiong

China Railway 16th Bureau Group Railway Transportation Project Co., Ltd., Gaobeidian Hebei  
Email: 124967643@qq.com

Received: Nov. 3<sup>rd</sup>, 2020; accepted: Nov. 18<sup>th</sup>, 2020; published: Nov. 25<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Hengshan Railway Tunnel is a shallow single-track in Loess area. Surrounding rock self-stability is very poor, and geological conditions are complex. In this paper, the stability of enclosure pile + top

beam + cross brace structure and the mechanical characteristics of cut and cover structure are simulated and analyzed by numerical method. By comparing and analyzing the displacement monitoring results of the retaining piles, it can be seen that the strength of the retaining piles meets the requirements of the code, the maximum crack width of the retaining arch structure is less than 0.2 mm, and the deformation of the retaining piles and the retaining arch is small. The retaining piles and the retaining are safe and reliable. The analysis results show that the method of open dark cave and cover-cut excavation effectively guarantees the safety of tunnel construction and solves the problem of safe tunnel exit, which can provide reference for similar projects.

## Keywords

Cut and Cover Structure, Maintenance Structure, Cut and Cover Method Excavation of Tunnel, Numerical Analysis

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

浅埋隧道穿越软弱地层，尤其是隧道进出洞时穿越软弱地层，一直是隧道施工的难点。施工采用暗挖法时往往施工风险较大，工序复杂，而明挖法开挖深度太大，基坑开挖与支护成本太高[1]。暗洞明做盖挖法是可进行选择的一种方案。

盖挖法在城市地下工程中的应用较多，而山岭隧道中较少。张党平[2]结合石林隧道软基浅埋段施工技术，通过地貌勘察、地质钻探，确定该段施工采用盖挖法(先拱部明挖施作护拱，后洞内暗挖通过的施工方法)，保障了工程质量和施工安全。张峰[3]依托武广客运专线浏阳河隧道进口穿越人工填土的软弱地层，隧道施工时地表沉降大，出现多处裂缝，为此提出了地表减载，利用钻孔桩加横撑，支撑洞顶两侧填土，然后进行盖挖的施工方法，最后降低了施工风险，缩短工期4个月。李建飞[4]研究了铁路隧道跨沟谷浅埋段盖挖法施工技术，对地层进行了注浆加固措施，取得了良好效果。李强[5]提出高速铁路隧道超浅埋下穿高速公路盖挖法也是一种方式，隧道施工安全性提高，降低了对高速公路运营影响。刘传利、沈佳佳[6]分析了重罗山隧道浅埋偏压段采用盖挖法施工时隧道受力、变形的变化规律，总结了浅埋偏压段盖挖法施工要点。由此可以看出，浅埋松散地层隧道采用盖挖法是一种较优方案，而盖挖法中围护结构的安全性和明挖结构的受力特征是必须解决的重要问题。

横山隧道进口段穿越风积粉细砂地层，围岩自稳性极差，且地表有一冲沟，施工风险较大。本文通过数值模拟和现场试验研究对该段暗洞明做法的安全性进行了分析，为工法选择提供了有力支撑，可为类似工程提供参考。

## 2. 工程背景

横山隧道为浅埋单线铁路隧道，里程 DK165+160~DK165+944。全长 784 m，隧道穿越风积砂层和黄土层。均为 V 级和 VI 级围岩，围岩自稳性很差，洞身最大覆盖层厚度为 22 m。

隧道施工时，出洞点位于 DK165+160，而 DK165+200 处原为一冲沟，后人为在隧址区左侧修筑一条土路将冲沟截断，上游形成一个大坑，雨季汇水量较大时易发生黄土陷穴；

原设计施工方法为两台阶临时横撑法 + 掌子面加固 + 扩大拱脚，DK165+160~DK165+190 段超前

预支护采用洞口超前大管棚；DK165+190~DK165+285 段超前预支护采用双层超前小导管。

掌子面里里程推进至 DK165+221 时，施工揭示掌子面为沙土，与原地勘结果不符，进一步勘测发现 DK165+160~DK165+230 段隧顶是风积粉细砂，并且属于浅埋隧道，原设计工法存在极大的施工风险，应寻求更合理的工法实现安全出洞。

考虑到现有技术条件，结合盖挖工法的特点，初步确定采用暗洞明做盖挖法施工，降低隧道施工风险。

DK165+160~DK165+220 桩拱剖面图如图 1 所示。地层分布从上到下依次为粉砂(⑦<sub>11</sub>)、新黄土(⑤<sub>11</sub>、⑤<sub>12</sub>、⑤<sub>12</sub>)、砂岩夹泥岩(⑨<sub>22</sub>，图中未显示)。

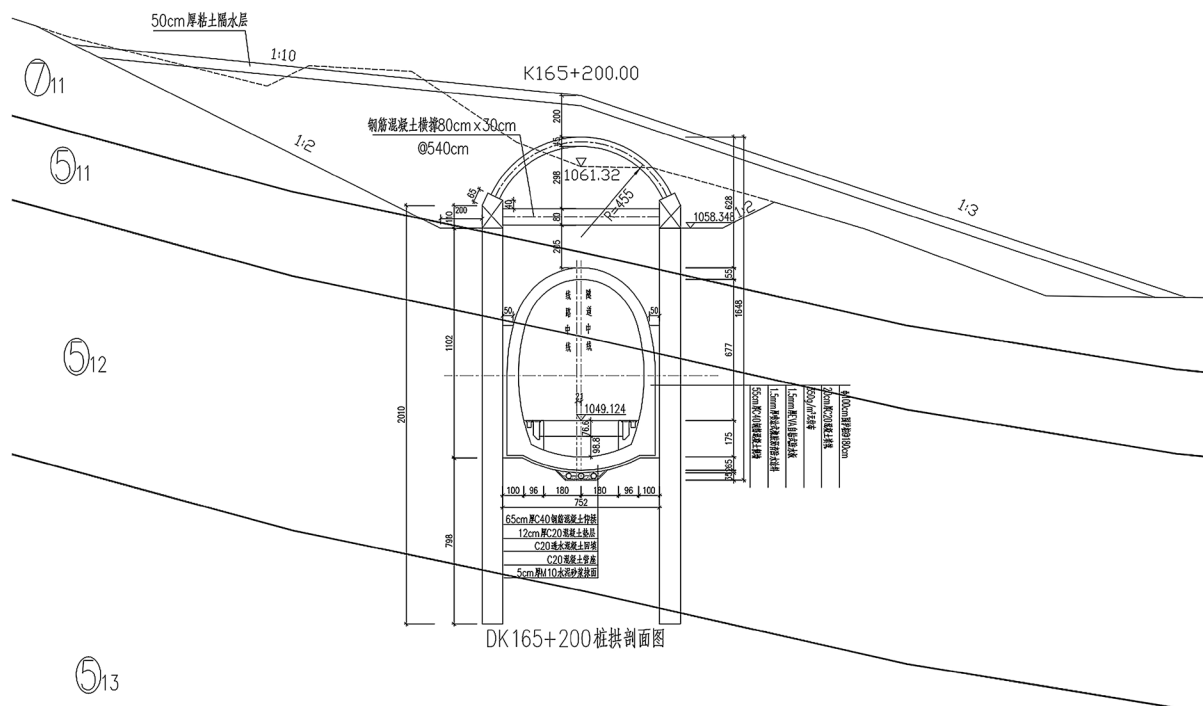


Figure 1. DK165+160~220 Section of pile arch  
图 1. DK165+160~220 桩拱剖面图

隧道结构为：侧墙及仰拱均采用 C40 钢筋混凝土，侧墙厚 55 cm，仰拱厚 60 cm。

### 3. 暗洞明做盖挖法施工工序

施工时，使用旋挖钻在隧道两侧打直径为 100 cm，间距 180 cm，长为 20.05 m 的围护桩，桩身采用 C35 钢筋混凝土，之后施作横截面为 30 cm × 80 cm，间距为 5.4 m 的矩形横梁形成框架式结构，并在冠梁上部浇筑 45 cm 厚护拱。施工方法及步序如 2 所示。

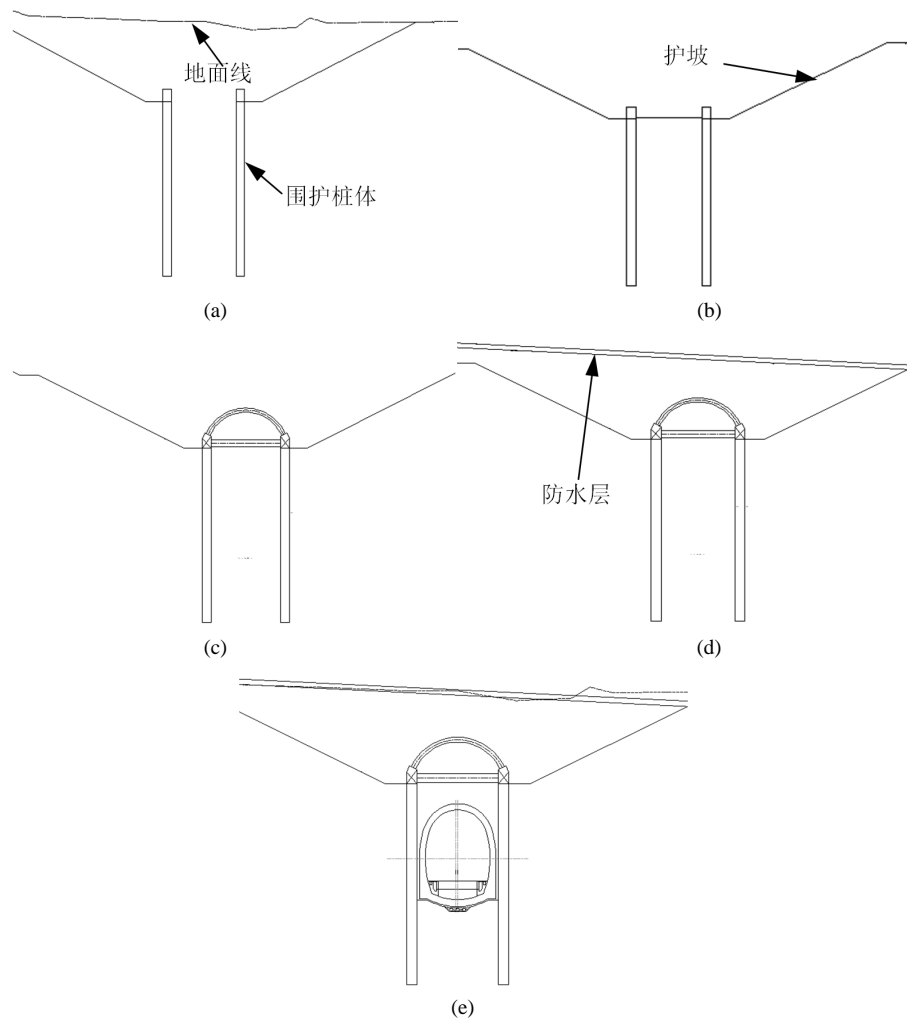
1) 施作围护桩，如图 2(a)所示，钻孔桩围护结构全部采用旋挖钻机成孔，采用泥浆护壁，从大里程向小里程方向采用“隔一钻一”的方法施工。并在混凝土灌注 24 小时以后进行邻桩成孔施工。钻孔前施放桩位点，排桩较设计统一外放 10 cm；在钻孔过程中，要制备符合性能指标的泥浆，同时及时补充泥浆，以确保孔内水头压力，防止塌孔。

2) 开挖上部土体，如图 2(b)所示，边挖边护；

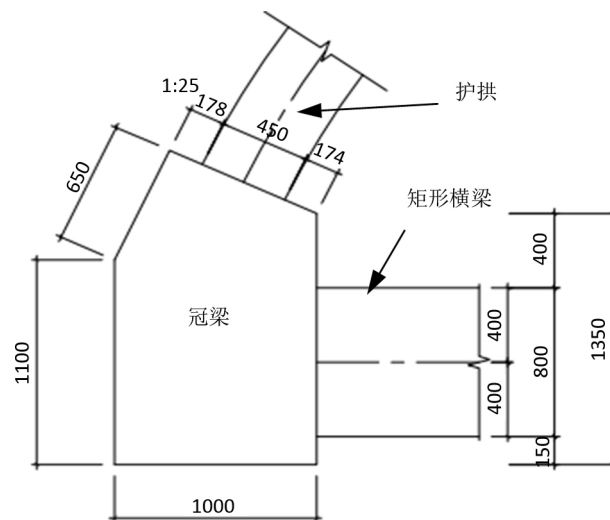
3) 施作冠梁、矩形横梁和护拱，如图 2(c)所示；冠梁结构如图 3 所示；

4) 回填护拱上部土体，如图 2(d)所示；

5) 开挖护拱下部土体，并在护拱保护下施作隧道结构，如图 2(e)所示。



**Figure 2.** Construction sequence diagram of open cover excavation method for underground tunnel  
**图 2.** 暗洞明做盖挖工法施工步骤图



**Figure 3.** Schematic diagram of crown beam structure  
**图 3.** 冠梁结构示意图

隧道出洞段 DK165+160~DK165+230 段从大里程向小里程方向采用“隔一钻一”的方法施工。

## 4. 暗洞明做盖挖法安全性分析

### 4.1. 分析模型

考虑了实际地形地貌,采用 FLAC3D 数值方法模拟分析结构受力与变形特征,计算模型如图 4 所示,模型节点数为 227,059,单元数为 216,270,模型范围上边界为自由表面,考虑了实际地形的变化,下、左、右边界为三倍基坑深度,各层围岩视为连续、均质、各向同性介质,仅考虑自重应力场。隧道衬砌、护拱采用壳(shell)单元模拟,围护桩采用桩(pile)单元模拟,冠梁、横撑采用梁(beam)单元模拟。土体本构模型采用摩尔—库伦力学模型,隧道结构采用弹性力学模型。

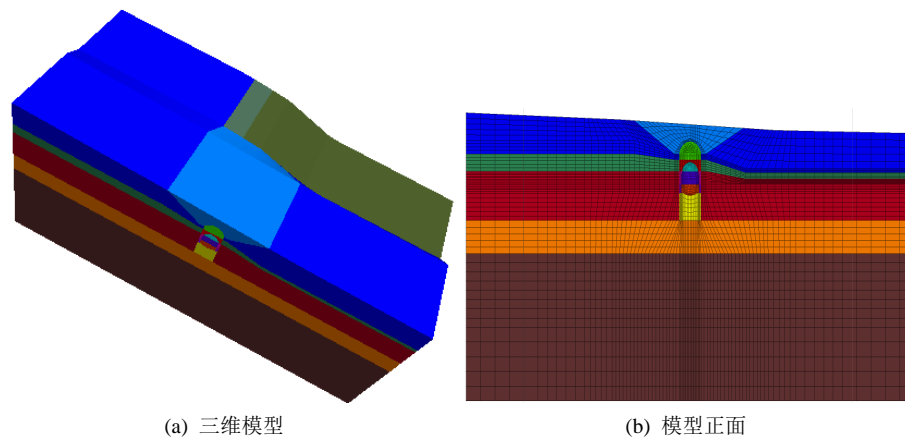


Figure 4. Calculation model diagram of cover excavation method for underground tunnel  
图 4. 暗洞明做盖挖法计算模型图

### 4.2. 计算参数

地层由上到下依次为粉细砂、新黄土、砂岩夹泥岩、砂岩。围岩及支护结构物理力学参数见表 1。

Table 1. Physical and mechanical parameters of surrounding rock and retaining structure

表 1. 围岩及围护结构物理力学参数表

材料	厚度(m)	密度(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量(Pa)	泊松比	黏聚力(Pa)	内摩擦角(°)	抗拉强度(Pa)
粉细砂	8~9	$1.92 \times 10^3$	$9 \times 10^6$	0.35	$3 \times 10^3$	16	$8 \times 10^3$
新黄土	27	$1.93 \times 10^3$	$1.1 \times 10^7$	0.3	$1.83 \times 10^4$	23	$3 \times 10^4$
砂岩夹泥岩	13	$1.95 \times 10^3$	$1.29 \times 10^9$	0.35	$1.6 \times 10^5$	27	$8 \times 10^5$
砂岩	20	$1.985 \times 10^3$	$1.5 \times 10^9$	0.4	$2.0 \times 10^5$	29	$9.76 \times 10^5$
衬砌(C40)	0.55	$2.5 \times 10^3$	$3.35 \times 10^{10}$	0.18	—	—	$1.71 \times 10^6$
灌注桩、冠梁及护拱混凝土(C35)	—	$2.5 \times 10^3$	$3.15 \times 10^{10}$	0.18	—	—	$1.57 \times 10^6$
桩间喷混凝土(C20)	0.2	$2.3 \times 10^3$	$2.8 \times 10^{10}$	0.2	—	—	$1.1 \times 10^6$

### 4.3. 结果分析

通过数值模拟可得到围护桩水平位移如图 5 所示,图示为模型中部围护桩整体位移云图。

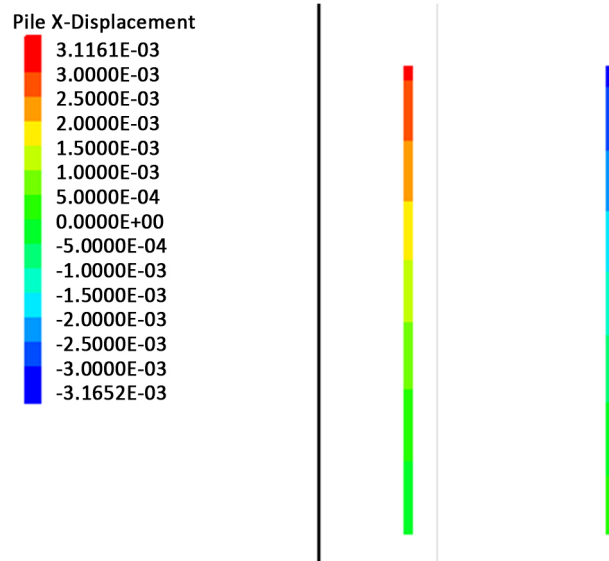


Figure 5. Horizontal displacement nephogram of retaining pile (unit: m)

图 5. 围护桩水平位移云图(单位: m)

由图 5 可知, 数值模拟计算的围护桩水平位移很小, 最大约为 3.16 mm, 位于右侧围护桩顶端, 两侧围护桩均向基坑内侧变形, 水平位移自桩顶向下逐渐减小, 右侧桩水平位移更大, 而监测结果均不到 1 mm, 计算结果与监测结果较为接近。

取模型中部左右 2 根围护桩竖向位移如图 6 所示。

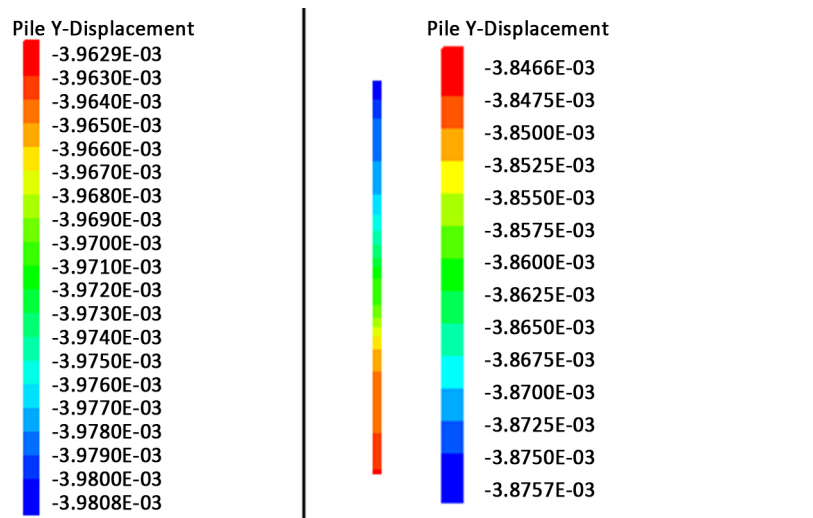


Figure 6. Vertical displacement nephogram of retaining pile (unit: m)

图 6. 围护桩竖向位移云图(单位: m)

由图 6 可知, 数值模拟计算的围护桩竖向位移约为 4 cm, 左侧围护桩沉降略大于右侧, 自桩顶向桩底位移逐渐减小。实际监测时, 每五根桩监测一根, 测点位于桩顶, 沿基坑纵向中心线对称布置。结果显示围护桩顶沉降均控制在 1 cm 范围内, 选取基坑中部附近三个桩顶测点绘制沉降曲线如图 7 所示。

围护桩受力云图如图 8 所示。

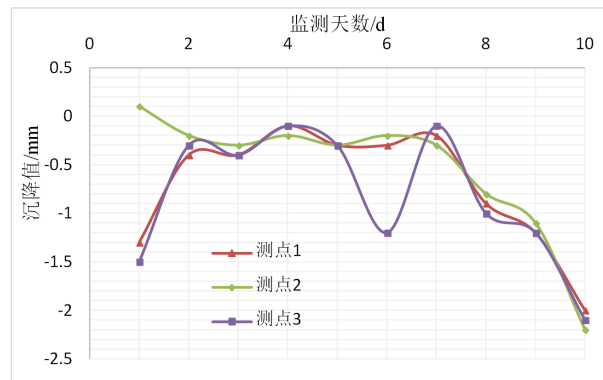


Figure 7. Settlement monitoring results of retaining piles  
图 7. 围护桩沉降监测结果

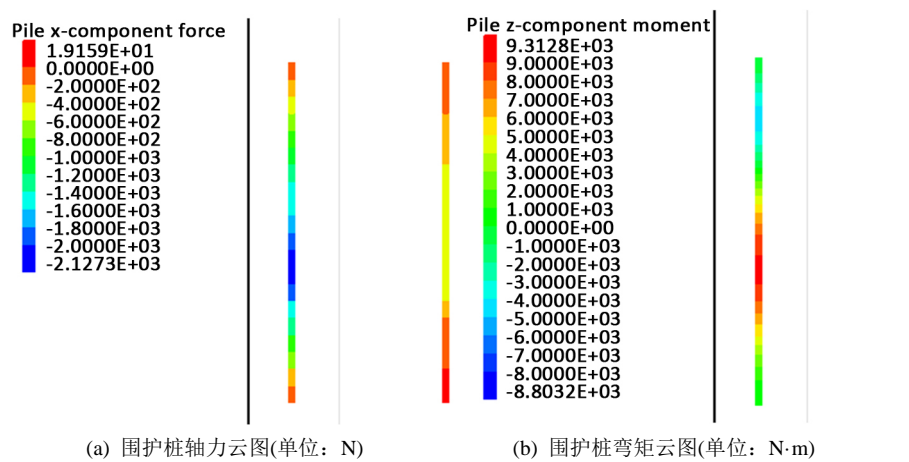


Figure 8. Stress nephogram of retaining pile  
图 8. 围护桩受力云图

由图 8 可知, 数值模拟计算所得桩受力很小, 轴向压力、弯矩最大处为靠近桩底, 距桩底约三分之一长度(约 7 m)处, 二者参数均非常小, 左侧桩受到的轴力和弯矩更大, 左右两侧轴力最大值分别为 2 kN, 600 N, 弯矩最大值分别为 9.31 kN·m, 8.80 kN·m。

冠梁、横撑变形如图 9 所示。

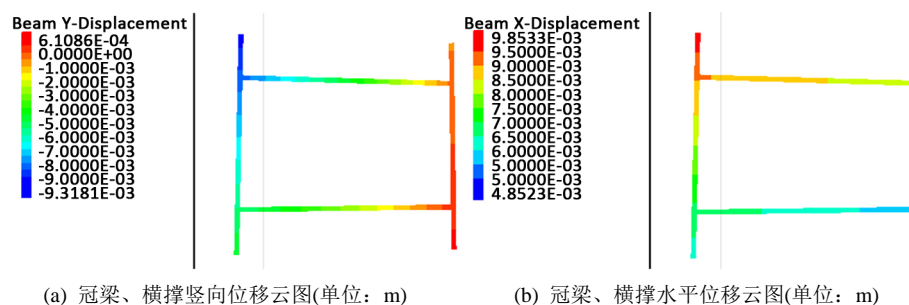


Figure 9. Deformation nephogram of crown beam and transverse brace  
图 9. 冠梁、横撑变形云图

由图 9 可知, 左侧冠梁、横撑的竖向位移比右侧大, 最大为 9.3 mm, 纵向上越靠近冲沟位置, 水平位移就越大, 最大为 9.8 mm, 右侧水平位移小于左侧水平位移。

冠梁受力云图如图 10 所示。

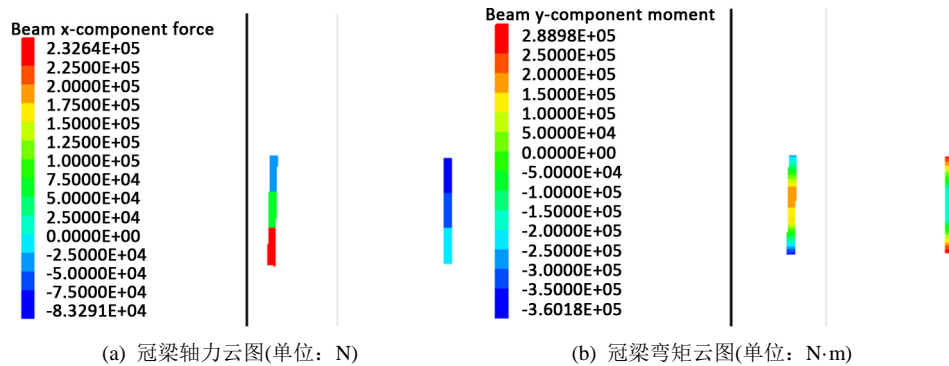


Figure 10. Stress nephogram of crown beam  
图 10. 冠梁受力云图

由图 10 可知, 左侧冠梁受到的轴力更大, 左侧冠梁大部受拉, 最大拉力为 232 kN, 位于冠梁下部, 右侧冠梁大部受压, 最大为 83 kN, 位于冠梁上部。左侧冠梁下端受到的弯矩最大, 约为 360 kN·m, 自两端向中间弯矩逐渐减小, 且到中部弯矩变为正弯矩。右侧冠梁弯矩的变化规律与左侧冠梁相同。

横撑受力如图 11 所示。

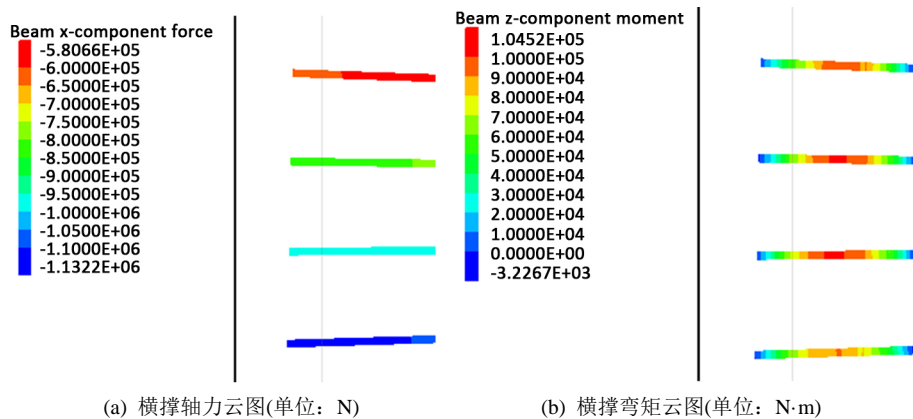


Figure 11. Stress nephogram of cross brace  
图 11. 横撑受力云图

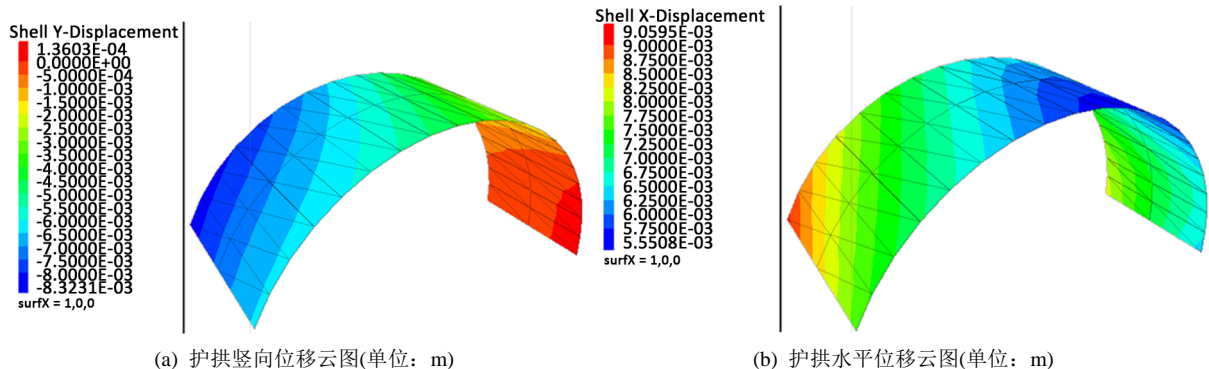


Figure 12. Deformation nephogram of arch protection  
图 12. 护拱变形云图



由图 11 可知,横撑受到的轴力比冠梁大很多,且均为压力,从下到上逐渐变大。横撑中部弯矩较大,向两端逐渐减小,且自下而上逐渐变大。

护拱变形如图 12 所示,由图 12 可知,护拱竖向位移左侧大于右侧,从左向右逐渐减小;护拱顶部水平位移较小,向两端逐渐变大,左侧水平位移比右侧大,水平位移方向为向右,即朝向冲沟。

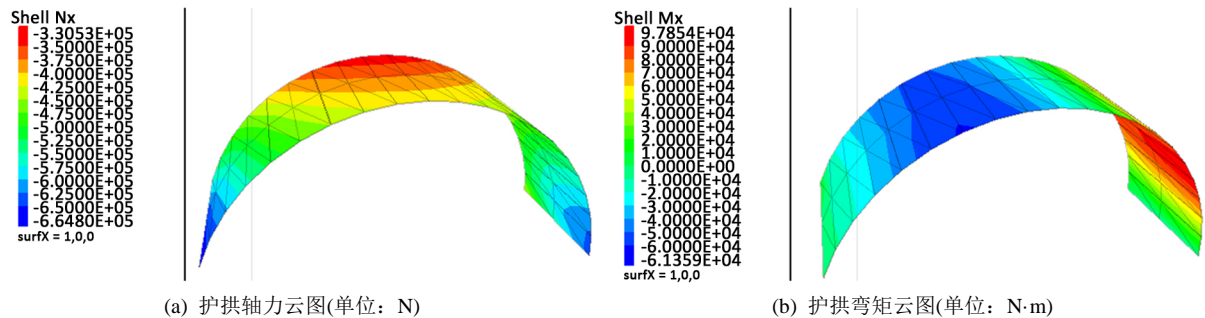


Figure 13. Stress nephogram of arch protection  
图 13. 护拱受力云图

护拱受力云图如图 13 所示,由图 13 可知,护拱自拱顶向拱脚轴力逐渐变大,全部为受压,最大轴力约为 665 kN,位于左侧拱脚。最大弯矩为 98 kN·m,位于靠近右侧拱脚位置,自拱顶向两侧拱脚弯矩逐渐变大,至拱脚位置弯矩又变小。

围岩塑性区分布如图 14 所示,护拱右侧上部土体塑性区较大,塑性区大部分是剪切塑性区。可以进一步填埋冲沟,减小冲沟附近的土体的坡度,减小塑性区。

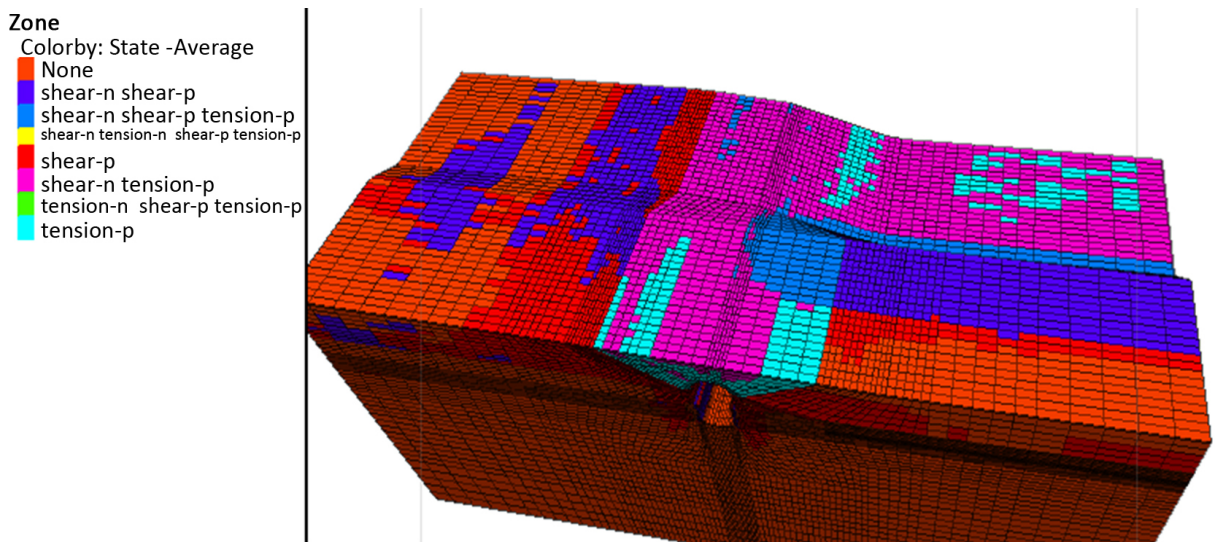


Figure 14. Distribution of plastic zone of surrounding rock  
图 14. 围岩塑性区分布图

## 5. 结构强度检算

根据轴力、弯矩和配筋计算得出护拱结构的安全系数和裂缝宽度,计算结果见表 2。

由表 2 可知,钢筋混凝土结构强度最小安全系数为 12.21,最大裂缝宽度为 0.12 mm,结构强度满足规范[7]要求,说明暗洞明做盖挖工法采用的参数有效的保证了隧道的稳定性,解决了隧道安全出洞的难题。

**Table 2.** Standard test system result data**表 2.** 标准试验系统结果数据

	左侧拱脚	左侧拱腰	拱顶	右侧拱腰	右侧拱脚
轴力计算值(kN)	665	452	402	526	627
弯矩计算值(kN·m)	12.4	61.2	20.1	96.8	19.6
安全系数	19.74	16.99	27.42	12.21	19.44
最大裂缝宽度(mm)	0.02	0.08	0.03	0.12	0.02

## 6. 结论

总结了风积砂地层浅埋隧道暗洞明做盖挖法的施工工序，分析了围护结构稳定性和明洞结构的受力特征，为保障此工法的安全性提供了技术保障。

1) 采用数值方法模拟分析围护桩 + 冠梁 + 横撑结构的稳定性及明洞结构的受力特征。对比分析围护桩的位移监测结果，可以看出围护桩受力、变形状况良好，护拱安全稳定。

2) 对护拱围护结构进行结构强度检算，计算得结构强度满足规范要求，计算得最大裂缝宽度为 0.12 mm，护拱结构安全可靠，满足使用要求。

3) 暗洞明做盖挖工法有效地保证了隧道施工安全，解决了隧道安全出洞的难题。

## 基金项目

中铁十六局集团铁运工程有限公司委托项目(08js-wtcl-2018-002)。

## 参考文献

- [1] 张永杰, 周维政, 陈国芳, 杨兴山. 山岭隧道浅埋盖挖段施工过程的数值模拟[J]. 公路工程, 2019, 44(2): 109-114+177.
- [2] 张党平. 石林隧道软基浅埋段盖挖法施工技术[J]. 隧道建设, 2012, 32(S1): 117-121.
- [3] 张峰, 李克坤, 付志刚, 董健. 浏阳河隧道进口穿越人工填土层盖挖法施工技术[J]. 铁道标准设计, 2009(4): 88-90.
- [4] 李建飞. 铁路隧道跨沟谷浅埋段盖挖法施工技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2020(6): 118-122.
- [5] 李强. 高速铁路隧道超浅埋下穿高速公路盖挖法修建技术研究[J]. 现代隧道技术, 2020(3): 161-166.
- [6] 李强. 盖挖法在重罗山隧道浅埋偏压段的应用[J]. 路基工程, 2016(3): 186-190+196.
- [7] 国家铁路局. TB10003-2016 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.