

大断面山岭隧道预留核心土环形开挖法与上下台阶法的比较分析

——以浙江奇坑隧道出口段施工方案比选为例

胡继强¹, 闵晓阳¹, 斯纪平¹, 黄夏明¹, 支彦锋¹, 赖允瑾²

¹浙江交工路桥建设有限公司, 浙江 杭州

²同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海

Email: 617026641@qq.com, laiyunjn@126.com

收稿日期: 2021年8月28日; 录用日期: 2021年9月22日; 发布日期: 2021年9月29日

摘要

预留核心土环形开挖法和上下台阶法是软弱破碎围岩大跨度山岭隧道掘进的重要方法。本文采用三维有限元数值模拟方法对浙江奇坑隧道的预留核心土环形开挖法和上下台阶法方案进行了计算分析, 提出了以掌子面挤出变形作为量化指标的评价方法, 采用折减系数法比较了两种施工方案下的掌子面稳定性情况。本文还对现场实测结果和数值计算结果进行了比较分析。研究表明, 预留核心土的几何形状和台阶步长对掌子面挤出变形密切相关, 在控制掌子面挤出变形和维持掌子面围岩稳定上, 上下台阶法结合管棚超前加固可达到预留核心土环形开挖法同样效果, 且可为大型机械施工创造较好条件, 提高了施工效率。本文的研究方法和结论可为类似工程提供借鉴。

关键词

山岭隧道, 预留核心土环形开挖法, 上下台阶法, 有限元数值模拟, 掌子面挤出变形

A Comparison between Two Tunneling Methods (SEM and THBM) for Large Cross-Section Mountain Tunnel

—A Case Study of Qikeng Tunnel in Zhejiang Driven

Jiqiang Hu¹, Xiaoyang Min¹, Jiping Si¹, Xiaming Huang¹, Yanfeng Zhi¹, Yunjin Lai²

¹ZCCC Road and Bridge Construction Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

²Geotechnical Engineering Department, Tongji University, Shanghai

文章引用: 胡继强, 闵晓阳, 斯纪平, 黄夏明, 支彦锋, 赖允瑾. 大断面山岭隧道预留核心土环形开挖法与上下台阶法的比较分析[J]. 土木工程, 2021, 10(9): 912-924. DOI: 10.12677/hjce.2021.109103

Email: 617026641@qq.com, laiyunjn@126.com

Received: Aug. 28th, 2021; accepted: Sep. 22nd, 2021; published: Sep. 29th, 2021

Abstract

Sequential excavation method (SEM) and top heading and bench method (THBM) are two important excavation methods for large cross-section mountain tunnels buried in weak ground. Based on 3D-FEM numerical analysis of Qikeng Tunnel, which is located in Hangzhou city of Zhejiang Province, this paper presents a comparison of tunnel's behavior between when tunneling by SEM and by THBM, using workface extrusion and crown settlement as appraisal indices and adopting reduction strength coefficient method for the calculation of the slope stability of tunnel front face. In the end, this paper carries out a comparison between the site measurements and calculation results. The study of this paper shows that the core extrusion of workface, in SEM, depends heavily on the shape and length of core rock, and that THBM, when combined together with forepoling, can achieve the same goal as that of SEM in confining the workface extrusion and keeping front face stable. The research approach and its conclusion can be used as reference for other similar projects.

Keywords

Mountain Tunnel, Sequential Excavation Method, Top Heading and Bench Method, FEM Numerical Simulation, Core Extrusion of Workface

Copyright © 2021 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

在软弱围岩环境下开挖大跨度山岭隧道,为了有效控制掌子面的挤出变形和维持掌子面的稳定,需要采取分部开挖法。其中,预留核心土环形开挖法和上下台阶法是常用的两种分部开挖法。

这两种方法各有优缺点。预留核心土环形开挖法的优点是,能够较好地约束掌子面的变形,更好地维持掌子面岩体的稳定,更好地减小隧道洞周变形。它的缺点是,岩石开挖和初支限制了大型机械的使用,只能采用小型机械施工,工作效率低,施工进度慢;由于施工进度慢,洞周变形稳定时间长,导致累积变形大,这样往往最终抵消了初支后隧道洞周变形小的优点。与此相对,上下台阶法的优点是,施工空间大,便于采用大型机械如凿岩台车和铲运机等进行施工,工作效率高,施工进度快,初支封闭等待时间短,隧道洞周变形稳定时间短;其缺点是,掌子面的变形较大,掌子面的岩体稳定风险大。

针对具体工程,工程师们最关心的是对上述两种方法的选择和关键参数的确定。具体地说,预留核心土环形开挖法需要确定预留核心土范围和步长;上下台阶法需要确定台阶划分位置和台阶步长。

近些年来,在预留核心土环形开挖法和上下台阶法的方案比选上,我国工程技术人员和学者采用有限元数值方法和动态实时反馈方法取得了很大进展。针对方案比选,学者们还提出了一些工程实用的量化指标,如提出采用掌子面挤出变形和拱顶沉降作为方案优劣的评价指标,等等。

针对有限元数值模拟应用于预留核心土环形开挖法和上下台阶法比较分析方面,有不少成功的案例。

黄维科(2021)采用有限元数值模拟方法并结合现场量测手段对 IV 围岩的贵黄高速龙昌隧道的原预留核心土环形开挖法方案进行优化, 最终提出上下台阶法方案, 解决了大型机械化施工的问题, 并确定了上下台阶法安全步距[1]。王利民(2017)针对土层隧道的弧形开挖预留核心土方法的核心土形状、尺寸确定问题, 采用理论解析和数值模拟进行了研究, 并提出参考数据[2]。张征亮, 耿萍(2009)依托广甘高速公路软岩隧道建设对各种台阶施工法和预留核心土开挖法开展了数值模拟和相似模型试验研究, 得到许多有益的结论, 并成功地应用于实际工程[3]。

针对掌子面变形和掌子面岩体稳定方面, 也有可喜的进展。朱雪健, 张念(2020)依托广西柳州莲花山隧道开展了软弱围岩大断面隧道台阶法施工优化研究, 他们通过有限元数值模拟计算和现场监测分析, 发现了台阶法施工的超前破坏模式和向后破坏模式, 并提出采用台阶法和超前管棚组合的新工法成功通过软弱地层[4]。张风(2020)报道了郑万铁路奉节隧道采用大断面软岩隧道两台阶四步法快速施工技术的工程实践, 提出了掌子面挤出变形的控制措施[5]。周路军, 尚岳全(2011)采用有限元数值分析方法对 V 级围岩隧道采用预留核心土环形开挖法的变形进行了计算分析, 得到了核心土长度与掌子面围岩稳定安全系数的相互关系[6]。

上述学者在预留核心土环形开挖法和台阶法比选上开辟的技术路线和方法对于解决类似工程问题提供了借鉴。

本文采用三维有限元数值模拟方法对 G25 长深高速杭州奇坑隧道进口段采用预留核心土环形开挖法和上下台阶法方案进行计算比较分析, 并与现场实测结果进行比照验证, 在此基础上就维持掌子面围岩稳定的关键技术提出了建议。

2. 工程概况

奇坑隧道位于浙江省杭州市余杭区瓶窑镇奇坑村山区, 双洞单向三车道, 左右洞按分离式隧道。左洞长 2430 m, 右洞长 2430 m。毛洞洞高约 11.3 m, 洞宽约 17 m, 毛洞面积为 154.5 m², 采用复合式支护结构形式: 初期支护以锚杆、钢筋网、喷射混凝土及钢拱架组成联合支护体系。

隧道出口暗埋段长度约 240 m, 处于低山斜坡环境, 山坡自然坡度约 20°, 上覆地层自上而下分别为: 全风化凝灰岩, 厚度 6~7 m; 其下为强风化凝灰岩, 厚度约 2 m; 再下为中风化凝灰岩。隧道顶部埋深约 8~30 m。隧道围岩等级为 IV 级围岩。出口段地质纵剖面图如图 1 所示, 围岩物理力学参数如表 1 所示。

Table 1. Properties of surrounding rocks

表 1. 围岩物理力学参数

围岩级别	重度 γ (kN/m ³)	弹性抗力系数 k (MPa/m)	变形模量 E (GPa)	泊松比 μ	内摩擦角 φ (°)	粘聚力 c (MPa)	计算摩擦角 φ_e (°)
IV	20~23	200~500	1.3~6	0.3~0.35	27~39	0.2~0.7	50~60
V	17~20	100~200	1~2	0.35~0.45	20~27	0.05~0.2	40~50

设计单位原定开挖方案为预留核心土环形开挖法, 如图 2 所示。设计单位认为预留核心土环形开挖法能较好的维持掌子面围岩稳定, 可以减小隧道洞周变形和拱顶沉降。但是开始实施后, 施工单位发现该方案限制了大型机械如三臂凿眼台车的使用, 施工工效低, 为此提出了上下台阶法方案, 如图 3 所示。

为了全面比较预留核心土环形开挖法和上下台阶法两方案实行后隧道的受力变形性能, 本文作者采用三维有限元软件 Z-Soil 对两种施工方法下各工况的隧道洞周变形、掌子面挤出变形以及掌子面围岩的稳定性进行了计算分析。同时确定了台阶法施工的最佳台阶步长。最后还进行了施工跟踪监测, 比较分析了实测结果和计算结果。

奇坑隧道工程地质纵断面图(左线出口)

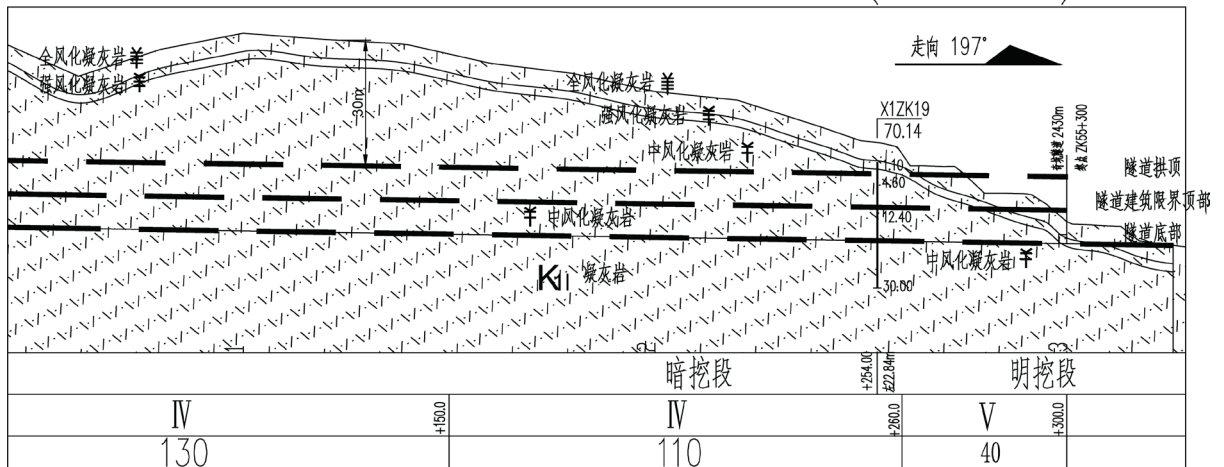
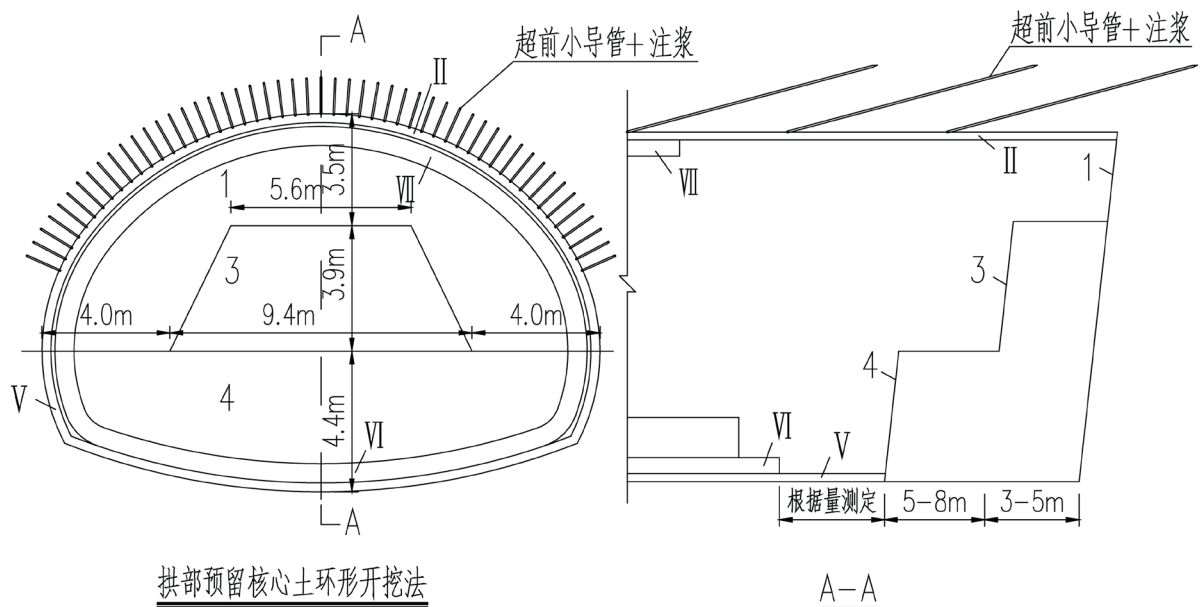


Figure 1. Longitudinal geology profile
图 1. 地质纵剖面图



施工程序:

- 1— 拱部留核心土开挖
- II— 拱部初期支护施做
- 3— 上半断面核心土开挖
- 4— 下半断面开挖
- V— 下半断面及仰拱初期支护施做(钢拱架与上半断面连接)
- VI— 仰拱二次衬砌浇筑,仰拱填充
- VII— 铺设防水层,拱部及侧墙二次衬砌施做

Figure 2. Sketch for sequential excavation method
图 2. 预留核心土环形开挖法示意图

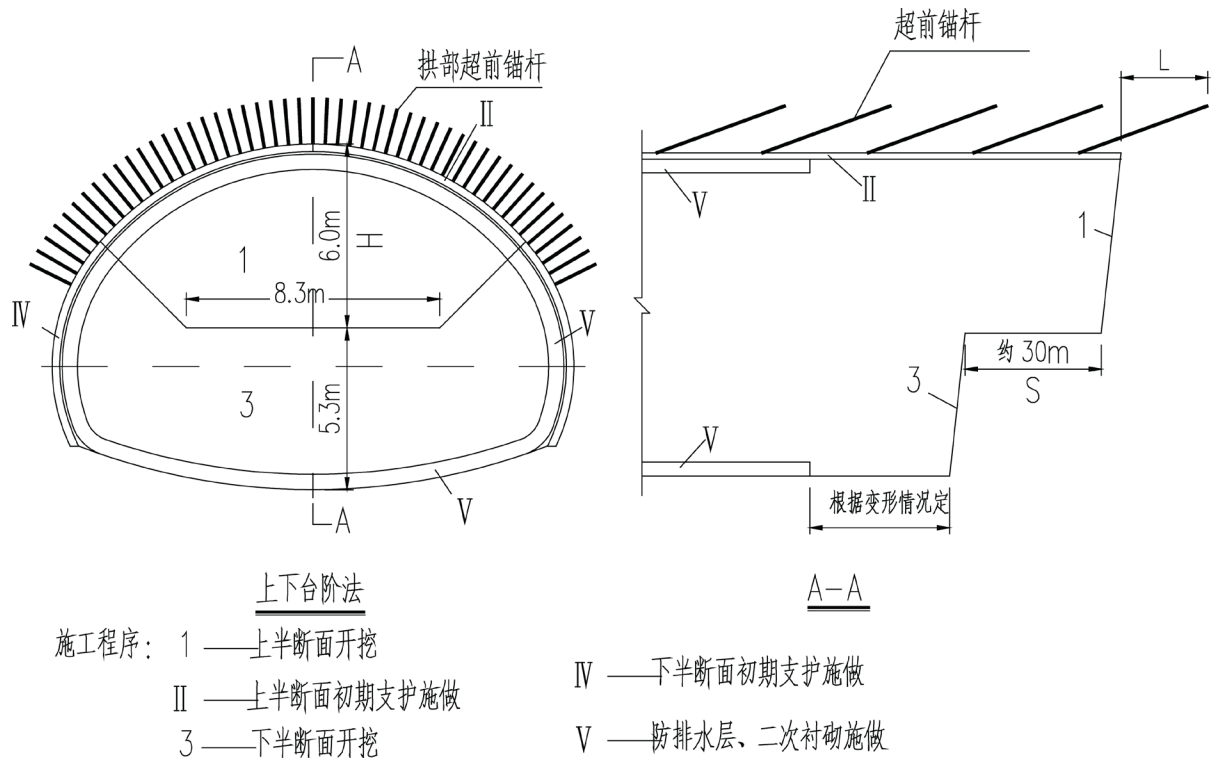


Figure 3. Sketch for top heading and bench method
 图3. 上下台阶法示意图

3. 有限元数值计算分析

3.1. 数值分析软件简介

Zsoil 是瑞士联邦理工学院(Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne)开发的真三维岩土工程有限元软件, 计算内容涵盖了现实世界中可能遇见的所有的岩土工程问题, 提供了解决土力学和岩石力学、地下结构、基坑开挖、隧道工程、土 - 结构相互作用、地下水和温度分析的统一方法。

3.2. 本构模型

3.2.1. 围岩介质和喷射混凝土

对于围岩介质和喷射混凝土材料, 采用软件内置的摩尔 - 库伦模型进行模拟。摩尔 - 库伦准则表述为:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (1)$$

式中, τ ——土体抗剪强度(kPa); c 、 φ ——土体粘聚力(kPa)和内摩擦角($^{\circ}$); σ ——正应力(kPa)。

摩尔 - 库伦模型屈服面函数为:

$$F = \frac{1}{3} I_1 \cdot \sin \varphi + \left(\cos \theta_{\sigma} - \frac{\sqrt{3}}{3} \sin \theta_{\sigma} \cdot \sin \varphi \right) \cdot \sqrt{J_2} - c \cdot \cos \varphi = 0 \quad (2)$$

式中

I_1 ——应力张量第一不变量, J_2 ——偏应力张量第二不变量, θ_{σ} ——洛德角。

有限元计算时, 围岩和喷混凝土作为实体单元处理。其物理力学参数如表 2 所示。

3.2.2. 锚杆和管棚的本构模型

有限元计算时, 锚杆按杆单元处理, 管棚按梁单元处理。锚杆和围岩的接触按接触面单元处理。计算参数如表 3 所示。

Table 2. Properties of surrounding rocks and shotcrete for FEM simulation

表 2. 有限元计算时取的围岩和喷混凝土的物理力学参数

围岩类别	密度	弹性模量	体积模量	剪切模量	泊松比	粘聚力	内摩擦角
	g (kg/m^3)	E (GPa)	K (GPa)	G (Gpa)	ν	C (Pa)	φ ($^{\circ}$)
IV	2150	3.0	2.78	1.14	0.32	0.22	27
V	1900	1.0	1.67	0.36	0.40	0.10	22
喷砼	2700	30			0.20		

Table 3. Properties of reinforcement bolt and forepoling pipe

表 3. 有限元计算时取的钢筋锚杆和管棚钢管的物理力学参数

材料	密度	弹性模量	抗拉屈服强度
	g (kg/m^3)	E (GPa)	f_y (MPa)
钢筋锚杆	7850	210	300
管棚钢管	7850	210	300

3.2.3. 掌子面的稳定性计算的强度折减法

采用强度折减法进行有限单元法来分析掌子面整体稳定安全系数时, 将假定的某一系数 F 去除抗剪强度参数 c 和 φ , 不断试算 F , 使其掌子面达到失稳临界状态。达到失稳临界状态的系数 F , 就是安全系数。

折减后抗剪参数可表示为:

$$\begin{cases} c' = \frac{c}{F} \\ \varphi' = \arctan\left(\frac{\varphi}{F}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: F ——为折减系数; c ——为围岩黏聚力; φ ——为围岩内摩擦角; c' ——按 F 值折减后的黏聚力; φ' ——按 F 值折减后的内摩擦角。

采用强度折减法计算隧道掌子面稳定性时, 采用的强度准则和屈服流动法则和一般的弹塑性有限元计算一样。只是将折减后所得的 c' 和 φ' 替换折减前的 c 和 φ 而已。

3.3. 三维有限元计算模型

计算范围确定原则: 隧道顶部按实际覆土厚度; 左右按隧道跨度的 2 倍, 隧道底部按隧道高度的 4 倍。图 4 和图 5 分别为预留核心土环形开挖法和上下台阶法的三维有限元网格模型。

3.4. 数值计算结果及其分析

3.4.1. 掌子面挤出变形

当安全系数取 1.4 时, 计算得到预留核心土环形开挖法和上下台阶法掌子面的挤出变形, 如图 6 和图 7 所示。预留核心土环形开挖法时的掌子面最大挤出变形为 70.72 mm, 上下台阶法时掌子面最大挤出变形为 33.61 mm。

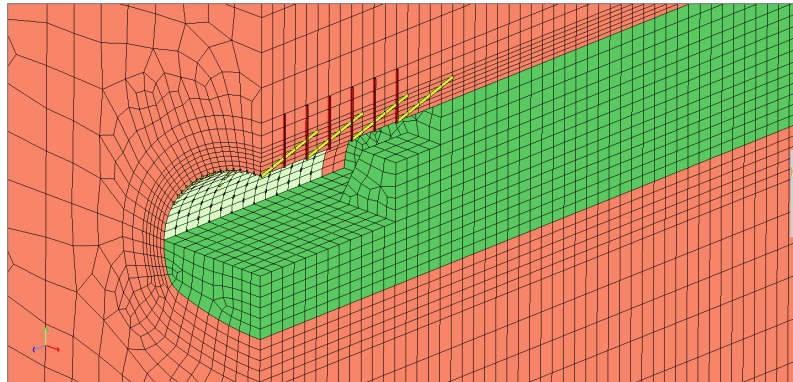


Figure 4. 3D-FEM grid for sequential excavation method
图 4. 预留核心土环形开挖法三维有限元网格模型

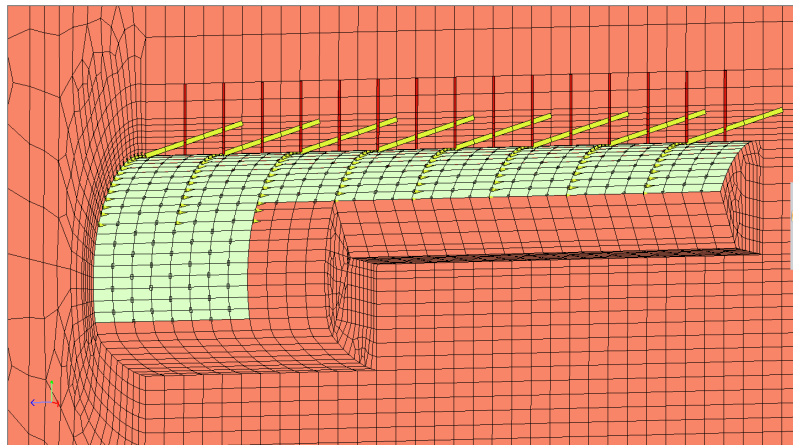


Figure 5. Sketch for top heading and bench method
图 5. 上下台阶法示意图

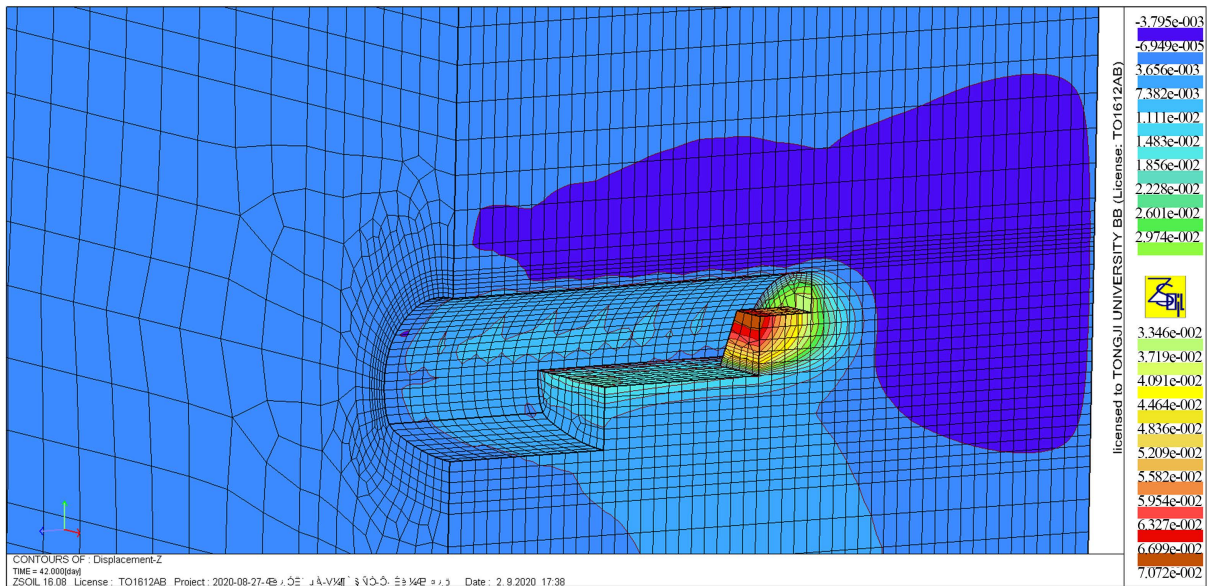


Figure 6. Core extrusion clouds of workface for sequential excavation method, unit: mm
图 6. 预留核心土环形开挖法掌子面挤出变形云图, 单位: mm

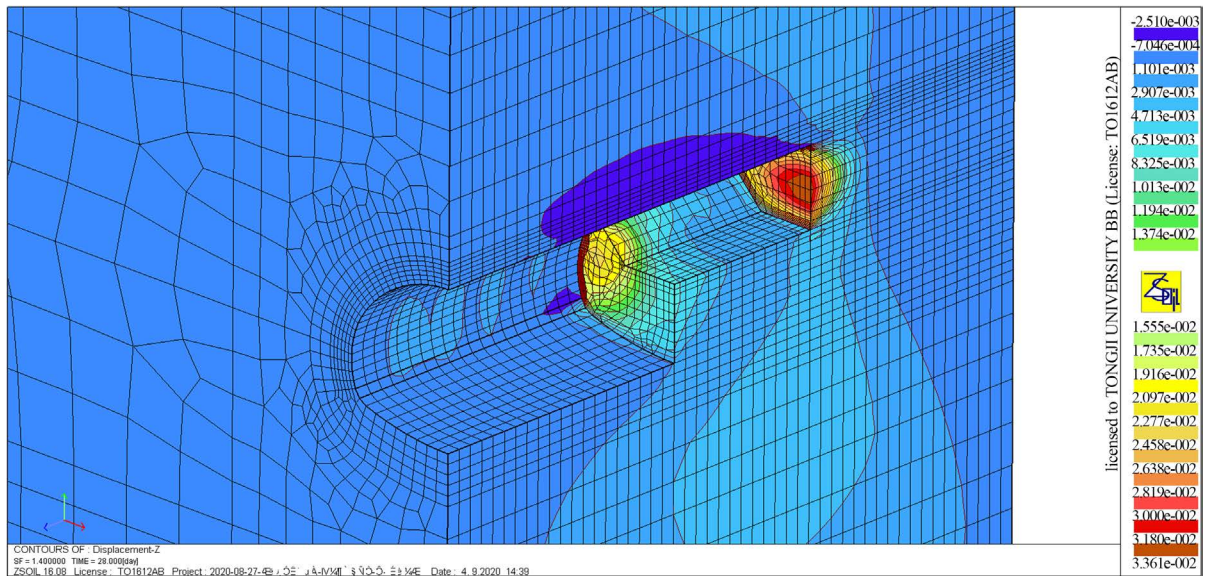


Figure 7. Core extrusion clouds of workspace for top heading and bench method
图 7. 上下台阶法掌子面挤出变形云图

3.4.2. 隧道洞周变形

当安全系数取 1.4 时，计算得到预留核心土环形开挖法和上下台阶法隧道洞周整体变形场，如图 8 和图 9 所示。预留核心土环形开挖法时的最大拱顶沉降为 92.6 mm，发生在初始支护后；上下台阶法时的最大拱顶沉降为 28.9 mm，发生在初始支护后。

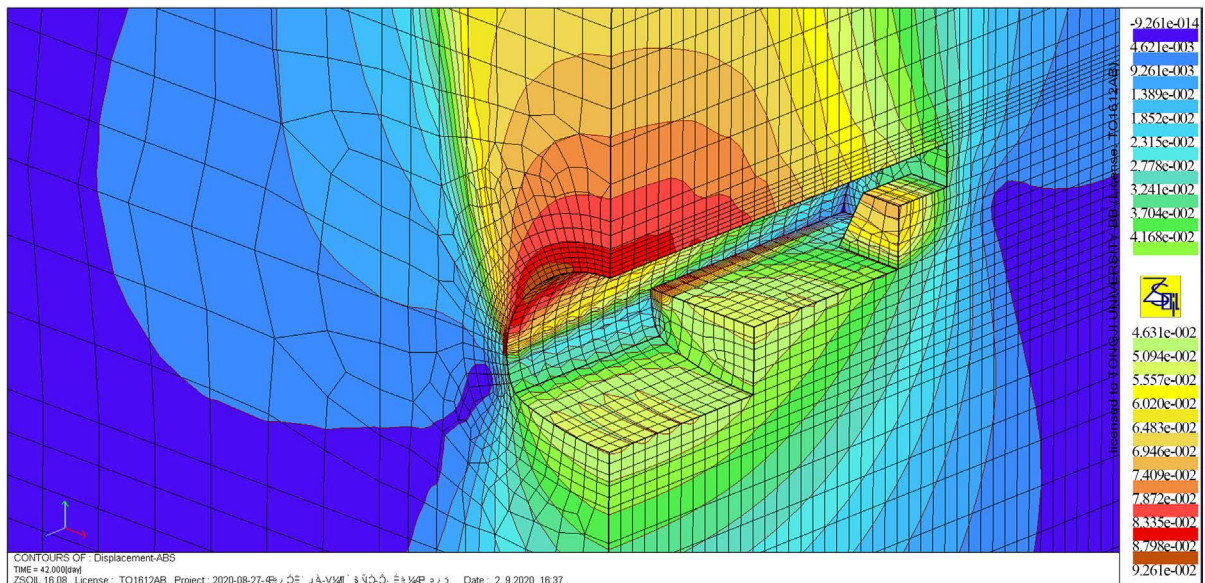


Figure 8. Displacement clouds around the tunnel for sequential excavation method
图 8. 预留核心土环形开挖法隧道洞周变形云图

3.4.3. 计算结果比较分析

比较预留核心土环形开挖法和上下台阶法的计算结果，可以看到，只要采取合理的辅助措施(如合理划分台阶面位置，设置刚度较大的超前管棚)，上下台阶法也能很好地控制掌子面挤出变形；初始支护完

成后，上下台阶法也能很好地控制住隧道洞周变形，如收敛变形和拱顶沉降。

计算结果验证了这样一个事实：掌子面岩体的稳定是可以通过调整掌子面压力 p 和掌子面前方核心土的覆土压力 q 来实现的，如图 10 所示。

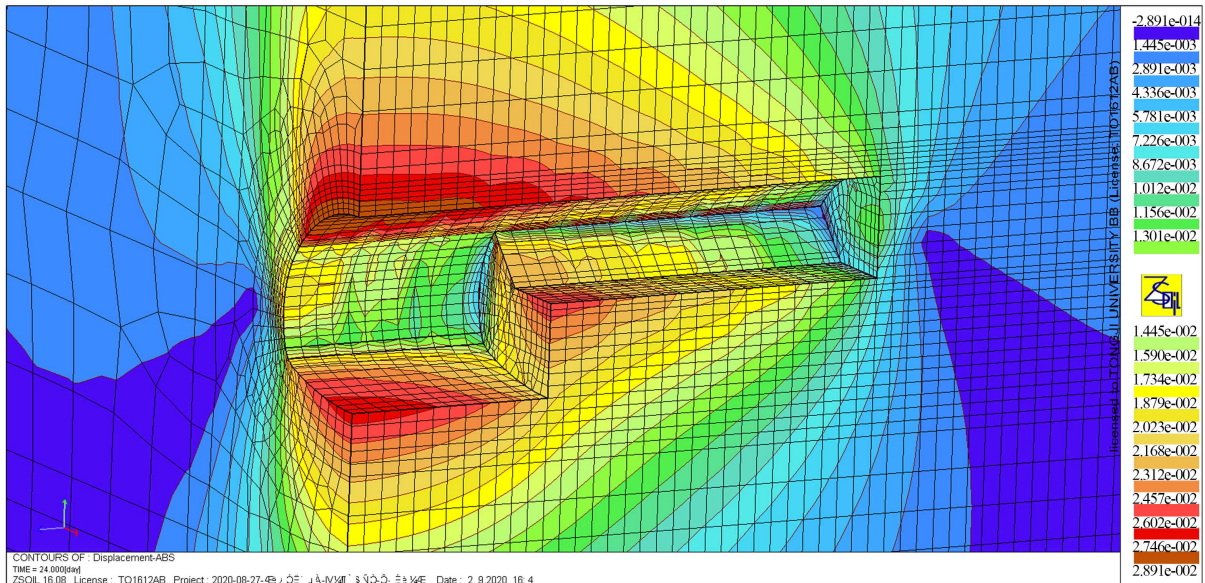


Figure 9. Displacement clouds around the tunnel for top heading and bench method

图 9. 上下台阶法掌子面隧道洞周变形云图

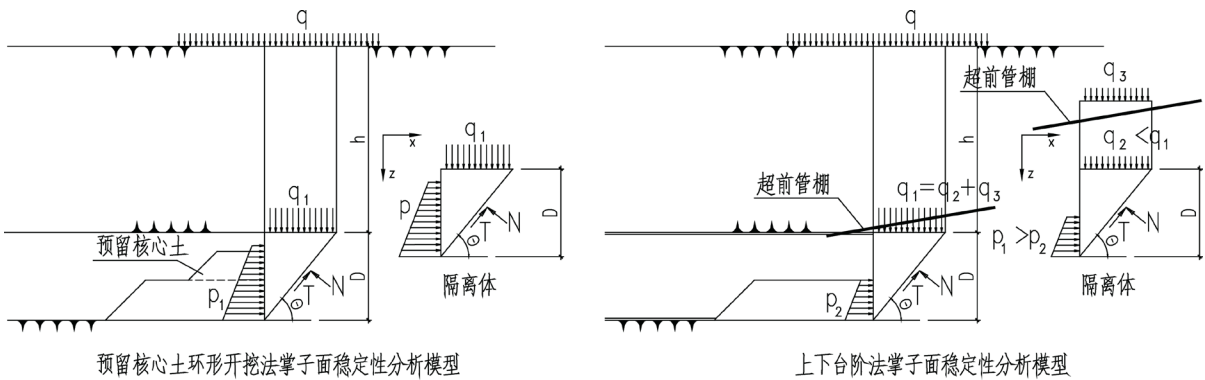


Figure 10. Sketch of models for analyzing the stability of front rock

图 10. 预留核心土环形开挖法和上下台阶法掌子面稳定分析模型

从图 10 可以看出，预留核心土环形开挖法因为预留核心土，增加了掌子面压力 p_1 ，控制了掌子面挤出变形，确保了掌子面岩体的稳定；而上下台阶法则是通过打设超前管棚辅助措施，让超前管棚分担掌子面前方核心岩体的部分覆土压力 q_3 ，使原覆土压力由 q_1 减小为 q_2 ，这样，虽然掌子面反压荷载减小了，但覆土荷载也减小了，同样可以使掌子面挤出变形减小，也达到了维持掌子面岩体稳定的目标。因此，两种方法异曲同工，殊途同归。

4. 有限元数值和监测结果比较分析

通过对预留核心土环形开挖法和上下台阶法的数值模拟研究以及施工可行性研究，最后采用了上下台阶法施工方案。并且根据掌子面变形控制标准确定了对上下台阶法的主要施工参数：台阶面位置、超前

管棚参数和台阶步长。

4.1. 上下台阶法主要施工参数确定

4.1.1. 掌子面变形控制标准

掌子面挤出变形是掌子面稳定性状态的重要指标,而且它和隧道拱顶沉降具有相关性。因此采用掌子面挤出变形作为控制标准可以比采用稳定性安全系数更方便地确定上下台阶法的施工参数和超前支护参数[7]。北京交通大学关岩鹏(2013)针对新意法掌子面稳定性判别方法,提出了采用掌子面中央水平挤出变形的量值作为的控制标准[8]。本文在此基础上建议采取挤出变形 δ 和隧道跨度 L 的比值 $\frac{\delta}{L}$ 作为隧道稳定标准,以适用不同断面尺寸隧道,如表4所示。

Table 4. Stability standard for core extrusion of workface
表 4. 掌子面挤出变形控制标准

围岩类别	跨度	跨度 < 16 m	跨度 \geq 16 m
	IV		0.3%
V		0.4%	0.5%
VI		0.5%	0.6%

对于奇坑隧道出口段,跨度 17.4 m, IV 级围岩,掌子面中央最大挤出变形应控制在 78.3 mm。

4.1.2. 上下台阶法主要施工参数

1) 上台阶高度 H

在未安装超前锚杆的情况下,上台阶长度 10 m,计算得到上台阶高度 H (如图 3 所示)与掌子面挤出变形的关系曲线,如图 11 所示。从图中可以看出,上台阶高度越大,掌子面挤出变形越大,当接近毛洞高度 2/3 时,挤出变形变化平稳。针对本工程,按台阶高度 6 m,掌子面中央挤出变形为 62.1 mm。

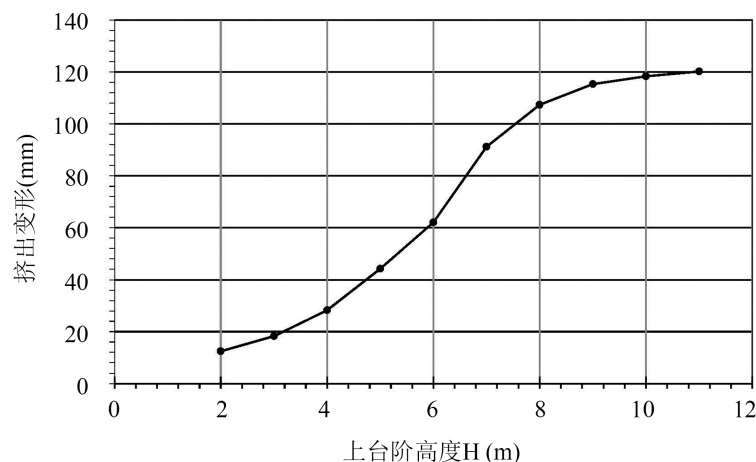


Figure 11. Curve of the height of top heading vs. core extrusion of workface
图 11. 上台阶高度与掌子面挤出变形关系曲线

2) 上台阶步长

在未安装超前锚杆的情况下,上台阶高度 6 m,计算得到上台阶长度 L (如图 3 所示)与掌子面挤出变

形的关系曲线，如图 12 所示。从图中可以看出，上台阶长度越大，掌子面挤出变形越小，但超过毛洞高度一倍时，对挤出变形影响不大。针对本工程，按台阶长度 10 m，掌子面中央挤出变形为 62.1 mm。

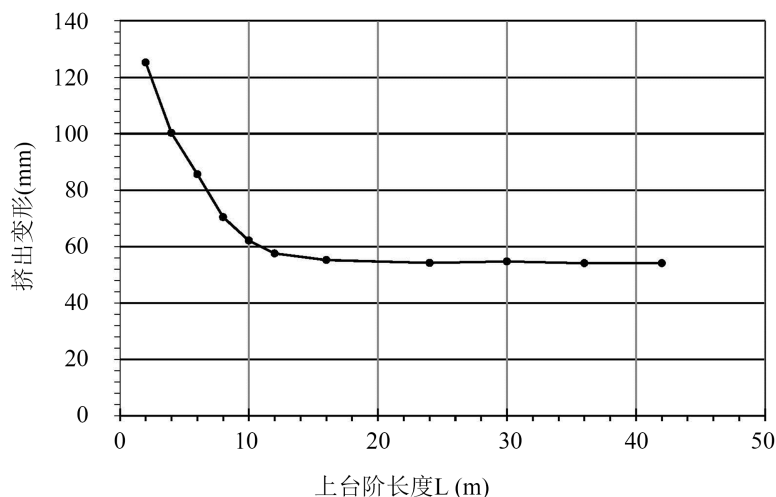


Figure 12. Curve of the length of top heading vs. core extrusion of workface
图 12. 上台阶长度与掌子面挤出变形关系曲线

3) 超前锚杆参数

对于上台阶高度 6 m，台阶长度 10 m 的情况，计算得到管棚长度 L (如图 3 所示)与掌子面挤出变形的关系曲线，如图 13 所示。从图中可以看出，管棚长度越大，掌子面挤出变形越小，但超过 6 m 后，管棚长度对挤出变形影响不大。针对本工程，将根据监测情况设置超前管棚，初定管棚长度 6 m。

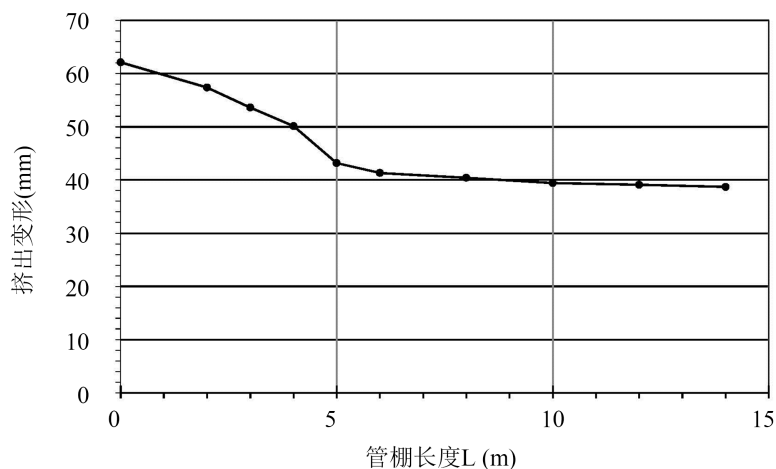


Figure 13. Curve of the length of forepoling vs. core extrusion of workface
图 13. 管棚长度与掌子面挤出变形关系曲线

4.2. 监测结果与计算结果比较分析

4.2.1. 监测内容和测点布置

施工期间开展了洞周位移监测和掌子面挤出变形量测，如图 14 所示为拱顶沉降和掌子面中央挤出变形监测点布置图。

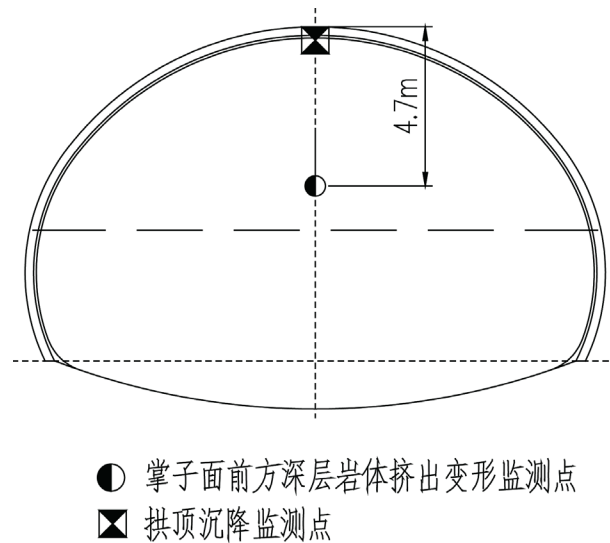


Figure 14. Layout of site measurements

图 14. 现场监测点布置图

4.2.2. 监测结果与计算结果的比较分析

1) 拱顶沉降

分别选取了 5 个监测断面进行比较分析。比较不同的施工工况拱顶沉降的实测结果和计算结果，如表 5 所示。表中数值为增量值。

Table 5. Comparison of crown settlement between site measurement and calculation, unit: mm

表 5. 拱顶沉降的实测结果和计算结果比较，单位：mm

监测断面		ZK55 + 290	ZK55 + 285	ZK55 + 280	ZK55 + 275	ZK55 + 270
上台阶开挖后	实测值	15.9	19.1	11.6	15.9	12.6
	计算值	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3
下台阶开挖后	实测值	12.9	10.7	12.3	11.6	13.9
	计算值	11.6	11.6	11.6	11.6	11.6

从表 5 可以看出，计算值和实测值处于同一量级，基本相符。由于计算时断面采用完全一样断面，所以数值一样。

2) 掌子面中央挤出变形

分别选取了 5 个监测断面进行比较分析。比较不同的施工工况掌子面挤出变形的实测结果和计算结果，如表 6 所示。

Table 6. Comparison of core extrusion between site measurement and calculation, unit: mm

表 6. 掌子面中央挤出变形的实测结果和计算结果比较，单位：mm

监测断面		ZK55 + 290	ZK55 + 285	ZK55 + 280	ZK55 + 275	ZK55 + 270
上台阶开挖后	实测值	36.7	42.6	31.2	37.8	33.4
	计算值	62.1	62.1	62.1	62.1	62.1
下台阶开挖后	实测值	12.4	14.7	9.8	13.3	11.2
	计算值	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8

从表 6 可以看出, 计算值和实测值处于同一量级, 变化规律一致: 上台阶开挖后发生的挤出变形占总数值的大部分, 因此控制好上台阶开挖时的掌子面挤出变形十分重要。由于计算时断面采用完全一样断面, 所以数值一样。

5. 结论

综合上述研究, 可归纳出如下结论:

1) 对于软弱围岩下大断面山岭隧道施工, 上下台阶法通过上台阶几何尺寸(台阶高度、台阶开挖步长和超前锚杆或管棚设置)的合理设置, 在控制掌子面挤出变形及维持隧道掌子面围岩稳定方面, 可以达到预留核心土环形开挖法的同样效果。

2) 采用掌子面中央挤出变形作为围岩稳定的评价指标, 既可以作为上下台阶法的设计依据也可以作为施工阶段进行动态信息反馈的重要指标; 它是评价隧道围岩稳定状态的又一定量方法。

3) 采用有限元进行开挖方案数值模拟计算时, 将强度折减法 and 掌子面挤出变形指标控制法有机结合起来, 是全面了解隧道围岩稳定状态的有益尝试, 值得推广借鉴。

基金项目

浙江省交通厅 2019 科研计划项目(项目号 2019033)。

参考文献

- [1] 黄维科, 马建云, 等. IV 级围岩隧道大型机械化施工与安全步距分析[J]. 公路, 2021(6): 385-390.
- [2] 王利民. 暗挖隧道掌子面稳定条件分析[J]. 建筑技术, 2017, 48(6): 583-586.
- [3] 张征亮. 广甘高速公路软岩隧道开挖方法对比研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [4] 朱雪健. 软弱围岩大断面隧道台阶法施工优化研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原科技大学, 2020.
- [5] 张风. 大断面软岩隧道两台阶四步法快速施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2020(10): 122-125.
- [6] 周路军. 隧道预留核心土环形开挖法合理应用研究.[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [7] 李斌, 漆泰岳, 等. 隧道掌子面锚杆加固参数确定方法[J]. 铁道学报, 2012, 34(10): 116-121.
- [8] 关岩鹏. 软岩隧道大断面施工方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2013.