

新意法在软弱围岩超大断面隧道掘进施工中的应用

——新意法在浙江某山岭隧道试验段的应用研究

姚永强¹, 王玉富¹, 斯纪平¹, 支彦锋¹, 韦麟¹, 赖允瑾²

¹浙江交工路桥建设有限公司, 浙江 杭州

²同济大学地下建筑与工程系, 上海

Email: 110265323@qq.com, laiyunjn@126.com

收稿日期: 2020年9月20日; 录用日期: 2020年10月6日; 发布日期: 2020年10月13日

摘要

在软弱围岩的介质环境中, 采用新意法可以实现大断面隧道的全断面开挖。为了探讨新意法应用的关键技术, 依托于浙江某山岭隧道工程, 选取了20米作为试验段, 进行了新意法技术的应用试验研究。本项试验研究的结果表明: 实施新意法的关键在于掌子面超前岩体的加固、掌子面挤出变形的实时量测和实时施工反馈。试验研究证明采用玻璃纤维锚杆对掌子面超前岩体进行加固可改善其刚度和强度, 研究还提出了实时量测掌子面前方岩土体挤出变形的新技术——基于磁环感应的掌子面超前岩土体挤出变形量测技术, 并取得成功。研究的成果可供类似工程借鉴。

关键词

新意法, 掌子面超前岩体, 软弱破碎围岩, 玻璃纤维锚杆, 全断面开挖

The Application of NITM in Full Face Excavation for Tunnel of Super-Large Cross-Section through Weak Rock

—A Research of the Application of NITM in the Experiment Portion of a Tunnel in Zhejiang Province

Yongqiang Yao¹, Yufu Wang¹, Jiping Si¹, Yanfeng Zhi¹, Lin Wei¹, Yunjin Lai²

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

²Geotechnical Engineering Department, Tongji University, Shanghai

Abstract

New Italian Tunneling Method (NITM) can achieve full-face excavation when tunneling through weak rocks. To study the key technology of NITM, a research project is performed in Zhejiang Province, selecting a portion of 20 m from a tunnel as test for the application of NITM. The test shows that the core technology of NITM is the solidation technology of tunnel front rock, as well as the monitoring and control of extrusion of the workforce. The test study also shows that fiber glass bolt can improve the stiffness and strength of the front rock. During the research, a new method of extrusion measurement of tunnel front—a method based on magnetic induction technology has been introduced and succeeded. It is believed that the test result shall be a good reference to similar projects.

Keywords

NITM, Rock of Tunnel Front, Weak Rocks, Fibreglass Bolt, Full Face Excavation

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

在山岭隧道施工中, 新奥法在我国得到了广泛的应用, 新奥法作为一种主要的隧道施工方法, 已写入了我国现行的相关规范中[1] [2]。但是, 对于软弱破碎岩体中的大断面隧道, 随着工程实践的不断增多, 新奥法的不足之处也不断显现出来。根据新奥法原理, 为了控制隧道开挖后隧道围岩的变形和充分利用围岩的自稳能力, 要求采用分部开挖方法, 如采用台阶法、侧壁导坑法, 预留核心土环形开挖法、CD法或CRD法等。这往往导致开挖空间小, 无法采用大型机械进行施工, 使得隧道掘进效率较低; 同时由于初始衬砌(特别是钢拱架喷锚支护)无法封闭, 初始衬砌的支护作用无法充分发挥出来, 因而常常出现变形过大甚至冒顶事故。根据调研, 这类冒顶事故大部分都是由于掌子面失稳导致的, 而且隧道设计和施工均采用新奥法原理[3]。

基于对新奥法原理的实践总结和理论探索, 在新意法的基础上, 意大利学者 Pietro Lunardi [4]教授提出一种新的隧道施工工法——按岩石或土层的控制变形分析的隧道施工法(Analysis of Controlled Deformation—Rock or Soil, ADECO-RS), 在我国称为新意大利隧道施工法(New Italian Tunneling Method, NITM), 简称新意法。新意法的核心是采用技术措施维护或加强掌子面超前岩土体的刚度, 达到对掌子面挤出变形和隧道收敛变形的控制, 最终确保掌子面的稳定和隧道安全。对于软弱岩体, 掌子面超前岩土体的变形控制通过超前加固来实现。新意法的突出优点是在软弱围岩的介质环境中可以实现全断面隧道开挖。

新意法在我国隧道实践中虽然尚处于探索起步阶段[5], 但这些初步的探索和试验研究已经显示出其突出优势, 值得总结推广, 以期形成规范性技术指南, 进一步提升我国的隧道建设水平。

作为新意法技术未来推广的技术储备,依托于浙江某山岭隧道工程,选取了 IV 级围岩地层的 20 米长度作为试验段,对新意法的关键技术进行试验研究。本项研究包括对原台阶法新奥法的优化设计,形成新意法施工方案;制定玻璃纤维锚杆对掌子面前方岩体进行加固的施工方案;掌子面超前岩体挤出变形的量测新技术的研发和监测结果分析;新意法施工的隧道力学行为的有限元分析计算。

本文将对此研究的相关成果进行介绍。

2. 工程概况

2.1. 地质概况

依托工程为 G25 长(春)深(圳)高速德清至富阳段扩容杭州段的奇坑隧道。隧道位于浙江省杭州市余杭区瓶窑镇奇坑村山区。新意法试验段选在左洞,桩号 K54+246~K54+266 区间。如图 1 所示。试验段的隧道最小埋深约 20 m。该段内有一节理密集带穿过隧道轴线。地貌上看,该段为低山,沟谷地段。隧道的上覆地层自上而下分别为:全风化凝灰岩,厚度 5~6 m;强风化凝灰岩,厚度约 2 米;中风化凝灰岩。隧道位于中风化凝灰岩中,岩质坚硬,但岩体破碎,完整性差,且有节理密集带穿过,含裂隙水,属于 IV 级围岩。节理密集带为 V 级围岩,节理带厚度约 6~7 m。

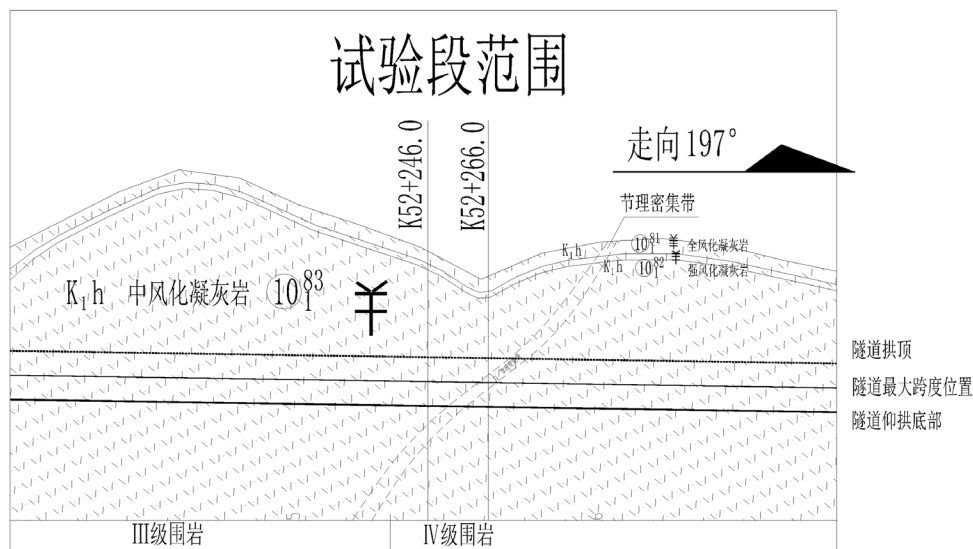


Figure 1. Longitudinal profile of geology at the experimental section

图 1. 试验段地质纵剖面图

2.2. 原设计新奥法施工方案

隧道为双洞单向三车道,左洞和右洞长度均为 2430 m。隧道净空高度 5 米,宽度 14.5 米,断面为五心圆。左右洞隧道结构按分离式隧道设计。毛洞尺寸为洞高约 11.3 m,洞宽约 17 m,毛洞面积为 154.5 m²,按属超大断面隧道(国际隧道协会 ITA 规定,断面面积大于 100 平米,属超大断面隧道)。原设计按照新奥法原理,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,开挖方法采用上下台阶法开挖。如图 2 所示。

2.3. 优化的新意法施工方案

试验段采用新意法进行施工,实现全断面开挖。掌子面超前加固如图 3 所示。

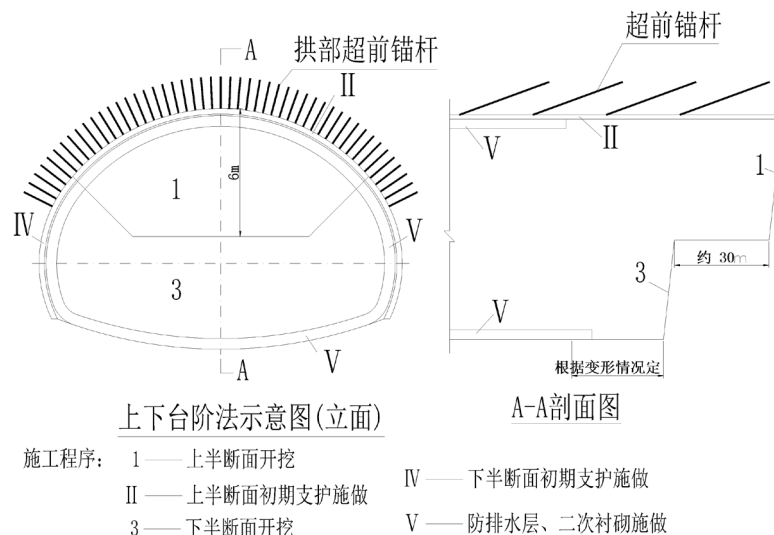


Figure 2. Bench excavation by NATM
 图 2. 原设计新奥法方案

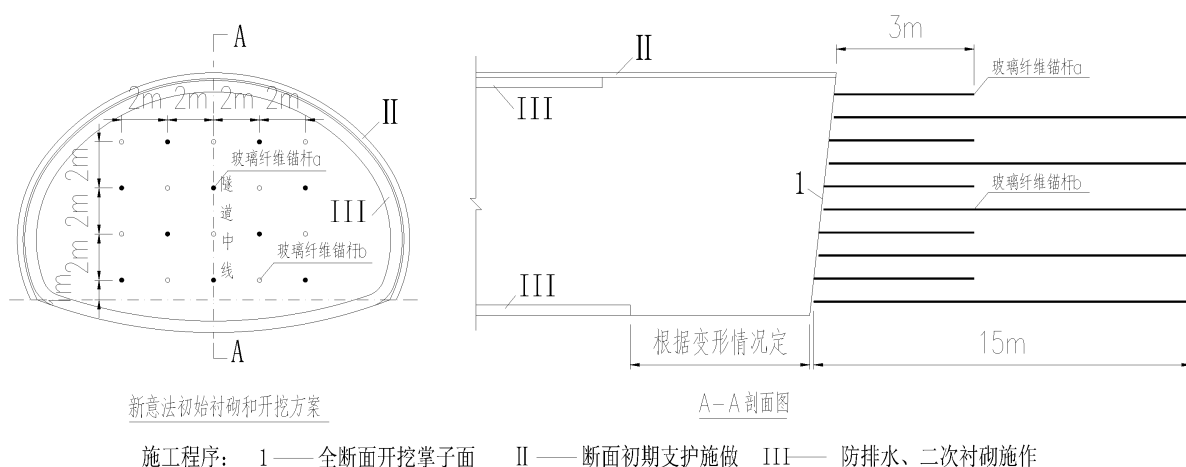


Figure 3. Full face excavation by NITM and core-face stabilization using fiber-glass bolts
 图 3. 玻璃纤维锚杆加固掌子面前方核心掩体和采用新意法实现全断面开挖

新意法的方案设计如下: 掌子面前方核心岩体采用玻璃纤维锚杆进行超前加固, 玻璃纤维锚杆的加固密度按 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 布置。玻璃纤维锚杆直径为 22 mm , 中空, 壁厚为 8 mm , 总长度 15 m , 由 7 m 和 8 m 两节接长, 采用套筒连接。锚杆成孔孔径 63 mm , 采用水泥浆, 加早强剂。玻璃纤维锚杆的搭接长度根据有限元数值计算结果确定, 初定为 3 m , 同时根据掌子面前方核心岩体的挤出变形情况进行调整。

为实时掌控隧道开挖及初始衬砌后, 隧道掌子面前后方围岩变形, 除了原设计的隧道洞周收敛变形、拱顶沉降等监测内容外, 还对掌子面挤出变形、掌子面前方核心岩体的挤出变形进行跟踪监测。

3. 掌子面前方核心岩体的超前加固

3.1. 掌子面前方岩体加固的力学机理

隧道开挖是一种三维力学行为。隧道开挖前, 地层中任意一点处于三向应力状态, 一旦开挖, 掌子面位置附近应力状态会进行调整, 即 σ_3 卸载至 0 , 如图 4 所示。

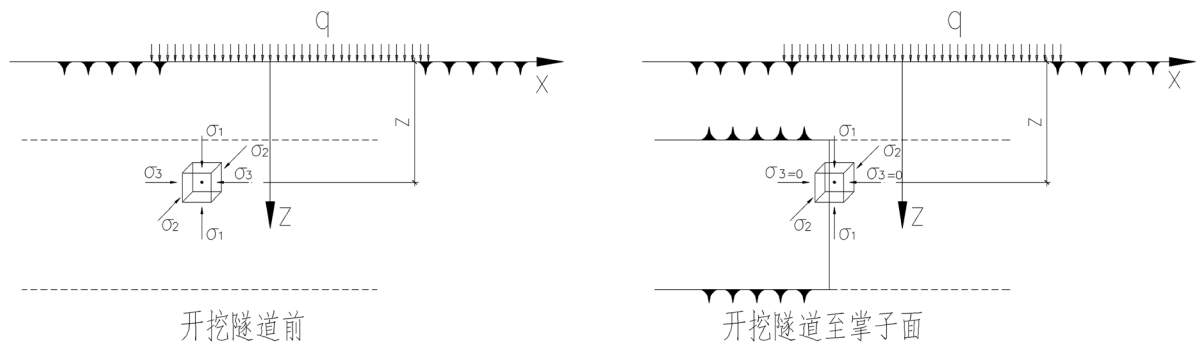


Figure 4. Three-dimensional Stresses of the point at the front of a tunnel

图 4. 掌子面处任意一点在开挖前后的应力状态

如此，将导致最大剪应力 $\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ 逐渐增大，最后达到 $\tau_{\max} = \frac{\sigma_1}{2}$ 。当 τ_{\max} 小于岩土体的抗剪强度 τ ，岩体稳定，否则破坏，如图 5 所示。

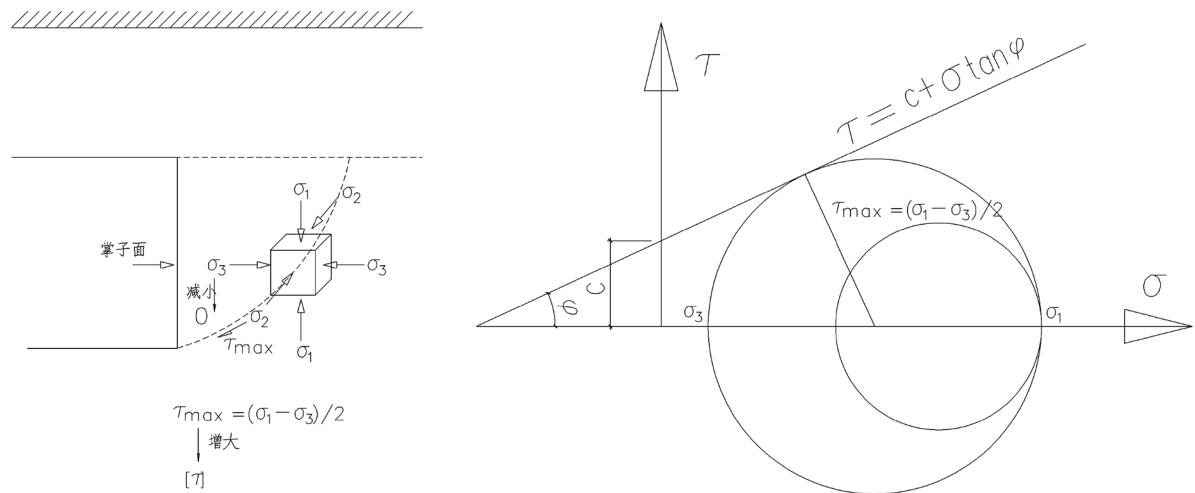


Figure 5. Sliding mechanism of front rock

图 5. 掌子面失稳滑移力学机理

对于软弱破碎围岩和土层，其抗剪强度都很低，掌子面出现滑移的可能性都很大。自然，滑移失稳之前均有明显的掌子面挤出变形。为了控制掌子面前方岩土体的变形，确保其稳定，可以通过掌子面后方预留土的办法，其目的是保持 σ_3 至一定水平。如图 6 所示。这就是新奥法原理的分部开挖法。



台阶法(留核心土)

双侧壁导坑法

Figure 6. Bench excavation and side adit excavation—to leave the rock behind workface

图 6. 分部开挖法——预留核心土

也可以通过对手子面前方核心岩土体进行加固,提高其抗剪强度 τ 和其刚度。加固的方法很多,如采用水平旋喷桩加固、注浆加固和打设超前锚杆和管棚等,其中采用玻璃纤维锚杆进行手子面前方核心岩土体加固是很有效的方法之一,如图7所示,这种方法可以实现隧道的全断面开挖。这也是基于新意法原理的施工方法。

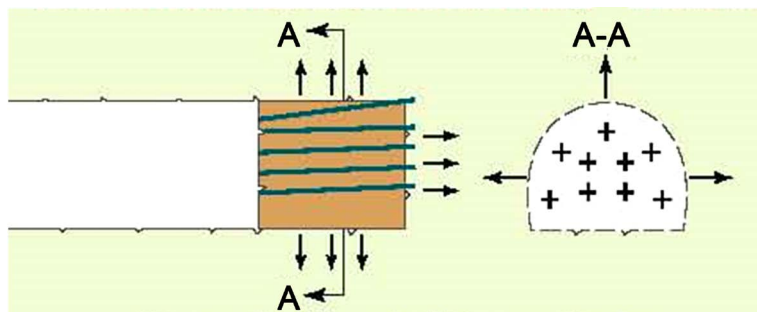


Figure 7. Core-face protection by means of fiber-glass bolts
图7. 玻璃纤维锚杆加固手子面前方核心岩土体

从前面新奥法和新意法对于手子面变形控制及确保其稳定的措施可以看到:新奥法需要分部开挖,初始支护需要分次完成,无法做到一次封闭,这导致如下结果:大型机械不能进洞作业,影响了施工效率;初始支护不能一次封闭,导致隧道变形短期内持续增大,影响洞室稳定;手子面变形依靠预留土体的被动反压作用,可靠性较低,无法确保手子面稳定。而新意法采取主动支护方式,对手子面岩体进行加固,提高了手子面超前岩体的刚度和强度,可有效控制手子面的变形并确保其稳定;隧道可采取全断面开挖,初始支护一次完成形成封闭,使得初始支护能够及时地、有效地控制隧道变形;隧道采取全断面开挖使得采用大型机械施工成为可能,提高了生产率,降低了工人的劳动强度,保障了施工安全。

3.2. 玻璃纤维锚杆加固设计和施工

理论上说,作为对手子面加固的锚杆,只要它能达到防止手子面滑移失稳,减少手子面的挤出变形的目的,采取哪一种材料是没有关系的。但是由于隧道处在不断掘进进程中,手子面前方核心岩土体加固用的临时锚杆,因此,从施工实践上说,在材料选择上,除了其强度和刚度的加固效果考虑外,还应考虑其能够便于后续施工。比较而言,玻璃纤维锚杆具备了这种优良特性。

3.2.1. 玻璃纤维锚杆的力学特性

玻璃纤维锚杆全名为玻璃纤维增强塑料锚杆(Bolt of Glass Fiber Reinforced Polymer,简称 GFRP 锚杆),由纤维和树脂材料复合而成。玻璃纤维注浆锚杆具有以下特点:1) 抗拉强度高、重量轻。试验表明,玻璃纤维锚杆的抗拉强度可达到钢质锚杆的1.5~2倍;但其重量只为同种规格钢质锚杆的1/4~1/5。这个特点能够保证它加固岩土体的效果;2) 抗剪和抗扭强度低,易于机械挖除。这个特点确保了隧道手子面前方岩土体易于开挖,也为隧道的机械化高效施工创造了条件。3) 锚杆为全长粘结性锚杆,杆体全段锚固,锚注结合,浆液可以渗透入锚杆周围的岩土层中,为杆体提供锚固力的同时也加固了锚杆周围岩体。4) 锚杆防静电、阻燃,安全性好。这一特点为其在瓦斯地层中的应用提供了安全保证。

本工程试验段采用的玻璃纤维锚杆为智性纤维复合加固南通有限公司生产,如图8所示。锚杆为中空锚杆,锚杆表面采用螺纹,提高杆体与锚固体的摩阻力;中央为中空,方便采取孔底注浆,无需另设注浆管。考虑到运输方面对长度的限制,锚杆可以根据需要接长,专门设计了钢制套筒街头。锚杆的力学参数如表1所示。

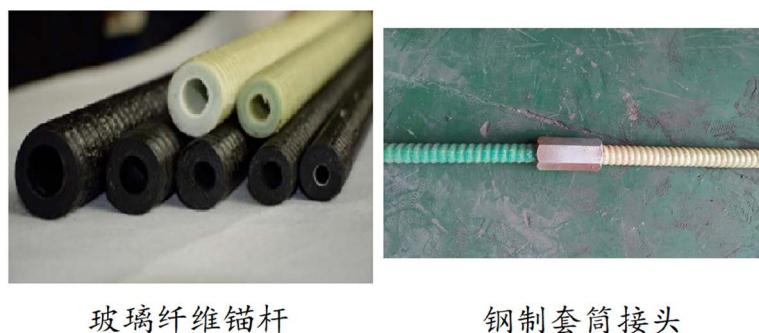


Figure 8. Bolt of glass fiber reinforced polymer (GFRP) and its steel connector
图 8. 玻璃纤维锚杆与钢制接头

Table 1. The properties of $\varnothing 22$ hollow GFRP bolt
表 1. $\varnothing 22$ 中空注浆锚杆产品性能规格表

产品型号	外径/壁厚 (mm/mm)	杆体极限抗拉力(KN)	横截面积 (mm ²)	极限抗拉强度(MPa)	扭矩 (N*m)	水压 (bar)	单位重量 (g/m)	弹性模量 (GPa)	弯曲强度 (MPa)	断裂伸长率 (%)	螺距 (mm)
ZX-22/8	22/8	170	280	>600	80	170	590	40	>400	2.5	10

3.2.2. 玻璃纤维锚杆的安装和质量控制

1) 玻璃纤维锚杆的安装

本工程试验段的玻璃纤维锚杆按 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 的密度布设,按 2-3-2-3 方式布置 10 根锚杆,如图 3 所示。考虑到光面爆破的爆破孔和掌子面前方核心岩体挤出变形监测孔,需要统筹安排。由于爆破孔孔深只有 4 m,而锚杆孔和监测孔孔深 15 m,因此布孔时优先考虑锚杆孔和监测孔。锚杆孔由阿特拉斯·科普拉 XE3C 三臂凿岩台车完成,台车配备锚杆孔特制钻头,电脑自行定位、自动控制钻孔深度和方向。锚杆孔成孔直径 63 mm。

成孔完成后,锚杆按 $7\text{ m} + 8\text{ m}$ 连接组装,同时配置对中定位支架,插入孔内。锚杆口部与水泥浆注浆管连接,进行注浆,直到孔口溢出水泥浆,持压 2 分钟后停止注浆。考虑到相邻锚杆应接头错开布置的要求,相邻锚杆按 $7\text{ m} + 8\text{ m}/8\text{ m} + 7\text{ m}$ 交错布置。注浆浆液为纯水泥浆,水灰比 0.45,加早强剂,以加速锚杆尽早达到设计强度。

锚杆注浆达到养护强度后,实施爆破开挖。图 9 为锚杆安装、注浆及全断面开挖的全过程照片。

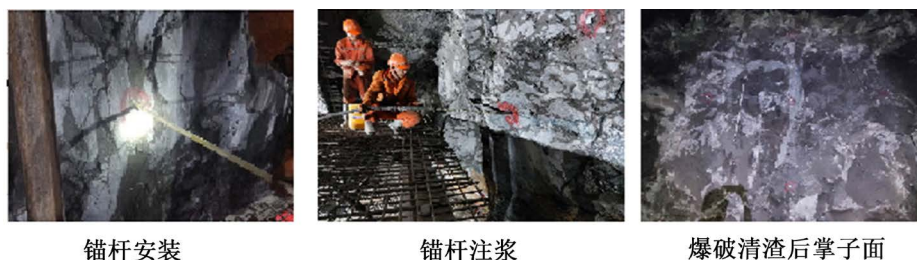


Figure 9. Photos on bolt installation, grouting and rock removal
图 9. 玻璃纤维锚杆安装及爆破开挖过程照片

3.3. 锚杆锚拉力现场试验

新意法的核心是通过加固技术措施提高掌子面超前岩土体的强度和刚度,达到对掌子面挤出变形和

隧道收敛变形的控制，最终确保掌子面的稳定和隧道安全。新意法成败的关键在于掌子面超前岩土体的加固效果。因此，爆破开挖前必须对玻璃纤维锚杆的加固效果进行检测，确保爆破开挖后，掌子面挤出必须在设计允许范围内，确保掌子面稳定。

本工程通过对玻璃纤维锚杆的现场拉拔力试验来检查玻璃纤维锚杆的可靠性。试验针对无早强剂和早强剂两种情况下，养护至一个开挖循环时间长度(24小时)时的锚杆拉拔力进行了现场拉拔试验。图 10 为现场试验结果。从图 10 中可以看出，加早强剂的水泥浆锚杆抗拉强度有所提高：图中普通水泥浆锚杆拐点处拉力为 75 kN，而加早强剂的锚杆拐点处拉力为 100 kN。

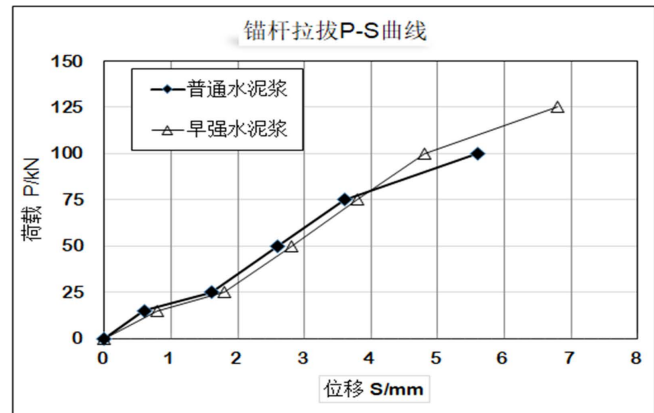


Figure 10. P-S test curves of two bolts on site
图 10. 锚杆拉拔力现场试验结果

根据试验段新意法施工方案的有限元数值计算结果，掌子面抗滑移稳定性安全系数为 1.21，锚杆拉力在 100 kN 以上时，掌子面抗滑移稳定性安全系数为大于 1.3。试验结果表明，普通水泥浆锚杆和早强水泥浆锚杆的抗拉强度对应于掌子面不同的稳定性安全系数，早强水泥浆对于提高锚杆的早期强度是有效的，这可以缩短锚杆的养护时间。

4. 掌子面及掌子面超前岩体挤出变形跟踪监测

和新奥法一样，新意法也要求在隧道开挖和支护施作期间对隧道受力变形进行跟踪监测，根据监测结果对设计施工参数进行动态调整，确保隧道安全和工程质量。除了新奥法要求的掌子面后方隧道收敛变形观测及初始衬砌的受力变形量测外，新意法特别重视掌子面的挤出变形量测，以及掌子面超前岩体的挤出变形量测。

本工程对于掌子面挤出变形量测采用全站仪完成，对于掌子面超前岩体挤出变形量测采用了本工程专利技术——基于磁环感应原理的隧道掌子面前方深部岩体挤出变形的量测技术。

4.1. 掌子面挤出变形实测

掌子面挤出变形量测要求在每次爆破清渣后即布设监测点，按每 4 小时间隔频率进行量测。本工程试验段掌子面挤出变形测点布置如图 11 所示，该测量断面位于桩号 K54+246 处。

量测得到出渣后 8 小时及 12 小时时刻各点挤出变形，如表 2 所示。将表 2 数据绘于掌子面上，即得挤出变形在掌子面的分布，如图 12 所示。实线和虚线分别为出渣后 12 小时和 8 小时数值。

从表 2 和图 12 可以看出，掌子面挤出变形的分布规律是：中央数值最大，边缘数值最小；挤出变形随时间增大，但增速不大。

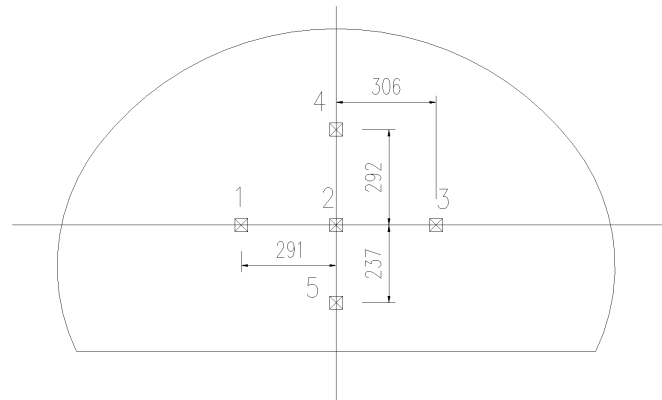


Figure 11. Layout of extrusion monitoring points at workface of tunnel (unit: cm)
图 11. 掌子面挤出变形测点布置图(图中尺寸单位: cm)

Table 2. Extrusions of the monitoring points at workface of tunnel (unit: mm)
表 2. 掌子面挤出变形一览表(单位: mm)

测点	1	2	3	4	5
出渣后 8 小时	14.1	15.5	14.3	14.8	14.8
出渣后 12 小时	15.7	17.8	17.0	18.1	17.7
变形增量	1.6	2.3	2.7	3.3	2.9

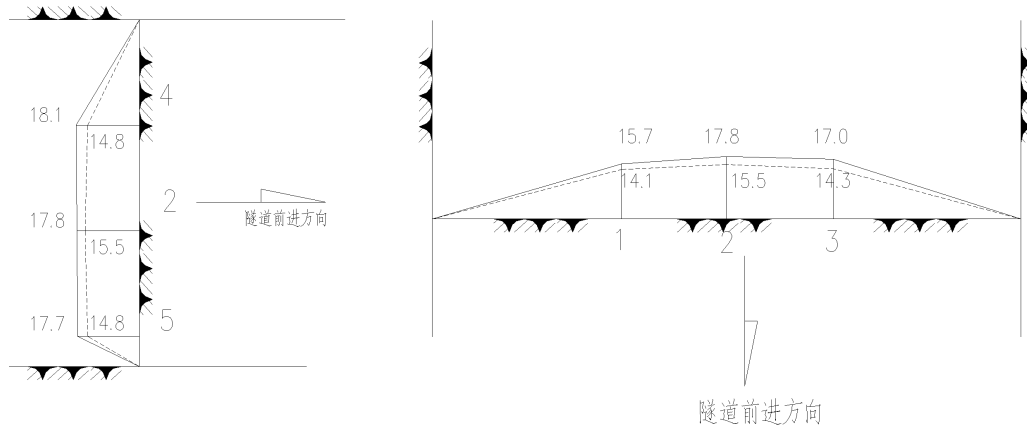


Figure 12. Extrusion displacement of workface (unit: mm)
图 12. 掌子面挤出变形(图中尺寸单位: mm)

4.2. 掌子面超前岩体挤出变形实测

本工程对于掌子面超前岩体挤出变形量测采用基于磁环感应原理的隧道掌子面前方深部岩体挤出变形的量测技术。其原理近似于岩土工程的分层沉降量测技术，只是将垂直沉降量测变为水平位移量测而已。

从掌子面水平钻孔进入掌子面超前岩体中，在掌子面前方不同位置埋设磁环，磁环套接于 PVC 管上，PVC 管内部中空。PVC 管外注水泥浆，确保磁环和岩体共同位移。另有可以探测磁环位置的电磁感应仪安装在有刻度的测杆上。电磁感应仪电源开关开启后，电磁感应探头通过磁环时会发出蜂鸣声。根据蜂鸣时测杆读数，即可以获得蜂鸣时磁环的位置。测试示意图如图 13 所示。

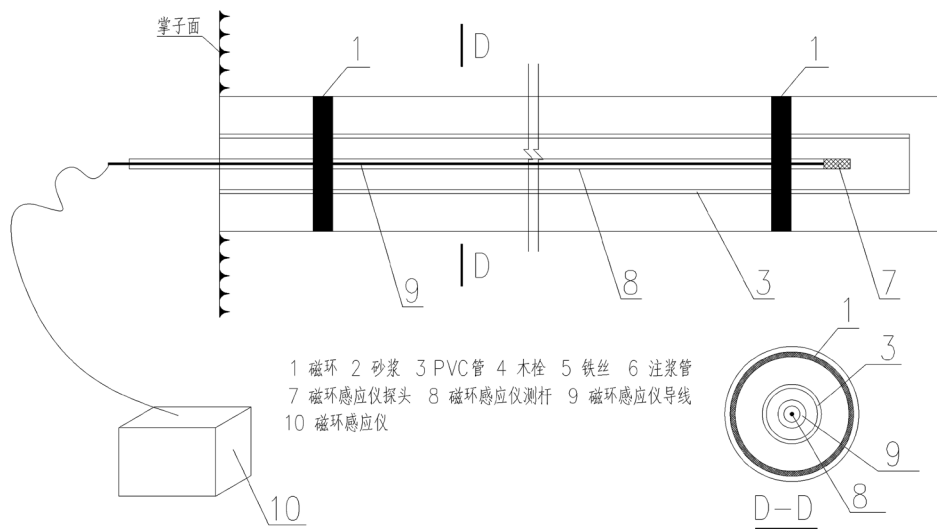


Figure 13. Scheme of monitoring technology of extrusion front rock of tunnel
图 13. 基于磁环感应原理的掌子面超前岩体挤出变形量测技术示意图

量测步骤如下：先通过全站仪确定孔口的水平位移，然后利用磁环量测计量测得到磁环与孔口的相对位移，最后两者求和，得到磁环的绝对水平位移。

本工程试验段在桩号 K54+246 处布置了磁环感应计，如图 14 所示。

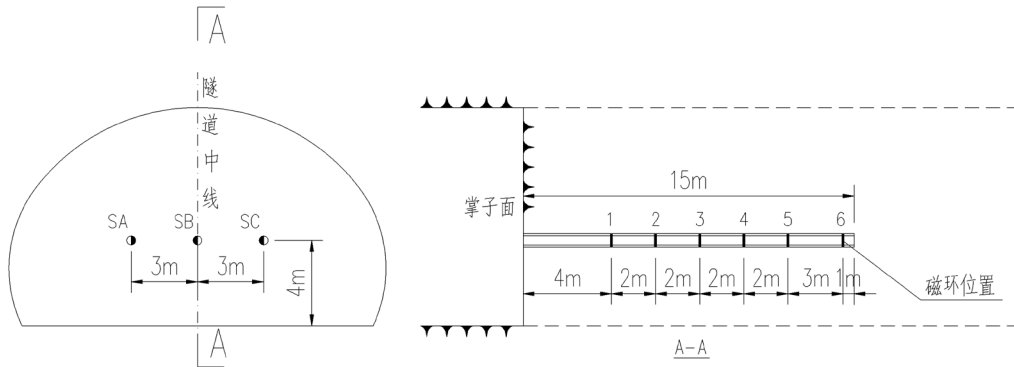


Figure 14. Layout of extrusion monitoring points in front rock of tunnel
图 14. 掌子面超前岩体挤出变形测点布置图

量测得到爆破出渣后 8 小时及 12 小时时刻，各测点的挤出变形值，如表 3 所示。如图 15 所示。图中虚线和实线分别表示爆破出渣 8 小时和 12 小时的数值。

Table 3. Extrusions of the monitoring points in front rock (unit: mm)
表 3. 掌子面超前岩体挤出变形一览表(单位: mm)

测点	0	1	2	3	4	5	6
与掌子面距离(m)		4	6	8	10	12	15
测孔	SA	15.7	4.7	2	0	0	0
	SB	17.8	6.3	2.5	0	0	0
	SC	17.0	4.0	1.5	0	0	0

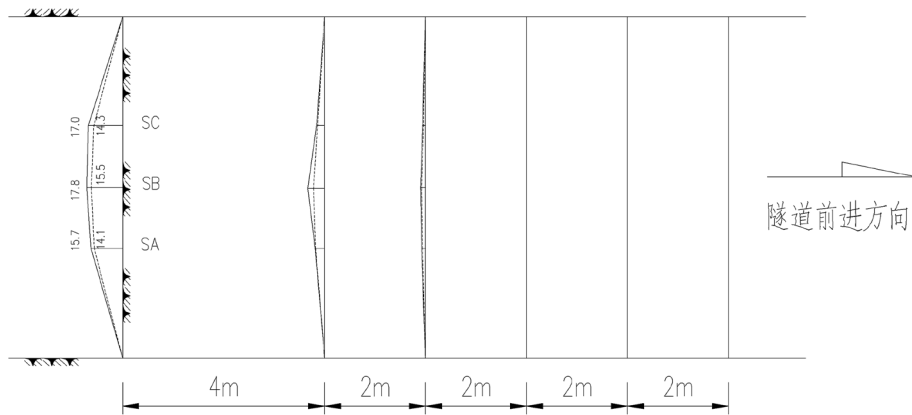


Figure 15. Extrusion displacements of in front rock of the tunnel (unit: mm)
图 15. 掌子面超前岩体挤出变形

从表 3 和图 15 可以看出, 掌子面中央挤出变形最大。距离掌子面 6 米处的挤出变形小于 5mm, 至 8 米处已无挤出变形, 说明开挖影响半径在 6 米至 8 米之间。从图中还可以看出, 掌子面挤出变形在前后两次的增量不大, 超前岩体的挤出变形的增量衰减更快。可见玻璃纤维锚杆加固效果是明显的, 掌子面是稳定的和安全的。

5. 三维有限元数值分析

5.1. 三维有限元计算模型

本工程试验段在确定玻璃纤维密度、搭接长度和初始衬砌参数的优化, 均通过三维有限元数值计算来实现, 所用计算分析软件为 Z-Soil 软件。

Z-Soil 软件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, 可以提供涉及土力学和岩石力学、隧道工程、基坑开挖、土-结构相互作用、地下水和温度分析的统一方法, 在隧道工程界得到广泛应用。

图 16 为三维有限元计算模型。计算中围岩本构模型采用摩尔-库仑(M-C)模型, 玻璃纤维锚杆采用锚杆单元模拟。隧道的初期支护按弹性材料考虑, 采用壳单元模拟。计算不考虑二次衬砌的影响。计算所用的玻璃纤维锚杆力学参数如表 4 所示。计算所用的材料力学参数如表 5 所示。

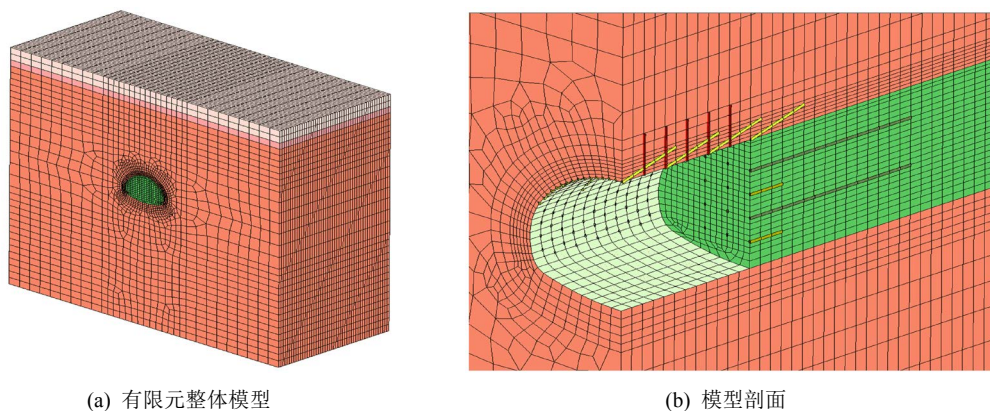


Figure 16. 3D-FEM Model
图 16. 三维有限元计算模型

Table 4. Properties of GFRP bolt
表 4. 玻璃纤维锚杆力学参数

弹性模量 E(GPa)	锚杆直径(mm)	水泥浆粘聚力(kPa)	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$
40	22	20×10^4	25

Table 5. Properties of material for 3D-FEM analysis
表 5. 三维有限元数值分析的材料力学参数

材料	容重 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	弹性模量(E/GPa)	泊松比 μ	内聚力 c(kPa)	内摩擦角($^{\circ}$)
IV 围岩	21.5	3	0.3	100	25
V 围岩	19	1	0.4	70	20
超前核心岩体(注浆加固)	19	1.1	0.35	75	21
初始支护	25	23	0.20		

5.2. 三维有限元数值计算结果

5.2.1. 掌子面超前岩体的挤出变形云图

计算得到掌子面超前岩体挤出变形云图,如图 17 所示。掌子面最大挤出变形在隧道中央,为 17.5 mm。从图中可以看出,掌子面前方岩体的挤出变形衰减很快,在距离掌子面 4 m 处挤出变形已下降至 6 mm 以下,距离掌子面 6 m 处,几乎无挤出变形。说明,玻璃纤维锚杆锚杆加固后,掌子面稳定,采用全断面开挖是可行的。

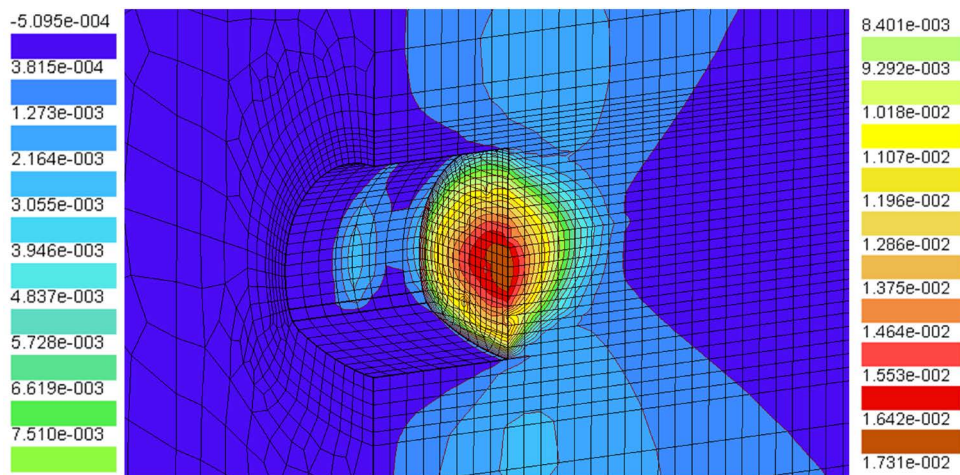


Figure 17. The extrusion cloud of front rock of the tunnel (unit: mm)

图 17. 掌子面超前岩体挤出变形云图(单位: mm)

5.2.2. 有限元计算结果和实测结果比较

针对掌子面超前岩体的挤出变形,三维有限元计算结果和实测结果对比分析如图 18 所示。从图中可以看到,计算结果和实测结果变化规律是一致的,量值也比较接近。说明采用的计算模型和力学参数是合理的。依此制定的施工参数是合理的。

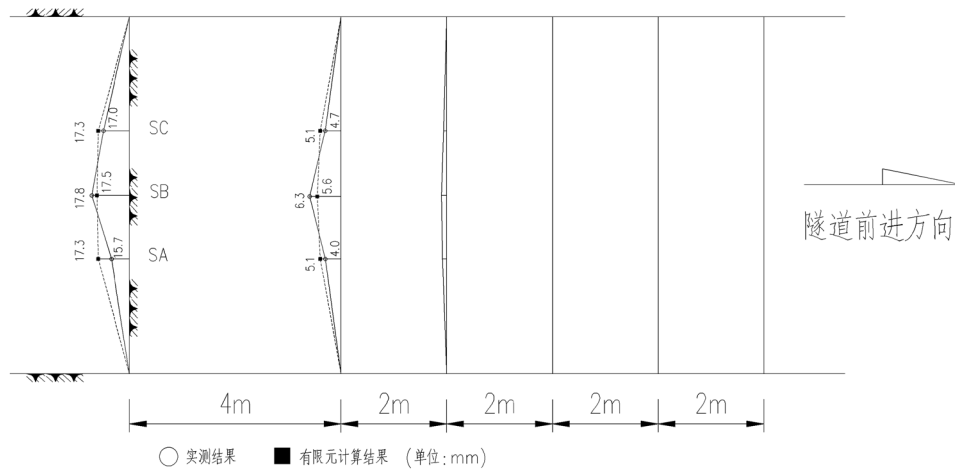


Figure 18. Comparison of the extrusion of front rock by 3D-FEM and by measurement
图 18. 掌子面超前岩体挤出变形计算值和实测值的比较

6. 新意法与新奥法施工效果的对比分析

新奥法采用上下台阶法进行隧道开挖，其具体工艺是：开挖上台阶，对拱部施工系统锚杆和钢拱架及挂网喷射混凝土；开挖下台阶，完成侧墙钢拱架及挂网喷射混凝土，初始支护完成封闭；最后开挖仰拱，施工仰拱结构。新意法采用全断面进行隧道开挖，其具体工艺是：掌子面打设超前玻璃纤维锚杆，全断面开挖，施工系统锚杆和钢拱架及挂网喷射混凝土，初始支护一次封闭。前者属于分部开挖，后者属于全断面开挖。为了比较二者工艺的效果，分别对有限元计算结果和实测洞周位移进行了比较。

6.1. 新意法和新奥法有限元计算结果比较

通过三维有限元计算，分别得到两种方法下的隧道变形情况。新意法计算结果见本文前节。

图 17 和图 19 分别为新意法和新奥法施工时隧道轴向变形云图。

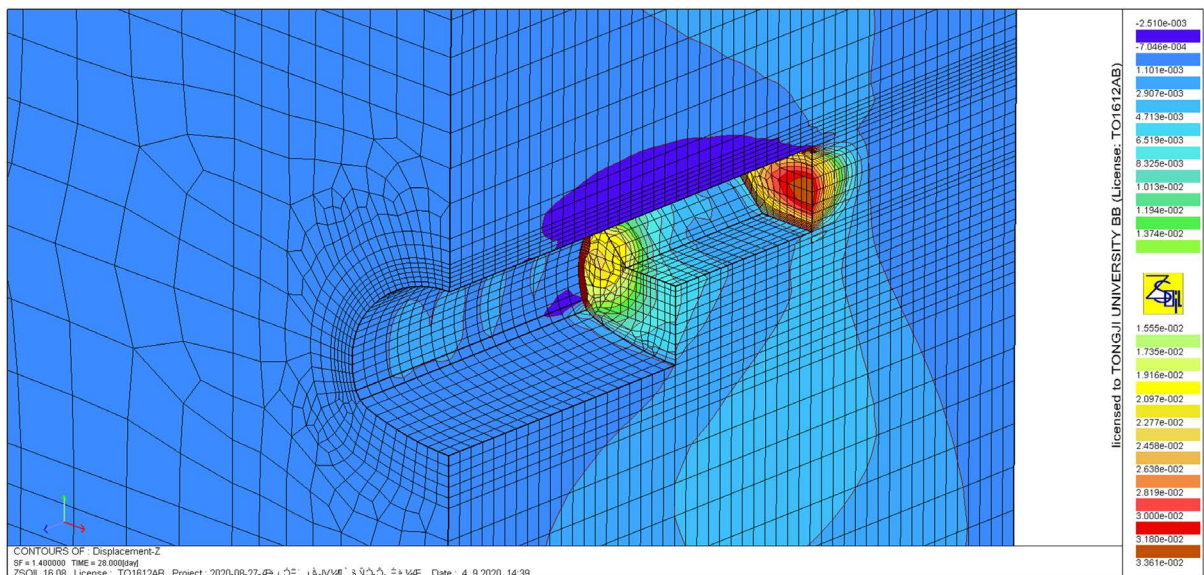


Figure 19. The cloud of axial extrusion of tunnel by NATM unit: m
图 19. 新奥法时隧道的轴向挤出变形云图，单位：m

从图 19 中可以看出, 采用新奥法当上台阶开挖后, 掌子面的轴向变形为 33.61 mm, 下台阶开挖后掌子面的轴向变形继续增大, 达到 54.21 mm。从图 17 中得到的新意法开挖后掌子面的轴向挤出变形为 17.55 mm。计算结果表明, 新意法对于控制掌子面变形是显著的。

6.2. 实测结果比较

根据现场监测结果, 对采用新奥法和新意法施工的两段隧道的收敛变形进行了比较。表 6 为新意法和新奥法施工时拱顶沉降和收敛位移实测值。

Table 6. Comparison of measurement between tunnels by NATM and by NITM

表 6. 新奥法和新意法实测值结果比较

施工方法		新奥法	新意法
掌子面位置		ZK54+310	ZK54+250
收敛位移(mm)	上测线	27.9	24.9
	下测线	24.4	19.5
拱顶沉降(mm)		18.2	15.9

从表 6 可以看出, 新意法施工时隧道的收敛位移和拱顶沉降均比新奥法施工时来得小, 说明新意法对于掌子面后方隧道洞周变形的控制比新奥法有效。

7. 结论

- 1) 对于通过强度较差的 IV 围岩和 V 围岩的大断面隧道, 采用新意法可以实现隧道的全断面开挖;
- 2) 新意法施工实践表明: 全断面开挖、掌子面超前岩体加固、掌子面超前岩体挤出变形实时监控是控制隧道变形及掌子面稳定的关键因素; 计算和实测结果均表明新意法比新奥法具有优势。
- 3) 玻璃纤维锚杆应用于掌子面前方岩体的超前加固方面效果可靠, 方便开挖, 是一种值得推荐的超前加固方法。

致 谢

智性纤维复合加固南通有限公司钱林峰工程师就玻璃纤维锚杆提供技术指导。

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] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计规范 JTG D70-2004 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] 中华人民共和国交通部. 公路隧道施工技术规范 JTG F60-2009 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [3] 张军伟. 软弱围岩隧道全断面加固技术设计理论及应用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2011.
- [4] Lunardi, P. (2008) Design and Construction of Tunnels—Analysis of Controlled Deformation in Rock and Soils. Springer, Berlin Heidelberg.
- [5] 贾涛. 基于新意法的隧道工程施工原理及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2016.