

# 采用玻璃纤维锚杆预加固掌子面软弱岩体的有限元分析和工程应用

——以浙江奇坑隧道试验段的新意法施工实践为例

闵晓阳<sup>1</sup>, 斯纪平<sup>1</sup>, 王玉富<sup>1</sup>, 支彦锋<sup>1</sup>, 韦麟<sup>1</sup>, 赖允瑾<sup>2</sup>

<sup>1</sup>浙江交工路桥建设有限公司, 浙江 杭州

<sup>2</sup>同济大学地下建筑与工程系, 上海

Email: 675756533@qq.com, laiyunjin@126.com

收稿日期: 2020年11月17日; 录用日期: 2020年12月2日; 发布日期: 2020年12月22日

## 摘要

新意法的核心是通过隧道掌子面前方核心岩体的预加固, 控制掌子面水平挤出变形, 确保掌子面的稳定, 最终实现隧道的全断面开挖。玻璃纤维锚杆以其易于切削的优点成为新意法隧道的掌子面预加固主要方法之一。如何确定锚杆的加固密度、锚杆长度、锚杆的搭接长度和锚杆布置是设计和施工上的关键问题。针对浙江奇坑隧道的新意法施工, 本文采用三维有限元数值模拟方法, 针对新意法各施工工况进行计算分析, 得到了锚杆密度、锚杆长度和锚杆搭接长度与掌子面挤出变形的关系; 本文提出了采用隧道掌子面挤出变形的控制值作为隧道掌子面稳定性的评价依据, 根据挤出变形的控制值来确定锚杆的相应设计参数; 文章最后将现场监测结果和计算结果进行了比较分析, 分析表明: 计算和监测结果相当吻合, 计算结果对施工具有实际指导意义。相信本文提出的论点和方法可供类似工程参考借鉴。

## 关键词

玻璃纤维锚杆, 新意法, 掌子面, 超前核心岩体的预加固

# The FEM Analysis and Application of NITM Tunnel Using GFRP Bolt as the Pre-Reinforcement of Front Rock of Tunnel

—A Case Study of Qikeng Tunnel in Zhejiang Driven with NITM

Xiaoyang Min<sup>1</sup>, Jiping Si<sup>1</sup>, Yufuwang<sup>1</sup>, Yanfeng Zhi<sup>1</sup>, Lin Wei<sup>1</sup>, Yunjin Lai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ZCCC Road and Bridge Construction Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

<sup>2</sup>Geotechnical Engineering Department, Tongji University, Shanghai

文章引用: 闵晓阳, 斯纪平, 王玉富, 支彦锋, 韦麟, 赖允瑾. 采用玻璃纤维锚杆预加固掌子面软弱岩体的有限元分析和工程应用[J]. 土木工程, 2020, 9(12): 1292-1303. DOI: 10.12677/hjce.2020.912135

Email: 675756533@qq.com, laiyunjn@126.com

Received: Nov. 17<sup>th</sup>, 2020; accepted: Dec. 2<sup>nd</sup>, 2020; published: Dec. 22<sup>nd</sup>, 2020

## Abstract

The philosophy of the new Italian tunneling method (NITM) is to keep under control the extrusion of tunnel workface and keep front rock stable by pre-reinforcement of front weak rock, and finally to achieve a full face excavation. Due to its being easy to break, the GFRP bolt has become one of the most important methods for the pre-reinforcement of tunnel face when tunneling with NITM. When applying GFRP, the density, length and overlap of the reinforcement constitute the parameters that characterize this reinforcement technique. Based on the application of GFRP bolt in the project of Qikeng Tunnel, Zhejiang province, this paper has obtained the relations between the extrusion and the design parameters of GFRP bolt using finite element method (FEM); this paper also suggests that the extrusion of tunnel face be taken as the index to judge the stability of tunnel face and the design parameters of GFRP bolts. This paper has carried out a comparison analysis between FEM results and site measurements, and the comparison shows that the FEM results agree very well with the site measurements and can be practical and instructive. The authors believe that the viewpoint and method mentioned in this paper shall be a good reference for the similar project.

## Keywords

GFRP Rock Bolt, NITM, Workface, Pre-Reinforcement of Front Corerock

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

1970年代,意大利学者Pietro Lunardi创立了按岩土变形控制的隧道施工法(Analysis of Controlled Deformation-Rock or Soil, ADECO-RS)。自2006年被介绍到我国以来,在十数个隧道工程中得到了应用,这一方法在我国称为新意大利隧道施工法(New Italian Tunneling Method, NITM)。新意法的核心是对隧道掌子面超前岩土体进行预加固,使待挖岩土体的刚度和强度得以提高,达到控制掌子面变形的目的,确保掌子面的岩体稳定,进而实现软弱岩体隧道的全断面开挖之最终目标。其中采用玻璃纤维注浆锚杆对软弱地层隧道前方待挖岩土体进行预加固是最常用的措施之一。

玻璃纤维锚杆是一种玻璃纤维增强聚合物制成的锚杆,可以做成实心的和空心的形式,表面常加工成螺纹状。玻璃纤维锚杆的突出优点是:抗拉强度高,与浆体材料粘结强度高,可以提供和传统钢筋锚杆一样的锚固力,可保证岩土体预加固的效果;而且玻璃纤维锚杆的抗剪和抗扭强度低,经其加固的岩土体,方便机械挖除,尤其适合隧道不宜爆破地段的土方开挖。

玻璃纤维锚杆用于掌子面前方核心土体的预加固,国内外案例很多。Lunardi教授(2008)报道了意大利数条软弱破碎地层采用玻璃纤维注浆锚杆进行超前待挖岩土体的预加固案例[1]。2008年武广客运专线浏阳河隧道施工中采用玻璃纤维锚杆对隧道掌子面前方岩体进行预加固,确保隧道成功穿越浏阳河,该隧道穿越的地层多为泥岩、泥质砂岩和砂质泥岩等IV~VI级软弱围岩[2]。玻璃纤维锚杆还可以和其它辅助

超前支护措施组合, 解决软弱地层隧道掘进的相关难题。2015 年浙江宁波野猪山隧道洞口段采用玻璃纤维锚杆和长管棚组合, 形成组合超前支护措施解决了隧道大变形和冒顶的难题[3], 最终实现了隧道全断面开挖。野猪山隧道洞口段处于全风化残积层和强风化凝灰岩地层, 围岩等级为 V 级。2017 年, 兰渝铁路桃树坪隧道在穿越未成岩富水粉细砂层(即饱和含水粉细砂层)时遇到流砂和掌子面失稳事故, 事故直接导致施工中断。事故后, 采用水平旋喷桩和玻璃纤维锚杆组合, 对掌子面前方土体进行超前预加固, 最终成功地完成了隧道高风险段的掘进施工[4]。2018 年浙江温州大罗山隧道采用玻璃纤维锚杆和长管棚组合支护措施, 对掌子面超前软弱土层进行预加固, 完成了大断面(175 m<sup>2</sup>)卵形(椭圆形)隧道的成功掘进[5]。

在新意法隧道设计和施工中, 采用玻璃纤维锚杆进行掌子面前方岩体预加固的关键问题是如何确定锚杆的如下参数: 锚杆的密度、锚杆的长度和锚杆的搭接长度。国内外的研究表明[1] [3], 锚杆上述参数与掌子面的水平挤出变形密切相关。和在新奥法应用一样, 三维有限元数值计算软件也可以有效地应用于新意法隧道开挖的模拟计算。通过对新意法施工各工况的数值模拟计算, 可以得到锚杆相关参数和掌子面挤出变形的相互关系, 通过对掌子面挤出变形和掌子面稳定性系数相关性, 可以为设计参数的确定提供依据。

浙江省 G25 长(春)深(圳)高速德清至富阳段扩容杭州段工程的奇坑隧道穿越 IV 级围岩, 采用新意法原理进行全断面开挖, 其中掌子面超前岩体预加固采用玻璃纤维注浆锚杆。

针对玻璃纤维锚杆在奇坑隧道新意法的工程实践, 本文作者采用三维有限元对玻璃纤维锚杆的加固效果进行计算分析, 得到了相关设计参数和掌子面挤出变形的关系, 同时将计算结果和现场量测结果进行了对比分析。

## 2. 工程概况

奇坑隧道左洞试验段的起讫桩号为 ZK54 + 235~ZK54 + 255。隧道采用双洞单向三车道, 拱墙断面为三心圆, 隧道净高 5 m, 净宽 14.75 m, 毛洞开挖面积为 154.5 平方米。该地段隧道所处围岩为: 自上而下为全风化凝灰岩, 厚度约 6 m; 强风化凝灰岩, 厚度约 2 米; 中风化凝灰岩。由于处于山谷, 节理较发育, 岩体内含裂隙水, 岩体破碎, 完整性差, 属于 IV 级—V 级围岩。原设计采用新奥法预留核心土台阶法施工。

为了方便大型机械进洞施工, 对原方案进行了优化, 优化后为新意法施工。根据新意法施工要求, 对掌子面超前核心岩体采用玻璃纤维锚杆进行加固, 然后按全断面开挖, 如图 1 所示。所用锚杆为 GFRP 中空注浆锚杆, 外径 22 mm, 长度 15 m, 采用 7 m 和 8 m 两节接长, 如图 2 所示。锚杆间距为 4 m × 4 m, 锚杆搭接长度为 6 m。注浆材料为纯水泥浆, 并掺早强剂。锚杆接长采用定制钢套筒, 套筒外径 32 mm, 套筒长度 200 mm。初始衬砌支护采用 200 mm 厚喷射混凝土 + 系统锚杆 + 钢拱架 + 超前管棚。

围岩的物理力学参数如表 1 所示。初始支护材料的物理力学参数如表 2 所示。玻璃纤维锚杆采用的物理力学参数如表 3 所示。

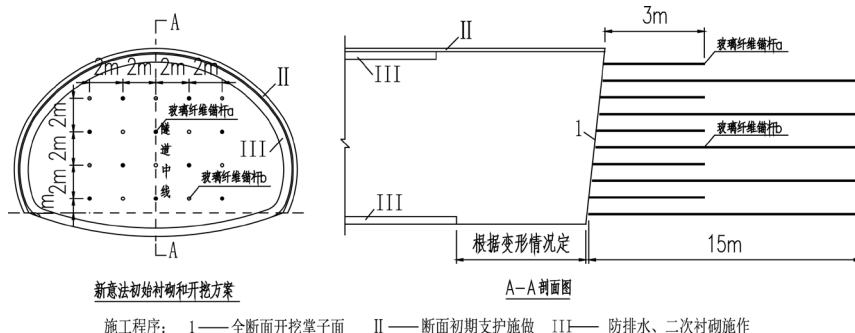


Figure 1. Sketch for NITM  
图 1. 新意法施工示意图



Figure 2. GFRP bolt and its links  
图 2. 玻璃纤维锚杆和钢套筒连接接头

Table 1. Properties of surrounding rocks  
表 1. 围岩物理力学参数

围岩级别	重度(kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量 E (GPa)	泊松比 $\gamma$	内聚力(kPa)	内摩擦角(°)
IV	21.5	3.00	0.32	22	27
V	19.0	1.00	0.40	17	22

Table 2. Properties of the materials of primary lining  
表 2. 初始支护材料物理力学参数

衬砌材料	重度(kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量 E (GPa)	泊松比 $\gamma$	抗压强度(MPa)	抗拉强度(MPa)
喷射混凝土 C20	22	21.00	0.2	10	1.1
系统锚杆、管棚、钢拱架	78.5	210	/	300	300

Table 3. Properties of GFRP bolt  
表 3. 玻璃纤维锚杆力学特性

外径/壁厚 (mm/mm)	螺距 (mm)	横截面积 (mm <sup>2</sup> )	杆体极限 抗拉力(KN)	极限抗拉强度 (MPa)	扭矩 (N*m)	单位重量 (g/m)	弹性模量 (GPa)	弯曲强度 (MPa)	断裂伸 长率(%)
22/8	10	280	17	>600	80	590	40	>400	2.5

### 3. 玻璃纤维锚杆全断面预加固机理分析

#### 3.1. 隧道掌子面采用锚杆预加固的机理

按 Horn [6]在 Janssen (1961)筒仓理论模型, 隧道开挖后, 要保持隧道掌子面的稳定, 必须在掌子面上作用一定的压力  $p$ , 如图 3 所示。对于坚硬围岩, 岩体本身的强度可以提供这个压力, 但对于软弱破碎岩体, 岩体本身的刚度和强度不足以提供足够的压力  $p$ 。如果不采取加固的话, 掌子面将发生很大挤出变形, 最终导致失稳。于是提出了在掌子面打设锚杆的方案, 通过锚杆和岩体的锚固粘结, 使掌子面前方的软弱地层得以预加固, 从而给待挖岩体的掌子面提供足够的压力  $p$ , 如图 4 所示。

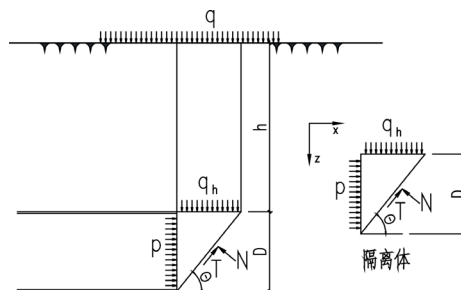


Figure 3. Sketch of the forces on the free body of the front rock  
图 3. 掌子面隔离体受力示意图

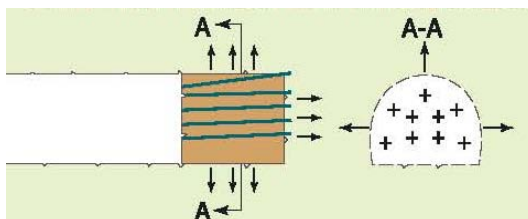


Figure 4. Sketch of the pre-consolidation of front core rock by bolts

图 4. 掌子面前方核心岩体锚杆超前加固示意图

总括而言，锚杆对掌子面进行超前加固的机理主要表现在如下方面：

1) 通过与稳定土层的锚固作用，使掌子面区域的土体受到拉力，以维持掌子面平衡所需的压力，如图 5 所示；

2) 通过注浆，使得锚杆和周围土层产生粘结作用，使得土层变得密实，改善了土体的力学性能，提高了其力学参数；内聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ 。设岩体的垂直应力为  $\sigma_v$ ，加固后超前核心土体的抗剪强度  $R_f$  得到提高：

$$R_f = c + \sigma_v \tan \varphi \quad (1)$$

3) 锚杆通过和土体的相互粘结以及锚杆的锚固作用，对掌子面前方土体施加约束作用，使得隧道掌子面及其前方的挤出变形得到抑制，进而使得掌子面后方的隧道洞周收敛变形得以减少，提高了隧道稳定性和安全度。

事实上，掌子面上核心土体上的锚杆对其前方土体的加固抗滑作用和边坡上的土钉作用是相同的。如图 5 所示。

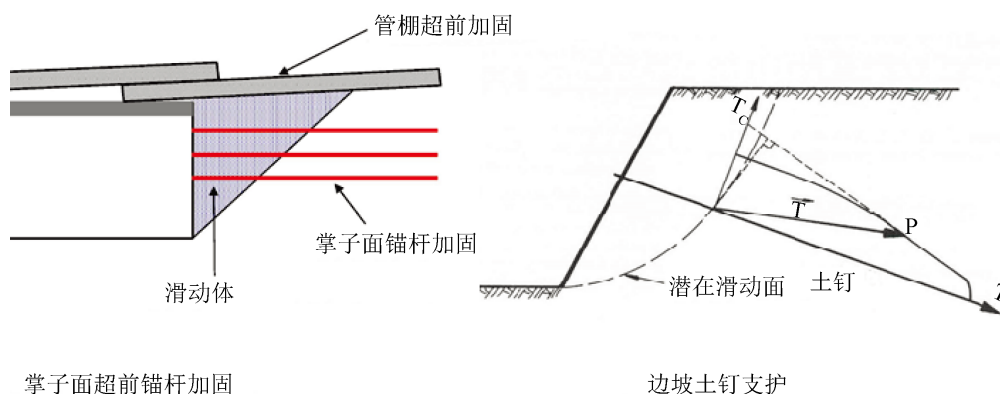


Figure 5. Mechanism of rock bolts in front core-rock of a tunnel vs. that of soil-nails of a slope

图 5. 掌子面前方核心岩体锚杆超前加固机理与边坡土钉加固机理比较示意图

### 3.2. 采用玻璃纤维锚杆进行超前加固的优点

作为对掌子面加固的锚杆，只要它能达到稳定掌子面的目的，减少掌子面的挤出变形，在力学上，就算满足了强度和变形的要求。但是对于隧道开挖用的临时锚杆，它还应满足便于后续施工的要求，不能给后续开挖增加难度和不便。传统的钢筋锚杆，虽然也可以达到稳定掌子面的目的，但是钢筋韧性很高，不易断裂，导致后续爆破和出渣效率低。而玻璃纤维锚杆正好具有这些优良特性。

试验表明[7]，玻璃纤维注浆锚杆具有以下特点：1) 抗剪和抗扭强度低，易于机械挖除。2) 杆体全

段锚固，锚注结合，在为杆体提供锚固力的同时也加固了锚杆周围岩体。3) 强度高、重量轻，玻璃纤维锚杆的抗拉强度可达到钢质锚杆的 1.5~2 倍；而其重量只为同种规格钢质锚杆的 1/4~1/5。

#### 4. 玻璃纤维锚杆预加固的有限元计算分析

掌子面及其前方核心岩体的纵向挤出变形、掌子面前方的预收敛变形和掌子面后方的收敛变形是掌子面稳定的重要判断指标。在设计阶段，确定玻璃纤维锚杆超前加固的相关参数是其重要内容。这些设计参数包括：锚杆密度；锚杆长度和锚杆搭接长度。

许多研究表明，锚杆的设计参数与掌子面挤出变形密切相关。针对新意法施工的各工况，采用三维有限元数值模拟方法，对各工况下隧道在开挖和支护阶段的受力变形特性进行计算分析，可以得到掌子面稳定情况下，锚杆参数和掌子面变形的相互关系，其结果可以作为确定设计参数的依据。

##### 4.1. 三维有限元数值建模

三维有限元数值分析的主要目的是确定锚杆密度、锚杆长度及锚杆的搭接长度，同时了解对应的隧道变形和围岩及衬砌支护的内力分布。针对本项目的计算分析，三维有限元计算软件采用 Z-Soil 软件。计算中，围岩采用莫尔 - 库伦模型，计算参数如表 1 所示；系统锚杆和超前锚杆、钢格栅钢架喷混凝土初始衬砌结构计算参数如表 2 所示。玻璃纤维锚杆采用杆单元，按线弹性模型，计算参数如表 3 所示。

莫尔 - 库伦模型的破坏准则表述为：

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \tag{2}$$

式中， $\tau$  —— 岩体抗剪强度(kPa)； $c$ 、 $\varphi$  —— 岩体粘聚力(kPa)和内摩擦角(°)； $\sigma$  —— 正应力(kPa)。

莫尔 - 库伦模型的屈服面函数表示为：

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

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， $\theta_\sigma$  —— 洛德角。

图 6 为玻璃纤维锚杆超前加固后进行全断面开挖时的三维有限元计算模型。

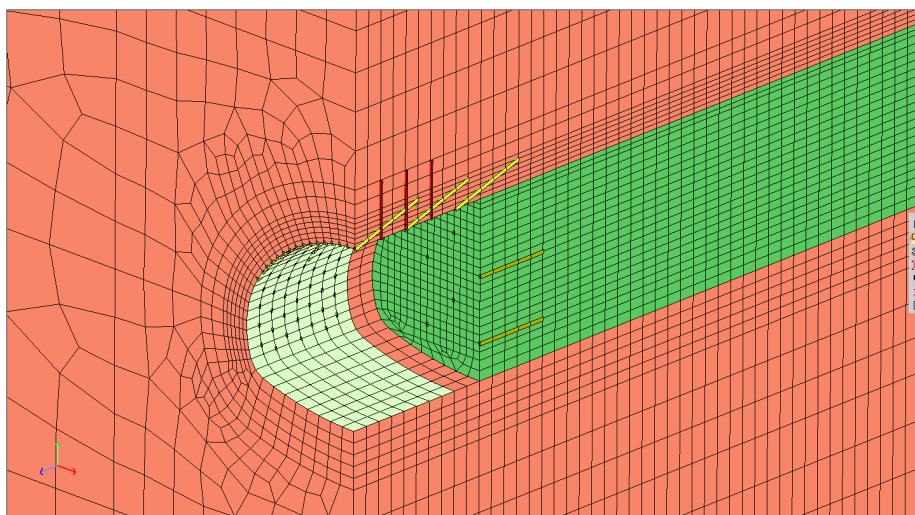


Figure 6. Model for 3D-FEM calculation

图 6. 三维有限元计算模型

计算比较了如下情形下隧道变形情况：掌子面无玻璃纤维锚杆超前加固和有玻璃纤维锚杆超前加固的三种工况。玻璃纤维锚杆加固后的三种工况是：1) 工况 1，毛洞开挖，即超前加固后但未安装初始支护；2) 工况 2，锚杆超前加固后 + 初始衬砌支护；3) 工况 3，初始衬砌后 + 玻璃纤维锚杆加固 + 下一循环超前核心岩体加固。

#### 4.2. 隧道掌子面稳定性和对应的变形控制标准

强度折减法是有限元分析掌子面整体稳定性的常用方法。这种方法在分析隧道掌子面稳定性安全系数和临界失稳坍方形态时，采用假定的掌子面稳定安全系数  $F$  去折减抗剪强度参数  $c$  和  $\varphi$ ，不断迭代计算直到其达到临界状态，此时的折减系数即  $1/F$ 。

对于隧道开挖时的掌子面稳定性，将计算不收敛作为判别临界状态的标准。折减后抗剪参数为：

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

式中： $F$ ——为折减系数； $c$ ——为围岩黏聚力； $\varphi$ ——为围岩内摩擦角； $c'$ ——按  $F$  值折减后的黏聚力； $\varphi'$ ——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，可以得到给定安全系数  $F$  时对应的掌子面水平挤出变形和隧道整体变形。

图 7 为采取强度折减系数法，计算得到的隧道开挖后隧道沿轴线方向的变形云图。该图表示整个隧道计算取安全系数为 1.4 时的轴向变形情况，此时掌子面中央的轴向变形最大，为 43.12 mm。

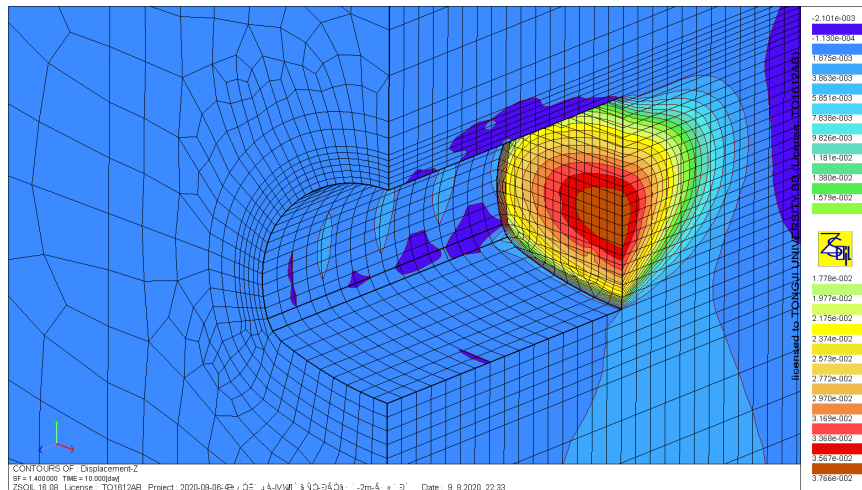


Figure 7. Cloud of Axial displacement of the tunnel, unit: m

图 7. 安全系数为 1.4 时隧道的轴向变形云图，单位：m

计算还得到同条件下不同安全系数时对应的掌子面最大挤出变形，如表 4。

Table 4. Safety factors vs. maximum extrusion of tunnel face

表 4. 掌子面稳定性安全系数和对应最大挤出变形

安全系数	1.60	1.50	1.40	1.30	1.20	1.10
挤出变形(mm)	62.71	51.18	43.12	37.66	25.45	18.33

从表 4 可以看到, 掌子面的最大挤出变形随着安全系数增大而增大, 原因是安全系数取得越大, 围岩力学参数折减得越多, 使得进入计算中的强度参数越低。参照现行《建筑边坡工程技术规范》(GB50330-2013)和《铁路隧道设计规范》(TB 10003-2016), 施工期间的隧道围岩稳定性安全系数取 1.30。经玻璃纤维锚杆预加固后, 本隧道取得安全系数 1.30 时, 对应的掌子面最大挤出变形为 37.66 mm。

### 4.3. 锚杆加固效果与隧道变形控制的关系

计算得到无纤维锚杆加固和有玻璃纤维锚杆加固的三工况下隧道变形。图 8 为上述四种情况下掌子面挤出变形沿隧道高度分布情况。从图中可以看出采用纤维锚杆加固时, 掌子面挤出变形比无纤维锚杆时减小达 50%。同时还看到, 随着纤维锚杆加固后的掌子面挤出变形随工况推进而有所发展。

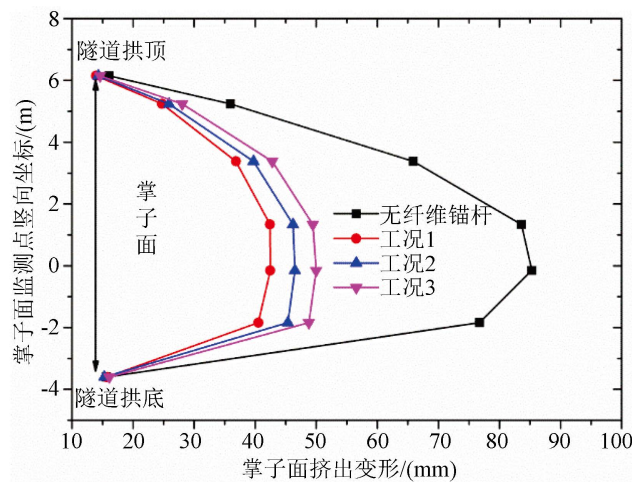


Figure 8. Extrusion Curves of tunnel workface for different cases  
图 8. 不同工况下掌子面的挤出变形分布曲线

图 9 和图 10 分别为上述四种工况下地表沉降和拱顶沉降分布曲线。从图 9 可以看出, 玻璃纤维锚杆超前加固后, 地表沉降明显减少; 从图 9 可以看出, 玻璃纤维锚杆超前加固后, 拱顶沉降明显减少, 而且掌子面前方及后方的拱顶沉降均有明显减少。

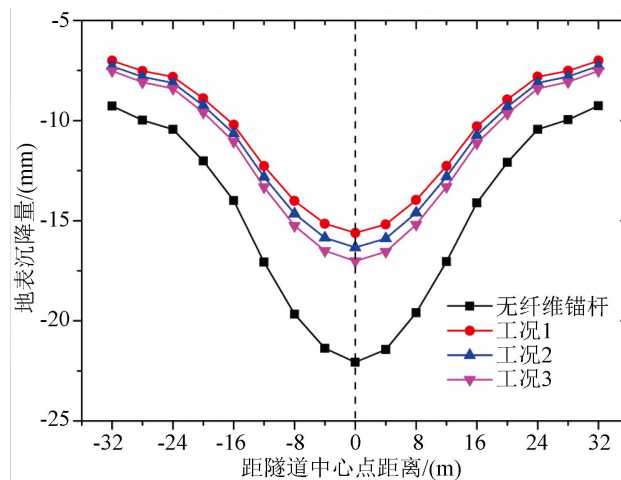


Figure 9. Settlement of ground surface for different cases  
图 9. 不同工况下地表沉降分布曲线



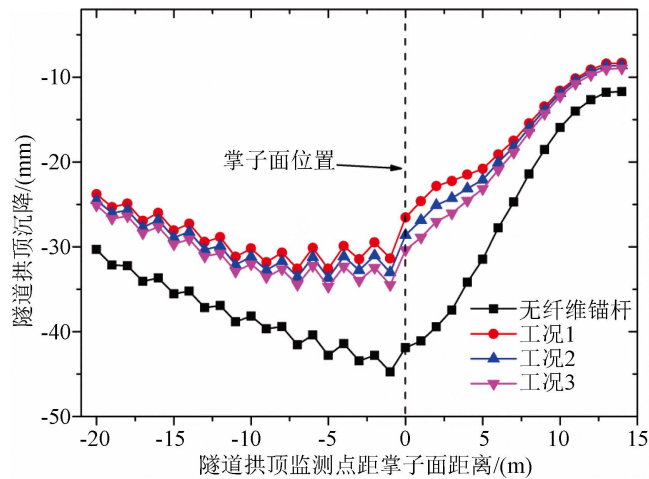


Figure 10. Settlement of tunnel crown for different cases  
图 10. 不同工况下隧道拱顶沉降分布曲线

#### 4.4. 锚杆加固密度与掌子面挤出变形的关系

计算表明，掌子面前方核心岩体采用玻璃纤维锚杆加固的密度与掌子面挤出变形控制有密切关系。图 11 为不同加固密度下掌子面挤出变形沿隧道高度的分布曲线。

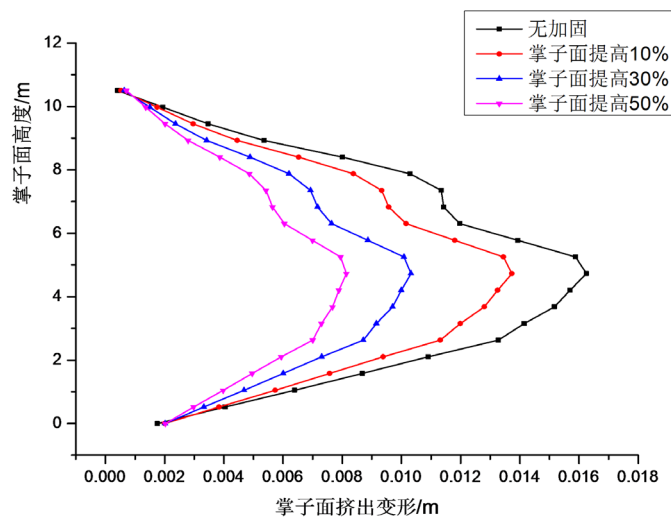


Figure 11. Extrusion Curves of tunnel workface for different distribution ratio of GFRP bolts  
图 11. 不同玻璃纤维锚杆密度下掌子面的挤出变形分布曲线

从图 11 可以看出，玻璃纤维锚杆越密，掌子面挤出变形越小。当锚杆加固后掌子面岩体强度提高 50% 时，掌子面的最大挤出变形比无锚杆加固时减少近一半。

#### 4.5. 锚杆长度与掌子面挤出变形的关系

锚杆长度关系到隧道土方开挖的施工组织。为了最大限度地减少锚杆打设次数，减少锚杆安装对隧道土方开挖的干扰，总是希望锚杆长度尽可能长，相邻循环的锚杆搭接长度尽可能短。因此需要了解锚杆长度与掌子面挤出变形的关系。图 12 为不同锚杆长度时，掌子面的挤出变形分布曲线。

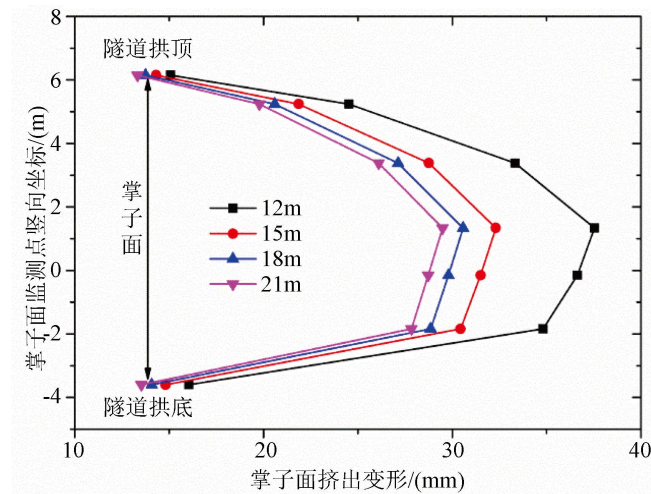


Figure 12. Extrusion Curves of tunnel workface vs. GFRP bolts' length

图 12. 玻璃纤维锚杆不同长度下掌子面的挤出变形分布曲线

从图 12 可以看出，锚杆长度为 15 m 时的掌子面挤出变形明显小于锚杆长度 12 m 时情况，而和锚杆长度为 18 m 及 21 m 时情况比较接近。这说明，锚杆长度大于 15 m 后，锚杆长度增加对隧道变形控制影响不大。因此奇坑隧道的锚杆长度采用 15 m，这是符合锚杆受力特点的。

#### 4.6. 前后循环的锚杆搭接长度的确定

前后循环的锚杆搭接长度必须确保上一循环打设的锚杆经开挖剩余长度仍具有足够的加固效果，可以满足掌子面变形控制的要求。图 13 为不同搭接长度下，掌子面的挤出变形分布曲线。

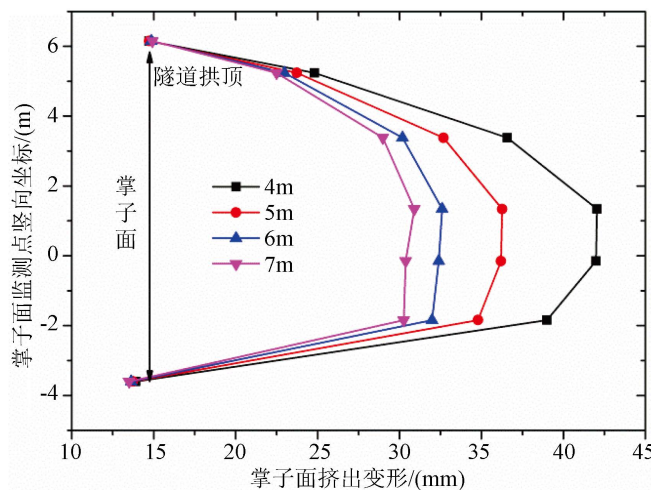


Figure 13. Extrusion Curves of tunnel workface vs. GFRP bolts' overlapping length

图 13. 玻璃纤维锚杆不同搭接长度下掌子面的挤出变形分布曲线

从图 13 可以看出，不同搭接长度下掌子面变形是不同的，搭接长度越大，掌子面挤出变形越小，锚杆搭接长度为 6 m 时。掌子面挤出变形明显小于搭接长度为 5 m 时情况，但较为接近搭接长度为 7 m 的情况。奇坑隧道的锚杆搭接长度建议为 6 m，同时建议根据现场监测信息实时调整。

### 5. 现场实测和有限元计算对比分析

奇坑隧道掌子面前方核心岩体采用玻璃纤维锚杆进行预加固后进行全断面开挖，加固参数如图 1 所示。掌子面及其前方核心岩体挤出变形测点布置图如图 14 所示。

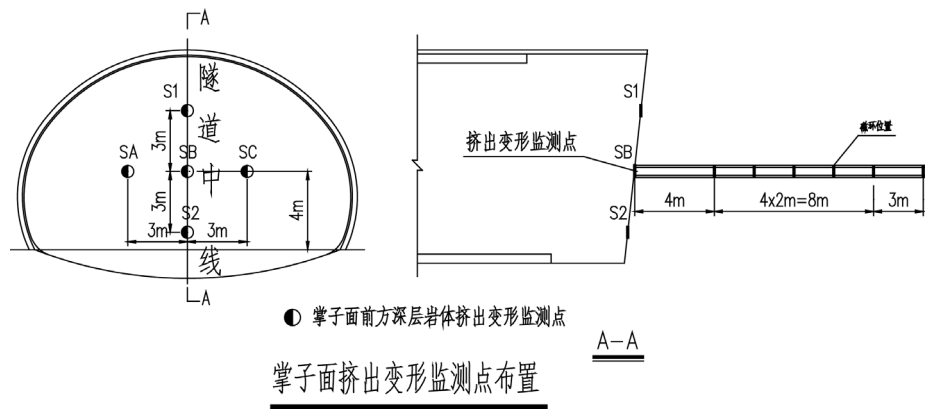


Figure 14. Layout of monitoring points for extrusion measurement  
 图 14. 掌子面挤出变形监测点布置图

#### 5.1. 掌子面挤出变形的计算值和实测值比较分析

现场量测得到掌子面的挤出变形，各测点的实测结果和对应有限元计算结果如表 5 所示。

Table 5. Comparison of extrusion of workface between FEM calculation and measurement (mm)  
 表 5. 掌子面挤出变形计算值和实测值比较(mm)

测点	SA	SB	SC	S1	S2
计算值(mm)	17.3	17.5	17.3	16.6	18.1
实测值(mm)	15.7	17.8	17.0	15.1	17.9

表 5 表明，无论计算值还是实测值，掌子面中央的挤出变形最大，然后逐渐向洞周衰减。从表 4 可以看出，计算值和实测值变化规律还是比较一致的。

#### 5.2. 掌子面前方核心岩体挤出变形的计算值和实测值比较分析

针对掌子面前方核心岩体的挤出变形，在隧道中央位置埋设了深层水平位移测点，以量测隧道开挖阶段深层土体的水平挤出变形，实测结果和有限元计算结果如表 6 所示。

Table 6. Comparison of extrusion of front rock between FEM calculation and measurement (mm)  
 表 6. 掌子面超前岩体挤出变形计算值和实测值(mm)

	测点距离掌子面距离(m)				
	0	4	6	8	10
计算值	17.5	5.6	1.8	0.5	0
实测值	17.8	6.3	2.5	0	0

表 6 表明，无论计算值还是实测值，掌子面超前岩体的挤出变形随其距离掌子面增大而减小。通过玻璃纤维锚杆对超前岩体的超前加固，抑制了待挖岩体的挤出变形，使得其挤出变形的加速衰减。从表

6 可以看到, 掌子面 6 m 以前的岩体几乎不受开挖面施工的影响, 也就是说开挖面的影响半径为 6 m, 其后的岩体可以认为是稳定地层, 可作为玻璃纤维锚杆的锚固区, 锚杆的搭接长度可按 6 m 设计。

## 6. 结论

1) 三维有限元数值模拟计算表明, 掌子面预加固的锚杆加固参数和掌子面挤出变形密切相关, 锚杆布置越密、锚固长度越长, 掌子面变形越小。锚杆搭接长度根据锚杆锚固长度确定。

2) 三维有限元数值模拟计算还表明, 掌子面稳定性系数的设定和对应的最大挤出变形密切相关, 安全系数越高, 变形越小。通常安全系数设定为 1.3 可满足施工期间要求。

3) 实测结果和有限元计算结果比较分析表明, 有限元计算的结果和实测结果反映的规律一致, 数值接近, 表明计算所选模型和参数是合理的。

## 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] Lunardi, P. (2008) Design and Construction of Tunnels—Analysis of Controlled Deformation in Rock and Soils (ADECO-RS). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [2] 杨汉勇. 武广客运专线浏阳河隧道综合施工技术[J]. 铁道标准设计, 2009(S1): 102-105.
- [3] 王克忠, 朱海斌, 孔令民, 梁其东, 张海军. 新意法在野猪山隧道施工中的应用研究[J]. 浙江工业大学学报, 2017, 45(3): 237-242.
- [4] 李世才, 石光荣, 伍军. 桃树坪隧道富水未成岩粉细砂预加固施工技术[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(2): 116-119.
- [5] 张云海, 蓝柳海, 周晨. 新意法在卵形大断面富水全风化凝灰岩隧道中的应用[J]. 公路, 2017(7): 310-316.
- [6] Horn, M. (1961) Horizontal Earth Pressure on Perpendicular Tunnel Face. *Hungarian National Conference of the Foundation Engineer Industry*, Budapest, 1961, 7-16.
- [7] 高战详. 隧道围岩玻璃纤维锚杆锚固性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.