

玻璃纤维锚杆注浆加固掌子面效果研究

孙会想, 沈才华

(河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 通过 abaqus 有限元方法模拟长江中下游地层和地质条件下破碎围岩浅埋隧道开挖过程, 对加筋玻璃纤维锚杆注浆技术加固掌子面前后分别建立模型并进行对比分析强化结果, 研究表明: 玻璃纤维锚杆注浆加固能较大程度提高掌子面前方核心岩土体的黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、弹性模量 E 和抗剪强度 τ , 加固后地表沉降减少了约 20%, 拱顶沉降量减少 20%, 掌子面纵向位移约 30%, 水平收敛减小 10%, 有效提高长江中下游地层和地质条件下破碎围岩浅埋隧道掌子面及其周围围岩的稳定性。

关键词: 玻璃纤维锚杆; 掌子面加固; 围岩稳定性; abaqus; 数值模拟

中图分类号: U455.48⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)04—0131—05

Research on Strengthening Effect of Grouting Glass Fiber Bolts for Tunnel Face

SUN Hui-xiang, SHEN Cai-hua

(College of Civil and Traffic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Here, by using abaqus finite element method to simulate a broken shallow-buried tunnel's excavation process in the geological conditions of the middle and lower area of Yangtze River, the models are set up to research the strengthening results respectively. The research results show that the grouting glass fiber bolt consolidation method could largely improve the tunnel face's core body in the cohesion force c , internal friction angle φ , elastic modulus E and shear strength τ after strengthening, the ground surface settlement reduces by about 20%, the vault settlement reduces by 20%, the longitudinal displacement reduces by about 30%, and the horizontal convergence reduces by 10%, all these as mentioned above could effectively improve the stability of surrounding rocks of the shallow broken tunnel face in the geological conditions of the middle and lower area of Yangtze River.

Keywords: glass fiber anchor; tunnel heading face strengthening; surrounding rock stability; abaqus; numerical simulation

0 引言

在我国中,许多隧道是软弱围岩地段的大断面浅埋隧道,这类隧道在施工过程中经常发生隧道塌方、冒顶等事故,给隧道建设带来很大困扰。为了避免隧道变形过大发生事故,在软弱围岩大断面浅埋隧道施工过程中,往往采用台阶、CD、CRD、双侧壁导坑等工法施工,但是这些施工方法施工程序复杂、材料浪费严重、工期缓慢,难以满足当前隧道建设的迫切需要。而由于预加固大断面隧道施工工法能较好的解决隧道围岩软弱、掌子面容易失稳等地段的安

全快速施工等难题,逐渐被国内外学者接受和重视。

传统的正面预加固措施大多是通过钢锚杆以及喷射混凝土对破碎、软弱围岩地质条件下的掌子面前方的“待挖核心体”预加固,但是核心土体加固后还要进行开挖,而钢材的切割不仅会增加隧道建设的投入,也大大降低了隧道全断面掘进的效率。近年来为了解决上述问题,国外学者 Chungsik Yoo^[1], Peila D^[2], Chambon P^[3]等提出利用全粘结型易切削锚杆对隧道掌子面进行超前加固的思想,它的主要原理是采用注浆易切削锚杆对隧道掌子面前方的“待挖核心体”进行预加固,以提高掌子核心岩土体

的黏聚力 c 、内摩擦角 φ 以及弹性模量 E 来控制其变形,从而保证隧道掌子面的稳定^[1-4]。但在我国仍是一项新技术,在大断面隧道中,至今没有应用的先例。为了阐述这种施工方法的基本应用原理,中铁西南科学研究院梅志荣等^[5-7]在其研究论文中介绍了隧道全断面预加固技术的一些基本概念,总结了目前高速铁路大断面软弱围岩或土质隧道施工中存在的问题。但是全粘结型易切削锚杆对隧道掌子面进行超前加固作为一种新的技术,加固前后隧道拱顶位移,隧道水平收敛和地表沉降效果变化规律研究还不十分透彻,本文运用 abaqus 有限元软

件,通过长江下游破碎丘陵地质条件下隧道开挖过程三维动态数值模拟,对掌子面开挖中玻璃纤维锚杆注浆加固机理和效果进行研究。

1 作用机理和模型的建立

1.1 玻璃纤维锚杆注浆加固施工过程

为了清楚地理解玻璃纤维锚杆注浆加固机理和影响,在三维数值模拟过程中真实地反映加固对掌子面稳定性的影响,有必要对加固施工过程有一定的了解,施工工艺如图 1。

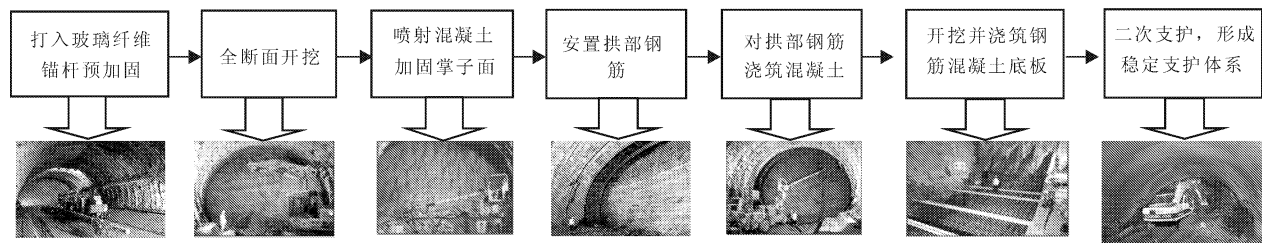


图 1 加固施工过程

在隧道掌子面开挖前,对核心土体打入玻璃纤维锚杆并进行注浆加固以增强围岩整体稳定性,然后全断面掘进机械对掌子面进行全断面开挖,同时喷浆加固开挖面,待掌子面开挖完成后,及时安放拱部钢筋并浇筑混凝土,浇筑底板,最后对隧道进行二次衬砌,形成稳定支护体系。

可以看出玻璃纤维锚杆注浆加固掌子面之后,围岩整体稳定性的提高,使得隧道开挖的过程机械化程度进一步提高,大大提高了隧道掘进效率。

1.2 玻璃纤维锚杆注浆加固原理^[8-9]

在隧道掌子面加固后玻璃纤维锚杆既受到轴向力的影响,又受到剪力作用,所以锚杆对核心土体的强化,一方面通过轴向受力改变围岩的受力状态,使核心土体由二向应力状态转变为三向应力状态,提高核心土体的强度;另一方面,通过与锚固体的横向联结,承受剪力及弯矩,提高核心土体的力学参数,达到提高锚固体强度的目的。同时通过中空玻璃纤维锚杆往孔中灌注砂浆,砂浆压力使部分浆液以一定的扩散半径顺着岩土体节理裂隙或孔隙渗透扩散,布置合理的锚杆孔距将使注浆扩散范围相互重叠,形成网状胶结体,从而大大提高岩土体的强度和刚度,即岩土体的抗压强度、内摩擦角、黏聚力有较大的提高。由于玻璃纤维锚杆沿杆体纵向具有较强的抗拉强度,使其可以作为加筋材料,同时杆体横向较小的抗剪强度使其具有易切削性,并且其价格低

廉,有利于全断面机械开挖。

掌子面玻璃纤维锚杆注浆加固后效果^[10]如图 2 所示。

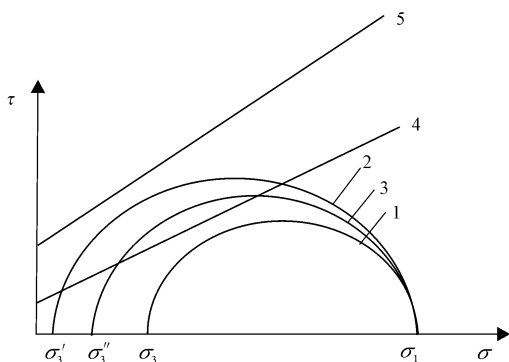


图 2 加固效果示意图

注:曲线 1、2、3 分别为:隧道掌子面围岩开挖前应力状态、隧道掌子面未超前加固围岩开挖应力状态、隧道掌子面全粘结型玻璃纤维锚杆注浆加固后围岩开挖应力状态,曲线 4、5 分别为全粘结型玻璃纤维锚杆注浆加固前后掌子面强度。

通过图 2 我们可以看出:

(1) 开挖前,对隧道掌子面注浆加固,加固后围岩强度提高,从图中曲线 4 提高到曲线 5 代表的围岩强度。注浆加固主要提高了围岩的黏聚力及内摩擦角,同时围岩的变形系数、强度均有不同程度的提高。

(2) 假设围岩最大主应力不变。围岩应力状态由于隧道开挖发生变化,主要表现为最小主应力减

小。围岩应力状态从曲线 1 变为曲线 2。此时,如果没有注浆加固,围岩就有可能发生塑性失稳。注浆锚杆的作用主要表现在防止最小主应力的减小,使得围岩最小主应力由 σ'_3 增大到 σ''_3 ,从而提高了隧道开挖后围岩稳定。

1.3 加固前后围岩物理及力学参数量化

岩土体通过玻璃纤维锚杆加固后各等效参数计算公式^[11]如下:

$$c_i = a_1 c_0 \quad (1)$$

$$R_{bi} = a_2 R_{b0} \quad (2)$$

$$\varphi_i = 2(\arctg \frac{R_{bi}}{2c_i} - 45^\circ) \quad (3)$$

$$\tau_i = R_{bi} \text{tg} \varphi_i + c_i \quad (4)$$

式中: c_0 、 c_i 分别为岩土加固前后的黏聚力; φ_i 为加固前后内摩擦角; R_{b0} 、 R_{b1} 分别为加固前后单轴抗压强度; a_1 、 a_2 分别表示等效黏聚力和单轴抗压强度的增大系数。

等效弹性模量 E_S 计算方法^[11] 如下所示(见图 3)。

$$E_S \cdot (A_1 + A_2) \cdot \Delta L = (E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2) \cdot$$

$$\Delta L \Rightarrow E_S = \frac{E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2}{A_1 + A_2} \quad (5)$$

式中: E_1 、 A_1 分别为围岩弹性模量和单个锚杆等效作用面积; E_2 、 A_2 分别为玻璃纤维锚杆的弹性模量和截面积。

隧道模型地质参数,取 II、III 级围岩、圆砾、残积粉质黏土、强风化砾岩、中等风化砾岩、强风化板岩等为主要岩体,按照《公路隧道设计规范》(JTG D70-2004)^[12]和《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086-2001)^[13]相应围岩,喷射混凝土取参数如表 1。

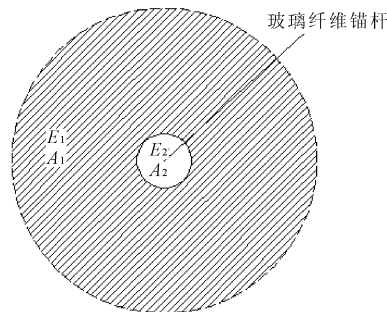


图 3 等效弹性模量计算图

表 1 围岩及喷射混凝土参数表

项目	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	变形模量 E /GPa	泊松比 μ	内摩擦角 φ /($^\circ$)	粘聚力 c /MPa
II 围岩	25 ~ 27	20 ~ 33	0.20 ~ 0.25	50 ~ 60	1.5 ~ 2.1
III 围岩	23 ~ 25	6 ~ 20	0.25 ~ 0.30	39 ~ 50	0.7 ~ 1.5
C30 喷射混凝土	24	21	0.20	50	3.0

玻璃纤维锚杆直径取 0.06 m,锚杆长度取 10 m,锚杆抗剪强度取 30 MPa,抗拉强度为 210 MPa,锚杆布置间距保证在注浆扩散半径范围的 2 倍,C30 混凝土,将上述各数据带入计算公式可分析加固前后岩土体的力学指标变化如表 2。

表 2 掌子面力学指标

项目	粘聚力 c /MPa	摩擦角 φ /($^\circ$)	抗剪强度 τ /MPa	弹性模量 E /GPa
无加固	0.39	32	1.52	20
玻璃纤维锚杆加固后	0.52	55	3.03	29
加固效果(提高)	25%	57.14%	105.92%	45%

1.4 模型的建立

建立的模型采用 Mohr-Coulomb 本构模型,利用 ABAQUS 中提供的初始应力状态的建立过程,单元的死活功能和分步骤求解的方式来模拟隧道开挖过

程。

模型尺寸:隧洞按照开挖尺寸半径取 12 m,隧洞左右各 40 m,模型横向尺寸共 40 m;隧洞以下 40 m,上部直到地表,地表尺寸按设计图上标示的埋深,地面高程按地形图上等高线进行测算,隧道围岩按均质弹塑性材料考虑。为准确求解,在隧洞附近加密单元划分,单元类型为 Quad 四边形。尽量采用映射方法划分网格(见图 4)。计算时仅考虑自重应力,自重应力场就是隧道围岩计算模型的边界条件,除上部为垂直荷载外,侧面和底面为法向约束边界,其中模型一为纯开挖共分为六步,分别为形成初始应力场、第一步应力释放、开挖第一步、第二步应力释放、开挖第二步、第三步应力释放、开挖第三步。模型二为模拟掌子面预加固后开挖,在模型一应力释放后进行掌子面玻璃纤维锚杆注浆锚固,模拟破碎 III 级围岩浅埋隧道掌子面加固效果。

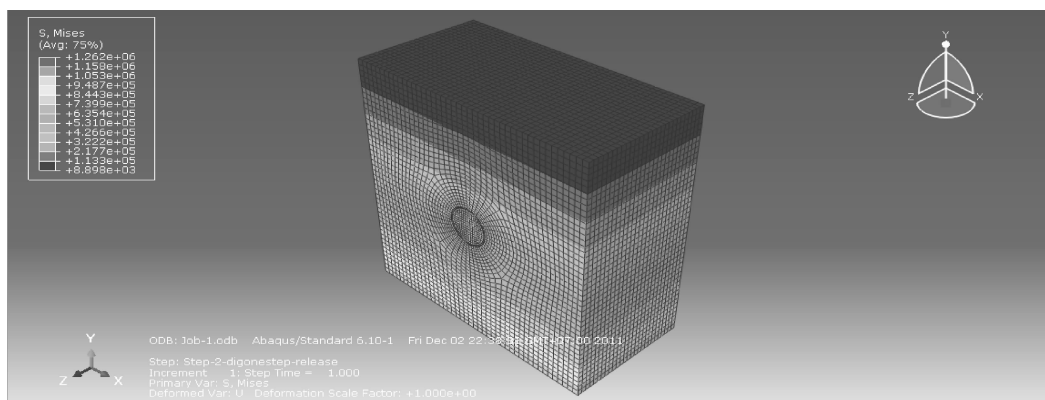


图 4 建立的有限元模型

2 结果及分析

掌子面玻璃纤维锚杆喷浆锚加固效果可以通过对掌子面加固前后隧道开挖引起的地表沉降,隧道水平收敛,拱顶沉降量以及纵向位移变化控制来显现。如图 5~图 8 所示。

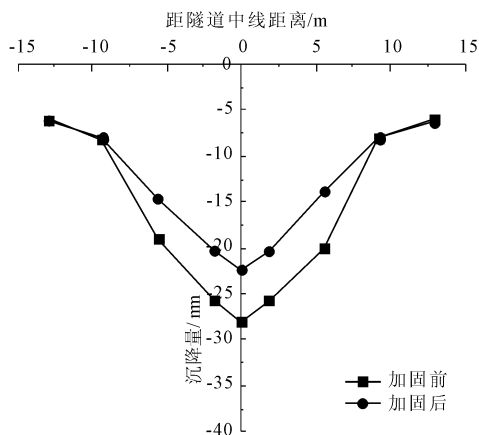


图 5 横向地表沉降变化曲线

图 5 为距离初始开挖面 3 m 横断面上各点开挖前后沉降量变化曲线,从图中看出在距离隧道开挖线 10 m 以外,地表沉降受隧道掌子面加固影响不大,加固前后沉降均在 8 mm 左右,而在距隧道中心线 6 m 范围内(以开挖面中心线一点为例)地表沉降量减少了 11 mm,减小幅度约 20%,应为浆体进入周围岩体裂缝和纹理,提高了围岩整体刚度,从而大大减少了地表沉降,图 6 可以看出玻璃纤维锚杆喷浆锚加固前掌子面纵向位移为 46 mm,加固后纵向位移变为 32 mm,减小幅度约 30%,大大提高了在隧道开挖过程中掌子面区域稳定性,能很好地减少发生坍塌的概率,提高施工的安全性。

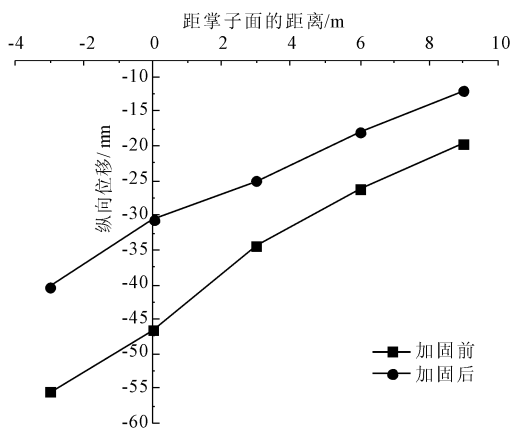


图 6 纵向位移变化曲线图

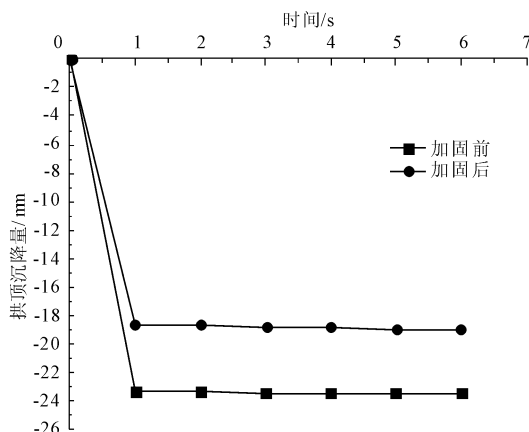


图 7 拱顶沉降历时曲线

图 7 为距离初始开挖面 3 m 拱顶的历时曲线,我们可以看出掌子面玻璃纤维注浆加固对于控制拱顶沉降有较好的效果(拱顶沉降量在加固前为 23 mm,加固后沉降量变为 18 mm,减小了 5 mm,减小幅度约为 22%),应该为玻璃纤维锚杆注浆后,浆体通过纹理裂缝进入围岩起到一定的黏聚作用,同时浆体凝固后对岩体起到一定的挤密作用,从而增大抗剪强度,提高了围岩抗变形能力。通过图 8 可以看

出,在0~1步间,水平收敛值最大(2.5 mm左右),此过程为形成重力场和开挖第一步的阶段,由于在此段时间之前没有加固措施,应力释放最大,导致水平位移较大。在第二步开挖时,由于拱部衬砌收敛值不断减小至5步趋于稳定,通过加固前后曲线变化我们可以看出,掌子面玻璃纤维锚杆注浆加固对于水平变形有一定加强,但幅度不是很大(加固前为5.8 mm,而加固后变为5.2 mm,减小0.6 mm,减小幅度为10%左右),因此在掌子面开挖后,应及时架设拱部钢筋并浇筑以控制水平位移过大。

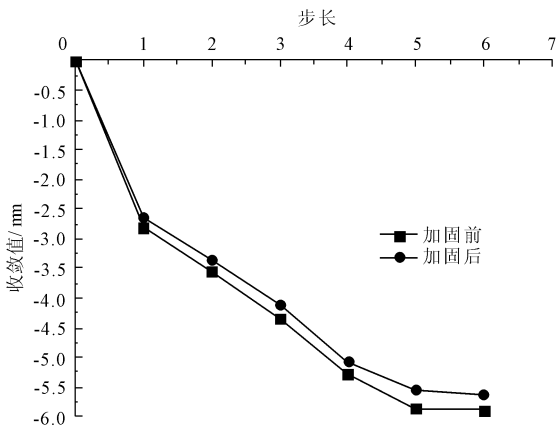


图8 水平收敛曲线图

3 结论

通过理论计算和数值模拟得出以下结论:

(1) 采用玻璃纤维锚杆加固掌子面后,待挖核心土体的粘聚力 c ,内摩擦角 φ ,抗剪强度 τ 以及弹性模量 E 都有很大程度的提高,尤其是抗剪强度增大近两倍,加固后的待挖核心土体稳定性大大提高,为全断面机械开挖提供很有利条件。

(2) 拱顶和地表沉降减小(20%左右),减小对周围环境的影响,减少对穿越城市繁华地段隧道施工对周围的扰动,洞内水平收敛相对于掌子面纵向位移减少较小,在掌子面开挖后,应及时架设拱部钢筋并浇筑以控制水平位移过大。

(3) 掌子面纵向位移大幅减小(30%以上),能充分发挥玻璃纤维的抗拉性能,有效控制掌子面开挖过程中坍塌发生,提高了施工安全性,同时材料来

源广泛,制作较为简单,对环境污染较小。

(4) 我国用于隧道钻孔的机械还很少,钻孔质量和速度都还有待提高,同时隧道工程作为地下工程,具有地下工程共有的时空效应,但目前隧道工程开挖过程中时空效应对锚固效果影响研究较少,仍是值得探究之处。

参考文献:

- [1] Yoo C. Finite-element analysis of tunnel face reinforced by longitudinal pipes[J]. Computers and Geotechnics, 2002, 29(1): 73-94.
- [2] Peila D, Oreste P P, Rabajoli G, et al. The pretunnel method, a new italian technology for full-face tunnel excavation: a numerical approach to design [J]. Tunnel Underground Space Technology, 1995, 10(3): 367-374.
- [3] Chambon P, Corté J F. Shallow tunnels in cohesionless soil: stability of tunnel face[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(7): 1148-1165.
- [4] Lee K M, Rowe R K. Finite element modeling of the three-dimensional ground deformations due to tunneling in soft cohesive soils[J]. Computers and Geotechnics, 1990, 10(2): 87-109.
- [5] 梅志荣,陈涛.高速铁路隧道全断面预加固技术的应用研究[J].隧道建设,2008,28(5):542-547.
- [6] 陈涛,梅志荣.隧道易切削锚杆全断面预加固的三维数值模拟[J].现代隧道技术,2008,45(5):22-27.
- [7] 陈涛,梅志荣,李传富.隧道玻璃纤维锚杆全断面预加固技术的应用研究[C]//中国土木工程学会第十三届年会暨隧道及地下工程分会第十五届年会论文集.北京:同济大学出版社,2008:226-231.
- [8] 吉小明,石明霞.浅埋暗挖隧道围岩预加固机理及稳定性分析[J].现代隧道技术,2008,(S1):238-243.
- [9] 陶龙光,侯公羽.超前锚杆预支护机理的力学模型研究[J].岩石力学与工程学报,1996,15(3):242-249.
- [10] 旷文涛.超前预加固大断面隧道围岩稳定性影响因素研究[D].重庆:西南交通大学,2010:246-247.
- [11] 原国家冶金工业局.GB 50086—2001.锚杆喷射混凝土支护技术规范[S].北京:中国计划出版社,2001.
- [12] 重庆交通科研设计院.JTGD70—2004.公路隧道设计规范[S].北京:人民交通出版社,2004.
- [13] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国质量监督检验检疫总局.GB50086—2001.锚杆喷射混凝土支护技术规范[S].北京:国家计划出版社,2001.