

高压旋喷加固在越江隧道中的协同效应研究

豆世康

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 针对浅埋大跨度越江隧道穿越软弱地层时面临的围岩稳定性差、地下水渗流路径复杂等工程难题,以赣州蓉江四路越江隧道为研究对象,系统探讨高压旋喷桩(jet grouting pile, JGP)的复合加固机理。基于FLAC3D三维弹塑性数值模型,构建考虑浆-土相互作用的本构关系,对比分析加固前后围岩应力场-位移场的演化规律。结果表明:JGP通过形成水泥-土骨架结构使加固区黏聚力提升3.8倍,内摩擦角提高42.7%,显著改善地层抗剪强度;现场监测数据与数值模拟的耦合分析显示,拱顶沉降量由110mm降至19mm,降幅达82.7%,验证了“承载拱-隔水层”协同作用机制。研究成果为富水软弱地层隧道加固设计提供了定量化理论依据。

关键词: 高压旋喷桩;流固耦合;本构模型修正;承载拱效应;瑞雷波速反演

中图分类号:

文献标志码:

文章编号: 1009-7716(2026)02-0306-04

Research on Synergistic Effect of High-Pressure Jet Grouting Reinforcement in Cross-River Tunnels

DOU Shikang

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: In response to the engineering challenges faced by shallow buried long-span cross-river tunnels crossing weak strata, such as poor rock stability and complex groundwater seepage paths, taking the Rongjiang Fourth Road Cross-river Tunnel in Ganzhou as the research object, the composite reinforcement mechanism of high-pressure jet growing pile (JGP) is systematically explored. Based on the FLAC3D three-dimensional elastoplastic numerical model, a constitutive relationship considering the interaction between slurry and soil is constructed, and the evolution law of the stress field - displacement field of the surrounding rock before and after reinforcement is compared and analyzed. The research results show that JGP enhances the cohesion of the reinforced zone by 3.8 times and increases the internal friction angle by 42.7% by forming a cement-soil skeleton structure, significantly improving the shear strength of the formation. The coupling analysis of on-site monitoring data and numerical simulation shows that the settlement of the arch crown has decreased from 110mm to 19mm, a decrease of 82.7%, which verifies the synergistic mechanism of the “bearing arch - waterproof layer”. The research results provide a quantitative theoretical basis for the reinforcement design of tunnels in water-rich and weak strata.

Keywords: high-pressure rotary jet grouting pile; fluid-structure coupling; revision of constitutive model; bearing arch effect; Rayleigh wave velocity inversion

0 引言

浅埋隧道穿越软弱地层时易引发地表沉降超限和突水涌砂灾害^[1]。传统注浆技术与高压旋喷相比,存在渗透不均、耐久性不足等问题,且强度低、透水性强(见表1)等,而高压旋喷桩通过机械-化学耦合作用形成连续加固体^[2],兼具结构强化与水力屏

障双重功能。

表1 加固方式强度对比

加固方式	渗透系数/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	抗压强度/MPa	施工扰动
普通注浆	$10^{-5}\sim 10^{-7}$	0.5~1.2	高
旋喷桩	$<10^{-7}$	1.5~3.0	低

注:本表根据本工程试验实测整理。

现有研究多关注JGP单桩承载特性,对其在隧道围岩中的空间协同效应研究不足。本文创新性提出“等效复合层”概念模型,通过修正Mohr-Coulomb准则表征加固区力学行为,旨在系统揭示JGP在隧道围岩加固中的“承载拱-隔水层”空间协同作用机制,为类似工程提供借鉴。

收稿日期: 2025-08-28

基金项目: 上海市政总院科研项目“软弱互层超浅埋小净距大断面穿江隧道安全建造关键技术研究”(K2019K168)

作者简介: 豆世康(1978—),男,硕士,高级工程师,从事隧道及地下工程设计、研究及咨询工作。

1 蓉江四路越江隧道概况

赣州蓉江四路越江隧道穿越章江,隧道长 1 745 m, 矿山法暗挖段长 786 m。隧道为双向双洞六车道隧道^[1],采用小净距+分离式设计,隧道相邻两侧结构外边缘净距约 4.0~20.0 m。隧道主要穿越第四系松散覆盖层(包括杂填土、素填土、粉砂、细砂、圆砾、中砂)及下伏白垩系强-中风化泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩。如图 1 所示。隧道暗挖段拱顶覆岩厚度较薄地段进行洞顶地表加固,加固深度至中风化岩面下,加固范围均为开挖边线外扩 8 m。加固采用高压旋喷满堂加固,加固范围^[2],西岸长度 159 m,东岸长度 311 m。蓉江四路越江隧道主体段距章江江底距离为 10 m,两条大断面隧道(北线、南线)在江底位置开挖施工将显著地改变河床下的水文地质边界条件,隧道地区地质条件复杂,地层中存在松散、破碎岩体,隧道底板高程远低于章江水位,隧道掘进施工过程中洞内的抽排水可能导致章江水体由河床底部中砂、圆砾形成的导水通道向洞内无限补给,对围岩稳定和施工安全构成双重威胁。因此,设计采用地表高压旋喷满堂加固,目标兼具提升地层力学性能(承载拱效应)与阻断水力联系(隔水层效应)。

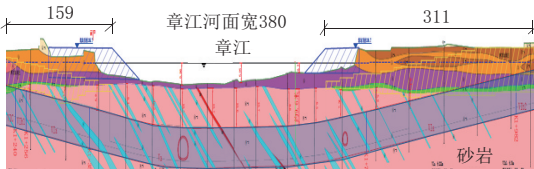


图 1 隧道工程地质纵断面

2 模型构建

基于钻孔 CT 和渗透试验获取地层:圆砾层渗透系数 $k=3.2\times10^{-3}$ cm/s,强风化泥质粉砂岩崩解率 $\eta=28.6\%$,地下水位波动幅值 $\Delta h=2.3$ m/d。

通过数值模拟软件,建立三维流固耦合模型如图 2、图 3 所示,基于 FLAC3D 平台构建精细三维模型,重点考虑 JGP 加固区[采用修正 MC 本构,考虑硬化行为,其参数通过试验确定,表现为更高的黏聚力(c)和可变化的摩擦角(φ)]与原状土体的相互作用及分步开挖效应。根据地勘报告及计算经验,CD 法施工中初期支护内钢架按抗弯刚度等效为相应厚度的喷射混凝土^[3]。分析计算结果如图 4~图 7 所示,充分模拟了原岩状态下施工各个工序开挖的围岩应力及结构受力状态。

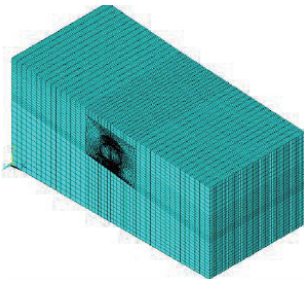


图 2 现场数值模型单元划分

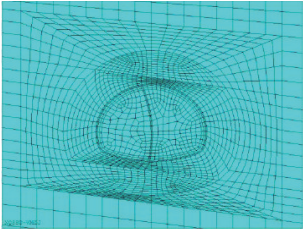


图 3 数值模型单元划分

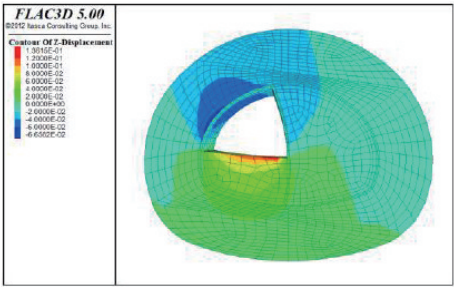


图 4 左上导洞开挖后围岩位移分布

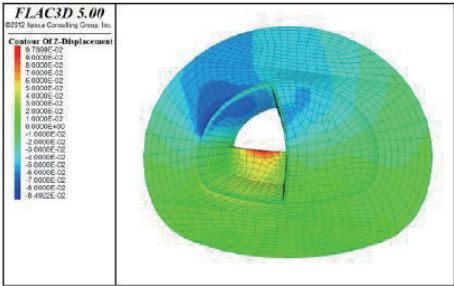


图 5 左下台阶开挖后围岩位移分布

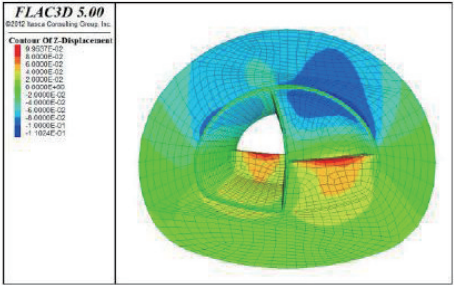


图 6 右上台阶开挖后围岩位移分布

3 加固机理分析

3.1 强度提升效应

(1)三轴试验应力-应变曲线:采用 GDS 动态三轴系统,围压设定为 100、200、300 kPa 三组工况。加

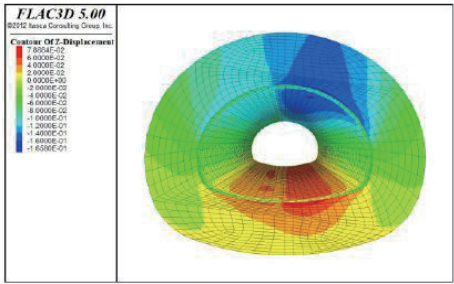


图7 下台阶开挖后围岩位移分布

固土体呈现显著应变硬化特征,临界偏应力较原状土提高 248%~315%。

(2)SEM 微观结构(5 000 倍率):可见水泥水化产物(C-S-H 凝胶)包裹砂粒形成空间网格结构,孔隙率由 32.7% 降至 18.4%(压汞法测量)。

(3)Drucker-Prager 准则拟合:通过最小二乘法优化得到强度参数,拟合优度 $R^2=0.96$,证实加固符合广义剪胀理论。

三轴试验显示,JGP 加固体应力-应变曲线呈现明显硬化特征,峰值强度较原状土提高 4.1 倍,满足 Drucker-Prager 屈服准则:

$$\sigma c = \frac{2c \times \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

式中:加固后 $c=85 \text{ kPa}$, $\varphi=32^\circ$ 。

3.2 水力屏障效应

(1)通渗透系数演化曲线:采用变水头渗透仪测得 JGP 加固体 $k=3.7 \times 10^{-8} \text{ m/s}$,较原状圆砾层($k=2.1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$)降低 4 个数量级,满足达西流-非达西流转变临界梯度($i_c=12.6$)。

(2)三维渗流场模拟:采用 TOUGH2 软件进行地下水运移模拟,加固后章江水体补给量由 $4.3 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 降至 $0.17 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 。

(3)孔隙连通性 CT 扫描:加固区孔隙喉道直径分布峰值从 $120 \text{ }\mu\text{m}$ 移动至 $35 \text{ }\mu\text{m}$,形成逾渗阈值限制。

$$v = \begin{cases} k \frac{\Delta h}{L} & (\Delta h/L \leq i_c) \\ kc \left(\frac{\Delta h}{L} \right)^n & (\Delta h/L > i_c) \end{cases}$$

式中: v 通常表示流速或渗透速度,单位如 m/s ; Δh 为水头差或势能差,单位如 m ; L 为流动路径长度,单位如 m ; $\Delta h/L$ 为水力梯度(无量纲或表示坡度); k 为线性条件下的渗透系数或比例常数(单位与 v 一致,如 m/s); i_c 为临界梯度,当梯度超过此值时行为变化(无量纲); kc 为非线性条件下的比例常数(单位取决于 n ,如 m/s); n 为指数,表示非线性程度(无量纲),

$n=0.82$ (原状土), $n=0.43$ (加固土),表明高水头下加固体呈现更强的非线性能量耗散。加固区渗透系数降低 2 个数量级,有效阻断章江水体与隧道的水力联系。

4 现场验证与误差分析

高压旋喷注浆加固的使用,对于土体物理力学参数具有明显提高作用,尤其是 C (黏聚力)、 φ (内摩擦角)值。隧道开挖进洞时,洞顶加固已施工完成且达到养护时间,现场土层及强风化泥质粉砂岩加固照片如图 8 所示,强风化泥质粉砂岩强度低但浆液渗透性很低,高压旋喷浆液仅填充了钻孔范围,由于浆液强度比强风化粉砂岩高,从整个地层角度出发,达到加固强风化泥质粉砂岩地层的作用,地层整体 C 、 φ 、 E 均会明显提高,因此泥质粉砂岩的膨胀性及崩解性均有所降低。根据地基承载力与无损检测瑞雷波速有较好的相关性,即波速越高,相应承载力越强,反映的介质层密实度或固结程度越高。采用无损检测瑞雷面波法现场进行物探,高压旋喷加固前后现场检测结果详见图 9、图 10。依据无损探测结果可评判经过高压旋喷处理的地层波速提升明显,承载能力增强,密实度提高,达到了预期加固效果^[4]。



图8 现场粉砂岩高压旋喷加固后洞外/洞内照片

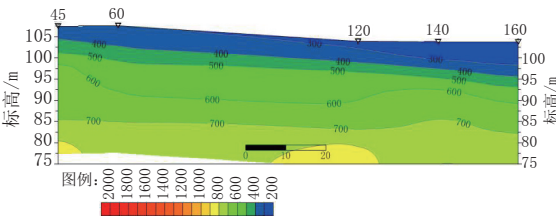


图9 洞顶加固前瑞丽面波波速剖面

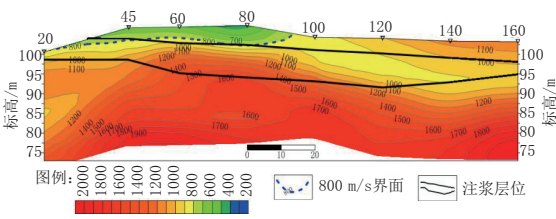


图10 洞顶加固后瑞丽面波波速剖面

通过原始地层的模拟计算与现场进行高压旋喷注浆加固实测对比结果,如图 11 左侧可以看出,明

显地层加固后拱顶沉降变形仅为 19 mm, 而未加固时的模拟计算达到 110 mm, 加固使得地层 C (黏聚力)、 φ (内摩擦角) 值提高很大, 地层得到非常明显的改善, 抽查加固体抗压强度达到 1~3 MPa, 由软土~硬土改善成为软岩或者接近软岩。根据施工现场反馈, 对控制隧道的拱顶沉降及隧道收敛, 效果特别明显, 现场如图 12 所示。

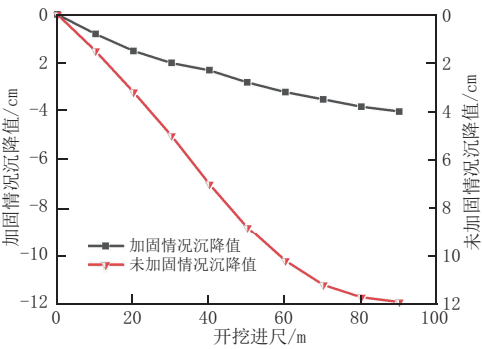


图 11 现场实测拱顶沉降与模拟计算对比



图 12 现场左下导坑开挖、左上导坑开挖照片

5 结 论

在城市隧道修建中对软弱不良地层采用高压旋喷注浆加固技术, 地层加固后再开挖的扰动较小, 拱

顶下沉减少很大。本文采用有限元软件模拟隧道软弱围岩地段开挖情况, 与应用高压旋喷注浆加固后实测结果进行分析对比, 得到以下结论:

(1) JGP 通过颗粒重排和胶结作用形成空间网状结构, 使地层综合模量提升 3.2 倍。提出的等效复合层模型能有效预测加固区应力重分布后续需研究荷载下加固体的疲劳损伤机理。

(2) 高压旋喷注浆技术在隧道软弱地层加固中的实践^[5], 高压旋喷注浆提高了加固范围内土层的物理性质 (C 、 φ 和 E), 由于在隧道上部形成水泥土加固体, 增进了承载拱支护作用, 同时减小了浅埋隧道的水平荷载。

(3) 高压旋喷注浆加固技术对地表沉降、隧道拱顶沉降能很好地控制, 同时确保隧道施工安全^[5]。

(4) 从实践来看, 对隧道周边围岩进行高压旋喷注浆加固, 能实现水泥浆液和土体充分混合, 加固质量保障率很高, 可靠性远高于普通注浆加固。

参考文献:

[1] 薛晓彬. 公路隧道改扩建选型及稳定性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
[2] 张昌桔, 杨守臻, 姜群. 隧道基坑下穿既有高架桥变形控制研究[J]. 市政技术, 2019(5): 114-117.
[3] 任鹏. 水平高压旋喷桩在隧道软弱围岩加固中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
[4] 豆世康. 蓉江四路越江隧道工程设计关键技术[J]. 城市道桥与防洪, 2024(2): 266-270; 293.
[5] 钟德祥. 高压旋喷技术在井巷工程表土层塌陷带处理的应用[J]. 能源与环境, 2020(5): 109-110.

(上接第 305 页)

设计方法, 采用理论推导的方式, 得到混凝土锥体破坏的理论计算公式, 提出该计算公式的适用范围 (不适用于单根锚栓埋置深度计算值大于 350 mm), 经试验验证, 该公式虽与《ACI 318》采用截然不同的推导思路, 但在适用范围内其计算结果接近, 适于我国国情。

(4) 基材混凝土配筋及群锚布置的刚性锚板均有益于预埋爬锥受力, 应纳入设计考量。

参考文献:

[1] 史智强, 胡健. 高墩柱爬锥托架法施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2016(5): 19-21.
[2] 李复才. 特大桥大体积预应力盖梁施工问题探讨[J]. 工程建设与设计, 2014(12): 180-182.
[3] 谭志维, 李江. 高墩盖梁预埋爬锥托架法施工关键技术[J]. 山西建

筑, 2020, 46(9): 133-135.
[4] 钟东, 林巍杰, 童昌. 爬锥与钢牛腿组合托架在高大框梁结构工程中的应用[J]. 工程技术研究, 2022, 7(12): 98-100.
[5] 尹斌. 特大桥大体积预应力盖梁施工问题探讨[J]. 交通世界, 2023(13): 116-118.
[6] 郭常瑞, 黄晓星, 胡学伟. 马普托大桥索塔上横梁牛腿支架法施工技术[J]. 公路交通科技, 2018, 35(增刊 1): 120-124.
[7] 冯宇飞. 桥梁工程长盖梁施工的控制要点[J]. 建筑施工, 2015, 37(10): 1213-1214.
[8] 潘英伟. 桥梁高墩大盖梁无支架支撑体系施工技术[J]. 四川建材, 2024, 50(11): 138-139.
[9] GB 50010—2015, 混凝土结构设计规范[S].
[10] JGJ 145—2013, 混凝土结构后锚固技术规程[S].
[11] American Concrete Institute. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary: ACI 318—2011[S]. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2011.