

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.1159

隧道地表高压旋喷加固的浆液渗透范围计算方法

徐 华^{1,2}, 张 瑜², 郭国和³, 蔡 敏³, 李奕信⁴, 陈 壮²

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031;
3. 广东云茂高速公路有限公司, 广东 广州 510623; 4. 中铁十一局集团第五工程有限公司, 重庆 400030)

摘 要: 由于隧道浅埋段软弱围岩地表高压旋喷加固后具有整体性好、强度高及渗透性低等优点, 已被逐渐应用于实际工程, 但高压旋喷浆液的渗透范围受到孔隙率、渗透路径及施工参数的影响难以确定。通过考虑岩土体性质、浆液流体力学特性及渗透路径等因素影响, 基于圆孔扩张理论, 建立浆液渗透范围的平面分析模型, 推导出高压旋喷浆液的径向渗透范围计算公式, 分析其适用范围及参数取值方法; 结合现场开挖验证理论计算公式的可靠性, 探讨影响浆液渗透范围的主控因素。研究表明: 理论计算与现场实测的浆液渗透径向范围分别为成桩半径的 0.630 倍、0.618 倍, 两者相差仅 2%, 能较好地体现隧道浅埋段软弱围岩特性及各施工参数的影响; 随岩土体孔隙率、浆液水灰比、旋喷压力的增大以及迂曲度的减小, 浆液渗透范围呈增大的变化规律。该方法可为隧道软弱围岩地表高压旋喷加固的桩间距及桩径设计、加固效果评价等提供理论参考。

关 键 词: 隧道浅埋段; 高压旋喷; 圆孔扩张理论; 浆液渗透范围

中图分类号: U451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 07-2064-10

Method for calculating penetration range of grouting slurry in the reinforced tunnel by high-pressure rotary jet grouting from ground

XU Hua^{1,2}, ZHANG Yu², GUO Guo-he³, CAI Min³, LI Yi-xin⁴, CHEN Zhuang²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;
2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 3. Guangdong Yun Mao Expressway Co. Ltd, Guangzhou, Guangdong 510623, China; 4. The 5th Engineer Co. Ltd. of China Railway 11th Bureau Group, Chongqing 400030, China)

Abstract: Due to the advantages of good integrity, high strength and low permeability, surrounding rock reinforced by high-pressure rotary jet grouting in shallow buried section of tunnels has been gradually applied to practical engineering. However, the slurry penetration process is closely related to porosity, penetration path and construction parameters, thus it is difficult to determine the slurry penetration range. Through considering the properties of rock and soil, the hydrodynamic characteristics of grouting slurry and penetration path, a plane analysis model of slurry penetration range was established based on cavity expansion theory, and the calculation formula of radial penetration range of high-pressure rotary jet grouting was derived. Its application scope and parameter determination were also analyzed. Comparing with the field excavation, rationality of the theoretical formula was verified. Furthermore, the primary factors affecting the penetration range of slurry were discussed. The results show that the radial range of slurry permeation from theoretical formula and field measurement is 0.63 times and 0.618 times of pile radius, respectively, and the deviation of between theoretical permeation range and measured one is only 2%, which indicates that the proposed formula can well reflect the property of surrounding rock at shallow buried section of tunnels and the effect of construction parameters. The penetration filling range of high-pressure slurry increases with the increase of porosity, slurry water-cement ratio, rotary jet pressure and the decrease of tortuosity. The proposed method can provide theoretical basis for designing pile spacing and pile diameter, and for the evaluation of reinforcement effect on shallow buried section of tunnels using high-pressure rotary jet grouting.

Keywords: shallow buried tunnel; high-pressure jet grouting piles; cavity expansion theory; penetration range of grouting slurry

1 引 言

近年来, 高压旋喷在隧道浅埋段软弱围岩地表

加固的应用越来越广泛, 加固后围岩性质得到很好的改善, 整体性好、强度高、渗透性低^[1-2], 除桩体自身加固作用外, 高压浆液对桩周土体的挤压渗透

收稿日期: 2022-07-26

录用日期: 2022-09-04

基金项目: 交通运输部重点科技项目 (No.2019-MS1-017)。

This work was supported by the Innovative Key Program of Ministry of Transport of China (2019-MS1-017).

第一作者简介: 徐华, 男, 1979 年生, 博士, 教授, 主要从事隧道与岩土工程方面研究。E-mail: xuhua@cdut.edu.cn

和填充作用也极大地影响了桩间距设计及加固效果^[3-5]；研究高压旋喷浆液对隧道围岩的渗透填充作用对实际工程具有重要意义。地基处理中高压旋喷桩和桩间土组成复合地基共同承担上部荷载，强调桩体作用；而在隧道浅埋段地表加固中高压旋喷主要通过浆液与岩土体的置换、挤压、渗透及填充作用以改善围岩工程性质^[6-7]，隧道开挖后桩土复合体形成“土拱效应”提高了围岩稳定性，避免了塌方涌水灾害。

国内外学者对高压旋喷浆液的置换、搅拌成桩机制已有一定的研究，但由于岩土体结构复杂、地下渗流路径不确定，对浆液渗透填充机制及影响范围的认识不甚明确。Miki^[8]和 Bell^[9]发现在渗透性较强的砂土、碎石土等土层中，静压注浆时浆液主要发挥渗透填充作用而非破坏土体；Zhang 等^[10]研究了不同粒径分布下注浆压力的渗透模式，揭示了静压注浆的机制；杨志全^[11]、路乔^[12]等通过考虑多孔介质迂回曲折效应对浆液柱形渗流扩散机制进行了研究，分析了浆液扩散路径对渗透扩散范围和注浆效果的影响。在浆液性质对渗透效果的影响方面，张聪等^[13]建立了脉动压力下浆液的渗透扩散模型，求解了浆液扩散半径的区间分布方程；叶飞等^[14]研究了浆液自重对盾构隧道管片注浆效果的影响。目前，虽然对静压注浆浆液的渗透扩散机制已有一定的研究成果，但对于高压旋喷冲击破坏土体后的挤压渗透机制及渗透范围研究较少。

基于高压旋喷浆液作用模式，考虑实际渗流过程中浆液的流体特性及渗透路径等影响因素，结合圆孔扩张理论建立了反映塑性区对弹性区挤压渗透过程中浆液渗透作用的平面分析模型，推导出高压浆液渗透范围的理论计算式及相关参数的确定方法；通过现场试验开挖结果验证了理论计算方法的可靠性，以为隧道地表高压旋喷的桩间距、桩径设计及加固效果评价等提供参考。

2 高压旋喷成桩机制及浆液作用

高压浆液对岩土体的作用主要包括切割置换、搅拌混合及挤压渗透等，根据其作用形式（见表1、图1）可进一步将桩体由桩中心依次向外分为均质浆液区域、搅拌混合区域及浆液挤压渗透区域（见图2(a)）。

在砂土、碎石土、全风化砂岩等渗透性较强的地层，对于静压注浆，由于初始浆液压力较小（0.5~1.5 MPa^[15]），浆液作用至弹塑性区交界面时，浆液能量消散较大，对弹性区的挤压应力 σ_p 极小，浆液

表1 浆液作用机制

Table 1 The mechanism of grouting slurry

浆液作用模式	表现形式	成桩区域
切割置换	高压浆液将周围土体完全切割破碎，硬质大颗粒被冲击到下一区域，水泥浆液与小颗粒充分混合形成均质固结体置换原来土体	破碎混合区域，位于桩体中心，面积占比较小
搅拌混合	高压浆液在土体中速度衰减迅速，压力降低较快，切割作用减弱，部分硬质土体无法被充分切割，随高压浆液的包裹包围迁移，水泥浆液与土体颗粒搅拌混合在一起，形成含有大颗粒的水泥土固结体	均匀搅拌区域，是桩体的主要部分，面积占比较大
挤压渗透	浆液压力大幅下降，仅对土体产生挤压渗透；在压力作用下，部分土体被挤压，浆液渗透填充岩体裂隙和孔洞，形成网状固结体	挤压渗透区域，位于桩体外侧及桩周一定范围，加固作用不容忽视

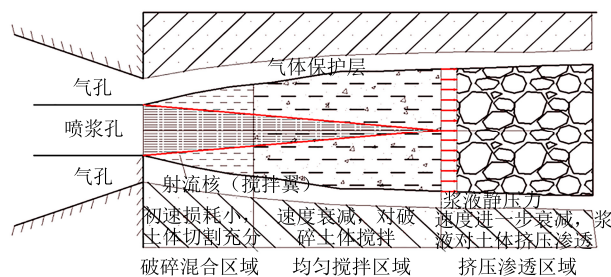


图1 高压浆液与土体作用模式

Fig.1 Interaction mode between high pressure grouting slurry and soil

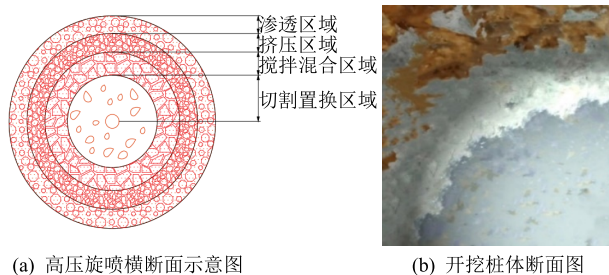


图2 高压旋喷横断面图

Fig.2 Cross-section of area around high-pressure jet grouting pile

主要渗透填充岩土体孔隙；而对于高压旋喷，由于初始旋喷压力较大（20~30 MPa），浆液作用至弹塑性区交界面时仍保留了较大的挤压应力 σ_p ，浆液对土体同时发挥了挤压作用和渗透充填作用（见图2(b)）。这也是静压注浆渗透扩散模型和计算范围方法不能直接用于高压旋喷法的主要原因。高压旋喷浆液固结后对岩土体的黏聚力和内摩擦角增强作用明显，同时对抗渗性能也有较大提高。

3 浆液渗透范围计算公式推导

3.1 基本假定及模型建立

根据上述高压浆液对岩土体的置换、挤压、渗

透及充填作用,参考经典的渗透理论模型及前人的研究^[11-14],基本假定如下:①土体与浆液均满足各向同性;②浆液为牛顿体,在渗透管道中只发生顺渗透方向(x 向)和垂直渗透方向(y 向)的流动,且浆液在多孔介质中渗透扩散过程属于层流状态;③浆液在流动过程中无能量损失;④浆液注入土体呈柱形扩散;⑤不考虑浆液的时变性。建立高压旋喷桩浆液渗透填充计算模型,如图3所示;考虑到柱形浆液渗透问题在柱体轴向的一致性,故将其视为平面问题。图中, R_e 为渗透充填圈的最大半径(渗透终点), R 为渗透充填圈中任意处的半径, R_p 为浆液的置换、搅拌作用区域的半径, r_p 为假定的径向渗透通道在渗透起点处渗透宽度的一半, r_e 为假定的径向渗透通道在渗透终点处宽度的一半, r 为假定的径向渗透通道在 R 处宽度的一半, σ_0 为岩土体初始平均法向应力。

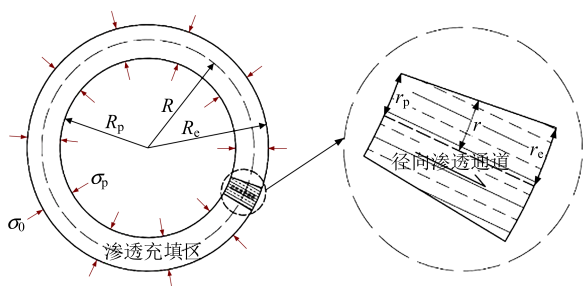


图3 渗透范围平面分析模型

Fig.3 Plane model of grouting slurry penetration range

为求解高压旋喷桩柱形渗透范围,任取渗透范围平面分析模型中渗透微段进行分析(见图3),对土体中浆液单向渗透范围进行求解。

3.2 浆液单向渗透范围计算

由于岩土体孔隙分布是无序的,浆液是迂回曲折地向前渗透。为反映多孔介质中流体流动时迂曲程度对渗透特性产生的影响,在进行渗透范围分析时需考虑迂曲程度的影响^[16]。采用迂曲度 ξ 来反映流体在多孔介质中的流动迂回曲折程度^[17]:

$$\xi = \left(\frac{L_e}{L_s} \right)^2 \quad (1)$$

式中: L_e 为流体的实际流动路径长; L_s 为流体实际流动路径对应直线长。 ξ 分布在2.00~2.50内^[17]。

Mu等^[18]发现进行渗透范围计算时,将所有由孔隙等效的迂曲渗透孔隙合并为一个渗透管道所得的计算结果,与实际情况相差较小,因此可将岩土体中的孔隙等效为一个沿渗透方向的具有 ξ 迂曲

度的渗透管道(见图4);若令一块岩土体的孔隙率为 α ,宽度为 B ,则可求得该岩土体合并后的迂曲管道宽度 b 为

$$b = \frac{B\alpha}{\sqrt{\xi}} \quad (2)$$

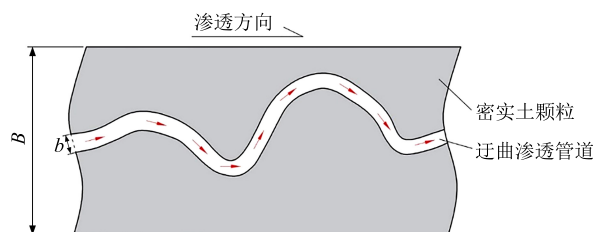


图4 迂曲管道示意图

Fig.4 Schematic diagram of tortuous pipeline

由于浆液具有相对较大的动力黏度,浆液流动速度无法按照达西定律进行计算,为了便于分析,根据假定②所述,将浆液在迂曲管道中的流动方向简化为只存在顺渗透方向和垂直渗透方向两种,并将顺渗透方向上简化后的管道合并为一个宽度为 b 的渗透管道,将垂直渗透方向上的管道视为大量长度为 b' 、宽度极小的等长渗流管道,均匀分布于整个渗透范围。于是得简化后的岩土体平面渗流管道模型(见图5)。

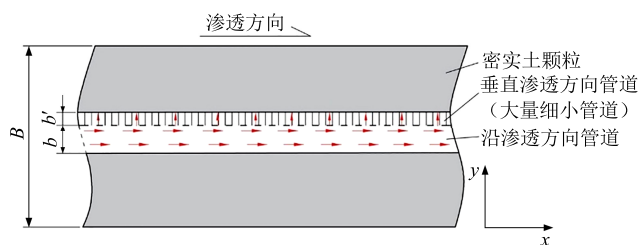


图5 简化后的岩土体平面渗流管道模型

Fig.5 Simplified penetration pipe model in rock/soil

根据式(2)可知,在建立的渗流管道简化模型中,顺渗透方向管道和垂直渗透方向管道的相对密度应分别为 $1/\sqrt{\xi}$ 、 $1-1/\sqrt{\xi}$,则垂直渗透方向渗透管道长度 b' 为

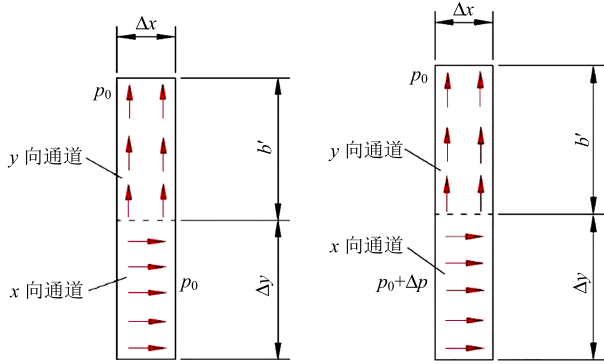
$$b' = B\alpha \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\xi}} \right) \quad (3)$$

令浆液重度为 γ ,岩土体中的初始渗透阻应力为 p_0 ,渗透压力为 $p_0 + \Delta p$;令长度为 Δx 、宽度为 Δy 的 x 向流动浆液压力损失量为 Δp ;则渗透终点和渗透起点处的 Δy 满足:在渗透终点处(见图6(a)): x

向通道微段末端压力为 p_0 ， y 向通道微段末端压力为 p_0 。于是 x 向通道微段始端压力 p_{x1} 为

$$p_{x1} = p_0 + \gamma j_0 \Delta x \quad (4)$$

式中： j_0 为浆液的初始水力梯度。由于微段 Δx 极小， p_{x1} 可近似等于 p_0 。 y 向通道的宽度为 Δx ，长度为 b' ，均较小；微段始端压力 p_{y1} 可近似等于 p_0 。



(a) 渗透终点处 Δy 分析微段

(b) 渗透起点处 Δy 分析微段

图6 Δy 分析微段模型

Fig.6 Microsegment analysis model of Δy

根据假定②，微段上浆液压力沿浆液流动方向是线性变化的；又根据假定③， x 向通道微段能量全部转化到 y 向通道微段能量，则有

$$\Delta x \cdot b' \frac{p_0 + p_{y1}}{2} = \Delta y \cdot \Delta x \frac{p_0 + p_{x1}}{2} \quad (5)$$

解得：

$$\Delta y \approx b' \quad (6)$$

在渗透起点处（见图 6(b)）：同渗透终点类似，在渗透范围的任意处取一微段， y 向通道微段末端压力均为 p_0 ；而由于 y 向通道的宽度和长度均较小，微段始端压力亦可近似等于 p_0 。 x 向通道微段始端压力为 $p_0 + \Delta p$ ，由于微段 Δx 极小，同样有 x 向通道微段终端压力近似为 $p_0 + \Delta p$ 。此时的 Δy 有

$$\Delta x \cdot b' p_0 = \Delta x \cdot \Delta y \cdot (p_0 + \Delta p) \quad (7)$$

当 $\Delta p \gg p_0$ 时，解得

$$\Delta y \approx 0 \quad (8)$$

由于微段上浆液压力沿浆液流动方向是线性变化的，且在渗透范围的任意处 y 向通道微段始端及末端压力均可近似为 p_0 ，即渗透范围内任意处取一微段，用于 y 向浆液渗流的能量是不变的，可知

Δy 沿渗透方向的变化亦是线性的。由此可得 Δy 沿 x 轴的变化曲线（见图 7）。

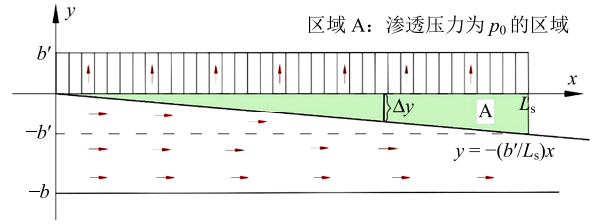


图7 Δy 沿 x 轴变化曲线图

Fig.7 Variation of Δy along the x axis

图 7 中区域 A 即表示 x 向管道中因压力损失至 p_0 而无法发生 x 向渗流的区域，将 x 向管道中可沿 x 向渗透的剩余区域重新等效为一个新的宽度为 b_0 的渗透管道，在此管道中，浆液仅发生 x 向渗流。在进行渗透范围计算时，以浆液在此管道中的渗流范围作为浆液在岩土体中的渗流范围，即浆液在宽度为 B 的岩土体中单向渗透时的渗透范围等于浆液在宽度为 b_0 的直管道中发生单向渗透的长度范围。得到最终简化后的岩土体中浆液单向渗流时的渗透范围计算模型（见图 8）。

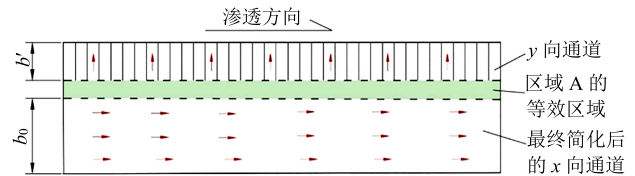


图8 浆液单向渗透范围计算模型

Fig.8 Computation model of single-direction grouting slurry penetration range

根据图 7 可知，图 8 中区域 A 的等效区域宽度为 $b'/2$ ，则最终简化后的 x 向渗透通道宽度 b_0 为

$$b_0 = b - \frac{b'}{2} = \frac{B\alpha}{2} \left(\frac{3}{\sqrt{\xi}} - 1 \right) \quad (9)$$

3.3 高压旋喷浆液的渗透范围计算

基于上述浆液单向渗透范围计算模型，结合圆孔扩张理论分析高压旋喷浆液渗透范围平面模型（见图 3），由于高压旋喷的渗透作用始于塑性区与弹性区的交界面，源于塑性区对弹性区的挤压应力 σ_p ，并作用于弹性区范围内，因此可将渗透过程视为一个最大半径为 R_p 的塑性区对弹性区挤压渗透的过程（见图 9）。

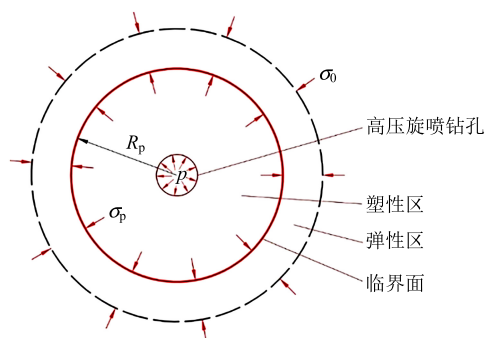


图9 圆孔扩张法计算模型
Fig.9 Cavity expansion model

塑性区和弹性区交界面的径向应力满足^[19]:

$$\sigma_p = (p_u + c \cot \varphi) \left(\frac{R_p}{r'} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - c \cot \varphi \quad (10)$$

式中: c 为岩土体黏聚力; φ 为岩土体内摩擦角; r' 为喷射轴线上弹塑性交界面距喷嘴距离; p_u 为内压力最终值。

塑性区半径 R_p 处对应的浆液压力 p_u 可根据高压旋喷现场试验确定, 高压旋喷浆液在不同介质的喷射过程中浆液压力衰减公式如下^[20]:

$$p_u = K \sqrt{d_0} p / R_p^n \quad (11)$$

式中: d_0 为喷嘴出口直径 (m); p 为喷嘴出口压力 (kPa); K 、 n 为不同介质经验系数, 根据已有成果和案例^[17], 取 $K = 0.1$, $n = 2$ 。

根据假定④, 柱形渗透范围可视为一个宽度随半径 R 增加而增大的渗透管道进行计算分析, 用浆液在该径向通道的渗流代替平衡了浆液环向渗流对径向渗流造成的压力损失之后的渗流, 则计算浆液在该径向管道中的渗透距离即可确定浆液的实际渗透范围。

于是根据式 (9) 可知:

$$r = \frac{1}{2} \times 2\pi R \times \frac{\alpha}{2} \left(\frac{3}{\sqrt{\xi}} - 1 \right) = \frac{\pi R \alpha}{2} \left(\frac{3}{\sqrt{\xi}} - 1 \right) \quad (12)$$

令渗透过程中的浆液渗入流量为 Q , 桩长为 L , 则半径 R 处浆液在径向通道中的渗透速度 v 为

$$v = \frac{Q}{2rL} = \frac{\sqrt{\xi} Q}{\pi R L \alpha (3 - \sqrt{\xi})} \quad (13)$$

浆液在整个渗透过程中的平均速度为渗透范围中点处的渗透速度, 结合式 (13) 可得平均渗透速度 v_{av} 为

$$v_{av} = v \Big|_{R=\frac{R_p+R_e}{2}} = \frac{2\sqrt{\xi} Q}{\pi L \alpha (R_p + R_e) (3 - \sqrt{\xi})} \quad (14)$$

令浆液的渗透时间为 t , 则有

$$v_{av} = \frac{R_e - R_p}{t} = \frac{2\sqrt{\xi} Q}{\pi L \alpha (R_p + R_e) (3 - \sqrt{\xi})} \quad (15)$$

由式 (15) 可以得到渗透流量关于渗透时间和最终渗透范围的关系式:

$$Q = \frac{\pi L \alpha (3 - \sqrt{\xi}) (R_e^2 - R_p^2)}{2\sqrt{\xi} t} \quad (16)$$

在二维模型中, 当把浆液在地层孔隙中的渗流考虑为流体在狭缝中的层流时, 狭缝断面的平均流速具有如下关系^[21]:

$$u = \frac{\gamma j r_0^2}{3\mu} \quad (17)$$

式中: u 为狭缝断面的平均流速; j 为水力坡度; μ 为流体的动力黏度; r_0 为断面宽度的一半。

在柱形扩散模型中, 渗透通道的断面宽度是随渗透半径 R 而变化的, 因此水力坡度也随 R 变化; 令 R 处的水力坡度为 j_R , 联合式 (12)、(17) 可得半径 R 处浆液在径向通道中的渗透速度 v :

$$v = \frac{\gamma j_R}{3\mu} \cdot \frac{\pi^2 R^2 \alpha^2}{4} \left(\frac{3}{\sqrt{\xi}} - 1 \right)^2 \quad (18)$$

联立式 (13)、(17)、(18) 可解得水力坡度 j_R :

$$j_R = \frac{6\mu(R_e^2 - R_p^2)}{\pi^2 \alpha^2 \gamma R^3 \left(\frac{3}{\sqrt{\xi}} - 1 \right)^2} \quad (19)$$

浆液从 R_p 处渗透到 R_e 处的过程中, 浆液应力由 σ_p 消减至 σ_0 , 由于浆液渗流速度较小, 浆液压力的消减主要由沿程水头损失造成; 即

$$\sigma_p - \sigma_0 = \int_{R_p}^{R_e} \gamma j_R dR = \frac{3\mu}{\pi^2 \alpha^2 t \left(\frac{3}{\sqrt{\xi}} - 1 \right)^2} \cdot \frac{(R_e^2 - R_p^2)^2}{R_p^2 R_e^2} \quad (20)$$

根据式 (20) 及基础条件 $R_e > R_p$ 可以解得

$$R_e = R_p \sqrt{\frac{C + \sqrt{C^2 - 4}}{2}} \quad (21)$$

$$C = \frac{\pi^2 \alpha^2 t (\sigma_p - \sigma_0)}{3\mu} \left(\frac{3}{\sqrt{\xi}} - 1 \right)^2 + 2 \quad (22)$$

式中： C 为定义的参数，表示除 R_p 之外所有影响 R_c 的因素所控制的参数。

3.4 适用范围

考虑扩散路径的高压旋喷浆液渗透半径公式是基于圆孔扩张理论和高压浆液柱形渗透注浆机制，以牛顿流体在土体中的渗透扩散为层流运动状态为前提推导的，因此不适应于紊流运动条件；同时，渗透模型考虑多孔介质迂回曲折效应时，将浆液的渗透填充区域简化为规则的渗流通道，浆液只发生规定方向上的渗流，而实际隧道围岩中孔隙的空间分布并不规律，围岩并非各向同性的均匀介质，以及浆液自重和非均质性也是影响浆液渗透范围的重要因素^[11-14]。因此，在实际岩土体的复杂浆液渗透路径下，本模型主要适用于岩土体原始结构性较好、土质相对均匀且孔隙率较大的地层，如：在砂土、碎石土、全强风化岩等渗透性较强的地层；对于孔隙率较小的黏性土地层或大孔隙的卵石地层的适用性有待进一步验证。

4 工程实例验证

4.1 工程概况

广东省云浮-茂名高速公路新屋隧道为分离式隧道，左线全长为 2 501 m，右线全长为 2 452 m。隧道范围内分布多处浅埋段，隧址区地层以碎石土、变质砂岩、花岗岩风化层为主，隧道浅埋段围岩软弱为全强风化花岗岩类土地层，围岩等级为 V 级。采用高压旋喷进行地表预加固，桩体直径为 0.6 m，三角形布桩，间距为 1.2 m，旋喷压力为 24 MPa，喷嘴孔直径为 2 mm，喷嘴提升速度为 18 cm/min，转速为 14~18 r/min，采用双管法旋喷，气压约为 0.7 MPa，水灰比为 1:1。横向加固范围为左右均超出隧道开挖轮廓线 3 m，加固宽度约为 19 m，加固深度为 15 m。

4.2 计算渗透范围

在施作高压旋喷前对全强风化花岗岩类土地层取样进行直剪试验，得到全强风化花岗岩类土质的正应力 σ 与剪应力 τ 关系曲线，结果如图 10 所示。对 3 组试验结果取平均测值，加固前土层 $c = 21.4$ kPa， $\varphi = 24.8^\circ$ 。

将 $d_0 = 0.002$ m， $p = 24\ 000$ kPa， $R_p = 0.3$ m 等参数代入式(11)，得 $p_u = 1\ 192$ kPa。并联立式(10)，代入 $c = 21.4$ kPa， $\varphi = 24.8^\circ$ ， $r' \approx 0.3$ m，解得 $\sigma_p = 1\ 192$ kPa。

现场采用钻孔套心法^[22]测得全强风化花岗岩类土地层的初始平均法向应力 σ_0 约 140 kPa；岩

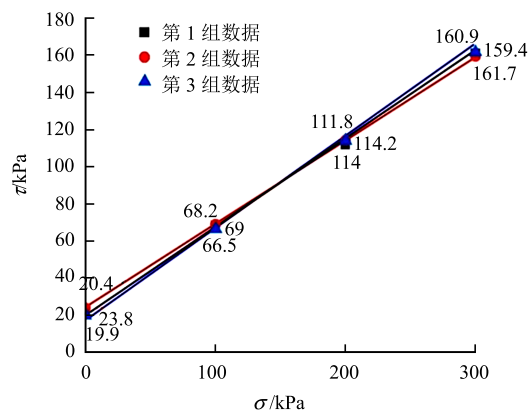


图 10 全强风化花岗岩类土地层加固前直剪试验
Fig.10 Direct shear test data of completely weathered granite layer before reinforcement

土体孔隙的迂曲度通常在 2.0~2.5 之间，碎石土层可取 2.25^[17]；根据勘察资料全强风化花岗岩类土地层的孔隙率为 20%；喷射流对桩周挤压应力的持续时间约为 60 s。根据不同时间水灰比 1:1 的纯水泥浆液黏度，求得浆液黏度 μ 为 8 000 kPa·s^[23]。渗透范围计算所需参数见表 2。

表 2 渗透范围计算参数值

Table 2 Parameter values of penetration range calculation

ξ	μ (kPa·s)	α	t /s	σ_0 /kPa	σ_p /kPa
2.25	8 000	20%	60	140	1 192

将表 2 施工参数代入式(21)~(22)中，得

$$C = \frac{\pi^2 \alpha^2 t (\sigma_p - \sigma_0)}{3\mu} \left(\frac{3}{\sqrt{\xi}} - 1 \right)^2 + 2 = 3.04 \quad (23)$$

则渗透充填区边缘至桩体中心的距离 R_c 为

$$R_c = R_p \times \sqrt{\frac{3.04 + \sqrt{3.04^2 - 4}}{2}} = 1.63 R_p \quad (24)$$

根据新屋隧道浅埋段地表加固的各参数计算，全强风化花岗岩类土地层中的渗透径向范围为

$$R_c - R_p = 0.63 R_p \quad (25)$$

4.3 实测渗透范围

为验证渗透范围计算方法的可靠性，新屋隧道浅埋段地表加固完成 28 d 后，在典型断面 K84+606 洞内开挖时进行了 3 组桩体横断面观察，对浆液实际渗透充填范围进行了测量，如图 11 所示。全强风化花岗岩类土地层中的成桩半径为 0.32~0.36 m，充填区域径向厚度为 0.20~0.22 m，取 3 组测量值

平均值（即成桩半径为 0.34 m，充填区域径向厚度为 0.21 m）可得，实际渗透范围和桩体半径的比值为 0.618。

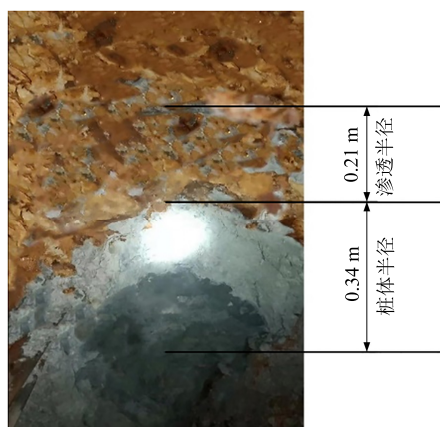


图 11 实际渗透范围剖面图

Fig.11 Observed profile diagram of penetration range

4.4 结果分析

公式计算和实际测量的浆液渗透范围分别为成桩半径的 0.63 倍和 0.618 倍，计算值略大于实测值，两者基本吻合，仅相差 2%，主要原因如下：

(1) 实际隧道围岩中孔隙的空间分布并不规律，理论分析中将浆液的渗透填充区域简化为规则的渗流通道，而浆液在实际渗流时并不是沿着既定的渗流通道流动，浆液的渗透受到一定的影响。

(2) 理论分析中浆液渗透时间较短，忽略了浆液时变性的影响，在实际渗透填充过程中浆液黏度会随着渗流时间的增加而增大，使实际浆液的渗透范围小于计算范围。

(3) 岩土体孔隙迂曲度、浆液压力变化等因素影响也是导致公式计算范围偏大的重要原因。

5 浆液渗透范围影响因素分析

由于高压旋喷浆液渗透范围受岩土体性质和施工参数影响较大，选取 4 个对高压旋喷浆液渗透起关键作用的主控因素——孔隙率、迂曲度、水灰比及旋喷压力对浆液渗透范围影响进行探讨，论证计算公式的可靠性。

5.1 孔隙率影响

大部分渗透性较强的地层，如砂土、碎石土及全风化砂岩等，孔隙率分布在 10%~24%。在其他参数一定的情况下，分析孔隙率与浆液渗透范围的关系（见图 12）。由图可知，浆液渗透范围随岩土体孔隙率的增大近似呈线性增大，即孔隙率越高，

渗透路径越多，渗透范围越大。

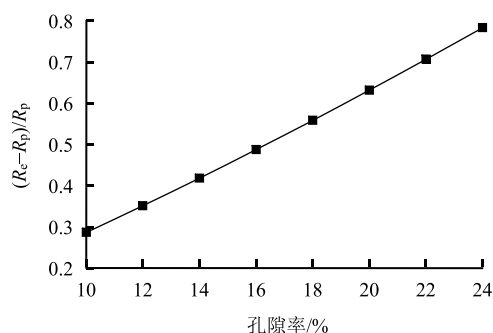


图 12 浆液渗透范围与孔隙率的关系

Fig.12 Relationship between grouting slurry penetration range and porosity

5.2 迂曲度影响

迂曲度主要反映了浆液在岩土体中流动时的曲折程度。根据孔祥言^[17]的研究，岩土体孔隙的迂曲度通常分布在 2.0~2.5 之间；在其他参数不变的情况下，分析不同迂曲度对浆液渗透范围的影响（见图 13）。随着岩土体迂曲度的增大，浆液渗透范围近似呈线性减小的趋势；由于多孔介质性质的影响，迂曲度对浆液渗透范围的影响较小，影响范围仅分布于 0.57~0.72 之间。

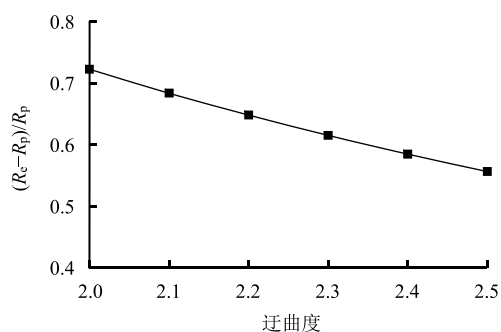


图 13 浆液渗透范围与迂曲度的关系

Fig.13 Relationship between grouting slurry penetration range and tortuosity

5.3 浆液水灰比影响

浆液黏度反映了浆液在流动时内摩擦力的作用大小，由于实际工程中浆液作用时间较短，可以忽略浆液黏度时变性的影响，因此浆液黏度仅取决于水灰比的大小。阮文军^[24]研究表明，水灰比为 1.0~10.0 时水泥浆液可视为牛顿流体，参考浆液黏度经验公式^[23]可以获得不同水灰比对应的浆液黏度。在其他参数不变的情况下，分析水灰比分别为 1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0 时对浆液渗透范围影响（见图 14）；随着水灰比的增大，浆液渗透范围

呈非线性增大趋势,浆液渗透范围为0.63~0.66倍桩体半径。

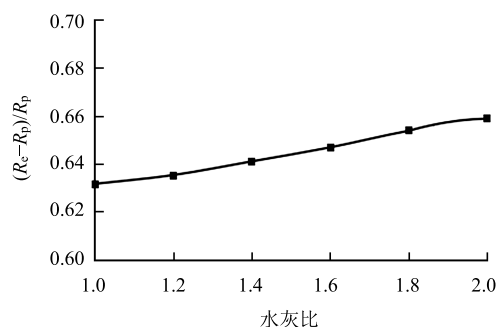


图14 浆液渗透范围与水灰比的关系

Fig.14 Relationship between grouting slurry penetration range and water-cement ratio

5.4 旋喷压力影响

高压旋喷压力 p 直接影响塑性区对弹性区的挤压应力 σ_p , 进而决定了浆液渗透范围大小; 参考高压旋喷在实际工程中不同工法的旋喷压力范围^[20], 单管法为 20~24 MPa, 双管法为 24~29 MPa, 三管法为 30 MPa 左右, 对不同旋喷压力下浆液渗透范围进行分析 (见图 15); 浆液渗透范围随旋喷压力增大而增大, 3 种压力范围内浆液渗透范围分别为 0.56~0.63 倍、0.64~0.72 倍与 0.73 倍桩体半径。旋喷压力的增大对浆液渗透范围影响总体较大。

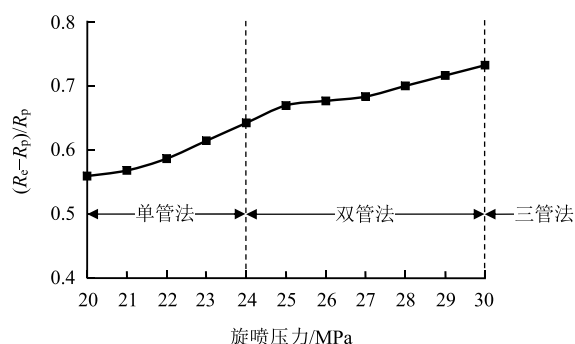


图15 浆液渗透范围与旋喷压力的关系

Fig.15 Relationship between grouting slurry penetration range and grouting pressure

5.5 影响因素讨论

基于高压旋喷浆液渗透扩散模型及渗透范围计算公式, 分析不同因素对渗透范围的影响可知, 当孔隙率为 10%~24% 时, 浆液渗透范围在 0.29~0.78 倍桩体半径范围; 当旋喷压力为 20~30 MPa 时, 浆液渗透范围在 0.56~0.72 倍桩体半径范围; 当迂曲度为 2.0~2.5 时, 浆液渗透范围在 0.57~0.72

倍桩体半径范围; 浆液水灰比为 1.0~2.0 时, 浆液渗透范围在 0.63~0.66 倍桩体半径范围。因此, 岩土体孔隙率及旋喷压力对浆液渗透范围的影响最为显著, 迂曲度及浆液水灰比影响相对较小。

建议高压旋喷设计与施工时, 在岩土体孔隙率与迂曲度一定的条件下, 为保证高压旋喷加固后隧道浅埋段围岩整体性、强度及抗渗性能满足要求, 应选用合理的旋喷压力与水灰比获得最优的高压旋喷桩径和桩间距。

6 结 论

(1) 考虑隧道浅埋段围岩性质、浆液流体力学特性及浆液渗透路径等因素影响, 提出了浆液单向渗透模型; 基于圆孔扩张理论, 建立在浆液压力下反映塑性区对弹性区挤压渗透作用过程的分析模型, 推导出浆液渗透范围的理论计算公式, 确定了适用范围及各参数取值方法, 揭示了高压旋喷浆液对隧道浅埋段软弱围岩的渗透充填机制。

(2) 通过对比理论计算与现场开挖结果, 验证了高压旋喷浆液渗透范围计算公式的可靠性。结果表明: 理论计算与现场实测的浆液渗透范围分别为成桩半径的 0.630 倍、0.618 倍, 两者较为接近, 相差仅 2%, 能较好地体现隧道浅埋段软弱围岩特性及各施工参数的影响, 为高压旋喷桩径、桩间距设计及加固效果评价提供理论依据。

(3) 探讨了 4 个对高压旋喷浆液渗透起关键作用的主控因素——孔隙率、迂曲度、水灰比及旋喷压力对浆液渗透范围的影响, 孔隙率及旋喷压力对浆液渗透范围的影响最为显著, 浆液水灰比与迂曲度影响相对较小; 基于浆液渗透范围分布规律, 为合理选取工程施工参数获得最优的高压旋喷设计提供参考。

参 考 文 献

- [1] YE S H, DAN H B, TANG Y D, et al. The application of vertical anti-seepage in modern landfill[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 610-613: 1751-1755.
- [2] 阙寿洪. 高压旋喷桩在隧道围岩加固中的应用[J]. *公路交通技术*, 2009(2): 130-133.
QUE Shou-hong. Application of high pressure spinning jetting pile in consolidating surrounding rock in tunnel[J]. *Technology of Highway and Transport*, 2009(2): 130-133.
- [3] SHEN S L, WANG Z F, CHENG W C. Estimation of lateral displacement induced by jet grouting in clayey

- soils[J]. **Géotechnique**, 2017, 67(7): 621-630.
- [4] CROCE P, FLORA A. Analysis of single-fluid jet grouting[J]. **Géotechnique**, 2000, 50(6): 739-748.
- [5] 胡仕涛. 高压旋喷注浆技术在隧道泥砂地层加固中的应用[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2011, 24(1): 10-13.
- HU Shi-tao. Application of high pressure jet grouting technology for mud and sand stratum strengthening in tunnel construction[J]. **Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)**, 2011, 24(1): 10-13.
- [6] 任伟新. 高压旋喷桩在饱和动态含水砂层浅埋暗挖隧道中的试验与应用探讨[J]. 铁道标准设计, 2009(7): 83-87.
- REN Wei-xin. Test and application of high pressure jet grouting pile in shallow buried tunnel in saturated dynamic water bearing sand layer[J]. **Railway Standard Design**, 2009(7): 83-87.
- [7] 安关峰, 张洪彬, 刘添俊. 旋喷群桩复合地基承载特性的数值分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 906-912.
- AN Guan-feng, ZHANG Hong-bin, LIU Tian-jun. Numerical analysis of bearing characteristics of composite subgrade reinforced by chemical churning pile groups[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(3): 906-912.
- [8] MIKI G. Soil improvement by jet grouting[C]//Proceedings of 3rd International Geotechnical SEM, on Soil Improvement. Singapore: Nanyang Technological Institute, 2017.
- [9] BELL A L. Jet grouting in ground improvement[M]. Glasgow: Chapman and Hall, 1996.
- [10] ZHANG J, LI S C, LI Z F, et al. Effect of particle size distribution on the grout diffusion pattern in completely and strongly weathered granite[J]. **Indian Geotechnical Journal**, 2020, 50: 531-539.
- [11] 杨志全, 卢杰, 王渊, 等. 考虑多孔介质迂回曲折效应的幂律流体柱形渗透注浆机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 410-418.
- YANG Zhi-quan, LU Jie, WANG Yuan, et al. Column penetration grouting mechanism for power-law fluids considering tortuosity effect of porous media[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(2): 410-418.
- [12] 路乔, 杨智超, 杨志全, 等. 考虑扩散路径的宾汉姆流体渗透注浆机制[J]. 岩土力学, 2022, 43(2): 385-394.
- LU Qiao, YANG Zhi-chao, YANG Zhi-quan, et al. Infiltration grouting mechanism of Bingham fluid considering diffusion paths[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(2): 385-394.
- [13] 张聪, 梁经纬, 阳军生, 等. 考虑区间分布的幂律流体脉动渗透注浆扩散机制研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(11): 2120-2128.
- ZHANG Cong, LIANG Jing-wei, YANG Jun-sheng, et al. Diffusion mechanism of pulsating seepage grouting slurry with power-law fluid considering interval distribution[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(11): 2120-2128.
- [14] 叶飞, 陈治, 孙昌海, 等. 考虑浆液自重的盾构隧道管片注浆浆液渗透扩散模型[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(12): 2175-2183.
- YE Fei, CHEN Zhi, SUN Chang-hai, et al. Penetration diffusion model for backfill grouting through segments of shield tunnel considering weight of grout[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(12): 2175-2183.
- [15] 徐华, 李天斌, 龚习炜, 等. 铜锣山隧道岩溶浅埋段地表注浆试验研究[J]. 现代隧道技术, 2008(5): 44-49.
- XU Hua, LI Tian-bin, GONG Xi-wei, et al. Study on surface grouting on the karst shallow section of Tongluoshan tunnel[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2008(5): 44-49.
- [16] 周鸿翔. 高性能孔隙尺度水流运动与溶质运移模拟方法及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- ZHOU Hong-xiang. High-performance pore-scale simulation method for fluid flow and solute transport with applications[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [17] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2011.
- KONG Xiang-yan. Advanced mechanics of fluids in porous media[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2011.
- [18] MU W, LI L, YANG T, et al. Numerical investigation on a grouting mechanism with slurry-rock coupling and shear displacement in a single rough fracture[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2019(4): 1-19.
- [19] 刘裕华, 陈征宙, 彭志军, 等. 应用圆孔柱扩张理论对预制管桩的挤土效应分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2167-2172.
- LIU Yu-hua, CHEN Zheng-yu, PENG Zhi-jun, et al. Analysis of pile driving effect of precast tubular pile using cylindrical cavity expansion theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2167-2172.