

TBM 隧道穿越断层破碎带超前注浆加固研究

王鹏硕^{1,2}, 高新强^{1,2}, 杨志国³, 孔超⁴, 万飞³, 关岳卓尔^{1,2}

- (1. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 石家庄 050043;
2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 3. 中铁十八局集团有限公司, 天津 300222;
4. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 绵阳 621010)

摘 要: 针对 TBM 隧道穿越断层破碎带易发生大变形, 甚至卡机问题, 研究超前注浆加固措施对断层破碎带围岩的加固及变形控制效果。基于复合材料强度理论和破碎岩体抗剪参数增长率经验公式, 提出两者相结合的岩体力学参数估算方法, 得出了注浆加固后岩体的力学参数。以此为基础, 建立了不同注浆加固强度增长率 (100%~165%) 和不同注浆加固区厚度 (2~6 m) 的 TBM 隧道施工力学分析模型, 分析了 TBM 隧道穿越断层破碎带施工时不同注浆参数下断层破碎带围岩变形特征。研究表明: 注浆加固强度增长率低于 110% 时, 增加注浆厚度对围岩变形控制效果不显著; 当注浆加固强度增长率由 155% 提高至 165% 时, 围岩变形与塑性区体积的降幅均小于 5%, 控制效果改善幅度较小; 综合围岩稳定性、施工可行性与注浆成本, 建议注浆加固强度增长率宜取 110%~155%, 注浆加固厚度取 4 m 左右。

关键词: TBM 隧道; 断层破碎带; 超前注浆参数; 围岩变形

中图分类号: U25; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 05-0064-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.05.010

Study on Pre-grouting Reinforcement of TBM Tunnel Crossing Fault Fracture Zone

WANG Pengshuo^{1,2}, GAO Xinqiang^{1,2}, YANG Zhiguo³, KONG Chao⁴, WAN Fei³, GUAN Yuezhaoer^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
3. China Railway 18th Bureau Group Co. Ltd., Tianjin 300222, China;
4. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: To address large deformation and machine jamming when a TBM tunnel traverses a fault fracture zone, this study

项目来源: 河北省自然科学基金项目 (E202310057); 河北省省级科技计划资助 (225676162GH); 中国铁建股份有限公司 2019 年度科技重大专项 (2019-A05)。

作者简介: 王鹏硕 (2000—), 男, 硕士, 研究方向: 隧道围岩稳定性控制。

通信作者: 高新强 (1970—), 男, 博士, 教授、博士生导师, 研究方向: 隧道围岩稳定机理。

收稿日期: 2025-03-08

investigates the reinforcement and deformation control effects of pre-grouting on surrounding rock. Based on composite material strength theory and the empirical formula for shear strength growth rate of fractured rock masses, a combined method for estimating mechanical parameters of grouted rock mass is proposed. A mechanical analysis model for TBM tunnel construction is established with different grouting reinforcement strength growth rates (100% ~ 165%) and thicknesses (2 ~ 6 m). The deformation characteristics of surrounding rock under various grouting parameters are analyzed. Results indicate that when the strength growth rate is below 110%, increasing grouting thickness does not significantly improve deformation control. When the growth rate increases from 155% to 165%, reductions in both deformation and plastic zone volume are less than 5%, showing limited improvement. Considering stability, constructability, and cost, the recommended strength growth rate is 110% ~ 155%, with a grouting thickness of approximately 4 m.

Key words: TBM tunnel; fault fracture zone; pre-grouting parameters; surrounding rock deformation

0 引言

目前,我国全断面隧道掘进机(TBM)正处于蓬勃发展时期^[1]。而TBM在复杂地质环境施工时,适应性降低,面临着一系列工程灾害的威胁。众多专家、学者、工程技术人员开展了大量复杂地质条件下TBM施工技术的研究均提出,超前注浆是围岩破碎条件下TBM施工的关键措施^[2]。

为明确注浆加固对破碎岩体力学性能的提高程度,刘长武等^[3]通过研究指出注浆加固提高了岩体的完整性和强度,还提高了结构面的黏结强度和内摩擦角;Evdokimov等^[4]通过试验比较了注浆前后岩体的剪切强度参数,增强效果明显;许宏发等^[5]以破碎岩体为研究对象,通过非线性拟合分析,提出了破碎岩体注浆加固抗压强度增长率的经验公式,并推导出剪切强度参数增长率的计算公式;黎永索等^[6]从微观角度出发,研究注浆对节理岩体损伤的加固效应,构建了考虑岩体损伤和注浆加固效应的单元安全系数,判断岩体的稳定性;路乔等^[7]考虑了不同的浆液扩散形式,提出了注浆渗透扩散范围的计算公式;陈星欣等^[8]通过研究超前注浆浆液扩散形式和扩散范围,分析了不同注浆施工方案浆液的扩散特征;钟宏伟等^[9]依据不同注浆效果检测方法,结合专家意见与实际工况,建立了注浆效果评价的数学模型;余成学等^[10]利用数值模拟方法,计算研究TBM隧道在断层超前注浆加固后,围岩的变形稳定规律;吴松锋等^[11]通过建立隧道注浆帷幕力学模型分析得出围岩弹性模量和剪切模量的提高可抑制围岩变形,但会增大围岩的径向和环向有效应

力;包其刚等^[12]以阳宗隧道断层破碎带实际工程为依托,利用FLAC 3D模拟分析指出,注浆加固厚度和范围对断层破碎带围岩稳定性的影响效果明显;马新世等^[13]研究围岩注浆加固机理,分析注浆加固对围岩塑性区、应力场、围岩变形量影响规律,结果表明注浆加固后塑性区范围明显减小,有效控制了围岩变形;魏文杰^[14]和顾喜鹏^[15]研究了超前注浆在矿山法中的应用;杨腾添等^[16]阐述了超前注浆技术在TBM隧道穿越软弱地层中的应用。

现有对超前注浆加固效果研究,计算时采用注浆加固后岩体力学参数,通常使用复合材料强度的计算方法,仅以岩体弹性模量为计算参数,而注浆加固后岩体黏聚力和内摩擦角等参数的选取往往依赖于经验;因此尝试通过计算公式确定注浆加固后岩体的黏聚力和内摩擦角等参数,并分析超前注浆效果,确定超前注浆加固参数的合理范围,使注浆参数的确定更具可操作性。

1 注浆加固参数估算方法

1.1 复合材料强度计算方法

破碎岩体经超前注浆加固后,岩体的力学参数提高,在研究破碎岩体注浆加固后的强度时,可将加固后岩体看作复合材料,根据复合材料计算公式得到加固后岩体的弹性模量^[6]:

$$E_f = E_0(1 - D_r) + \lambda E_j D_r \quad (1)$$

式中: E_f 为破碎岩体注浆加固后弹性模量, GPa; E_0 为岩石的弹性模量, GPa; D_r 为在破碎岩体的裂隙体积, m^3 ; λ 为注浆的裂隙充填率一般在 0.5 ~ 0.7^[12,17]; E_j 为注浆材料的弹性模量, GPa。

岩土力学

然而，以上公式仅能估算注浆加固后岩体的弹性模量，破碎岩体加固后的黏聚力、内摩擦角的取值对隧道围岩稳定性的准确计算有着至关重要的作用。

1.2 复合材料强度及抗剪强度计算方法相结合的验证

复合材料强度计算方法对注浆岩体的弹性模量进行估算，破碎岩体抗剪强度计算方法是基于注浆岩体抗压强度增长率经验公式，得到了岩体抗剪参数增长率计算公式^[5]。

进行数值分析时，往往需要岩体的弹性模量、黏聚力和内摩擦角等参数，若能将两种方法相结合，便能得到更为准确的计算参数。

而岩石单轴抗压强度和弹性模量之间存在模糊的正相关性，根据资料统计和工程经验，唐大雄等^[18]提出了均质岩石试件单轴抗压强度和弹性模量之间的一个线性经验关系式：

$$E_0 = 350S_{cb}$$

(2)

式中： E_0 为弹性模量，GPa； S_{cb} 为岩体抗压强度，MPa。

同类别岩石单轴抗压强度和弹性模量线性关系更明显^[19]。进而能够将同类别岩石的抗压强度增长率近似等效为岩体弹性模量强度增长率。按照两种不同计算方法，采用岩石强度为 1.59 GPa，岩体裂隙度 $D_r=0.2$ 为基本岩石参数；因不同注浆材料和注浆材料的配合比均会影响浆液强度^[20]，分别采用注浆加固浆液凝固强度为 16、18、20 GPa， λ 为 0.5~0.8 不同情况，计算注浆加固后岩体弹性模量，结果见表 1。

表 1 注浆加固后岩体弹性模量比较
Table 1 Comparison of rock mass elastic modulus after grouting reinforcement

计算方法	注浆填充率 / λ	浆液强度/GPa		
		16	18	20
复合材料强度	0.5	2.87	3.07	3.27
	0.6	3.19	3.43	3.67
	0.7	3.51	3.79	4.07
	0.8	3.83	4.15	4.47
破碎岩体抗压强度		4.05	4.24	4.43

当注浆效果不佳，即 λ 取值较小时，两种计算方法得到结果差别较大，而随着注浆浆液强度的增加及注浆效果的提高，两种计算结果逐渐吻合。岩

石注浆后的充填效果同浆液的颗粒大小和岩石的裂隙度相关，岩体越破碎相应的充填效果越好^[21]，所以可大致判断，在断层破碎带，采用抗压强度增长率计算方法得到的注浆岩体弹性模量与复合材料强度计算方法结果一致性较高， $\lambda=0.7$ 时，误差在 8.1%~13.3%， $\lambda=0.8$ 时误差在 1.0%~5.4%。所以基于破碎岩体抗压强度增长率推导的黏聚力和内摩擦角，具有一定的可靠性。

2 分析模型建立

隧道采用敞开式 TBM 开挖，隧道洞径 11 m，采用有限差分软件 FLAC 3D 进行数值模拟分析，将开挖区附近网格划分较为密集。数值模型在长、宽、高三个方向的尺寸分别为 90、66、66 m。为模拟断层破碎带影响范围，沿洞轴线方向，前 18 m 范围为完整围岩区，围岩强度等级为Ⅳ级；中间 54 m 范围为断层破碎带围岩，围岩等级为Ⅴ级；后 18 m 范围为完整围岩区。三维模型网格如图 1 所示。

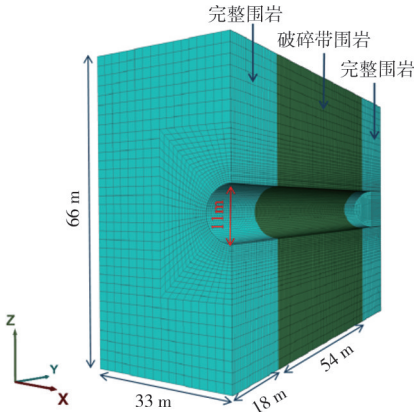


图 1 三维模型网格划分
Fig. 1 3D model meshing

围岩按各向同性连续介质考虑，采用理想弹塑性模型、Mohr-Columb 屈服准则。计算模型中喷混凝土，采用 shell 结构单元模拟；锚杆采用 cable 结构单元模拟；钢拱架采用 beam 结构单元模拟；TBM 护盾采用 liner 结构单元模拟^[22]，护盾长度 $L=1.8$ m，结构单元采用弹性模型。模型顶面施加垂直荷载 23.716 MPa，侧压力系数取 1.0。

锚杆、钢拱架纵向间距 0.9 m，锚杆环向间距 1 m，喷射混凝土厚度 25 cm 的初期支护参数。围岩物理力学参数及隧道初期支护参数见表 2。

表 2 围岩物理力学参数及隧道初期支护参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of surrounding rock and tunnel primary support parameters

材料	容重 γ /(kN/m^3)	弹性模量 E/GPa	泊松 比 μ	黏聚力 c /MPa	内摩擦 角 $\varphi/(^\circ)$	抗拉强度 σ_t/MPa
完整 围岩	22.0	5.00	0.32	10.0	40.0	1.00
破碎带 围岩	18.5	1.59	0.40	1.5	23.5	0.15
喷混 凝土	23.0	31.50	0.20			
锚杆	78.5	206.00	0.30			
护盾	78.5	206.00	0.30			

3 超前注浆加固对断层破碎带隧道围岩变形的影响

3.1 注浆加固参数

参考表 1 所得结果，设置未注浆和 5 种注浆岩体强度增长率工况，注浆加固后岩体的弹性模量的取值，通过复合材料强度和破碎岩体注浆后岩体抗剪强度计算两种方法相结合进行计算，结果见表 3。注浆最大厚度取隧道开挖轮廓线外 2 m，采取全断面帷幕注浆，注浆加固区为断层破碎带区域，每一次沿隧道纵向注浆 10.8 m，保留 3.6 m 注浆区长度进行下一次注浆，循环至通过断层破碎带。为模拟实际工程中以一定外插角打设注浆导管，注浆厚度沿隧道纵向不同的情况，每一循环注浆厚度沿隧道开挖纵向呈梯度变化。

表 3 不同注浆加固强度增长率计算参数
Table 3 Calculation parameters of different grouting reinforcement strength growth rate

计算工况	强度增长 率/%	弹性模量 E/GPa	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	抗拉强度 σ_t/MPa
工况 0		1.59	0.150	23.5	0.150
工况 1	100	3.15	0.300	25.0	0.280
工况 2	110	3.35	0.315	26.0	0.285
工况 3	130	3.65	0.340	26.0	0.300
工况 4	155	4.05	0.380	26.5	0.340
工况 5	165	4.25	0.395	26.5	0.360

3.2 注浆加固强度增长率对围岩变形影响

由图 2 可知，在未采用超前注浆加固措施情况下，完整围岩区域的围岩变形量整体在 8 cm 左右，在断层交界面附近约 3.6 m 有小幅增加，断层交界面的变形量为 13.3 cm。进入断层破碎带后，断层破碎带内出现围岩变形大幅度增大现象，产生这种

现象的原因在于，当断层破碎带揭露前，隧道的开挖扰动导致在破碎带围岩产生一定变形，当 TBM 进入断层破碎带后，破碎围岩变形量持续增大，距离断层破碎带交界面约 $D/3$ 处拱顶沉降量为全断层破碎带各位置的最大值，沉降量为 40.7 cm。断层破碎带中间位置变形量较大，沉降量为 40.2 cm。围岩变形特征总体呈现出，在断层破碎带初段约 $D/3$ 距离内出现围岩变形骤然增大的现象，在距断层交界 $D/3$ 处和断层破碎带中间围岩变形量最大。说明 TBM 需要掘进通过断层破碎带时，断层破碎带距断层交界面 $D/3$ 范围内和破碎带中间为施工关键控制区域。

超前注浆加固后，注浆加固对围岩变形量控制效果显著。断层破碎带初段 $D/3$ 区域围岩变形量骤增的现象得到明显控制，加固区中部围岩位移沿隧道开挖方向出现波动情况，而未注浆加固情况下，破碎带中部围岩变形未产生波动情况，是由于超前注浆存在一定外插角，每次注浆范围呈梯度变化，注浆加固厚度大的区域变形量相对较小。随注浆加固强度增长率提高，围岩变形量逐渐降低，而当注浆加固强度增长率从 155% 增加至 165% 时，围岩 LDP 曲线非常接近，围岩变形进一步控制效果并不明显，并且注浆加固强度增长率为 165% 的工况对应的 λ 值约为 0.8，对注浆工作的要求较高，实现难度较大。

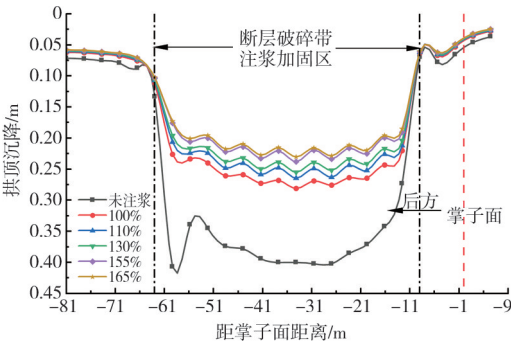


图 2 不同注浆加固强度增长率的拱顶围岩 LDP 曲线
Fig. 2 LDP curves of vault surrounding rock with different grouting reinforcement strength growth rate

根据破碎带围岩变形特征，判断在进入断层破碎带约 $D/3$ 处和断层破碎带中间为 TBM 过断层破碎带施工控制的关键位置，设置距断层交界面 $D/3$ 处为监测断面 1，破碎带中间为监测断面 2。总结超前注浆对两处监测断面围岩的控制效果，即注浆加固后围岩变形减小量与未注浆加固时的比值，如图 3 所

岩土力学

示。两处监测断面围岩的变形对比无注浆加固时均有显著的控制效果，并且对断面 1 的控制效果优于断面 2。在实际施工时，依靠超前地质预报技术，及时准确的判断出断层破碎带的位置，通过超前注浆加固措施，能够有效控制 TBM 掘进由完整围岩过渡到断层破碎带时围岩变形的突变量，避免因大变形导致的工程灾害。

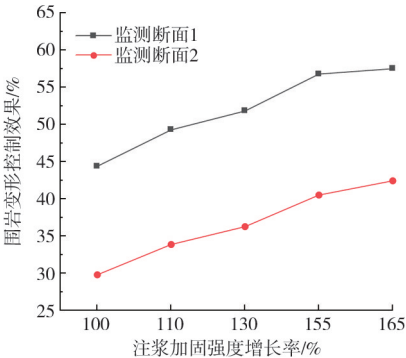


图3 围岩变形控制效果
Fig.3 Control effect of surrounding rock deformation

3.3 超前注浆加固厚度对围岩变形影响

综合围岩稳定性和所需注浆量的大小，研究相对合理注浆厚度，分别设置了最大注浆厚度 2、3、4、6 m 不同工况进行数值模拟，并且各厚度同样设置不同注浆加固区强度增长率进行综合对比。

由图 4 可知，当注浆加固强度增长率为 100% 时，提高加固厚度到 3 m 后，围岩变形进一步控制效果并不明显，LDP 曲线在部分位置出现重合情况，当注浆加固强度增长率达到 110% 之后，提高加固区厚度出现一定效果，此时对应的注浆加固区弹性模量为 3.35 GPa。一定程度上说明了只有在注浆加固区强度参数达到一定值的情况下，增加注浆加固区厚度才能进一步有效提高断层围岩的稳定性；反之若注浆加固区强度达不到一定值，即使增加注浆加固区厚度达不到提高加固效果的作用，浪费施工成本。

采取超前注浆加固措施后，不同加固厚度条件下围岩变形规律相同，故在对比 3、4、6 m 注浆加固厚度对围岩稳定性影响时，选取模型中距离掌子面 36 m 处，即断层破碎带中间位置（监测断面 2）为分析断面，对比该断面处注浆厚度对拱顶沉降值和边墙收敛值的影响，如图 5 所示。随着注浆厚度的提

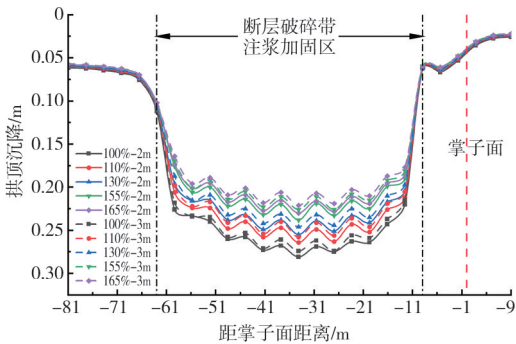
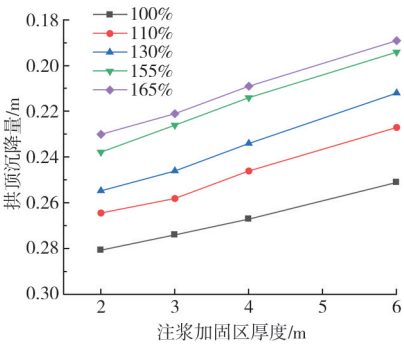
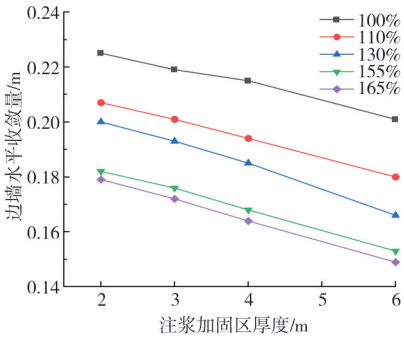


图4 不同注浆加固强度增长率和厚度拱顶围岩 LDP 曲线
Fig.4 LDP curves of vault surrounding rock with different grouting reinforcement strength growth rate and thickness

高，注浆加固强度增长率为 100% 对应的曲线出现了斜率变陡的现象，进一步说明当注浆加固强度增长率较低时，只有注浆厚度达到一定值后，围岩控制效果才会逐渐明显。当注浆加固强度增长率大于 110% 后，随注浆加固厚度的提高，围岩变形量呈线性减小的趋势，表明注浆区厚度越大越有利于围岩变形量的控制。



(a) 拱顶沉降



(b) 边墙收敛

图5 围岩变形量随注浆加固区厚度变化
Fig.5 The deformation of surrounding rock changes with the grouting thickness

在研究合理的注浆厚度时,注浆区体积与注浆厚度为 2 次方的关系,每增加 1 m 注浆厚度,注浆区的体积越来越大,而注浆区体积的不同直接影响着注浆量的大小和成本。以注浆加固区体积代表施工成本,分析能达到良好的围岩稳定性控制效果下合理的注浆加固区体积。不同注浆厚度对应的每次超前注浆加固区围岩体积见表 4。

表 4 注浆厚度对应的加固区体积

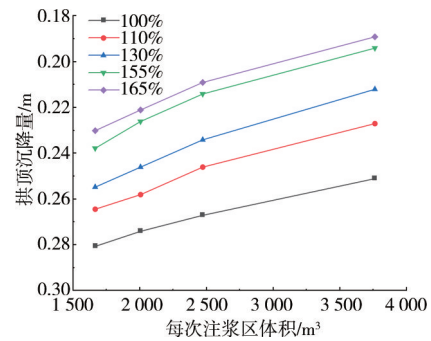
Table 4 The volume of the reinforcement area corresponding to the grouting thickness

注浆厚度/m	每次注浆区体积/ m^3
2	1.67×10^3
3	2.01×10^3
4	2.47×10^3
6	3.76×10^3

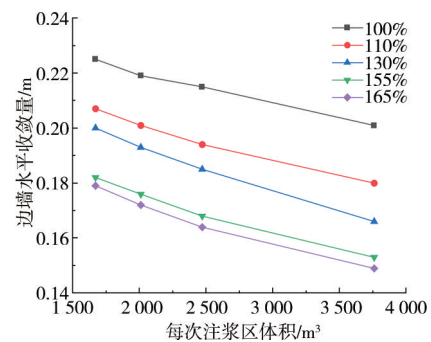
由图 6 可知,注浆加固强度增长率为 100% 工况下,围岩变形量随注浆加固区体积的增加的曲线仍出现斜率变陡的情况,当注浆加固强度增长率为 100%,注浆厚度达到 6 m 后,其对围岩稳定性的控制效果仅相当于注浆加固强度增长率为 110% 时注浆厚度为 2 m 的工况,而需要进行注浆加固的围岩体积增加了 1.25 倍。表明,应当尽量使得注浆加固强度增长率大于 100%,否则需要投入大量的施工成本来保证对围岩变形的有效控制。当注浆加固强度增长率达到 110% 后,此时,加固区弹性模量达到 3.35 GPa,增加注浆加固区体积,围岩控制效果递增,曲线斜率逐渐减小,控制效果趋向于平稳。

将每次注浆区体积由 $1.67 \times 10^3 \text{ m}^3$ 增加到 $2.47 \times 10^3 \text{ m}^3$,对应注浆加固区厚度由 2 m 增加到 4 m、每次注浆区体积由 $2.47 \times 10^3 \text{ m}^3$ 增加到 $3.76 \times 10^3 \text{ m}^3$,对应注浆加固区厚度由 4 m 增加到 6 m 分为划分为阶段 I 和阶段 II,计算得到两个阶段注浆区体积每增加 1000 m^3 时围岩变形控制效果,注浆加固强度增长率为 100% 的工况下围岩变形控制效果较差,围岩变形控制效果随强度增长率升高而增强,在 155% 时达到最优,继续增加至 165% 后效果不再明显改善。各个强度增长率的下,阶段 I 的围岩变形控制效果明显优于阶段 II。在考虑施工难度,施工时间等因素,结合所得注浆加固区体积对围岩变形控制效果的结论,可初步判断,注浆加固区厚度不宜增加到 6 m,宜在 4 m 左右,注浆加固强度增长率宜在

110%~155% 之间。



(a) 拱顶沉降



(b) 边墙收敛

图 6 围岩变形量随注浆区体积变化

Fig. 6 The deformation of surrounding rock changes with the volume of grouting area

3.4 超前注浆加固对围岩塑性区影响

由图 7 可知,当不采取超前注浆加固措施时,围岩发生总塑性变形体积有 34555.5 m^3 ,断层破碎带每延米平均塑性区体积为 610.48 m^3 。通过柱状图结合塑性区体积折线图可以看出,采取超前加固注浆后,塑性区体积减小明显,随着注浆加固强度增长率的提高,分别降低了 35.54%、40.46%、43.38%、

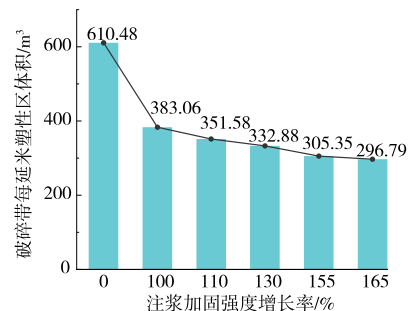


图 7 不同注浆加固强度增长率对应破碎带围岩每延米塑性区体积

Fig. 7 Different grouting reinforcement strength growth rate corresponds to the plastic zone volume per meter of the surrounding rock of the fracture zone

岩土力学

47.68%、49.02%，塑性区体积在注浆加固强度增长率小于155%时变化较为明显，而当注浆加固强度增长率大于155%后变化甚微。

由图8可知，塑性区体积总体呈现随注浆强度和厚度的增加而减小趋势，但当注浆厚度达到4 m后，提高超前注浆参数对塑性区体积的控制效果甚微，部分工况下塑性区体积甚至产生了增大的现象，此时增加注浆厚度不能有效控制围岩塑性区范围。结合上文结论当注浆加固厚度达到4 m后，继续增加加固区厚度至6 m，所需的施工成本大幅增高，综合分析围岩变形量的控制效果，以及约束破碎带围岩塑性区发展的作用，考虑实际工程的施工难度和成本等，得出结论，注浆加固强度增长率宜在110%~155%之间，对应注浆加固区弹性模量为3.35~4.05 GPa，注浆加固厚度宜在4 m左右。

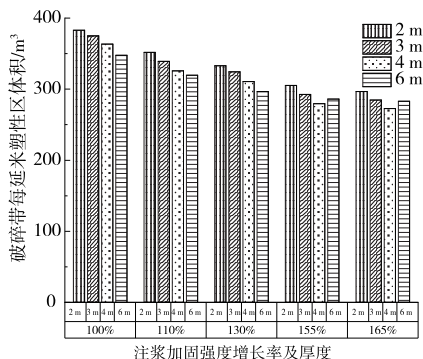


图8 不同注浆加固工况破碎带围岩每延米塑性区体积

Fig. 8 The volume of plastic zone per meter of surrounding rock in fracture zone under different grouting reinforcement conditions

4 结论

采用注浆后岩体强度参数计算方法，得出了注浆围岩力学参数，分析了注浆参数对围岩的稳定性影响规律，指出了合理的注浆参数范围，得出以下结论：

(1) 断层破碎带围岩变形特征，由断层交界面到破碎带 $D/3$ 范围内围岩变形骤增，在距离断层交界面 $D/3$ 处，和断层破碎带中间位置，破碎带围岩变形量最大，两处位置的围岩稳定性最差，应作为施工控制的关键位置。

(2) 当注浆加固强度较低时，增加注浆区厚度并不能进一步有效的降低围岩变形量。只有注浆加

固强度增长率达到一定程度后，增加注浆厚度才有进一步效果和价值，注浆加固强度增长率宜在110%~155%范围内。

(3) 当注浆区强度达到一定值后，注浆区厚度对围岩变形量具有显著的影响。综合围岩稳定性控制效果和施工成本和难度，注浆厚度宜为4 m左右。

参考文献

- [1] 洪开荣, 杜彦良, 陈馈, 等. 中国全断面隧道掘进机发展历程、成就及展望 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42 (5): 739-756.
- [2] 齐梦学, 杨国清, 曾绍毅. 全断面岩石隧道掘进机 (TBM) 施工超前处置技术综述与思考 [J]. 隧道建设 (中英文), 2021, 41 (9): 1555-1564.
- [3] 刘长武, 陆士良. 水泥注浆加固对工程岩体的作用与影响 [J]. 中国矿业大学学报, 2000 (5): 12-16.
- [4] Evdokimov P D, Adamovich A N, Fradkin L P, et al. Shear strengths of fissures in ledge rock before and after grouting [J]. Hydrotechnical Construction, 1970, 4 (3): 229-233.
- [5] 许宏发, 耿汉生, 李朝甫, 等. 破碎岩体注浆加固强度估计 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35 (11): 2018-2022.
- [6] 黎永索, 张可能. 考虑岩体损伤和注浆加固效应的单元稳定性 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2012, 43 (2): 651-655.
- [7] 路乔, 杨智超, 杨志权, 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.
- [8] 陈星欣, 陈雨洁, 何明高, 等. 盾构地中对接法超前注浆扩散及堵水效果研究 [J]. 土木工程学报, 2024, 57 (增刊2): 108-114.
- [9] 钟宏伟, 秦鹏飞, 卢再光, 等. 富水砂土隧道注浆加固效果评价研究: 以郑州地铁7号线砂土隧道为例 [J]. 西北地质, 2025, 58 (1): 315-322.
- [10] 余成学, 卢薇, 黄祥志. 大断层区隧洞TBM施工超前注浆加固计算 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2005 (3): 36-40.
- [11] 吴松峰, 刘忠, 李奇, 等. 流固耦合作用下富水深埋隧道帷幕注浆力学模型 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (35): 15775-15783.
- [12] 包其刚, 闫云翔, 姚崇凯, 等. 穿越断层破碎带隧道超前注浆加固效果分析 [J]. 交通科学与工程, 2024, 40 (3): 91-99.
- [13] 马新世, 弓培林, 李超. 深部大断面巷道围岩注浆加固技术研究与应用 [J]. 矿业安全与环保, 2021, 48 (3): 62-67.
- [14] 魏文杰. 中天山隧道超高压富水破碎带施工方法研究 [J]. 隧道建设, 2014, 34 (5): 484-488.
- [15] 顾喜鹏. 掘进巷道过断层超前注浆加固技术研究 [J]. 煤, 2024, 33 (7): 26-28.

(下转第78页)

岩土力学

- [3] 吴跃东, 吴鸿昇, 罗如平, 等. 考虑真空度衰减及涂抹区渗透系数变化的真空预压固结解析解 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2016, 44 (2): 122-128.
- [4] 黄朝煊, 王正中, 方咏来. 考虑漏气及井阻非线性的真空预压地基固结解析解 [J]. 岩土力学, 2017, 38 (9): 2574-2582.
- [5] 蔡袁强, 周岳富, 王鹏, 等. 考虑淤堵效应的疏浚淤泥真空固结沉降计算 [J]. 岩土力学, 2020, 41 (11): 3705-3713.
- [6] 雷华阳, 王鹏, 刘旭, 等. 基于气体运移规律的增压式真空预压法加固机制分析 [J]. 岩土力学, 2021, 42 (4): 943-95.
- [7] Wang Jun, Gao Ziyang, Fu Hongtao, et al. Effect of surcharge loading rate and mobilized load ratio on the performance of vacuum-surge preloading with PVDs [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, 47 (2): 121-127.
- [8] Lu Yitian, Chai Jinchun, Ding Wenqi. Predicting deformation of PVD improved deposit under vacuum and surcharge loads [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48 (1): 32-40.
- [9] 吴其长, 徐方, 张期树, 等. 塑料排水板地基侧向变形的模型试验与仿真分析 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51 (6): 113-125.
- [10] 刘景锦, 罗学思, 雷华阳, 等. 等应变条件下增压式真空预压固结解析解 [J]. 岩土力学, 2024, 45 (3): 809-821.
- [11] 崔允亮, 潘方然, 高媛园, 等. 真空预压淤堵区渗透系数的计算方法 [J]. 岩土力学, 2024, 45 (7): 2085-2093.
- [12] Chai Jinchun, Qiao Yafei, Ding Wenqi, et al. Mechanism of airboosting and its effects on vacuum consolidation [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2024, 52 (4): 554-561.
- [13] 孙宏磊, 徐振恺, 刘斯杰, 等. 考虑土柱发展过程的淤泥真空预压大应变固结计算 [J]. 岩土力学, 2025, 46 (1): 133-146.
- [14] 倪睿思, 肖世国, 吴兵, 等. 基于非线性井阻的饱和软弱土无砂增压式真空预压分析方法 [J]. 岩土力学, 2025, 46 (7): 2160-2172.
- [15] Wu Yajun, Wu Jinjin, Lu Yitian, et al. Experimental study on vacuum preloading combined with intermittent airbag pressurization for treating dredged sludge [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2025, 53 (1): 366-377.
- [16] Xu Fang, Yang Junfang, Wu Qichang, et al. Prediction method for lateral deformation of PVD-improved ground under vacuum preloading [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2025, 53 (4): 1021-1034.

(上接第 70 页)

- [16] 杨腾添, 李恒, 周冠南, 等. 软弱地层敞开式 TBM 超前注浆加固技术研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2021, 41 (5): 858-864.
- [17] 毛永强, 张子平, 袁青, 等. 隧道穿越富水破碎带涌水突泥风险评估模型研究 [J]. 人民长江, 2022, 53 (12): 88-95.
- [18] 唐大雄, 孙榛文. 工程岩土学 [M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [19] 何鹏, 刘长武, 王琛, 等. 沉积岩单轴抗压强度与弹性模量关系研究 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2011, 43 (4): 7-12.
- [20] 李增林, 张东升, 王锐, 等. 大断面斜井富水砂化层段注浆改性及围岩控制技术研究 [J]. 煤炭工程, 2024, 56 (8): 38-46.
- [21] 李召峰, 李术才, 刘人太, 等. 富水破碎岩体注浆加固实验与机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36 (1): 198-207.
- [22] 刘琪, 张传健, 颜天佑, 等. 敞开式 TBM 穿越断层破碎带时岩-机作用分析——以滇中引水工程香炉山隧洞为例 [J]. 人民长江, 2021, 52 (10): 165-175.