

钻爆法海底隧道穿越断层破碎带围岩稳定性 综合分析与控制方法研究

白松松¹, 周宗青^{1, 2}, 高成路¹, 孟庆余³, 刘建勋⁴, 高天⁵, 王旭³, 柯成林⁴

(1. 山东大学 齐鲁交通学院, 山东 济南 250061; 2. 山东大学(齐河) 新材料与智能装备研究院, 山东 德州 251114; 3. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308; 4. 中铁十四局 第一工程发展有限公司, 山东 日照 276800; 5. 山东中建城市发展有限公司, 山东 济南 200112)

摘要: 海底隧道穿越断层破碎带等不良地质时的围岩稳定性控制至关重要。提出一种“隧址区大范围稳定性计算先行、高风险区精细化灾变分析紧跟”的围岩稳定性数值分析方法。依托汕头湾海底隧道工程 F9 断层及风化槽段, 分别采用 FLAC3D 和 DEM 方法对隧道爆破开挖过程进行数值模拟, 评估隧道高风险施工段落, 对比研究注浆不同注浆加固圈厚度对隧道围岩变形的控制效果, 提出海面与洞内联合注浆的围岩稳定性控制方案。通过数值模拟与现场实测结果验证了方案的可靠性, 保障了隧道施工安全。相关结论对类似条件海底隧道建设过程中围岩稳定性控制与注浆方案优化具有一定参考价值。

关键词: 隧道工程; 海底隧道; 数值模拟; 流固耦合; 围岩变形; 稳定性控制

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2025)03 - 0691 - 14

Research on comprehensive analysis and control method of surrounding rock stability in submarine tunnel crossing fault fracture zone by drilling and blasting method

BAI Songsong¹, ZHOU Zongqing^{1, 2}, GAO Chenglu¹, MENG Qingyu³,

LIU Jianxun⁴, GAO Tian⁵, WANG Xu³, KE Chenglin⁴

(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China; 2. Research Institute of New Material and Intelligent Equipment, Shandong University(Qihe), Dezhou, Shandong 251114, China; 3. China Railway Design Construction Group Co., Ltd., Tianjin 300308, China; 4. 1st Engineering Development Co., Ltd., China Railway 14th Bureau Group, Rizhao, Shandong 276800, China; 5. Shandong CSEEC Urban Development Co., Ltd., Jinan, Shandong 200112, China)

Abstract: The stability control of surrounding rock is crucial when the submarine tunnel passes through poor geological conditions like fault fracture zone. In this paper, a numerical analysis method of surrounding rock stability is proposed, which requires the stability of the surrounding rock in the whole area of the tunnel to be calculated first, and then the refined hazard process of high-risk area is analyzed. Numerical simulation with FLAC3D and DEM methods are carried out respectively based on the F9 fault and weathering trough section of the Shantou Bay

收稿日期: 2024 - 08 - 19; **修回日期:** 2024 - 11 - 12

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB2603600); 国家自然科学基金资助项目(52279104, 51991391)

Supported by the National Key R&D Program of China(Grant No. 2023YFB2603600) and National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 52279104 and 51991391)

作者简介: 白松松(1997 -), 男, 2019年毕业于石家庄铁道大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事隧道工程重大地质灾害数值仿真方法方面的研究工作。E-mail: bss_student@outlook.com。通讯作者: 周宗青(1988 -), 男, 博士, 现任教授、博士生导师。E-mail: Zongqing.Zhou@sdu.edu.cn

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0622

Submarine Tunnel Project. The high-risk sections of the tunnel were evaluated. The control effect of different grouting reinforcement area thicknesses on the deformation of the tunnel surrounding rock was compared by simulation. Based on the comparison results, a scheme of joint grouting on the sea surface and inside the tunnel was proposed. The reliability of the proposed scheme was verified through numerical simulations and measurements of Shantou Bay Tunnel. The implementation of the grouting scheme ensured the safety of tunnel construction. The relevant conclusions offer valuable insights for controlling the stability of surrounding rock and optimizing grouting schemes during the construction of submarine tunnels under similar conditions.

Key words: tunnel engineering; submarine tunnel; numerical simulation; fluid-solid coupling; rock deformation; stability control

1 引言

海底隧道是打通关键节点、跨越海域天堑、实现区域互联互通的重要链接方式。近年来,我国海底隧道工程数量稳步上升,先后建成了厦门翔安隧道、青岛胶州湾隧道、大连湾海底隧道、港珠澳大桥跨海隧道等,在建有青岛胶州湾第二海底隧道、深江铁路珠江口隧道、甬舟铁路金塘海底隧道等。未来,还将兴建如渤海湾跨海通道、琼州海峡跨海通道等一批世界级海底隧道工程^[1-4]。

围岩稳定性控制是海底隧道建设过程中的基本任务之一^[5],特别是面临断层破碎带、风化槽、节理密集带等不良地质时,在上覆海水无限补给、高水压条件下,造成的突涌水、围岩垮塌灾害相较山岭隧道更加严重,灾后治理更加困难。隧道施工过程中围岩稳定性评估主要采用理论分析、数值模拟以及现场监测等手段。基于断裂、损伤、流固耦合等理论研究围岩稳定性分析及评价方法,取得了丰硕的成果^[6-7]。包焯明等^[8]采用极限分析上限法、围岩整体安全系数法,总结提炼出了复合 2 种模式(掌子面滑移失稳,软弱围岩松散失稳)的高地应力软岩隧道围岩稳定性判定准则。石欣等^[9]在极限分析理论框架下,对既有 2 种适用于线性破坏准则的预测模型进行了修正和扩展,以研究符合非线性 Hoek-Brown 破坏准则的裂隙岩体中隧道开挖面极限支护压力。宋洋等^[10]推导了渗流力作用下圆形洞室弹塑性解析表达式,并通过现场监测,验证了理论分析正确性。然而,在面临复杂地形、复杂地质条件、强流固耦合作用等问题时,理论分析方法存在较大局限性,难以实现定量分析。

随着计算机技术和计算理论的发展,数值模拟已成为隧道围岩稳定性分析至关重要的手段之一^[11-12]。

在岩土工程领域数值计算方法主要可分为连续介质力学和非连续介质力学方法 2 种。其中,连续介质力学方法包括有限差分(FDM)、有限元(FEM)等,具有计算精度高、稳定性好、易于处理复杂几何形状的特点,广泛应用于隧道、矿山巷道岩体稳定性分析中^[13-17]。王琴等^[18]采用 FLAC3D 数值模拟结合现场监测的方法,依托天成坝隧道研究了 5 种厚度下复杂煤层组的围岩变化规律,并对比研究了三台阶和三台阶预留核心土 2 种工法对围岩稳定性的控制效果。陈一凡等^[19]依托甬舟铁路金塘海底隧道,建立了考虑渗流的盾构隧道对接有限元模型,研究了对接对开挖面失稳机制以及极限支护压力的影响。刘昆珏等^[20]通过有限元极限分析结合随机场分析的方法,研究了围岩参数空间变异性对连拱隧道施工稳定性的影响。以非连续介质力学为基础的离散元(DEM)、不连续变形分析法(DDA)等方法,通过将岩体视为颗粒或块体,实现了大变形、破裂等现象的有效模拟^[21-23]。离散单元法自 1979 年由 P. A. Cundall 等^[24-25]提出以来,经过 40 余年的不断发展,逐渐成为了搭建岩土体“微观-介观-宏观”分析桥梁的重要工具,在隧道围岩稳定性分析^[26]、突涌水灾害模拟^[27]中得到了广泛应用。梁宸和王迎超^[28]使用 UEDC 离散元数值模拟软件,模拟隧道钻爆法施工时裂隙围岩塌方运动全过程,揭示塌方过程中位移、速度、加速度等的变化规律。蒲松等^[29]采用离散元软件 PFC 建立了三维离散地层模型,并通过利用 FLAC 内置命令生成小导管和锚杆连续结构单元,进而构建离散-连续耦合模型,以此分析不同支护方案对掌子面稳定性的影响。M. T. Xian 等^[30]采用 DEM-CFD 耦合方法,研究了地下水渗流与断层带破碎岩体运移之间的复杂耦合关系,揭示了地下水侵蚀诱发断层突涌水的力学机制。然而,当面临数十米甚至数百米的工程尺度计算模型时,计算效率

的大幅降低严重制约了非连续介质力学方法的应用。

本文依托汕汕高铁汕头湾海底隧道, 综合 FDM 与 DEM 两种模拟方法的优势, 建立了一种“隧址区大范围稳定性计算先行、高风险区精细化灾变分析紧跟”的隧道工程围岩稳定性分析范式, 对海底隧道施工风险进行了分析评估, 提出了围岩稳定性控制方法, 并验证了其可靠性, 对科学指导现场施工, 保障隧道建设安全有重要意义。

2 工程概况

汕头湾海底隧道是广东汕头至汕尾高速铁路的关键控制性工程, 位于汕头湾榕江入海口。隧道全长 9 781 m, 海域钻爆段长 1 056 m, 穿越 F8~11 共 4 条断层, 如图 1 所示。F9 断层位于汕头湾主航道下, 物探及钻探结果揭示里程为 DK161+070~+320。断层走向为 320°(NW 向), 倾角 75°。



图1 汕头湾海底隧道平面位置

Fig.1 Plane location of Shantou bay submarine tunnel

海上钻探结果如图 2 所示, 隧道右侧里程 DK161+096 和左侧里程 DK161+110 为分界, 小里程范围岩体较完整, 局部较破碎, 局部辉绿岩岩脉侵入, 接触带附近岩体破碎; 大里程范围至隧道右侧 DK161+196 和隧道左侧 DK161+210 岩体受断层及辉绿岩岩脉侵入影响, 岩体破碎, 局部较破碎和极破碎, 呈条带状分布。断层下盘较稳定, 上盘破碎, 上盘因后期风化侵蚀, 形成风蚀凹槽, 按隧道上覆弱风化花岗岩 1 倍洞径考虑, 风蚀凹槽分布在隧道左侧里程 DK161+110~DK161+144 和隧道右侧里程 DK161+096~DK161+130, 宽约 34 m。风蚀凹槽最低点处, 隧道拱顶弱风化层厚度仅为 2.3 m, 在爆破开挖扰动下极易失稳, 诱发重大突水、塌方灾害。

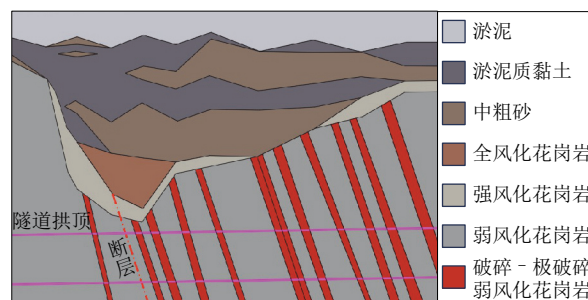


图2 F9断层及风化深槽区域地质剖面图

Fig.2 Geological profile of the F9 fault and weathered trough area

3 FLAC3D 大范围围岩稳定性分析

基于“隧址区大范围稳定性计算先行、高风险区精细化灾变分析紧跟”的分析模式, 首先使用 FLAC3D 软件建立隧址区域大范围围岩稳定性数值计算模型, 分析隧道施工过程中的高风险区域。

3.1 FLAC3D 数值计算原理

FLAC3D 采用显式差分求解算法, 即给定 t 时刻场变量和 Δt 时间步总增量, 从而确定 $t + \Delta t$ 时刻的场变量状态^[3]。其计算流程主要分为 4 个步骤:

(1) 根据牛顿第二定律求解平衡方程, 得到网格节点加速度如下:

$$M_i \ddot{u}_i = F_i^{\text{total}} \quad (1)$$

式中: M_i , $\ddot{u}_i$, F_i^{total} 分别为节点 i 的质量、加速度和所受的合力;

(2) 采用时间积分计算节点速度和位移。

(3) 通过空间导数求解单元应变率:

$$\int v_{i,j} dV = \int v_i n_j dS \quad (2)$$

$$\xi_{i,j} = -\frac{1}{6V} \sum_{l=1}^4 (v_i' n_j' + v_j' n_i') S^l \quad (3)$$

式中: v_i 为节点 i 的速度, $v_{i,j}$ 为速度对位置矢量 x_j 求偏导, n_j 为单元表面的外法线矢量, $\xi_{i,j}$ 为单元应变率, V 为单元体积(此处为四面体), S^l 为单元第 l 个平面的面积。

(4) 进行单元积分计算网格节点内力: 将计算所得新的内力传入步骤(1)中, 形成计算循环, 直至模型收敛。

3.2 FLAC3D 模型构建

选取隧道里程 DK161+080~+240 为模型范围, 建立 FLAC3D 计算模型, 如图 3 所示。模型尺寸为 160 m(长)×160 m(宽)×150 m(高), 隧道开挖轮廓直径为 16.84 m, 衬砌厚度为 0.2 m, 模型网格数为

340 291。模型底部约束竖向位移,四周约束水平位移,顶部为自由边界。海床距海面约 22 m,因此在模型顶部设置 22 m 高的水头,四周及底部设置为自由透水边界。隧道施工方法为五级台阶法(见图 3)。

3.3 模型参数设置

岩体本构模型选取莫尔-库仑模型,通过地质勘探所得到的物理力学参数如表 1 所示。

通常勘察阶段的地质参数并未考虑岩体结构面对力学参数的弱化,因此,所得到的力学参数一般较大,计算得到的高风险区域较小。本文采用表征单元体(representative elementary volume, REV)^[32-33]方法对花岗岩地层的岩体力学参数进行修正。获取岩体 REV 力学参数的主要流程如下:

- (1) 选取汕头湾海底隧道 DK160+910~+950 断面,使用三维激光扫描仪采集掌子面及围岩结构面点云数据;
- (2) 基于结构面点云数据,形成初始结构面几何数据,主要包括结构面中心点坐标、法向矢量、倾向、倾角;
- (3) 通过聚类分析方法分析该区域岩体结构面的 3 个优势组,并得到优势组结构面的产状分布范围;
- (4) 采用数理统计方法获取优势组结构面几何

- 数据的分布特征值(均值、标准差);
 - (5) 基于结构面几何数据分布特征值建立离散裂隙网络模型;
 - (6) 基于隧道现场岩石样本开展室内单轴压缩和三轴压缩试验、获得岩石宏观力学参数;
 - (7) 建立岩石的 DEM 颗粒模型,通过试错法标定其接触模型的细观参数;
 - (8) 开展 DEM 结构面之间实验,标定 DFN 光滑节理模型的细观参数;
 - (9) 构建一系列长宽高比例为 1:1:2 的多尺寸合成岩体(synthetic rock mass, SRM)模型;
 - (10) 选取岩体裂隙密度、单轴抗压强度、弹性模量、泊松比、黏聚力和内摩擦角作为目标参数,分析随着模型尺寸增大,目标参数的变化规律;
 - (11) 选取变异系数和差值比率作为 REV 尺寸和力学参数评价指标,当上述目标参数的评价指标均小于 10%时,即可得到 REV 的尺寸与岩体力学参数。
- 上述步骤中优势组结构面几何参数、接触模型细观参数等数据及分析过程详见孙基伟^[33]的研究。最终得到 REV 尺寸为 6 m×6 m×12 m,岩体等效物理力学参数如表 2 所示。

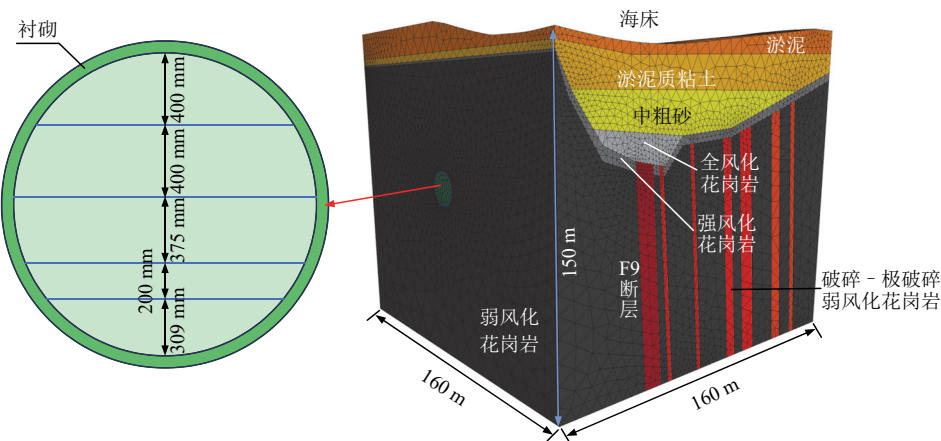


图 3 F9 断层区域三维数值计算模型

Fig.3 Numerical simulation model of the F9 fault and weathered trough area

表 1 勘探所得各地层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of each stratum obtained by geological prospecting								
地层类型	天然密度/ (kg·m ⁻³)	压缩系数/ MPa ⁻¹	泊松比	弹性模量/ MPa	单轴抗压 强度/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/ (m·s ⁻¹)
淤泥	1 600	1.93	0.45	1.37	—	8.31	4.17	2.31×10 ⁻⁷
淤泥质黏土	1 750	0.59	0.40	3.94	—	13.21	11.78	2.31×10 ⁻⁷
中粗砂	1 950	—	0.30	—	—	—	30	2.55×10 ⁻⁴
全风化花岗岩	1 940	0.25	0.25	40	24	30.33	22.57	5.79×10 ⁻⁶
强风化花岗岩	2 100	0.20	0.20	50	42	500	33	3.47×10 ⁻⁶
弱风化花岗岩	2 160	0.25	0.25	8 370	81.7	1 330	42.9	9.26×10 ⁻⁶

表 2 基于 REV 的岩体等效物理力学参数
Table 2 Isokinetic physic-mechanical parameters of rock mass based on REV

地层类型	天然密度/ (kg·m ⁻³)	压缩系数/ MPa ⁻¹	泊松比	弹性模量/MPa	单轴抗压 强度/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/ (m·s ⁻¹)
淤泥	1 600	1.93	0.45	1.37	—	8.31	4.17	2.31×10 ⁻⁷
淤泥质黏土	1 750	0.59	0.4	3.94	—	13.21	11.78	2.31×10 ⁻⁷
中粗砂	1 950	—	0.3	—	—	—	30.00	2.55×10 ⁻⁴
全风化花岗岩	1 940	0.25	0.25	35.3	16.0	20	17.20	5.79×10 ⁻⁶
强风化花岗岩	2 100	0.2	0.2	40.2	19.4	210	19.40	3.47×10 ⁻⁶
弱风化花岗岩	2 160	0.25	0.25	5600	33.5	490	20.30	9.26×10 ⁻⁶

3.4 爆破扰动影响模拟方法

根据围岩损伤程度不同，爆破作用下的围岩破坏区域可分为爆破粉碎区、爆破裂隙区和爆破振动区^[34]。其中，爆破粉碎区岩石完全破碎，丧失承载能力；爆破裂隙区岩体位于粉碎区外围，尚且具有一定承载能力；爆破振动区围岩岩体力学性质不会受到大的破坏，围岩完整，力学性能保持稳定^[35]。

(1) 爆破扰动分区损伤性能

在考虑爆破扰动的数值模拟中，通常将爆破粉碎区视为删除的单元。因此，实现爆破扰动影响模拟的关键在于表征爆破裂隙区岩体力学性能的变化。基于爆破前后岩体密度及泊松比近似相等的假定，可将岩体损伤因子与岩石波速建立数学关系以表征爆破后岩体的完整性^[36]，即

$$D=1-\frac{E}{E_0}=1-K_v=1-\left(\frac{v}{v_0}\right)^2 \tag{4}$$

式中： D 为岩体损伤因子； E_0 ， E 分别为爆破前和爆破后的等效弹性模量； K_v 为岩体完整性系数； v_0 ， v 分别为爆破前后同一测试部位的声波速度。

(2) 爆破裂隙区范围分析

为评估爆破裂隙区范围，在距掌子面 5~15 m 位置开展了多次岩石波速测试，如图 4 所示，用以等效分析围岩松动圈范围。测试设备为 RSM-SY6(C)非金属声波检测仪，测试结果如图 5 所示。

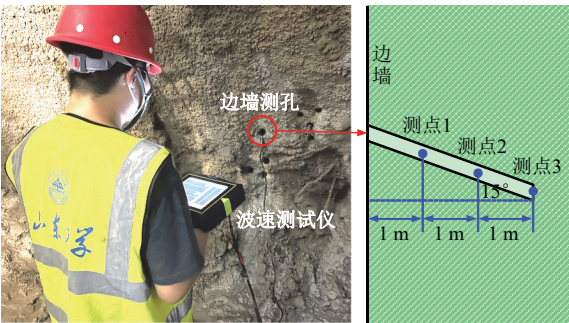


图 4 岩石波速测试方案
Fig.4 Rock wave velocity test

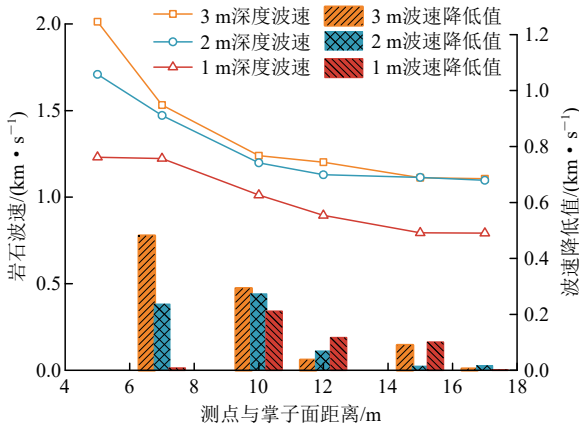


图 5 岩石波速测试结果
Fig.5 Result of rock wave velocity test

测试结果显示，围岩深度 3，2 m 的波速在前 2 次爆破时骤减，此时爆破位置与测点距离分别为 5 和 7 m。当爆破位置达到 10 m 以上时，岩石波速降低速率降低。围岩深度 1 m 波速降低速率先低后高，且在距离达到 10~12 m 时仍有降低。基于上述测试结果，推测当前爆破方案爆破裂隙区范围为隧道开挖轮廓外 10~12 m。结合工程经验，多级台阶自上而下施工时，裂隙区范围取上限值^[34]，即 12 m。将岩石波速测试结果代入式(4)计算得到平均岩体损伤因子为 0.56。由此可得出爆破后裂隙区内全风化、强风化、弱风化花岗岩弹性模量分别为 12.58，17.54 和 2.96 GPa。

基于上述结论，在模型开挖后弱化该开挖步爆破裂隙区范围内的网格单元参数，如图 6 所示，即可实现爆破扰动影响的模拟。

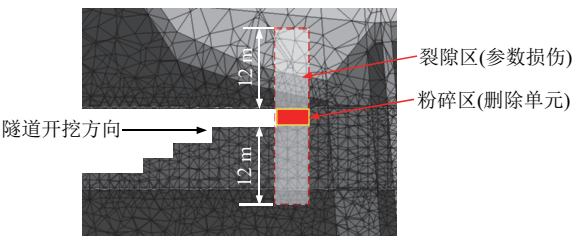


图 6 爆破扰动模拟示意图
Fig.6 Blasting disturbance simulation

3.5 大区域围岩稳定性计算结果

变形量是判定围岩稳定性最直观的因素，也是隧道施工过程中监控量测的重点参数。本文参考规程^[37]中对隧道围岩变形安全阈值的规定，判定模型风险区，即当拱顶位移 $>60\text{ mm}$ 或水平收敛 $>40\text{ mm}$ 时，围岩变形量过大，处于危险状态。

基于前文建立的数值计算模型，设置如下 2 个计算工况：

工况一：计算模型使用勘探岩体参数(见表 1)，且不考虑爆破扰动影响；

工况二：计算模型使用 REV 岩体参数(见表 2)，考虑爆破扰动影响；

各工况计算结果如图 7 所示。工况一计算得出风险区有两处，分别为 DK161+134~+139 和 DK161+190~+200，其位于 F9 断层核心影响带边界与 F9 断层影响带边界。工况二计算得出风险区有 3 处，其中风险区①(DK161+110~+138)的横向、纵向范围均明显大于前者，风险区②(DK161+189~+200)范围变化不明显，风险区③(DK161+208~+217)为本工况计算中新增风险区。

图 8，9 分别展示了 2 种计算工况下隧道拱顶沉降和水平收敛情况。结果显示，采用 REV 岩体参数计算得到的最大拱顶沉降量为 4.704 m，明显高于勘探岩层参数(3.622 m)；2 种工况计算得到的水平变形均处于安全范围。

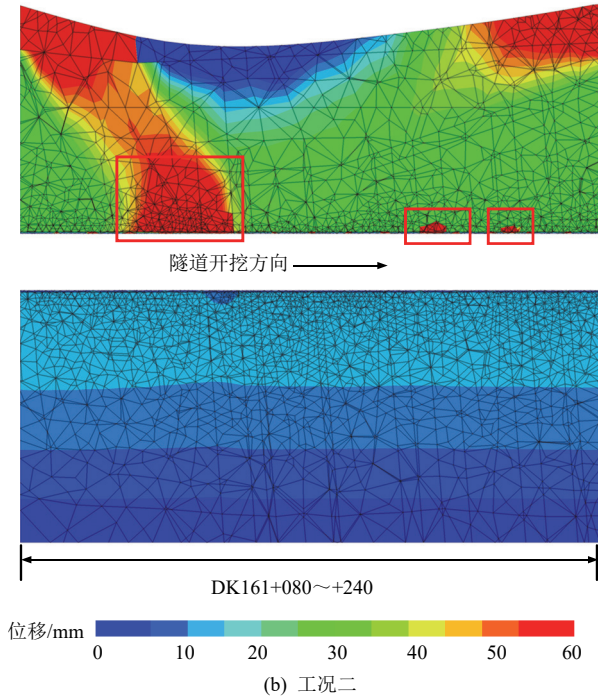
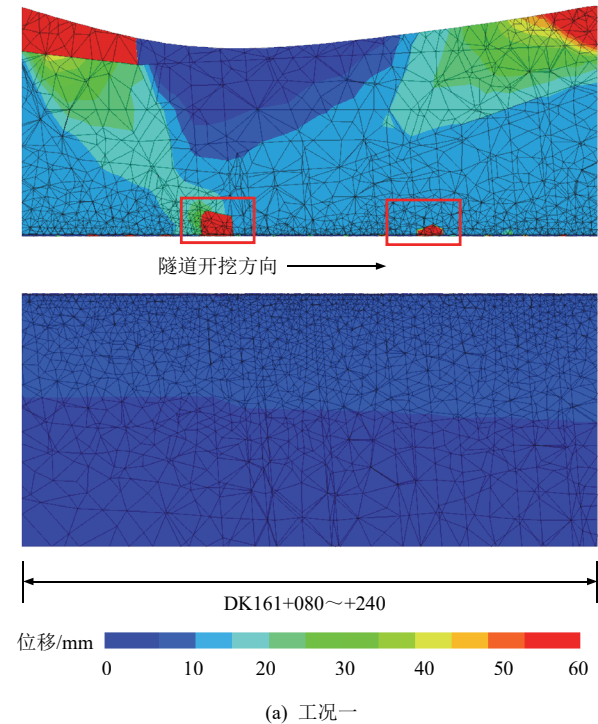


图 7 开挖后隧道纵剖面位移云图

Fig.7 Displacement contour of vertical section after excavation

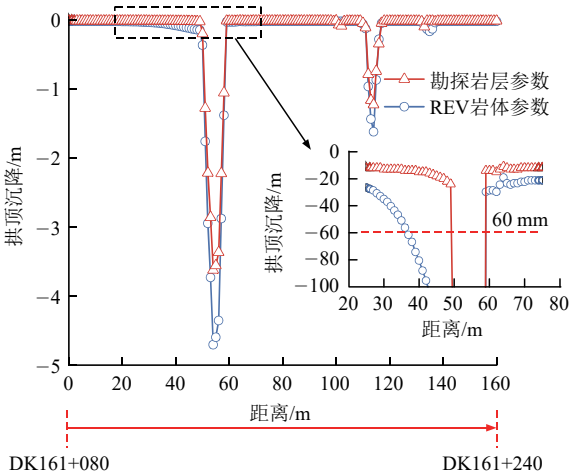


图 8 拱顶沉降曲线

Fig.8 Settlement curves of roof

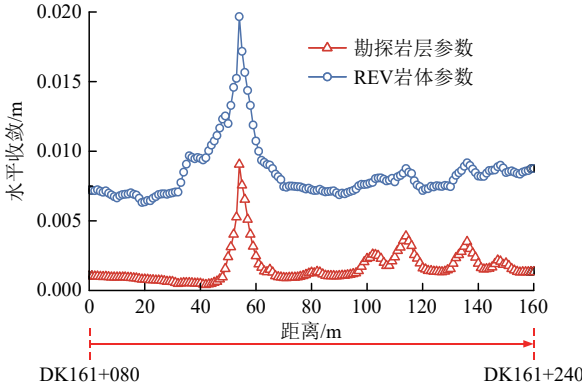


图 9 水平收敛曲线

Fig.9 Horizontal convergence curves

综合上述结果, 得出高风险段落为 DK161+110~+139, DK161+189~+200, DK161+208~+217 三段。

4 DEM 高风险区精细化灾变分析

基于本文节 3 中区域稳定性计算结果, 选取 DK161+120, +125, +135, +195, +215 为高风险断面, 采用二维 DEM-CFD(Computational Fluid Dynamics, 即计算流体动力学)耦合方法开展仿真分析。

4.1 DEM-CFD 流固耦合仿真基本原理

本文采用 Unresolved 的 DEM-CFD 耦合框架, 即以 DEM 模拟围岩变形, CFD 模拟地下水渗流。其中, DEM 以牛顿第二定律描述颗粒的运动过程如下:

$$\sum F_i = m_i(\ddot{x}_i - g_i) \quad (5)$$

$$\sum M_i = I_i \ddot{\theta}_i \quad (6)$$

式中: m_i , I_i 分别为颗粒 i 的质量和转动惯量; $\ddot{x}_i$, $\ddot{\theta}_i$ 分别为颗粒 i 的加速度和角加速度; $\sum F_i$, $\sum M_i$ 分别为作用在颗粒 i 的合力与合力矩。

CFD 渗流场部分采用不可压缩的缓慢渗流方程计算:

$$\bar{\nabla} \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (7)$$

式中: $\mathbf{v}$ 为渗流速度, 可由达西定律计算:

$$\mathbf{v} = -k \bar{\nabla} p \quad (8)$$

式中: k 为岩层渗透系数, $\bar{\nabla} p$ 为局部压力梯度。

流体对颗粒的作用力主要考虑拖曳力、压力梯度力 2 种, 表达式如下:

$$f_{d,i} = \frac{1}{2} C_d \rho \pi r_p^2 |U_r| U_r \quad (9)$$

$$f_{\nabla p,i} = -V_p \nabla p \quad (10)$$

式中: C_d 为拖曳力系数, 与流体的雷诺数有关; ρ 为流体密度; r_p 为颗粒半径; U_r 为颗粒与流体间的相对速度; V_p 为颗粒速度; ∇p 为流体压力梯度。

4.2 模型构建

建立计算模型如图 10 所示, 模型颗粒总数为 247 686, 模型底部、左、右均为固定边界, 限制颗粒的位移, 顶部为自由边界, 并设置流场入口, 流场出口为隧道开挖边界。

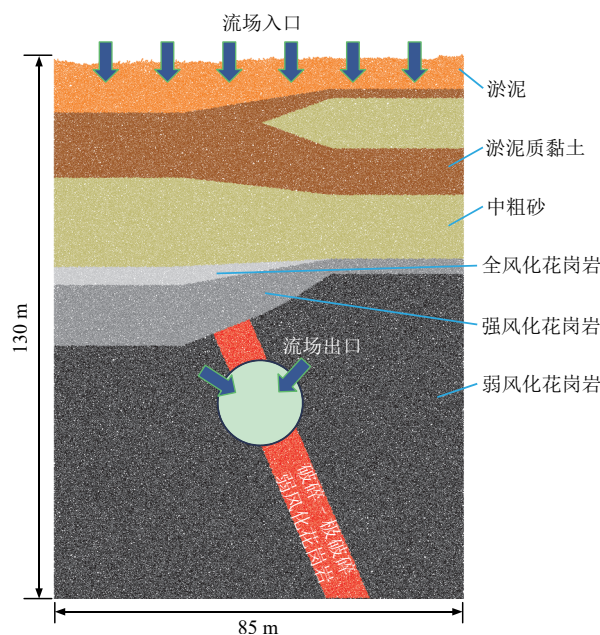


图 10 高风险断面 DEM 计算模型(DK161+135)

Fig.10 DEM simulation model for high-risk sections

4.3 模型参数设置

DEM 模型中主要包含有黏性土(淤泥、淤泥质黏土)、无黏性土(中粗砂)和岩体(全风化、强风化、弱风化花岗岩)三类介质, 根据材料特性分别采用不同的参数标定策略。

(1) 淤泥、淤泥质黏土

建立高×宽为 6 m×12 m 的二维 DEM 模型, 通过试错法不断改变颗粒的细观参数, 开展双轴压缩试验。设置模型围压分别为 130, 195 和 260 kPa, 对应平均埋深约为 10, 15 和 20 m 的围压, 以表 2 中淤泥和淤泥质黏土的黏聚力和内摩擦角为判断依据。

(2) 中粗砂

DEM 标定模型尺寸设置为 6 m×12 m, 开展双轴压缩试验。设置模型围压分别为 360 和 440 kPa, 对应平均埋深约为 50 和 60 m 时的围压, 以表 2 中粗砂的内摩擦角为判断依据。

(3) 全/强/弱风化花岗岩

基于本文节 3.3 中计算得到的 REV 尺寸与力学参数开展岩体 DEM 细观参数标定。建立模型尺寸为高×宽 = 6 m×12 m, 分别开展单轴压缩、双轴压缩试验, 以表 2 中花岗岩单轴压缩强度、弹性模量、泊松比、内摩擦角和黏聚力为判定标准。

采用上述参数标定方法, 最终得到的模型细观参数如表 3 所示。

表 3 DEM 颗粒细观参数
Table 3 Micro-parameters of DEM particles

地层类型	最小颗粒半径/m	粒径比	颗粒弹性模量/GPa	颗粒摩擦因数	PBM 弹性模量/GPa	PBM 刚度比	PBM 法向强度/MPa	PBM 切向强度/MPa	PBM 摩擦角/(°)
淤泥	0.1	1.5	1.0	0.25	0.001	1	0.001	0.001	15
淤泥质黏土	0.1	1.5	1.0	0.25	0.01	1	0.004	0.005	20
中粗砂	0.1	1.5	1.0	0.3	-	-	-	-	-
全风化花岗岩	0.1	1.5	1.0	0.3	0.12	1	0.02	0.03	27
强风化花岗岩	0.1	1.5	1.0	0.44	0.76	1	1.53	1.64	35
弱风化花岗岩	0.1	1.5	1.0	0.44	6.91	1	17.6	18.6	35

4.4 爆破扰动影响模拟

基于节 3.4 结论设置爆破碎裂区和爆破裂隙区如图 11 所示。裂隙区的弱风化、强风化花岗岩地层细观参数如表 4 所示。

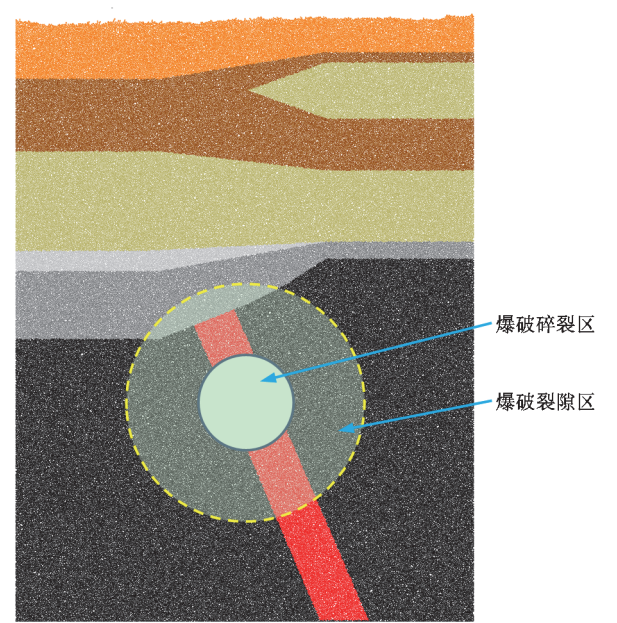


图 11 DEM 模型爆破扰动范围
Fig.11 Range of blasting disturbance of DEM model

表 4 爆破裂隙区细观参数

Table 4 Micro-parameters of the blasting fracture zone

地层名称	参数单位	损伤因子	值
强风化	颗粒弹性模量(GPa)	0.56	0.44
花岗岩	PBM 弹性模量(GPa)		0.44
弱风化	颗粒弹性模量(GPa)		1.32
花岗岩	PBM 弹性模量(GPa)		1.32

4.5 高风险断面围岩稳定性计算结果

计算得到各高风险断面计算位移分布情况如图 12 所示。DK161+135 断面拱顶围岩在重力和渗流耦合作用下坍塌，DK161+125 断面拱顶发生掉块。其余 3 个断面拱顶沉降均超过 60 mm。

统计各高风险断面拱顶最大位移如表 5 所示。从整体上看，各断面隧道拱顶最大竖向位移均大于 60 mm。隧道坍塌最严重断面位于 DK161+135，围岩发生大范围坍塌，FLAC3D 计算得到拱顶沉降最大区域也在该断面附近，两者计算结论可相互印证。此断面 F9 断层上盘风化槽、(强风化花岗岩下边界)位于隧道顶部偏右侧，与隧道边界最近距离约 8 m，隧道拱顶与强风化花岗岩下边界距离约 9 m。由于洞身范围内，存在较大范围的破碎 - 极破碎花岗岩

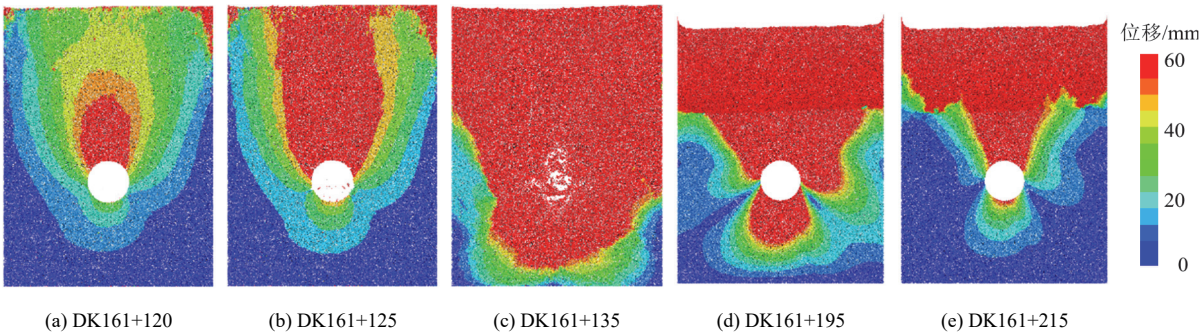


图 12 各高风险断面位移分布
Fig.12 Displacement distribution of high-risk sections

表 5 高风险断面围岩竖向/横向最大变形
Table 5 Maximum vertical/transverse displacement of surrounding rock of the high-risk sections

桩号	拱顶沉降/mm	边墙收敛/mm
DK161+120	107	27
DK161+125	118	掉块
DK161+135	坍塌	坍塌
DK161+195	237	74
DK161+215	173	55

与强风化花岗岩层贯通，因而造成了大范围的围岩坍塌。

进一步绘制该断面开挖过程中位移分布情况与力链分布情况，如图 13，14 所示。开挖上台阶时，隧道拱顶位移明显增大，并出现 3.9 m 高的松动范围。随着中、下台阶的开挖，拱顶坍塌范围逐渐扩大，最大达到 13.9 m。此时坍塌区域顶部已进入全风化花岗岩及中粗砂地层，在海水持续渗流作用下最终会形成直达海床的通道。当开挖中台阶时，隧道边墙出现破坏区域，如图 14(c)所示，随着进一步开挖破坏范围不断增大，直至最终发生坍塌，如图 14(e)所示。此外，隧道仰拱位置也出现了较大范围的围岩破坏。

上述计算结果表明：高风险断面围岩变形均超过规范要求限度。此结论与 FLAC3D 计算结果一致。

因此，亟需对该地层进行注浆加固处理，从而实现
对围岩变形的控制。

5 围岩稳定性控制方法研究

隧道超前加固手段主要包括：超前小导管、超前管棚、超前注浆加固等方法。隧道超前加固手段主要包括：超前小导管、超前管棚、超前注浆加固等方法。由于海底隧道施工过程中超前加固需兼顾堵水功能，因而多采用注浆加固方式对断层破碎带等不良地质进行处理。通过对比不同工况下围岩变形情况，选取最佳注浆加固圈范围，综合地质条件提出注浆加固方案。

5.1 注浆方案比选

本文在数值计算中做出如下假设：

(1) 弱风化花岗岩层注浆仅封堵岩层中的裂隙，不提高岩体强度，即模型渗透系数增大、强度不变；

(2) 强、全风化花岗岩注浆后强度提高 50%^[38]。

因此，FLAC3D 模型在注浆加固范围内强风化、全风化地层的单轴抗压强度、抗剪强度提高 50%，渗透系数设置为 $8 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ；弱风化地层仅将渗透系数设置为 $8 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 。同理，DEM 模型在注浆加固范围内的强风化、全风化地层细观 PBM 法向和切向强度提高 50%；3 种花岗岩地层注浆加固范围内的渗透系数设置为 $8 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 。

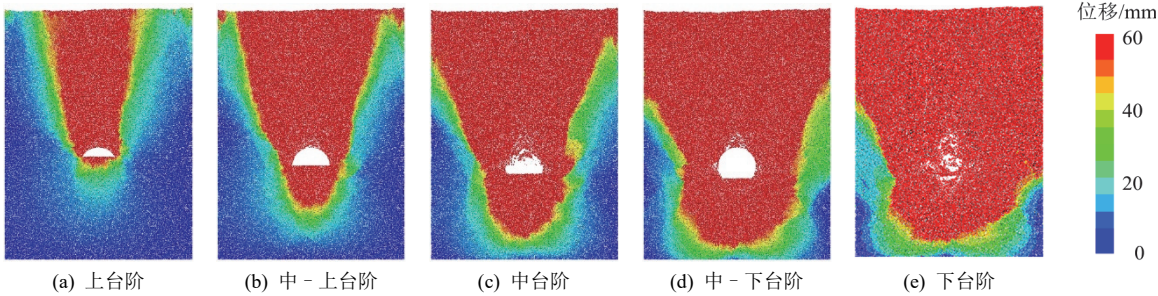


图 13 DK161+135 断面位移分布情况
Fig.13 Displacement distribution of DK161+135

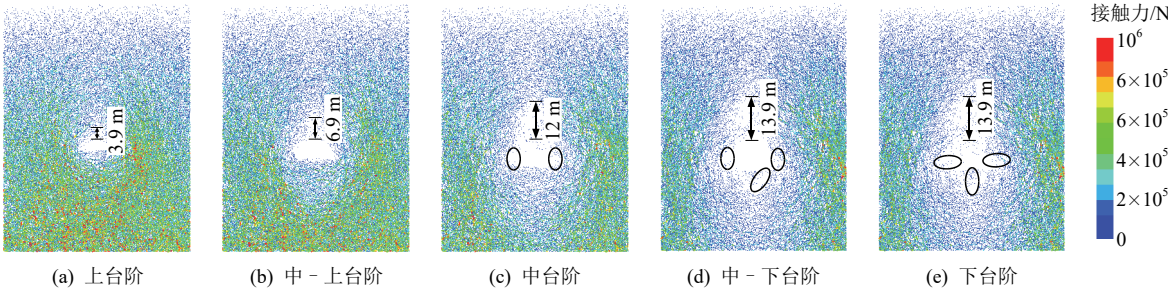


图 14 DK161+135 接触力链分布情况
Fig.14 Contact force chain distribution of DK161+135

基于上述方法, 设置注浆加固圈厚度为 5, 8, 10 m 三种工况开展数值分析。FLAC3D 区域稳定性和 DEM 局部稳定性分析结果如图 15 所示。

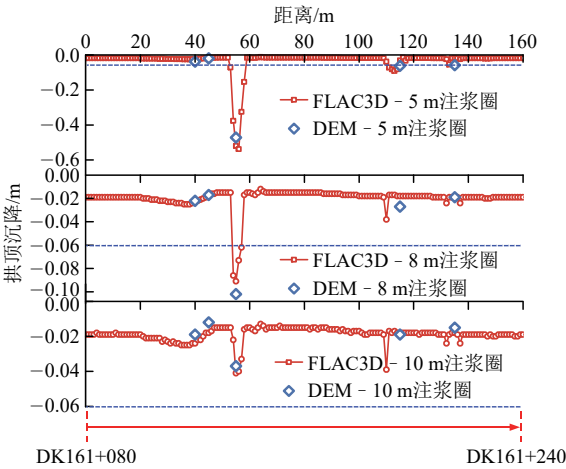


图 15 不同注浆圈厚度对应拱顶沉降值

Fig.15 Tunnel roof settlement of different grouting area thickness

结果显示: 当注浆圈厚度为 5 m 时, 三处高风险区域内仍存在较大范围超过拱顶沉降控制值(60 mm)。当注浆圈范围达到 8 m 时, 除 DK161+134~+137 拱顶沉降大于 60 mm 外, 其余部分均处于安全范围。进一步扩大注浆圈范围直至 10 m 时, 模型全部拱顶沉降满足安全控制要求。

基于上述计算结果, 隧道超前注浆加固方案应满足如下要求:

- (1) DK161+095~+150 段注浆厚度应不小于 10 m;
- (2) DK161+190~+220 段注浆厚度应不小于 8 m;
- (3) 其余区域可考虑采用 5 m 帷幕注浆, 控制围岩稳定性的同时封堵围岩中的裂隙水。

5.2 综合注浆方案

综合地质、数值分析、爆破裂隙区等多方面因素, 提出了如下分区注浆加固方案(见图 16):

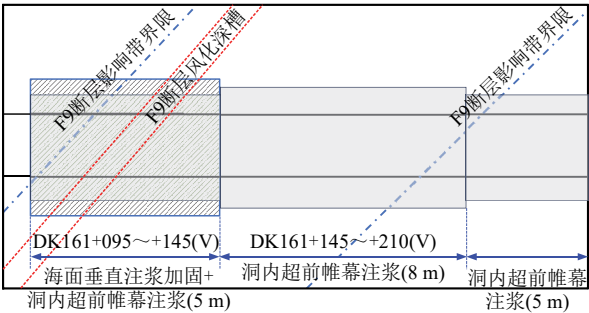


图 16 注浆方案平面图

Fig.16 Plan of grouting scheme

(1) DK161+095~+145 段为重点加固区域, 采用海面垂直注浆加固与洞内超前帷幕注浆加固, 合计注浆加固范围约 15 m, 注浆横断面如图 17 所示。

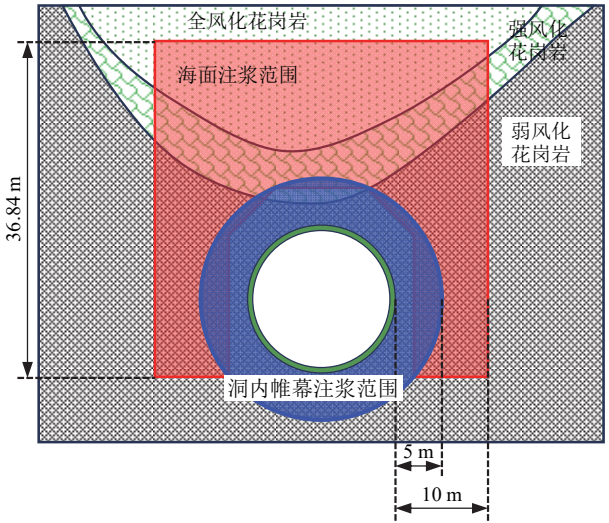


图 17 海面、洞内联合注浆横断面图

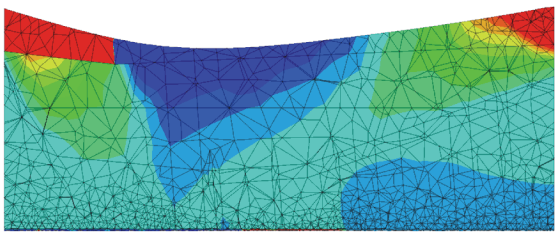
Fig.17 Cross section diagram of grouting scheme from sea surface and inside tunnel

- (2) DK161+145~+210 段为一般加固区域, 采用洞内超前帷幕注浆加固(8 m 注浆加固圈)。
- (3) 其余段落采用 5 m 注浆加固圈。

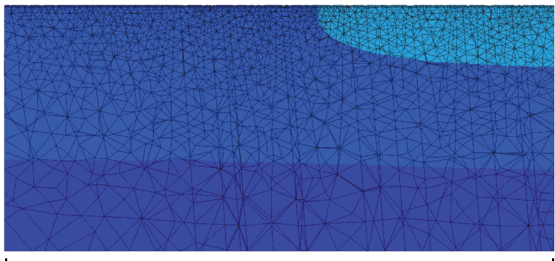
5.3 围岩稳定性控制效果

(1) 数值模拟验证

基于加固方案调整 FLAC3D 和 DEM 模型并开展计算, 得到计算结果如图 18 所示。分析图中数据可得出, 采用联合注浆加固方案围岩变形量均小于安全阈值, 围岩处于稳定状态。



隧道开挖方向 →



DK161+080~+240

(a) 纵断面位移云图

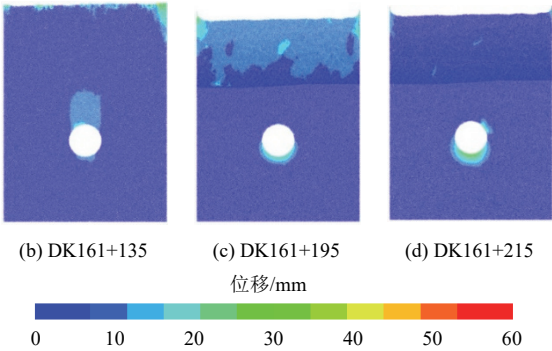


图 18 注浆后计算结果

Fig.18 Simulation results after grouting

(2) 现场实测数据对比

统计隧道穿越 F9 断层施工阶段监控量测结果，并与数值模拟所得结果进行对比。隧道开挖过程累计最大拱顶沉降与最大水平收敛变形如图 19 所示。从位移结果可知，隧道拱顶变形和边墙收敛均控制在 40 mm 以内，围岩处于稳定状态。

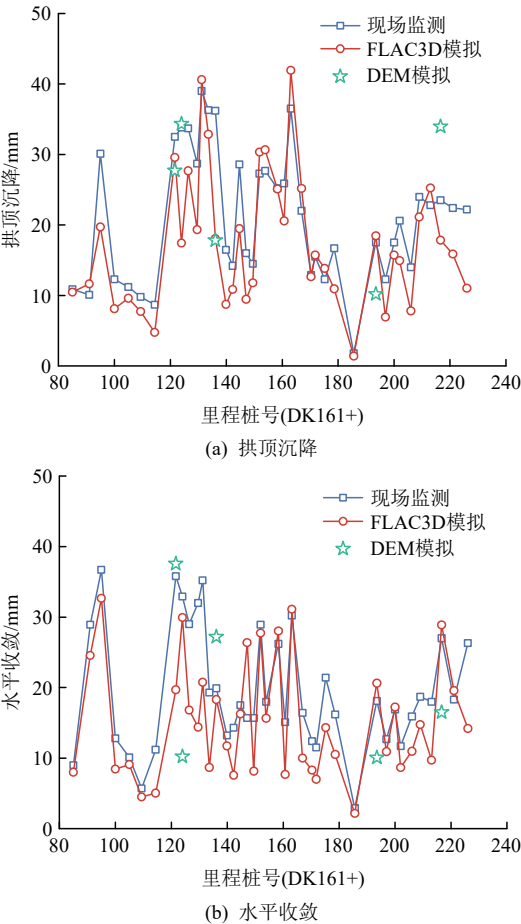
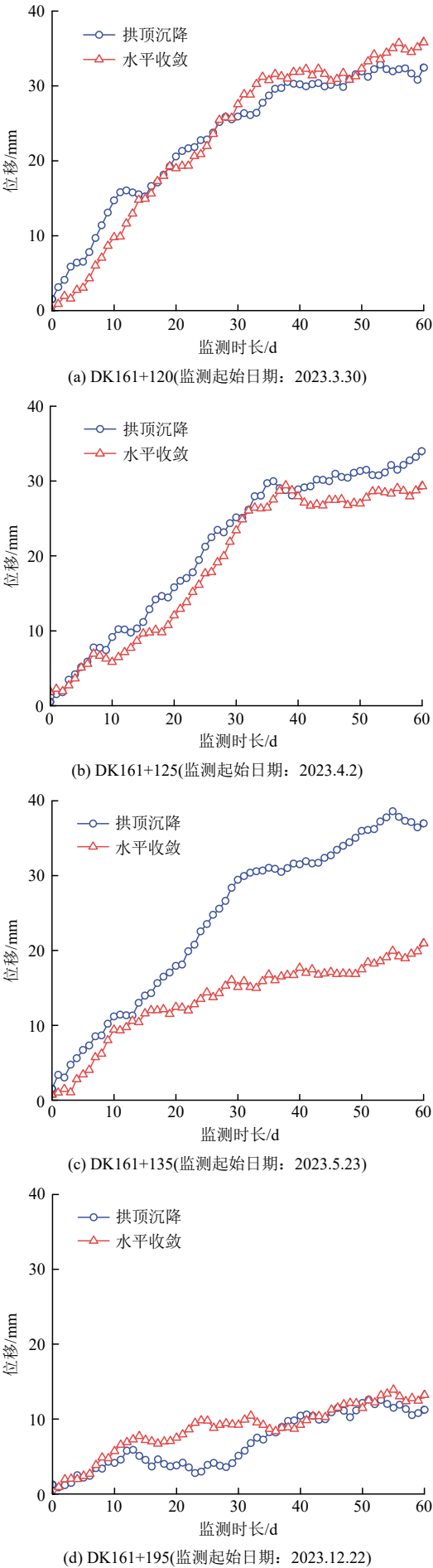
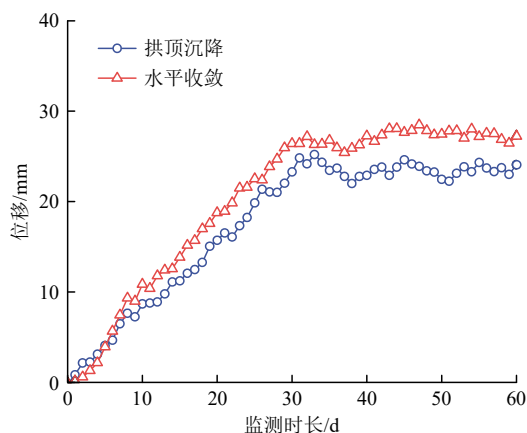


图 19 监控量测与数值模拟结果对比情况

Fig.19 Comparison of monitoring and simulation results

统计高风险断面(DK161+120, +125, +135, +195, +215)施工过程中持续变形监测结果如图 20 所示。图中结果显示，隧道围岩累计变形量在较短





(e) DK161+215(监测起始日期: 2024.1.31)

图 20 高风险断面围岩连续变形监测情况

Fig.20 Monitoring results of surrounding rock continuous deformation in high-risk sections

时间内达到峰值, 各高风险断面变形峰值均在规范要求范围内, 隧道施工过程中围岩处于稳定状态。

6 讨 论

本文所采用的“隧址区大范围稳定性计算先行、高风险区精细化灾变分析紧跟”模拟方法兼顾计算效率与分析精度, 可为复杂工程围岩稳定性的高效分析提供借鉴。然而, 计算过程中针对岩体裂隙、注浆加固体等部分采用了等效、平均的方法, 未能实现对岩体裂隙分布、浆液真实扩散范围的精确建模, 这会造成一定程度的误差, 有待建模水平的进一步提升。此外, 在流固耦合模拟隧道开挖过程时未能考虑爆破扰动下花岗岩裂隙中水压急剧变化的影响^[39], 这有待于数值模型与算法的进一步优化。最后, 在隧道支护方面受限于模型单元尺寸和计算效率影响, 未能精确建模, 并未分析此类条件下支护结构对围岩稳定性的影响。

7 结 论

本文依托汕汕铁路汕头湾海底隧道, 分析了海底隧道穿越断层破碎带及风化深槽施工过程中围岩稳定性的情况, 并提出了综合注浆加固方案。本文主要结论如下:

(1) 综合连续、非连续介质力学计算方法的特点, 提出了一种适用于工程尺度的“隧址区大范围稳定性计算先行、高风险区精细化灾变分析紧跟”围岩稳定性分析方法, 兼顾了计算效率的同时实现了岩体破坏灾变过程的精确分析。

(2) 分析了海底隧道穿越断层破碎带时围岩变形情况, 得到了 DK161+110~+139, DK161+189~+200, DK161+208~+217 高风险段落, 揭示了渗流、应力耦合作用下围岩坍塌的灾变演化过程。

(3) 分析了不同高风险段落的最佳注浆圈厚度, 综合地质、围岩松动圈范围等多方因素, 提出了海面与洞内联合注浆方案。通过对比数值模拟与现场实测数据, 验证了方案的可靠性, 保障了隧道施工安全。

参考文献(References):

- [1] 陈建芹, 冯晓燕, 魏 怀. 中国水下隧道数据统计与分析(截至 2023 年底)[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(4): 826 - 881.(CHEN Jianqin, FENG Xiaoyan, WEI Huai. Statistics and analysis of underwater tunnels in China(by the End of 2023) [J]. Tunnel Construction, 2024, 44(4): 826 - 881.(in Chinese))
- [2] 巩江峰, 王 伟, 王 芳, 等. 截至 2023 年底中国铁路隧道情况统计及 2023 年新开通重点项目隧道情况介绍[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(2): 377 - 392.(GONG Jiangfeng, WANG Wei, WANG Fang, et al. Statistics of China's railway tunnels by the end of 2023 and overview of tunnels of key new projects in 2023[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(2): 377 - 392.(in Chinese))
- [3] 刘继国, 崔庆龙, 李丹妮, 等. 截至 2023 年底中国 10 km 以上特长公路隧道统计与分析[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(1): 189 - 198.(LIU Jiguo, CUI Qinglong, LI Danni, et al. Statistics and analysis of super-long highway tunnels over 10 km in China by the end of 2023[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(1): 189 - 198.(in Chinese))
- [4] 刘泓志, 曹英贵, 代镇洋, 等. 穿越多种典型地层的跨海超大直径泥水盾构选型及针对性设计: 以青岛胶州湾第二海底隧道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(4): 793 - 800.(LIU Hongzhi, CAO Yinggui, DAI Zhenyang, et al. Selection and targeted design of cross-sea ultralarge diameter slurry shield tunneling through various typical strata: A case study of Jiaozhou Bay second submarine tunnel in Qingdao, China[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(4): 793 - 800.(in Chinese))
- [5] 徐鼎平, 江 权, 李邵军, 等. 地下洞室围岩整体稳定性定量评估的方法、云系统与工程实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(11): 2 186 - 2 198.(XU Dingping, JIANG Quan, LI Shaojun, et al. Quantitative approach, cloud system and engineering practice for global stability assessment of surrounding rock in underground caverns[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(11): 2 186 - 2 198.(in Chinese))
- [6] BIENIAWSKI Z T. Engineering classification of jointed rock masses[J]. Transactions of the South African Institution of Civil Engineers, 1973,

- 15(12): 355 - 344.
- [7] BARTON N, LIEN R, LUNDE J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support[J]. *Rock Mechanics*, 1974, 6(4): 189 - 236.
- [8] 包焯明, 陈子全, 周子寒, 等. 高地应力软岩隧道快速施工围岩稳定性分析[J]. *现代隧道技术*, 2024, 61(3): 25 - 34.(BAO Yeming, CHEN Ziquan, ZHOU Zihan, et al. Stability analysis of surrounding rock in high-geostress soft rock tunnels under rapid construction[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2024, 61(3): 25 - 34.(in Chinese))
- [9] 石 欣, 赵大军, 宋盛渊, 等. 基于非线性 Hoek-Brown 破坏准则的裂隙岩体圆形隧道开挖面稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(增 2): 3 359 - 3 366.(SHI Xin, ZHAO Dajun, SONG Shengyuan, et al. Face stability analysis of the circular tunnels in fractured rock masses based on the nonlinear Hoek-Brown failure criterion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(Supp.2): 3 359 - 3 366.(in Chinese))
- [10] 宋 洋, 于英杰, 杨 辉, 等. 富水软岩隧道破碎带围岩稳定性及预留变形量优化研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(10): 100 - 105.(SONG Yang, YU Yingjie, YANG Hui, et al. Study on surrounding rock stability and reserved deformation optimization in fracture zone of water-rich soft rock tunnel[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(10): 100 - 105.(in Chinese))
- [11] ZHOU Z Q, ZHANG D S, GAO C L, et al. A PD-FEM approach for fast solving static failure problems and its engineering application[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 262, 108269.
- [12] GAO C L, ZHOU Z Q, LI L P, et al. Strength reduction model for jointed rock masses and peridynamics simulation of uniaxial compression testing[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-energy and Geo-resources*, 2021, 7(2): 34.
- [13] 乔春生, 王 可, 贺维国, 等. 超大跨扁平地下洞室围岩分级方法探讨[J]. *隧道建设(中英文)*, 2023, 43(9): 1 443 - 1 454.(QIAO Chunsheng, WANG Ke, HE Weiguo, et al. Surrounding rock classification method for super-large-span flat underground caverns[J]. *Tunnel Construction*, 2023, 43(9): 1 443 - 1 454.(in Chinese))
- [14] 叶 雄, 余 浩, 王桂林, 等. 穿煤隧道层面性质对岩柱安全厚度的影响研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2023, 19(增 2): 926 - 933.(YE Xiong, YU Hao, WANG Guilin, et al. Influence study of layer properties of tunnel through coal seam on the safety thickness of rock column[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2023, 19(Supp.2): 926 - 933.(in Chinese))
- [15] 张顶立, 孙振宇, 宋浩然, 等. 海底隧道突水演化机制与过程控制方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(4): 649 - 667.(ZHANG Dingli, SUN Zhenyu, SONG Haoran, et al. Water inrush evolutionary mechanisms of subsea tunnels and process control method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(4): 649 - 667.(in Chinese))
- [16] 吕海亮, 郝建财, 吴立辉. 软弱围岩大变形隧道初期支护围岩稳定性及结构安全性分析[J]. *公路*, 2024, 69(5): 477 - 482.(LV Hailiang, HAO Jiancai, WU Lihui. Analysis of the stability and structural safety of the surrounding rock of the initial support of the tunnel with large deformation of the weak surrounding rock[J]. *Highway*, 2024, 69(5): 477 - 482.(in Chinese))
- [17] 陈 兴, 王怀正, 宋战平, 等. 山岭浅埋隧道进洞方案优化与洞口段稳定性分析[J]. *西安建筑科技大学学报: 自然科学版*, 2023, 55(3): 359 - 367.(CHEN Xing, WANG Huaizheng, SONG Zhanping, et al. Optimization of tunnel entry scheme and stability analysis of tunnel entrance section in mountain shallow-buried tunnel[J]. *Journal of Xian University of Architecture and Technology: Natural Science*, 2023, 55(3): 359 - 367. (in Chinese))
- [18] 王 琴, 陶铁军, 李 晋, 等. 复杂煤层组隧道围岩与支护结构施工力学行为[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(23): 10 105 - 10 117.(WANG Qin, TAO Tiejun, LI Jin, et al. Construction mechanical behavior of surrounding rock and supporting structure of tunnel in complex coal seam group[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(23): 10 105 - 10 117. (in Chinese))
- [19] 陈一凡, 沈 翔, 陈湘生. 海底软弱地层浅埋大直径盾构对接开挖面失稳灾变机制研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2024, 44(4): 712 - 723.(CHEN Yifan, SHEN Xiang, CHEN Xiangsheng. Instability and catastrophe mechanism of docking excavation face of a shallow-buried large-diameter shield in subsea soft strata[J]. *Tunnel Construction*, 2024, 44(4): 712 - 723.(in Chinese))
- [20] 刘昆珏, 随 意, 程晓辉, 等. 考虑围岩参数空间变异性的连拱隧道稳定性分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2023, 19(3): 911 - 920.(LIU Kunyu, SUI Yi, CHENG Xiaohui, et al. Stability analysis of double-arch tunnels considering the spatial variability of rock parameters[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2023, 19(3): 911 - 920.(in Chinese))
- [21] 甯尤军, 吕昕阳. 岩石力学与工程问题的 DDA 和 NMM 模拟研究进展[J]. *应用力学学报*, 2022, 39(4): 657 - 672.(NING Youjun, LV Xinyang. Research progress in DDA and NMM simulation of rock mechanics and engineering problems[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2022, 39(4): 657 - 672. (in Chinese))
- [22] 韩智铭, 刘庆宽, 王 雪, 等. 岩体多裂纹扩展演化过程数值流形方法研究[J]. *工程力学*, 2021, 38(增): 7 - 13.(HAN Zhiming, LIU Qingkuan, WANG Xue, et al. Study on numerical manifold method for evolution process of multi-crack propagation in rock mass[J].

- Engineering Mechanics, 2021, 38(Supp.): 7 - 13.(in Chinese))
- [23] 陈远强, 杨永涛, 郑 宏, 等. 饱和 - 非饱和渗流的数值流形法研究与应用[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2): 338 - 347.(CHEN Yuanqiang, YANG Yongtao, ZHENG Hong, et al. Saturated-unsaturated seepage by numerical manifold method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 338 - 347.(in Chinese))
- [24] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47 - 65.
- [25] 蒋明镜. 现代土力学研究的新视野——宏微观土力学[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2): 195 - 254.(JIANG Mingjing. New paradigm for modern soil mechanics: Geomechanics from micro to macro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 195 - 254.(in Chinese))
- [26] 黄 锋, 董广法, 李天勇, 等. 断层破碎带隧道围岩稳定性的离散元模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(18): 7 429 - 7 440. (HUANG Feng, DONG Guangfa, LI Tianyong, et al. Study on discrete element simulation of tunnel surrounding rock stability with fault fracture zone[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(18): 7 429 - 7 440.(in Chinese))
- [27] 周宗青, 李利平, 石少帅, 等. 隧道突涌水机制与渗透破坏灾变过程模拟研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3 621 - 3 631.(ZHOU Zongqing, LI Liping, SHI Shaoshuai, et al. Study on tunnel water inrush mechanism and simulation of seepage failure process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(11): 3 621 - 3 631.(in Chinese))
- [28] 梁 宸, 王迎超. 爆破荷载作用下隧道裂隙围岩塌方规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(5): 1 699 - 1 707.(LIANG Chen, WANG Yingchao. Research on the collapse law of tunnel surrounded with fracture rock under blasting load[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(5): 1 699 - 1 707.(in Chinese))
- [29] 蒲 松, 叶来宾, 余 涛, 等. 白马隧道软弱围岩掌子面稳定性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(增 1): 194 - 201.(PU Song, YE Laibin, YU Tao, et al. Research on the face stability in soft surrounding rock of Baima Tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(Supp.1): 194 - 201.(in Chinese))
- [30] XIAN M T, XU Z G, CHEN B. Numerical investigation of variable-mass seepage mechanism of broken rock mass in faults[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 160, 105527.
- [31] 王春波, 丁文其, 乔亚飞. 硬化土本构模型在 FLAC3D 中的开发及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 199 - 208.(WANG Chunbo, DING Wenqi, QIAO Yafei. Development and application of hardening soil constitutive model in FLAC3D[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 199 - 208.(in Chinese))
- [32] ZHOU Z Q, SUN J W, LAI Y B, et al. Study on size effect of jointed rock mass and influencing factors of the REV size based on the SRM method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 127, 104613.
- [33] 孙基伟. 基于表征单元体的岩体连续-非连续耦合模拟分析方法及应用[硕士学位论文][D]. 济南: 山东大学, 2023.(SUN Jiwei. The simulation method and application of continuous-discontinuous coupling for rock mass based on REV[M. D. Thesis][D]. Jinan: Shandong University, 2023.(in Chinese))
- [34] 王建辉, 高 萌, 王润生, 等. 极小覆岩厚度条件下地铁隧道逆台阶法开挖稳定性分析[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(4): 690 - 697. (WANG Jianhui, GAO Meng, WANG Runsheng, et al. Stability analysis of surrounding rock of inverse bench excavation of metro tunnel with minimal overburden thickness[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(4): 690 - 697.(in Chinese))
- [35] 李 卫. 考虑围岩爆破损伤效应的浅埋大跨硬岩车站稳定性分析与应用[博士学位论文][D]. 济南: 山东大学, 2021.(LI Wei. Stability analysis and application of shallow buried large span hard rock station considering blasting damage effect of surrounding rock[Ph. D. Thesis][D]. Jinan: Shandong University, 2021.(in Chinese))
- [36] 朱传云, 喻胜春. 爆破引起岩体损伤的判别方法研究[J]. 工程爆破, 2001, (1): 12 - 16.(ZHU Chuanyun, YU Shengchun. Study on the criterion of rock mass damage caused by blasting[J]. Engineering Blasting, 2001, (1): 12 - 16.(in Chinese))
- [37] 中华人民共和国行业标准编写组. Q/CR 9218—2015 铁路隧道监控量测技术规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Q/CR 9218—2015 Technical specification for monitoring measurement of railway tunnel[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.(in Chinese))
- [38] 齐延海, 李术才, 李召峰, 等. 全风化花岗岩富水地层注浆治理研究与应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2019, 50(3): 694 - 703. (QI Yanhai, LI Shucai, LI Zhao Feng, et al. Study and application of grouting governing of completely weathered granite in water-rich stratum[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2019, 50(3): 694 - 703.(in Chinese))
- [39] 屠文锋. 爆破动力诱发裂隙岩体破坏突水机制与过程调控方法[博士学位论文][D]. 济南: 山东大学, 2021.(TU Wenfeng. Water inrush mechanism and process control method of fractured rock mass induced by blasting power[Ph. D. Thesis][D]. Jinan: Shandong University, 2021.(in Chinese))