

DOI: ****

饱水软土中盾构隧道裂损演化统一相场模拟与韧性评价

黄宏伟¹, 王飞阳^{2,*}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 东华大学 环境科学与工程学院 土木工程系, 上海 201620)

摘要: 受近邻工程突发扰动影响, 饱水软土盾构隧道频现局部非稳定渗流, 诱发接头压溃、管片开裂等不可逆的结构性非连续裂损, 严重损害隧道结构的力学和耐久性能, 威胁其运营安全和寿命。如何表征连续-非连续介质渗流的水力特性, 以及如何描述流体、固体、非连续裂损耦合问题, 成为精准预测隧道结构裂损风险及精准评价隧道结构韧性的关键。为此, 基于相场理论, 构建了统一断裂相场理论框架, 提出了流-固-相多场耦合数值方法, 精准追踪隧道结构裂损特征的演化, 进而建立了基于裂损特征演化的隧道结构韧性评价模型。结合上海地铁 18 号线盾构隧道裂损实例开展研究, 结果表明: 局部非稳定渗流导致了隧道结构的力学失衡, 诱发了接头压溃和管片开裂等局部裂损现象; 随着裂损风险的演化, 裂损截面处的内力出现了显著的重分布, 这一过程伴随着能量的释放, 使得隧道结构的韧性明显下降。研究为饱水软土盾构隧道裂损演化分析提供了可靠理论方法, 为隧道结构的韧性评价和恢复提供科学依据。

关键词: 断裂相场理论; 连续-非连续介质; 盾构隧道; 承压饱水软土; 韧性模型

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: ****

Unified phase-field numerical simulation and resilience evaluation on crack damage evolution of shield tunnels in saturated soft soil

HUANG Hong-wei¹, WANG Fei-yang^{*2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil Engineering, College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Due to sudden disturbances caused by nearby construction projects, shield tunnels in saturated soft soil frequently experience localized unstable seepage. This may induce irreversible structural discontinuities, such as joint crushing and segment cracking, severely compromising the mechanical and durability performance of the tunnel structure, ultimately threatening its operational safety and service life. Characterizing the hydraulic properties of continuous-discontinuous media and describing the coupling problems among them have become crucial for accurately predicting the crack damage risk in tunnel structures and evaluating their resilience during crack damage evolution. To address these problems, a unified fracture phase-field theory framework was constructed based on phase-field theory, and an innovative numerical method for fluid-solid-phase multi-field coupling was proposed. This method can precisely capture the evolution of crack damage characteristics in tunnel structure. Consequently, a resilience evaluation model based on the crack damage evolution was established for tunnel structures. Studies on the crack damage accidents of the shield tunnel, Shanghai Metro Line 18, show that localized unstable seepage leads to mechanical imbalances of the tunnel structure, which in turn induces local damage phenomena such as joint crushing and segment cracking. As the crack damage risk evolves, there is a significant redistribution of internal forces at the crack damage cross-sections, accompanied by energy release, which significantly reduces the resilience of the tunnel structure. The related research findings provide a reliable theoretical method for analyzing the crack damage evolution of shield tunnels in pressurized water-rich soft soil, and offer scientific basis for the resilience evaluation and restoration of tunnel structures.

Key words: fracture phase-field theory; continuous-discontinuous media; shield tunnel; pressurized water-rich soft soil; resilience model

收稿日期: 2024-12-03

基金项目: 中央高校基本科研业务费(项目编号: 2232024D-16); 国家自然科学重点基金项目(52130805)的资助; 国家自然科学基金项目(项目编号: 52308408)。

作者简介: 黄宏伟(1967-), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土及地下工程风险管控、工程结构新型健康监测检测等研究工作。E-mail: huanghw@tongji.edu.cn。

通讯作者: 王飞阳(1990-), 男, 讲师, 博士, 主要从事岩土及地下工程防减灾与韧性提升方面的研究工作。E-mail: wangfy@dhu.edu.cn。

1 引言

我国内地盾构隧道已历经 50 余年,其中沿海软土地区的城市盾构隧道已突破 6000 公里(源于交通运输部 2023 年最新数据)。近年来,由于联络通道、壁后注浆、基坑、桩基、渣土堆载等附属结构或近邻工程突发扰动影响^{[1]-[12]},盾构隧道结构出现接头压溃、管片开裂等不可逆的结构性非连续裂损及局部渗漏工程病害,严重影响结构的运维安全,甚至会引起多米诺骨牌式坍塌。

2003 年,由于联络通道冻结法施工失效,上海地铁 4 号线隧道内涌入大量的水土,导致约 274 m 长的隧道发生坍塌破坏,造成直接经济损失高达约 1.5 亿

元人民币^[3]。2019 年,上海地铁 18 号线盾构隧道发生了类似事故,由于冻结管破裂隧道结构内部出现严重的局部渗流,导致近 80 环管片出现了局部渗漏和结构裂损^[12],若未及时抢救将会重现上海地铁 4 号线多米诺骨牌式坍塌^[3]。近 20 年不完整的盾构隧道结构裂损统计结果见表 1,表明近 2/3 的盾构隧道裂损事故与富水地层相关,且接头压溃、管片开裂等非连续裂损处有明显渗流。由此可见,饱水地层隧道事故不仅直接影响隧道结构的力学性能,甚至会导致隧道结构的破坏,还会造成极大的经济损失,威胁人民的生命安全。因此,有必要系统全面的开展盾构隧道结构非连续裂损病害研究,从而制定合理有效的治理措施,控制结构性非连续裂损的发生和发展,以保障盾构隧道的运营安全和耐久性。

表 1 近 20 年来盾构隧道结构裂损事故统计

Table 1. Statistics of structural cracking damage incidents of shield tunnel in recent twenty years.

时间	地点	事故情况	事故原因	参考文献
1998	台北 TRTS 隧道	39 环管片在拱顶处出现开裂, 裂缝宽度 0.05 ~ 0.25 mm。	邻近基坑开挖, 基坑深度 21.1 m, 地连墙侧向变形高达 60 mm。	[1]
1998	广州地铁 1 号线	左线隧道产生不均匀移位, 拱腰处管片出现纵向贯穿性裂缝。	邻近基坑开挖至 5 m, 柱桩基础采用人工挖孔桩, 降水施工时在隧道附近砂层、淤泥质砂层中形成降水漏斗。	[2]
2003	上海地铁 4 号线	约 274 m 长的隧道坍塌, 经济损失约 1.5 亿元。	联络通道冻结法施工, 大量水土涌入隧道。	[3]
2008	上海地铁 2 号线	隧道顶部衬砌管片开裂, 腰部接头被压溃, 环向东延伸螺栓被拉断。	隧道上方突发堆载, 平均堆高约 4.0 m, 最高达 7.0 m, 堆高与覆土厚比值达 0.43。	[4]
2009	上海地铁 9 号线	上行线进洞处约 20 环衬砌变形、不均匀沉降, 下行线进洞处 20 环衬砌的受损。	水和流砂从隧道进洞加固体与衬砌结构、风井围护结构之间存在渗水通道涌出。	[5]
2011	西安地铁 1 号线	30 环管片出现开裂, 裂缝共 121 条, 3 条裂缝深度达到 100 mm, 裂缝宽度 0.01 ~ 0.90 mm。	隧道涌水涌砂注浆治理, 注浆压力使管片受力不均。	[6]
2011	天津地铁 2 号线	已完工隧道及近邻隧道管片近 100 m 连续破损, 地表大范围沉陷。	掘进过程中, 盾构机螺旋输送机发生大量涌水涌砂。	[7]
2012	南京地铁 2 号线	101 环管片出现裂缝, 多数为纵向贯穿裂缝, 12 块管片有多条裂缝, 裂缝宽度 0.1 ~ 0.6 mm。	邻近 3 个基坑降水施工, 引起隧道漏水、漏砂。	[8]
2012	宁波地铁 1 号线	拱顶和拱底管片内弧面出现纵向贯通裂缝。	由于近邻基坑开挖, 盾构隧道向坑内变形, 管片开裂。	[9]
2014	成都地铁 2 号线	左线 9 环管片在 1 点钟方向出现纵向贯通性裂缝, 缝宽 0.1 ~ 0.2 mm, 5 环管片拱顶纵缝处贯通性碎裂。	道路平整, 左线盾构隧道拱顶大范围开挖, 覆土厚度由 18 m 开挖到 7 m, 道路基层与面层施工又恢复到 10 m。	[10]
2016	天津地铁 1 号线	联络通道邻近范围约有 10 块混凝土管片开裂, 接头压溃。	联络通道钻孔时密封失效, 约 77.5 m ³ 的水土涌入隧道。	[11]
2019	上海地铁 18 号线	左右线隧道各 40 环衬砌管片严重开裂、接头压溃、错台、渗漏水等。	联络通道因冻结管破裂失效, 隧道底部发现 2 个初始渗漏点, 水土涌入隧道。	[12]

不同于地上结构, 线型拼装式软土盾构隧道常赋存于具有高渗透性粉砂、砂质粉土等承压含水层的软

土地层中, 易受近邻工程突发扰动影响, 其赋存环境具有多物理场属性、突发性、半隐蔽性和不确定性等

特点^{[13]-[15]}。受岩土介质环境的约束, 盾构隧道结构处于拉压弯剪复合受力状态^[16]。国内外学者采用相似模型试验^[17]、足尺试验^[18]和现场测试^[19]等手段研究了盾构隧道结构非连续裂损的演化过程, 结果表明盾构隧道结构处于复杂应力状态, 其裂损通常为拉剪复合型裂损。在2009年铁木辛柯颁奖礼上, 著名力学家、美国三院院士Bazant教授致辞中指出, 固体结构的损伤破坏问题与流体力学中的湍流问题并称为21世纪工程科学领域的两大难题。中国科学院院士白以龙先生(2006)^[20]认为非连续裂损的本质是非连续变形问题, 其难点在于非连续变形的动态演化。随着连续/非连续介质计算力学的发展, 改进有限元法^[21]、扩展有限元法^[22]、黏聚区模型^[23]、离散元法^[24]等数值方法逐步被用于解决盾构隧道非连续裂损动态演化的难题。但由于盾构隧道赋存于多物理场环境, 其裂损形态及其演化极其复杂, 现有方法难以同时兼顾多物理场特性、复合型裂损、裂损形态演化及其计算效率。

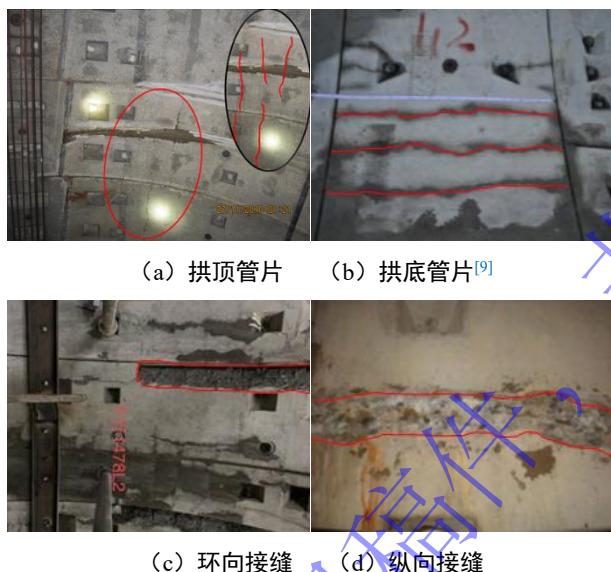


图1 盾构隧道结构的典型裂损特征.

Fig. 1 Typical crack damage characteristics of shield tunnel structures.

以Griffith断裂理论为基础, 国际前沿相场理论通过连续性相场变量来表征连续介质材料从连续状态演变为非连续状态的相变过程^[25]。相比于其他非连续数值方法, 相场方法通过连续性相场变量可实现与多物理场耦合, 高效地模拟弯曲、弯折、聚合、分叉等任意形态的非连续裂损^[26]。在相场理论中, 相场控制方程中驱动能量是模拟裂损起始、演化的关键。目前, 主要有两种主流方法用于确定裂损的驱动能量: 一是体应变-剪应变分解法^[27], 二是方向分离法^[29]。对于前者, 驱动能量包括体积应变能和剪切应变能两部分, 该方法难以准确模拟以剪切为主的裂损演化^[28], 且其断裂参数无法直接国际材料与结构研究实验联合会

(RILEM)^[30]推荐的测试方法测得; 对于后者, 裂缝面内的应力需随驱动能量同时退化, 这可能会导致方向分离法中的映射算子不再满足热力学一致性^[31]。为此, 基于统一拉伸断裂准则^[32], 笔者提出了统一断裂相场方法, 解决了拉、剪、拉剪复合裂损演化问题^[33], 及裂损演化过程中的热力学一致性问题^[34]。

从国内外近20年的事故案例(见表1)来看^{[1]-[12]}, 饱水软土盾构隧道因工程突发扰动而出现局部渗漏, 改变了地层-隧道体系的赋存应力场和赋存渗流场, 使得隧道结构出现接头压溃、管片开裂等不可逆的结构性非连续裂损, 形成新的渗流通道, 从而促进非连续裂损演化。因而, 饱水软土隧道裂损的本质是在流固耦合作用下非连续变形的演化问题。流-固耦合分析建立在Biot固结理论体系的基础上, 其控制方程由连续介质的平衡方程和流体的连续性方程组成。流-固耦合数值模型的基本未知量有土骨架的位移 \mathbf{u} 、孔隙压力 p 和孔隙流体的绝对位移 \mathbf{U} , 较为普遍有限元格式有位移-孔压($\mathbf{u}-p$)格式、位移-位移($\mathbf{u}-\mathbf{U}$)格式、位移-位移-孔压($\mathbf{u}-\mathbf{U}-p$)格式和混合格式。与 $\mathbf{u}-\mathbf{U}$ 格式、 $\mathbf{u}-\mathbf{U}-p$ 格式及混合格式相比, $\mathbf{u}-p$ 格式中基本未知量的数目少, 其在计算效率上有很大的优势, 因此 $\mathbf{u}-p$ 格式在流固耦合分析中的应用最为广泛。针对饱水软土盾构隧道非连续裂损演化的问题, 需要同时考虑流-固耦合及裂损演化。

综上, 现有分析方法难以兼顾多场赋存环境中盾构隧道结构连续-非连续的演化过程, 少有能准确反映裂损特征及其演化过程中隧道结构的力学性能。为此, 针对饱水软土盾构隧道的裂损风险, 提出了统一断裂相场理论, 并建立了流-固-相($\mathbf{u}-p-\phi$)多场耦合数值方法, 探究了局部渗漏事故隧道结构裂损风险及其韧性演化与恢复过程。

2 统一断裂相场理论

2.1 隧道结构裂损特征及致裂因子

盾构隧道裂损事故调研结果显示(表1), 盾构隧道结构裂损主要包括四种典型的非连续裂损特征: 拱顶管片的纵向裂缝, 拱底管片的纵向裂缝、环向接缝压溃、纵向接缝压溃, 详见图1。从裂损表观特征来看, 裂缝具有多条、尺度小、形态不规则、隐蔽性(隧道外侧的裂损及裂损深度具有隐蔽性)等特征, 以及接头压溃范围、形态各异的特征。从致裂原因来看, 接头的压溃属于局部受压剪切破坏, 而拱顶、拱底的纵向裂缝则属于拉剪破坏^[23]。为了描述材料拉、剪以及拉剪复合断裂行为, Zhang等(2005)^[32]将最大拉应力准则、特雷斯卡准则、莫尔库伦准则和米塞斯准

则统一起来，提出了统一断裂准则：

$$\frac{\sigma^2}{\sigma_c^2} + \frac{\tau^2}{\tau_c^2} \geq 1 \quad (1)$$

其中 σ_c 表示断裂时的临界正应力， τ_c 表示断裂时的临界剪应力。

对于混凝土脆性材料，临界正应力与临界剪应力之比通常大于 $\sqrt{2}/2$ ^[33]，裂缝沿最大主拉应力方向扩展，详见图 2。因而，该断裂准则可描述材料的拉、剪和拉剪复合开裂，故而将此断裂准则与断裂相场理论相结合，可建立适应于盾构隧道结构非连续裂损演化的统一断裂相场方法。

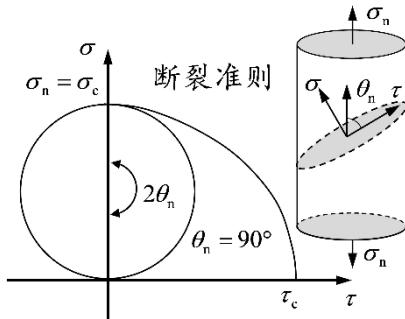


图 2 统一断裂准则 ($\tau_c/\sigma_c \geq \sqrt{2}/2$)
Fig. 2 Unified fracture criterion ($\tau_c/\sigma_c \geq \sqrt{2}/2$)

2.2 统一断裂相场理论基础

依据哈密尔顿原理，对系统能量求变分，可得应力平衡方程和相场演化方程：

$$\begin{cases} \operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = 0 \\ \frac{\partial g(\phi)}{\partial \phi} H + \frac{G_c}{l} \phi - G_c l \Delta \phi = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中 ϕ 为相场， $g(\phi)$ 为退化函数（其具体形式可参考文献^[33]）， $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力， \mathbf{b} 为体积力， H 为相场驱动能量， G_c 和 l 分别为临界能量释放率和尺度控制参数。

根据统一断裂准则，采用谱分解方法对应力平衡方程中的应力张量进行谱分解，分解为正和负两部分，其中正的部分与相场演化密切相关：

$$\boldsymbol{\sigma}^+ = \mathbb{R}_0^+ : \boldsymbol{\sigma} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^- = \boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}^+ = \mathbb{R}_0^- : \boldsymbol{\sigma} \quad (4)$$

其中 \mathbb{R}_0^\pm 为应力张量映射算子。

为保证谱分解后的应力张量满足热力学一致性，Wang 等(2023)提出了以下热力学一致性映射算子，并对其热力学一致性进行了检验^[34]。

$$\begin{cases} {}^+ = \mathbb{R}_0^+ + \mathbb{N} \\ {}^- = \mathbb{I} - \mathbb{R}^+ \end{cases} \quad (5)$$

其中 \mathbb{I} 为四阶单位张量， $\mathbb{R}_0^+ = H(\sigma_n) \mathbf{M}_{nn} \otimes \mathbf{M}_{nn}$ ，

$$= 2 \sum_a^{s,t} \frac{\langle \sigma_n \rangle}{\sigma_n - \sigma_a} \mathbf{M}_{na} \otimes \mathbf{M}_{na}, \quad \mathbf{M}_{ab} = \frac{1}{2} (\mathbf{n}_a \otimes \mathbf{n}_b + \mathbf{n}_b \otimes \mathbf{n}_a),$$

$H(\cdot)$ 表示 Heaviside 函数， $\langle \cdot \rangle_{\pm} = (\cdot \pm |\cdot|)/2$ ， \mathbf{n}_a ($a = n, s, t$) 分别为法向、第一剪切方向和第二剪切方向的方向向量。

然后依据能量等效原理，通过名义物理量与有效物理量之间的转化关系^[35]，可得刚度张量的表达式：

$$\mathbf{C} = (\sqrt{g(\phi)} \mathbb{R}^+ + \mathbb{R}^-) : \mathbf{C}_0 : (\sqrt{g(\phi)} \mathbb{R}^+ + \mathbb{R}^-) \quad (6)$$

其中 \mathbf{C}_0 为未裂损刚度张量， \mathbf{C} 为裂损后刚度张量。

相场驱动能量是相场演化方程的一个关键物理量，决定着裂损演化与否。根据应力张量的谱分解，可将应变能分为两部分：

$$\psi(\phi, \boldsymbol{\varepsilon}) = \psi_+(\phi, \boldsymbol{\varepsilon}) + \psi_-(\phi, \boldsymbol{\varepsilon}) \quad (7)$$

其中 $\psi_+(\phi, \boldsymbol{\varepsilon})$ 表示相场驱动能量。

若卸载，相场驱动能量 $\psi_+(\phi, \boldsymbol{\varepsilon})$ 会逐渐减小，则相场会减小，表示裂损愈合，显然这与裂损不可逆的事实相矛盾^[26]。为此，相场演化方程中的相场驱动能量采用最大历史相场驱动能量：

$$H = \begin{cases} \psi_0^+(\boldsymbol{\varepsilon}) = \frac{1}{2} \mathbb{R}^+ : \boldsymbol{\sigma}_0 : \mathbb{R}^+ : \boldsymbol{\varepsilon} & \psi_0^+(\boldsymbol{\varepsilon}) > H_p \\ H_p & \psi_0^+(\boldsymbol{\varepsilon}) \leq H_p \end{cases} \quad (8)$$

其中 H_p 表示先期历史最大相场驱动能量， $\psi_+(\phi, \boldsymbol{\varepsilon}) = \psi_0^+(\boldsymbol{\varepsilon})$ 表示当前相场驱动能量。

3 流-固-相多场耦合数值方法

在饱水软土地层中，隧道结构的非连续裂损往往伴随着局部渗流过程^[36]。突发工程扰动改变了地层-隧道体系的渗流稳定，形成局部非稳定渗流，严重影响盾构隧道的赋存应力场和赋存渗流场，从而导致拼装式盾构隧道结构产生接头压溃、管片开裂等不可逆的结构性非连续裂损，并在非连续裂损位置处出现局部渗漏，如图 3。针对盾构隧道的局部渗流特性，Wang 等(2021)^[37]提出了接头防水性能的计算模型，并指出非连续裂损演化需要考虑裂损管片和接头的渗流特性。Wu 等(2020)^[38]建立了接缝渗漏数值模型，结果表明接缝渗漏水对盾构隧道结构的变形模式有显著的影响。鉴于此，以统一断裂相场方法为基础，考虑渗流场（流体）、应力场（固体）和相场（非连续裂损）的耦合作用机理，提出流-固-相多场耦合理论，用于饱水软土盾构隧道非连续裂损演化分析。

固相的应力平衡方程和相场演化方程（非连续裂损演化的控制方程）：

$$\begin{cases} \operatorname{div} \boldsymbol{\sigma}' - \alpha_b \nabla p \cdot \mathbf{I} + \mathbf{b} = 0 \\ \frac{\partial g(\phi)}{\partial \phi} H + \frac{G_c}{l} \phi - G_c l \Delta \phi = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中 σ' 为有效应力, \mathbf{I} 为二阶单位张量, α_b 为比奥系数, p 为孔压。

在流-固-相多场耦合中, 相场驱动能量仍采用式(8), 但式中应力应采用有效应力。随着裂损在连续介质中的演化, 其渗流从连续介质渗流演变为非连续介质渗流, 见图 4。因而, 将连续介质的固相划分为非裂损域 Ω_U 和裂损域 Ω_C , 其中非裂损域的渗流符合达西渗流, 而裂损演化过程中其渗流则由达西流逐渐演变为平面泊肃叶流。

$$\begin{cases} \alpha_b \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \beta \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{v} = Q & \text{in } \Omega_U \times (0, T) \\ \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \beta \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{v} = Q & \text{in } \Omega_C \times (0, T) \end{cases} \quad (10)$$

其中 ε_v 为非裂损域的体积应变或裂损域的等效体积应变, β 为流体的压缩系数, \mathbf{v} 为达西流流速, Q 为源汇项。

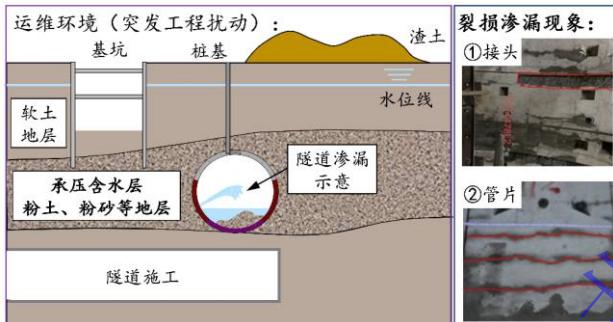


图 3 盾构隧道结构裂损渗漏示意图。

Fig. 3 Schematic of crack damage and leakage in a shield tunnel.

非裂损域的渗透系数 \mathbf{K}_U 为对角张量, $\mathbf{K}_U = \mathbf{K}_{\text{Darcy}}$, k_x, k_y 和 k_z 表示 x, y 和 z 方向的渗透系数, 各向同性介质 $k_x = k_y = k_z$ 。将裂损域渗流看作平面泊肃叶流, 其等效渗透系数:

$$\mathbf{K}_P = \frac{w^2}{12\eta} \mathbf{I} \quad (11)$$

其中 η 为动力粘度系数

为了保证其连续性, 裂损演化过程中连续-非连续介质渗流的渗透系数取达西流和平面泊肃叶流的线性组合形式:

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_P + \mathbf{K}_{\text{Darcy}} \quad (12)$$

当等效裂隙宽度 $w=0$, 即在非裂损域内, 其渗透系数为达西渗流的渗透系数, $\mathbf{K} = \mathbf{K}_{\text{Darcy}}$ ($\mathbf{K}_P = 0$); 当等效裂隙宽度 $w \neq 0$, 即在裂损域内, 其渗透系数为达西流和平面泊肃叶流的线性组合, $\mathbf{K} = \mathbf{K}_{\text{Darcy}} + \mathbf{K}_P$ ($\mathbf{K}_P \neq 0$)。

等效裂隙宽度 w 是确定连续-非连续介质渗流的重要参数, 水平集方法为确定等效裂隙宽度提供了有效手段^[39]。等效裂隙宽度 w :

$$w = \int_{-l}^l (\lambda_c - 1) dx \quad (13)$$

其中 λ_c 为裂损域宽度方向上的变形梯度,

$$\lambda_c^2 = \mathbf{n}^T \cdot \mathbf{F} \cdot \mathbf{n}_0 \cdot (\mathbf{n}_0^T \cdot \mathbf{F}^T \cdot \mathbf{n}) = \frac{\nabla \phi^T \cdot \nabla \phi}{|\nabla \phi^T \cdot \mathbf{C}^{-1} \cdot \nabla \phi|}, \quad \mathbf{C} = \mathbf{F}^T \mathbf{F}$$

为右柯西-格林张量, \mathbf{F} 为变形梯度, \mathbf{n}_0 和 \mathbf{n} 分别为固体变形前后的相场梯度。

裂损域与非裂损域界面的临界相场值 ϕ_c , 当 $\phi > \phi_c$, 连续介质处于裂损状态, $\lambda_c \neq 0$, 等效裂隙宽度 $w_c \neq 0$; 当 $\phi \leq \phi_c$, 连续介质处于无裂损状态, $\lambda_c = 1$, 等效裂隙宽度 $w_c = 0$ 。

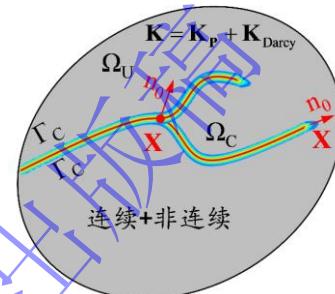


图 4 裂损演化过程中连续-非连续介质渗流。

Fig. 4 Seepage in continuous-discontinuous media during crack damage evolution.

4 饱水软土盾构隧道裂损演化分析

4.1 饱水软土盾构隧道局部渗漏事故

受工程突发扰动影响, 饱水地层中软土盾构隧道局部渗漏失衡, 严重影响其赋存应力场和渗流场, 从而导致隧道结构裂损演化。上海地铁 18 号线隧道龙阳路站-迎春路站盾构区间出现局部渗漏水事故, 该区间由平行双圆隧道组成, 其衬砌结构采用通缝拼装。赋存地层为上海典型的海相沉积成层软土, 覆土厚度为 23.7m, 揭露地层从上到下依次为①1 杂填土、②1 粉质粘土、③1 砂质粉土、④淤泥质粉质粘土、⑤淤泥质粘土、⑥1-1 灰色粘土、⑦1-2 灰色粉质粘土、⑧灰黄色粉质粘土、⑨1-1 砂质粉土夹粉质粘土、⑩1-2 砂质粉土和⑪2 粉砂。区间隧道所在地层为⑥灰黄色粉质粘土、⑦砂质粉土、⑧粉质粘土, 其中⑦砂质粉土层为上海地区典型的承压富水地层。由于联络通道冻结法施工失效, 承压水从冻结管破裂处(渗漏点 M5)涌入下行线隧道, 并将地层中的部分土颗粒带入隧道, 见图 5。

在局部渗漏事故发生后, 隧道结构出现了严重的裂损现象, 如图 6(a)。以下行线隧道 LT1482 环为例, 拱顶位置处纵向接头被压溃, 裂损区域宽度约为 14.5 cm, 管片局部出现开裂, 如图 6(b)。但由于地层-隧道接触一侧的隐蔽性, 难以检测隧道外侧的裂损情况, 这给隧道结构的安全风险带来了严峻挑战。为此, 采

用流-固-相多场耦合数值方法重现局部渗漏情况下隧道结构的裂损演化，进而对裂损演化过程中隧道结构性能进行韧性评价。

4.2 隧道结构裂损风险演化分析

以 LT1482 环为研究对象，事故发生 16.5 小时后局部渗漏得到控制，检测结果显示单环涌水量为 4.06 m³。地层-结构模型的左侧、右侧和下侧均设置为不透水边界，渗漏位置的渗流范围根据涌水量确定，同时考虑地层损失对土体弹性模量的影响，建立流-固-相多场耦合数值模型^[12]。该模型中衬砌结构由管片和螺栓组成（图 5），衬砌结构与地层之间的界面采用黏结滑移摩擦接触，螺栓采用拉压弹簧和剪切弹簧模拟，隧道结构采用流-固-相多场耦合数值方法模拟，模型共有三个工况，地应力平衡、隧道施工和局部突发渗漏水。在突发渗漏水阶段，施加渗水边界并修改地层损失范围内的土体弹性模量。

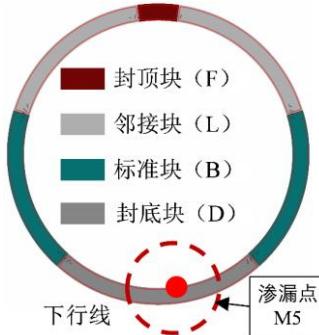


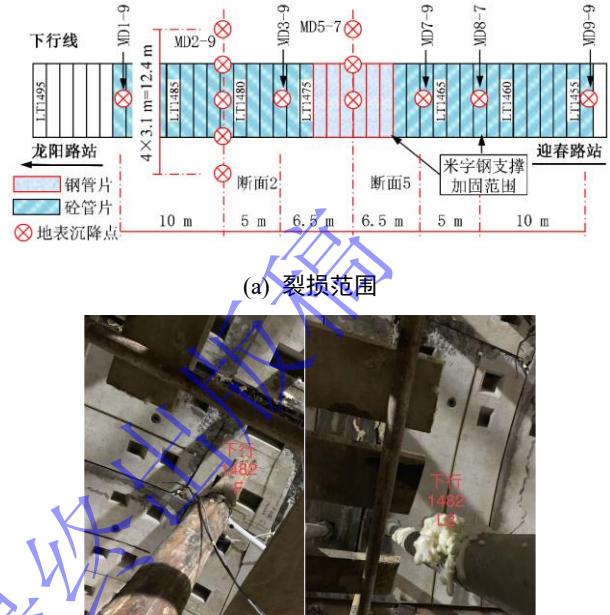
图 5 盾构隧道局部渗漏。

Fig. 5 Local leakage point of shield tunnel.

根据流-固-相多场耦合数值模拟结果，渗漏水发生约 9.5 h 后，即 1 月 29 日 13:30，腰部接头和顶部接头开始出现裂损。随着渗流，腰部接头和顶部接头的裂损持续发展，并于约 15.36 h 后，即 1 月 29 日 17:52，腰部接头和顶部接头由局部挤压产生的贯通裂缝，见图 7。腰部接头的压溃出现在外弧面侧，破坏范围的宽度约为 15.0 cm，深度约为 5.7 cm，而顶部接头的压溃出现在内弧面侧，破坏范围的宽度约为 12.8 cm，深度约为 4.2 cm。此外，渗漏水发生 16.5 h 后，即 1 月 29 日 19:00，拱底管片外弧面侧开始出现了微裂缝，由于地层损失，拱底管片外侧受拉，该微裂缝主要是由于拉应力引起的。

现场检测和数值模拟结果显示，盾构隧道结构接头的裂损呈楔形，LT1482 环的具体裂损信息见表 2。顶部接头裂损尺寸与现场检测结果基本一致，但由于地层-隧道接触一侧的隐蔽性，现场无法检测到腰部接头外侧的裂损情况，而流-固-相多场耦合数值模拟给出了腰部接头的具体裂损特征，为隧道结构的加固修复提供重要的物理基础和理论依据。此外，在接头压

溃或裂缝演化过程中，隧道结构裂损截面的弯矩会出现降低的现象^[41]。这主要是由于裂损截面的中性轴往无损侧移动，导致裂损截面出现了明显的内力重分布，但结构仍然保持了一定的承载能力，这为事故的紧急抢修提供了宝贵的时间窗口。



(b) LT1482 环管片

Fig. 6 Crack damage of shield tunnel lining.

表 2 LT1482 环的裂损信息

Table 2. Crack damage information of ring LT1482.

裂损位置	数值模拟 (楔形)		现场检测 (楔形)	
	宽度/cm	深度/cm	宽度/cm	深度/cm
顶部接头 (内侧)	12.8	4.2	14.5	5.1
腰部接头 (外侧)	15.0	5.7	-	-

5 基于裂损演化的隧道结构韧性评价

为应对突发工程灾害，美国发布第 21 号总统政策令（PPD-21, 2013），将基础设施韧性提升到了国家战略高度^[42]，而后制定了建筑和基础设施系统韧性指南^[43]。韧性评价模型是系统综合评价盾构隧道结构应对突发灾害或工程扰动的抵御能力、适应能力和恢复能力^[44]。为抵御和适应突发工程扰动，盾构隧道结构常出现不可逆的非连续裂损，其结构强度性能难以恢复到扰动前的状态。近年来，国内外学者相继开展了基础设施韧性理论研究，提出了多种韧性评价模型。Cimellaro 等(2010)^[45]指出韧性评价包括灾后系统性能的损失和恢复，系统性能的损失是指系统的易损性或鲁棒性，而其性能恢复则依赖于现有技术和响应能力。Ayyub 等(2014)^[46]认为韧性可以兼顾系统的鲁棒性和可恢复性，并建立了考虑扰动阶段和恢复阶段的韧性

评价模型。以变形作为盾构隧道结构性能指标, Huang 和 Zhang (2016)^[47]提出了考虑扰动阶段、演化阶段和恢复阶段的韧性评价模型, 并将其应用到突发渣土堆载的盾构隧道工程案例中。在韧性理论中, 韧性评价模型的关键是构建基于特定评价指标的结构性能函数, 横向收敛、沉降、应力等指标常被用于表征盾构隧道的结构性能。然而, 陈湘生等(2022)^[48]认为受不可逆非连续裂损的影响, 即使盾构隧道的变形、沉降等宏观控制指标恢复至工程扰动前的状态, 其结构强度性能也与工程扰动前有显著区别。

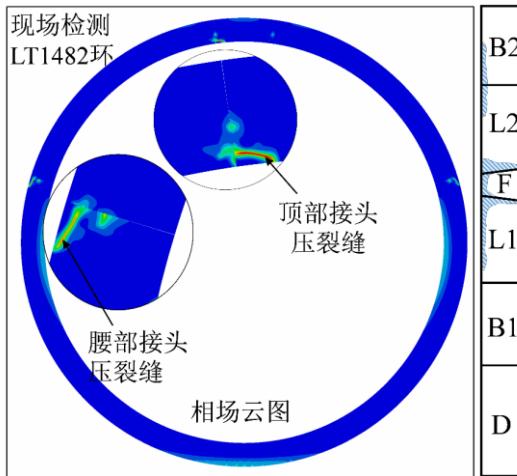


图 7 现场检测与数值模拟的隧道结构裂损演化对比分析

Fig. 7 Comparative analysis of crack damage evolution in tunnel structures from on-site inspection and numerical simulation

流-固-相多场耦合数值方法为盾构隧道结构的裂损演化分析提供了有效手段, 借此可准确模拟非连续裂损演化过程中隧道结构的力学性能, 进而可建立基于裂损演化的隧道结构韧性评价模型。在突发渗漏水事故的工程案例中, 盾构隧道的腰部接头和顶部接头被压溃。因此, 在进行隧道结构韧性评价时, 仅考虑腰部接头和顶部接头等易损截面。从数值模拟结果中获取腰部接头、顶部接头裂损域内相场均值 ϕ_w 、 ϕ_t (图 8), 其演化规律呈现出类似 sigmoid 函数的形态。将相场均值作为量化裂损演化过程隧道结构性能的基本指标, 表达式:

$$\phi_{w/t} = \frac{\zeta}{1 + \beta \exp^{-\theta t}} \quad (14)$$

其中 β 、 θ 和 ζ 为相关参数, t 为事故发生时间。

Sigmoid 函数拟合优度指标接近 1.00, 表明 sigmoid 函数能够反映裂损的演化规律。图 9 为裂损演化过程中隧道结构腰部接头和顶部接头的受弯承载力随相场指标的关系, 承载力的表达式:

$$Q = a\phi_{w/t} + b \quad (15)$$

其中 a 和 b 为线性参数。

由此可见, 盾构隧道的结构性能与相场指标呈线性相关关系, 因而基于相场指标可构建盾构隧道结构

韧性模型, 其表达式:

$$R(t) = \frac{\int_{t_i}^t (1 - \phi) dt}{(1 - \phi_i)(t - t_i)} \quad (16)$$

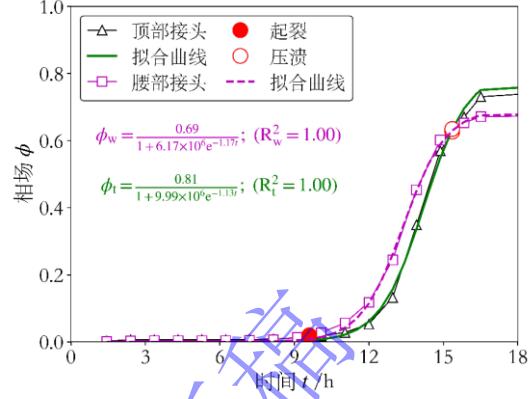


图 8 裂损演化过程表征 (R_w 和 R_t 为拟合优度指标)

Fig. 8 Representation of crack damage evolution (R_w and R_t are the goodness-of-fit indicators)

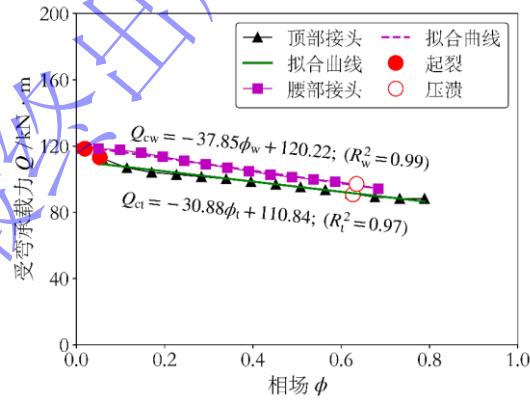


图 9 裂损演化过程中隧道结构的承载力性能 (R_w 和 R_t 为拟合优度指标)

Fig. 9 Bearing capacity of tunnel structures during crack damage evolution (R_w and R_t are the goodness-of-fit indicators).

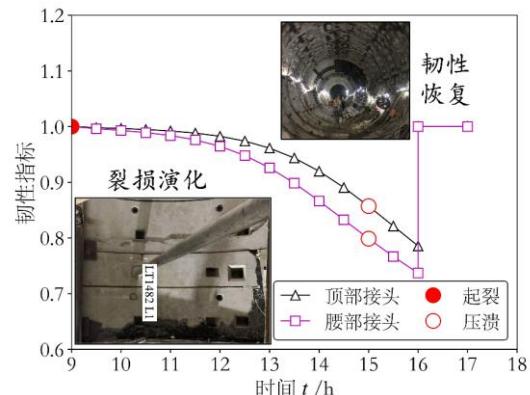


图 10 局部渗漏事故盾构隧道结构韧性演化与恢复

Fig. 10 Evolution and recovery of structural resilience of shield tunnel under local leakage incidents.

采用式(14)和(16)对局部渗漏事故盾构隧道进行韧性评价, 如图 10。隧道结构的韧性有两个阶段, 即韧性演化阶段和韧性恢复阶段: 在韧性演化阶段, 随

着裂损的演化，相场值逐渐增加到 0.8 左右，预示着接头压溃（如图 8），隧道结构的承载力随相场演化呈线性下降，约下降 30%左右（如图 9），隧道结构的韧性指标下降约 30%；在韧性恢复阶段，钢板加固等修复措施使得隧道结构的韧性恢复到事故前的水平。

韧性评价结果表明，基于相场指标的盾构隧道结构韧性模型能够有效量化表征裂损演化过程中隧道结构韧性的演化和恢复过程。该模型能准确反映非连续裂损对隧道结构性性能产生的不可逆影响，从而为隧道结构韧性修复提供坚实的理论依据。

6 结论

饱水承压软土盾构隧道裂损涉及到两方面关键问题，一是连续-非连续介质渗流的水力特性，二是多场耦合作用下隧道结构裂损的演化。围绕饱水软土盾构隧道结构的裂损风险，以断裂相场理论为基础，提出了统一断裂相场理论框架，建立了流-固-相多场耦合数值方法，进而开展了隧道结构裂损风险演化分析及其韧性评价。得到如下主要结论：

(1) 从近年来隧道结构的裂损风险事故来看，工程突发扰动常常诱发地层-隧道体系产生局部非稳定渗流，进而引发隧道结构产生接头压溃、管片开裂等不可逆的结构性非连续裂损，接头压溃常出现在受压侧，管片开裂则常见于受拉侧。

(2) 在裂损演化过程中，隧道结构裂损截面的中性轴会向无损侧移动，这标志着结构内力重分布。此时，隧道结构仍能保持一定的承载能力，这为事故的紧急抢修提供了宝贵的时间窗口。

(3) 断裂相场方法能够精确地模拟隧道结构的裂损演化过程，通过相场指标可有效量化隧道结构裂损演化过程，建立盾构隧道结构韧性评价模型。根据韧性评价结果，隧道结构的韧性变化有两个阶段：韧性演化阶段和韧性恢复阶段。在韧性演化阶段，随着裂损的演化，隧道结构的韧性逐渐下降；在韧性恢复阶段，通过钢板加固等修复措施使隧道结构恢复到事故前的韧性水平，甚至达到更高的韧性状态。

基于连续性假定，相场方法容易实现非连续裂损演化过程的模拟。因而，在处理涉及非连续变形与水、汽、热、化等多物理场耦合问题时，相场方法展现出其独特的先天优势，该方法将在未来的研究和应用中大有可为。然而，断裂相场理论主要聚焦在低应力、低水压状态下脆性材料的拉、剪及拉剪复合裂损演化分析，而在高应力、高水压环境下，特别是隧道大变形特性，现有断裂相场理论尚难以准确模拟。

参考文献：

- [1] Chang C T, Sun C W, Duann S W, et al. Response of a Taipei Rapid Transit System (RTS) tunnel to adjacent excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 151-158.
- [2] 竺维彬, 鞠世健. 盾构隧道管片开裂的原因及相对策[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(1): 21-25. (ZHU Weizhen, JU Shijian. Causes and countermeasures for segment cracking in shield-driven tunnel [J]. Modern Tunneling Technology, 2003, 40(1): 21-25. (in Chinese))
- [3] Zheng G, Cui T, Cheng X, et al. Study of the collapse mechanism of shield tunnels due to the failure of segments in sandy ground[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 79: 464-490.
- [4] Huang H, Shao H, Zhang D, et al. Deformational responses of operated shield tunnel to extreme surcharge: a case study[J]. Structure & Infrastructure Engineering, 2017, 13(3): 345-360.
- [5] 陆明, 秦灏, 朱祖熹. 上海轨道交通 9 号线盾构区间隧道抢险修复工程介绍[J]. 中国建筑防水, 2007, 27(4): 27-30. (LU Ming, QIN Hao, ZHU Zuxi. Introduction of shield running tunnel emergency repair of Shanghai rail rapid transit Line 9[J]. China Building Waterproofing, 2007, 27(4): 27-30. (in Chinese))
- [6] 赖金星, 邱军领, 潘云鹏, 等. 盾构隧道管片裂缝病害的综合监测与分析[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(2): 186-191. (LAI Jinxing, QIU Junling, PAN Yunpeng, et al. Comprehensive Monitoring and Analysis of Segment Cracking in Shield Tunnels [J]. Modern Tunneling Technology, 2015, 52(2): 186-191. (in Chinese))
- [7] 郑刚, 崔涛, 姜晓婷. 砂土层中盾构隧道局部破坏引发连续破坏的机理研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(09): 1556-1571. (ZHENG Gang, CUI Tao, JIANG Xiaoting. Mechanism of progressive collapse induced by partial failure of shield tunnels in sandy soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(09): 1556-1571. (in Chinese))
- [8] 张学文. 运营期地铁隧道常见结构病害成因及治理方法研究[D]. 南京大学, 2014. (ZHANG Xuewen. Research on the causes and treatment methods of common diseases during the operation of metro tunnel structure [D]. Nan University, 2014. (in Chinese))
- [9] 杨雨冰, 周彪, 谢雄耀. 邻近基坑施工作用下盾构隧道横向变形及开裂特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016(s2): 4082-4093. (YANG Yubing, ZHOU Biao, XIE Xiongyao. Study on transverse deformation and cracking property of

- shield-driven tunnel induced by adjacent excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016(s2): 4082-4093. (in Chinese)
- [10] 戴志仁. 地表大范围开挖卸载引起下卧盾构隧道管片碎裂机理研究[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(4): 62-69. (DAI Zhiren. Study on Mechanism of Segment Crack and Fracture of Underlying Shield Tunnel Caused by Extensive Excavation and Unloading of Ground Surface [J]. China Railway Science, 2017, 38(4): 62-69. (in Chinese))
- [11] Huang L, Ma J, Lei M, et al. Soil-water inrush induced shield tunnel lining damage and its stabilization: A case study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 97: 103290.
- [12] Wang F, Zhang D, Huang H, Huang Q. A phase-field-based multi-physics coupling numerical method and its application in soil–water inrush accident of shield tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 140: 105233.
- [13] 王飞阳. 盾构隧道结构非连续裂损演化多尺度多场模拟与安全评价[D]. 同济大学, 2021. (WANG Feiyang. Study on the Discontinuous Crack Damage Evolution and Safety Evaluation of Shield Tunnel by Multi-scale and Multi-physics Simulations [D]. Tongji University, 2021. (in Chinese))
- [14] 王飞阳, 黄宏伟, 张东明, 等. 带裂缝服役混凝土结构力学性能的多尺度模拟方法[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(12): 155-162. (WANG Feiyang, HUANG Hongwei, ZHANG Dongming, et al. Multi-scale simulation method of existing concrete structure with crack[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(12): 155-162. (in Chinese))
- [15] 王飞阳, 黄宏伟. 盾构隧道衬砌结构裂缝演化规律及其简化模拟方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S01): 2902-2910. (WANG Feiyang, HUANG Hongwei. Crack evolution law of shield tunnel lining and its simplified simulation method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S1): 2902-2910. (in Chinese))
- [16] Li X, Yan Z, Wang Z, et al. A progressive model to simulate the full mechanical behavior of concrete segmental lining longitudinal joints[J]. Engineering Structures, 2015, 93: 97-113.
- [17] 何川, 刘川昆, 王士民, 等. 裂缝数量对盾构隧道管片结构力学性能的影响[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 209-219. (HE Chuan, LIU Chuankun, WANG Shimin, et al. Influence of Crack Number on Mechanical Properties of Shield Tunnel Segment Structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 209-219. (in Chinese))
- [18] Guo W, Feng K, Zhou Y, et al. Full-scale test and numerical modeling on deformation and damage behavior of segmental joints under ultimate compression-bending load[J]. Engineering Structures, 2023, 279: 115648.
- [19] Molins C, Arnau O. Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 1: Test configuration and execution[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(6): 764-777.
- [20] Bai Y L, Wang H Y, Xia M F, et al. Statistical mesomechanics of solid, linking coupled multiple space and time scales[J]. Advances in Mechanics, 2006, 58(6): 286-305.
- [21] Xu G, He C, Lu D, et al. The influence of longitudinal crack on mechanical behavior of shield tunnel lining in soft-hard composite strata[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 144: 106282.
- [22] Fu J, Xie J., Wang S, et al. Cracking performance of an operational tunnel lining due to local construction defects[J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(4): 04019019.
- [23] Wang F Y, Zhou M L, Zhang D M, et al. Random evolution of multiple cracks and associated mechanical behaviors of segmental tunnel linings using a multiscale modeling method [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 90: 220-230.
- [24] Liu C, Zhang D, Fang Q, et al. Investigation of progressive failure mechanism of tunnel lining with material defects using discrete element method[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023: 103832.
- [25] Yu Z, Shao J, Duveau G, et al. Numerical modeling of deformation and damage around underground excavation by phase-field method with hydromechanical coupling[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 138: 104369.
- [26] Miehe C, Welschinger F, Hofacker M. Thermodynamically consistent phase-field models of fracture: Variational principles and multi-field FE implementations[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2010, 83(10): 1273-1311.
- [27] Miehe C, Hofacker M, Welschinger F. A phase field model for rate-independent crack propagation: Robust algorithmic implementation based on operator splits[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2010, 199(45-48): 2765-2778.
- [28] Wang F, Zhou M, Shen W, et al. Fluid-solid-phase multi-field coupling modeling method for hydraulic fracture of saturated

- brittle porous materials[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 286: 109231.
- [29] Steinke C, Kaliske M. A phase-field crack model based on directional stress decomposition[J]. Computational Mechanics, 2019, 63(5): 1019-1046.
- [30] Srawley J E, Brown W F: Fracture toughness testing methods, Fracture toughness testing and its applications: ASTM International, 1965.
- [31] Wu J Y, Xu S L. Reconsideration on the elastic damage/degradation theory for the modeling of microcrack closure-reopening (MCR) effects[J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 50(5): 795-805.
- [32] Zhang Z F, Eckert J. Unified Tensile Fracture Criterion[J]. Physical review letters, 2005, 94(9): 094301.
- [33] Wang F Y, Shao J F, Huang H W. A phase-field modeling method for the mixed-mode fracture of brittle materials based on spectral decomposition[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 242: 107473.
- [34] Wang F, Chen Y, Yang T, et al. Study on the Consistency of a Phase Field Modeling Method and the Determination of Crack Width[A]. In Proceedings of the 5th International Conference on Numerical Modelling in Engineering: Volume 2: Numerical Modelling in Mechanical and Materials Engineering[C]. Singapore: Springer Nature, 2023: 17-26.
- [35] Cervera M, Tesei C. An energy-equivalent d+/d- damage model with enhanced microcrack closure-reopening capabilities for cohesive-frictional materials [J]. Materials, 2017, 10: 433.
- [36] Ye Z, Liu H. Mechanism and countermeasure of segmental lining damage induced by large water inflow from excavation face in shield tunneling[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(12): 04018163.
- [37] Wang F Y, Huang H W. Theoretical analysis of the joint leakage in shield tunnel considering the typical deformation mode[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(12): 04020218.
- [38] Wu H N, Shen S L, Chen R P, et al. Three-dimensional numerical modelling on localised leakage in segmental lining of shield tunnels[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 122: 103549.
- [39] 王飞阳. 脆性材料统一断裂相场方法及其裂缝宽度的确定[J]. 工程力学, 2024, 41(06): 1-8. (WANG Feiyang. Unified fracture phase-field method and determination of crack width for brittle materials[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(6): 1-8. (in Chinese))
- [40] 王飞阳. 流-固-相多场耦合数值方法及水力压裂模拟研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 1~9. (WANG Feiyang. Study on the fluid-solid-phase multi-field coupling numerical method and the numerical simulation of hydraulic fracturing [J]. Journal of Tongji University, 2025, 53(2):1~9. (in Chinese))
- [41] Wang F, Huang H, Zhang D, et al. Cracking feature and mechanical behavior of shield tunnel lining simulated by a phase-field modeling method based on spectral decomposition[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 119: 104246.
- [42] House T W. Presidential policy directive 21: Critical infrastructure security and resilience. 2013.
- [43] U.S. Department of Commerce. Community Resilience Planning Guide for Buildings and Infrastructure Systems: Volume I [S]. Washington D C: National Institute of Standards and Technology, 2015.
- [44] Francis R, Bekera B. A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2014, 121: 90-103.
- [45] Cimellaro G P, Reinhorn A M, Bruneau M. Framework for analytical quantification of disaster resilience[J]. Engineering Structures, 2010, 32(11): 3639-3649.
- [46] Ayyub B M. Systems resilience for multihazard environments: definition, metrics, and valuation for decision making[J]. Risk Analysis, 2014, 34(2): 340-355.
- [47] Huang H W, Zhang D M. Resilience analysis of shield tunnel lining under extreme surcharge: Characterization and field application[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 301-312.
- [48] 林星涛, 陈湘生, 苏栋, 等. 考虑多次扰动影响的盾构隧道结构韧性评估方法及其应用[J]. 岩土工程学报, 2022, 44 (4): 591-601. (LIN Xingtao, CHEN Xiangsheng, SU Dong, et al. Evaluation method for resilience of shield tunnel linings considering multiple disturbances and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44 (4): 591-601. (in Chinese))