

基于断裂力学的水工隧洞衬砌裂缝扩展数值模拟

刘彦 孙笑^(通讯作者) 王赫 王强

江西水利电力大学水利工程学院, 江西南昌, 330099;

摘要: 水工隧洞混凝土衬砌中的裂缝通常表现为表面裂缝或贯穿性裂缝。本研究建立了一套完整的模拟方法, 用以研究水工隧洞周围混凝土中的裂缝扩展。基于 I-II 复合型裂纹扩展原理, 结合混凝土断裂力学理论, 采用断裂韧度作为材料参数, 通过虚拟裂纹模型分析裂缝扩展过程。利用有限元软件建立了平面轴对称模型, 系统研究了水工隧洞中的裂缝扩展。通过参数化分析, 评估了初始裂缝位置、方向和长度的影响。结果表明, 正 Y 轴 45 度位置是结构薄弱点, 随着裂缝与负 Y 轴夹角的增大, 裂缝起裂压力和最大承载能力均有所提高。初始裂缝长度仅对扩展早期阶段有显著影响, 对高级开裂阶段的极限承载能力或扩展方向影响甚微。水工隧洞中的圆形裂缝通常呈线性扩展, 从横截面中心向外呈径向发散。

关键词: 水工隧洞; 断裂力学; 裂缝扩展; 数值模拟; 混凝土衬砌完整性

DOI: 10.69979/3060-8767.26.04.034

1 引言

1.1 关键基础设施挑战

水工隧洞在水利工程项目中发挥着重要作用, 包括泄水、输水、防洪和发电等功能。这些隧洞的结构完整性对水电站的安全运行至关重要。尽管其重要性显著, 但由于水工隧洞独特的结构特性和荷载条件, 其理论分析和设计计算仍不完善, 给工程师带来了重大挑战。

混凝土衬砌开裂是水工隧洞结构完整性最常见且最严重的威胁之一。这些结构缺陷不仅表现为表面异常, 而且往往贯穿整个隧洞横截面, 损害整体结构性能。此类开裂的后果包括漏水、周围岩体侵蚀、结构稳定性下降和耐久性降低——所有这些都大幅缩短了使用寿命并降低了运行效益。在严重情况下, 大量渗水可能导致隧洞完全失稳。

1.2 方法论优势

将断裂力学原理应用于有限元分析, 有效克服了与裂尖奇异性相关的计算挑战。该方法显著改进了传统方法, 减少了有限元分析中的网格敏感性问题, 从而为水工隧洞衬砌裂缝行为提供了更可靠的预测。

1.3 独特的分析挑战

与地上结构相比, 水工隧洞因其地下位置和持续承受水压力及周围岩体作用而呈现出独特的分析挑战。这些独特的环境条件显著改变了裂缝形成和扩展机理, 需要采用与常规水工结构不同的专门计算方法。

1.4 已建立的计算方法

多位学者已开发出用于分析水工隧洞衬砌裂缝的专门方法。何欢基于粘结滑移理论, 首创了“实体单元-阴影节点-梁单元”传力体系, 利用有限元分析计算钢筋受力并预测最大裂缝宽度^[1]。类似地, 彭守拙在衬砌独立工作的假设下, 提出了透水衬砌裂缝宽度的简化计算方法^[2]。

1.5 先进数值方法

由于水工隧洞复杂的应力分布使传统分析方法难以应对, 研究人员越来越多地采用有限元解法^{[3]-[5]}。刘金亮建立了考虑粘结滑移效应的预应力混凝土梁裂缝扩展模型, 通过对比分析验证了有限元方法在裂缝宽度计算中的可靠性^[7]。张田涛采用扩展有限元法 (XFEM) 数值模拟分析了衬砌后空洞的应力和裂缝分布, 证明了 XFEM 在隧洞衬砌安全评估中的适用性。

1.6 断裂力学应用

卜康基于最大周向应力准则, 利用有限元方法推导了 I-II 复合型裂纹的起裂角和临界水压力解析解, 确立了裂纹类型与出露角度无关的结论。黄成君采用双 K 断裂方法提出了隧洞衬砌裂缝的分析方法, 并开发了基于有限元的隧洞衬砌混凝土断裂过程模拟。

1.7 综合计算框架

近期研究聚焦于综合计算方法。Alshoabi 利用 ANSYS 软件实施了裂缝扩展分析和寿命预测建模。丁浩结合 FPC 软件和实验验证建立了模拟可靠性, 进一步引入 BP 神经网络评估裂缝安全状态。黄建伟采用复合函数方法分析了双裂缝隧洞工况, 表征了裂缝发展

模式和断裂行为。

这些数值方法的进步显著增强了预测和分析水工隧洞衬砌裂缝行为的能力,为改进设计和维护规程提供了重要工具。

1.8 断裂力学与计算方法的融合

研究界越来越多地采用将断裂力学理论与先进有限元软件相结合的综合方法。Hussein 证明了将断裂力学原理应用于裂缝扩展分析的可行性,确立了其在预测断裂行为方面的有效性。类似地, Adrian Faron 通过将混凝土构件裂缝扩展的计算预测与实验结果进行对比,验证了断裂力学与数值模拟相结合的有效性,确认了这种综合方法的实用价值。

1.9 研究贡献

尽管取得了这些进展,但专门通过断裂力学和数值模拟研究水工隧洞裂缝扩展的文献仍然有限。本研究通过将有限元数值模拟与混凝土断裂力学理论相结合,以

圆形水工隧洞为研究对象,模拟 I-II 复合型裂纹扩展过程,推导了不同荷载条件下混凝土裂缝宽度和扩展路径,填补了这一空白。

1.10 实际意义

本研究为水工隧洞的安全合理设计与施工提供了实质性基础。通过建立更符合工程实际的方法论,为限制断裂的设计方法奠定了基础,提高了水电站的运行稳定性。研究结果为参与水工隧洞基础设施开发和维护的工程师及利益相关者提供了实用指导,有助于改进这些关键水管理结构的安全规程和设计标准。

2 数值模拟过程分析

2.1 模型参数确定

基于上述选择,将水工隧洞衬砌裂缝设为 I-II 复合型裂纹,基于虚拟裂纹理论建立二维轴对称有限元模型,求解水工隧洞混凝土衬砌裂缝的扩展过程。建模采用四种围岩配置。水工隧洞基本参数如下表所示。

表 2.1 水工隧洞基本材料特征参数

材料等级	衬砌厚度(cm)	洞径(m)	计算总宽度(m)	隧洞埋深(m)	地层总高度(m)
C30	20	4.5	33	20	32

水工隧洞基本数据及隧洞围岩结构材料特征参数如下表所示。

表 2.2 隧洞围岩结构材料特征参数

材料	泊松比	弹性模量(GPa)	粘聚力(c/kPa)	内摩擦角(°)	岩石容重(kN/m ³)
IV 级围岩	0.35	4.5	250	30	24.5
混凝土	0.167	28	1	54	24

在水工隧洞计算中,内水压力构成作用于围岩的主要荷载。在建模过程中,内水压力以面压力形式施加。建立荷载增量 ΔP ,每荷载步 ΔP 递增(或递减),使荷载经历从 0-Pini-Pmax 的变化过程。通过这种方法,准确捕捉了水工隧洞围岩混凝土在各加载阶段的裂缝扩展。

2.2 建模与加载过程

模型采用 PLANE183 单元,同时采用 CONTACT172 和 TARGET169 单元分别模拟接触面和目标面。在接触面与目标面之间实施面对面接触方法。这些单元用于处理围岩与混凝土界面处的应力奇异性,并计算裂尖应力强度因子。根据已有文献,接触面间摩擦系数设为 0.25。

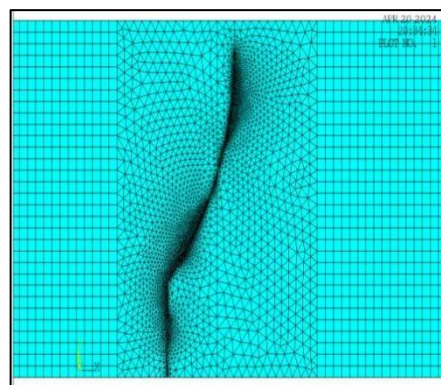
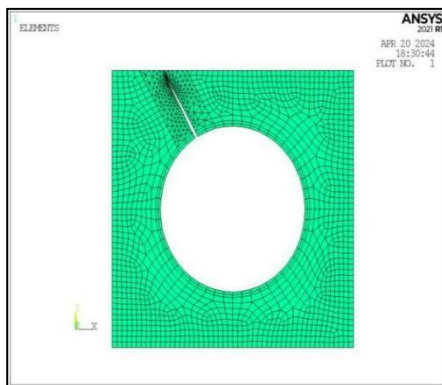


图 2.3 水工隧洞横截面建模与网格划分示意图

在水工隧洞分析中，内水压力代表作用于围岩的主要荷载。在计算中，该内水压力以面压力形式施加。建立荷载增量参数 ΔP ，每加载步 ΔP 递增或递减，模拟压力从0到 P_{min} 再到 P_{max} 的变化。该方法有助于全面追踪水工隧洞围岩混凝土在各渐进加载阶段的裂缝扩展

3 计算结果分析

3.1 初始开裂对水工隧洞混凝土衬砌内裂缝扩展的影响

水工隧洞选定裂缝的混凝土衬砌裂缝扩展模拟结果如下：

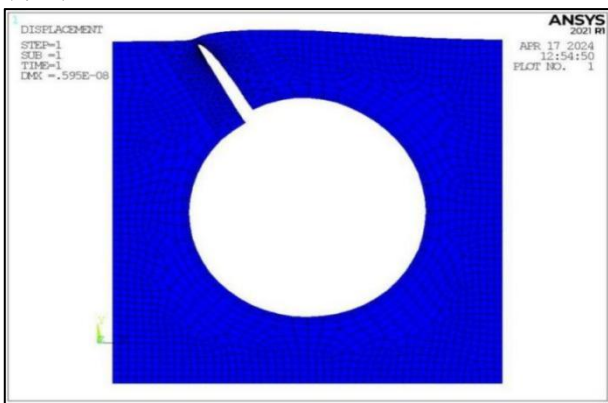


图 2.4 衬砌裂缝扩展与变形示意图

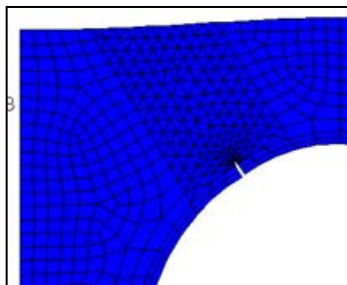


图 2.5 衬砌裂缝扩展变形（第 2 步）

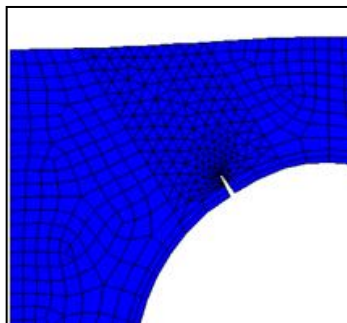


图 2.6 衬砌裂缝扩展变形（第 15 步）

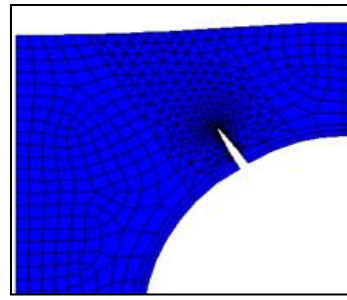


图 2.7 衬砌裂缝扩展变形（第 30 步）

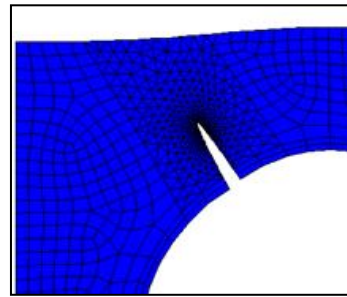


图 2.8 衬砌裂缝扩展变形（第 50 步）

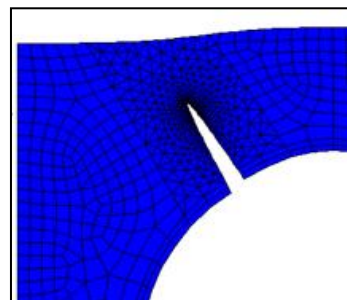


图 2.9 衬砌裂缝扩展变形（第 66 步）

可以看出，在隧洞裂缝扩展过程中， K_I 远大于 K_{II} 。然而，决定裂缝扩展方向的主要因素是 II 型裂纹的应力强度因子 K_{II} 。从实验结果可见，应力强度因子 K_{II} 的值随扩展步的增加而增大。这表明裂缝扩展方向将发生较大角度的偏转，导致断裂扩展角随之增大。下图显示了扩展步与位移曲线，以及内水压力-裂缝张开位移曲线：

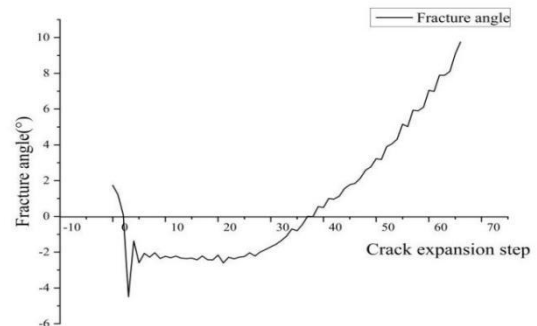


图 2.10 裂缝扩展步-断裂角曲线

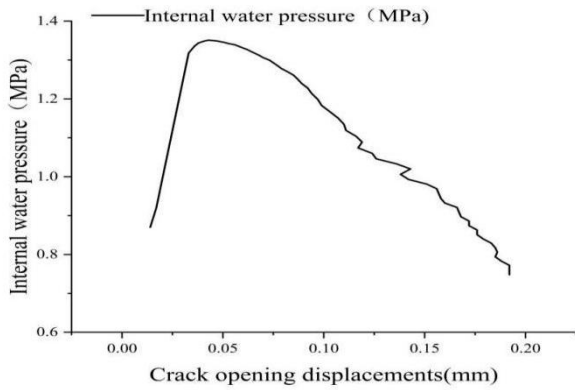


图 2.11 内水压力-裂缝张开位移曲线

通过对不同位置初始裂缝的水工隧洞裂缝扩展进行模拟，模拟结果如下：

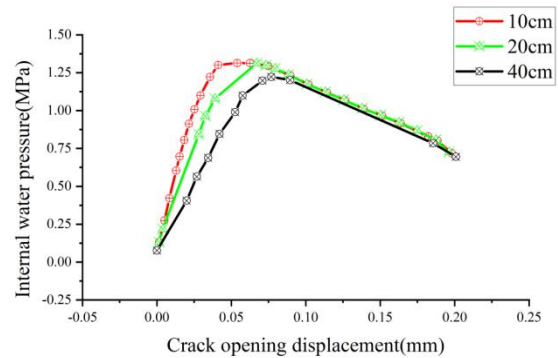


图 2.12 不同位置裂缝张开位移对比曲线

3.2 不同位置初始裂缝对水工隧洞混凝土衬砌内裂缝扩展的影响

将结果汇总于以下表格：

表 2.13 不同起裂位置水压力-裂缝张开位移列表

起裂位置	开裂状态		极限状态	
	缝内水压力(MPa)	裂缝张开位移(mm)	最大内水压力(MPa)	裂缝张开位移(mm)
45°(y-)	1.41	0.0201	2.28	0.547
30°(y-)	1.31	0.0254	1.93	0.0396
60°(y+)	0.87	0.0144	1.35	0.0474
45°(y+)	0.83	0.0238	1.29	0.0545
30°(y+)	0.88	0.0252	1.33	0.0545

从实验结果观察到，不同位置的初始裂缝表现出不同的开裂和极限状态。45°(y-)和 30°(y-)位置的初始裂缝张开荷载和最大荷载逐渐增加。这表明随着位置接近隧洞底部，混凝土的抗裂能力增强。45°(y+)处的起裂荷载和最大荷载低于 30°(y+)和 60°(y+)处，揭示 45°(y+)位置是相对薄弱的位置。

数据分析表明，断裂角波动在裂缝扩展早期阶段更为明显。随着裂缝扩展的继续，这些波动逐渐减小，导致后续扩展步的断裂角曲线逐渐平滑。这一现象表明初始开裂阶段是断裂过程区快速扩展的时期。在此阶段，粘性力显著影响裂尖应力分布，引发断裂角的大幅波动。随着裂缝进一步扩展，断裂过程区趋于稳定，粘性力的影响减弱，大幅降低了断裂角变化的幅度。

在曲线上升段，较长的初始裂缝在相同内水压力值下始终表现出更大的裂缝张开位移。然而，在曲线后段出现显著的收敛现象，各轨迹趋于重叠。这种收敛表明，尽管初始裂缝长度不同，但随着裂缝扩展的继续，裂缝承载能力最终趋于一致，说明初始裂缝长度主要影响早期行为而非长期结构完整性。

4 结论

本研究通过基于混凝土断裂力学理论的虚拟裂纹模型在围护混凝土中创建初始裂缝，建立了平面轴对称有限元模型。通过对 I-II 复合型裂纹扩展的分析，系统评估了水工隧洞围岩混凝土的裂缝扩展过程，得出以下结论：

(1) 断裂力学原理可有效应用于隧洞围岩混凝土完整断裂过程的有限元模拟，能够准确计算内水压力条件下的单裂缝宽度。断裂角方法成功预测了水工围岩混凝土裂缝的扩展路径。

(2) 对不同位置初始裂缝的对比分析表明，随着裂缝与 Y 轴负向夹角的增大，起裂荷载和最大承载能力逐渐增加。Y 轴正向 45 度位置的起裂荷载和最大荷载值超过 30 度和 60 度位置，证实 45 度位置是结构薄弱点。

(3) 对不同初始裂缝长度的分析表明，初始裂缝越长，水工隧洞围岩混凝土的极限承载能力越低。较长的初始裂缝在隧洞失稳前相同内水压力条件下表现出更大的张开和闭合位移。在裂缝扩展后期，总长度相等的裂缝无论初始长度如何，经历的压力条件大致相当。

(4) 初始裂缝长度对水工隧洞围岩混凝土裂缝扩展方向影响甚微,不同初始裂缝长度在圆形隧洞横截面直径方向上表现出相同的整体扩展方向。圆形水工隧洞横截面的裂缝扩展路径基本呈线性轨迹,从截面中心沿直径路径向外辐射。

参考文献

- [1]何欢. 基于粘结滑移的衬砌裂缝宽度计算模型[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(07): 149-153.
- [2]卓守鹏. 压力隧洞透水衬砌裂缝宽度计算方法探讨[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(03): 46-48+58.
- [3]Zhang T T, et al. Study on mechanism of lining cracking and distribution rule of void cra-

cks behind lining based on XFEM[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2023.

[4]Cramer J, Empelmann M. Influence of concrete shrinkage on crack widths in reinforced concrete members under direct loading[J]. Beton- Und Stahlbetonbau, 2021, 116(9): 677-688.

[5]Wang L, et al. Cracks width prediction of steel-FRP bars reinforced high-strength composite concrete beams[J]. Structures, 2022, 43: 424-433.

项目基金: 本研究得到南昌工程学院研究生创新专项基金项目(项目编号: YJSCX202401)资助。