# 基于相场理论的混凝土梁断裂数值模拟研究

# 刘晨晨<sup>1</sup>,赵启迪<sup>1</sup>,刘中跃<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学环境与建筑学院,上海 <sup>2</sup>内蒙古北方重工业集团有限公司南京研发中心,江苏南京

收稿日期: 2024年10月19日; 录用日期: 2024年11月12日; 发布日期: 2024年11月19日

# 摘要

混凝土是以砂浆与骨料为主要成分的一种非均质、准脆性复合材料,断裂失效是工程中的常见问题,相场法是近年来兴起的一种新型断裂模拟方法,实现了裂纹的萌生、扩展、分叉、融合,在模拟复杂裂纹形态上展现出巨大优势。本文基于相场理论方法通过ABAQUS软件对混凝土梁断裂性能进行模拟研究,首先,验证相场法的相场特征宽度/₀和网格尺寸ħ的敏感性;其次,验证了混凝土梁断裂裂纹形态、内部力-裂缝张口位移响应曲线(P-CMOD)与文献模拟结果的稳健性;最后,模拟分析五种不同厚度的混凝土梁的断裂性能。结果表明相场法适用于混凝土梁厚度的断裂研究。

#### 关键词

混凝土,有限元,相场理论,断裂特性

# Research on Numerical Simulation of Concrete Beam Fracture Based on Phase Field Theory

#### Chenchen Liu<sup>1</sup>, Qidi Zhao<sup>1</sup>, Zhongyue Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai <sup>2</sup>Nanjing R&D Center of Inner Mongolia North Heavy Industry Group Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

Received: Oct. 19th, 2024; accepted: Nov. 12th, 2024; published: Nov. 19th, 2024

#### Abstract

Concrete is a non-homogeneous, quasi-brittle composite material mainly composed of mortar and aggregate. Fracture failure is a common problem in engineering. The phase field method is a new type of fracture simulation method that has emerged in recent years. It has achieved crack initiation,

propagation, branching, and merging, showing great advantages in simulating complex crack shapes. This paper uses the phase field theory method to simulate the fracture performance of concrete beams through the ABAQUS software. First, the sensitivity of the phase field characteristic length  $l_0$  and mesh size h is verified. Secondly, the robustness of the fracture crack morphology, internal force-crack mouth opening displacement response curve (P-CMOD) of the concrete beam fracture is verified against the simulation results in the literature. Finally, the fracture performance of five concrete beams of different thicknesses is simulated and analyzed. The results show that the phase field method is suitable for fracture research of concrete beams of different thicknesses.

## **Keywords**

**Concrete, Finite Element, Phase Field Theory, Fracture Characteristics** 

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC O Open Access

# 1. 引言

随着人类在建筑材料及化学工艺等领域的发展,混凝土已经逐步成为了全球应用最为广泛的土木工 程材料[1]。尤其是在1875年,钢筋混凝土材料首次应用于桥梁建造后,混凝土更是在地下工程、高层建 筑、水利工程、交通工程等领域占据着不可或缺的地位。近年来,随着纤维、高性能掺合料、再生骨料的 应用,混凝土正在向低碳、高强、高耐久性的方向发展[2]-[4]。但是由于裂纹和缺陷导致的结构损伤在工 程事故中占有很高的比例,在实际的工程中对于一些结构而言裂纹的产生及扩展可以贯穿其整个生命周 期,直至达到最终失效破坏[5]。因此,研究裂纹的起因和预测断裂裂纹扩展行为规律对于材料、工程结 构稳定性的评价至关重要[6],可以提前采取及时有效的安全措施,防止事故的发生。

利用断裂力学的概念来研究混凝土的破坏机理和宏观裂缝的稳定性,学者认为试件尺寸对于强度的 影响与混凝土中随机分布的裂纹有关。首先将断裂力学的概念引用到混凝土中,并进行了混凝土的断裂 韧度试验后,国内外更多的工作是进行各种断裂模式包括拉裂模式、剪切模式和撕裂模式的实验研究以 及断裂韧度的测试,并积累了大量的测试资料,提出了一系列的应力强度因子计算方法和经验断裂判据。 目前评估混凝土的断裂特性仍然是一个重要的研究方向。钟小青[7]通过对不同强度混凝土三点弯曲切口 梁的断裂试验来分析混凝土的特性,试验表明起裂韧度与失稳韧度与试件尺寸的关系。王煜杰[8]揭示了 不同缝高比和弯折比下混凝土的力学性能和断裂特性变化规律,通过混凝土断裂试验,获得了混凝土的 真实断裂能 GF。胡响等[9]利用 Python 开发的计算机程序,通过在有限元模型中插入内聚力单元,并分 别对三点弯曲素混凝土梁的 I 型断裂失效模式和 L 型混凝土板混合断裂失效模式进行模拟,分析钢筋混 凝土梁的裂纹扩展过程和荷载-挠度曲线。学者们证实了试验方法和理论方法可用于混凝土断裂的研究。

根据断裂力学将裂缝划分为张开型(I型)裂缝、滑开型(II型)裂缝以及撕开型(III型)裂缝三种基本类型,如图1。目前众多学者重点研究对结构危害最大的I型裂缝,深入分析了I型的断裂特性及承载特性,本文通过有限元分析混凝土梁模型来研究混凝土的断裂特性和裂缝扩展,并验证相场理论的可行性。本文以三点弯曲梁(TPB)作为研究对象,通过对现有尺寸的五种不同厚度的TPB梁进行相场理论模拟,研究混凝土梁断裂过程中的裂纹的萌生、扩展、分叉和融合过程。首先,验证相场法的相场特征宽度 *l*<sub>0</sub> 和 网格尺寸 *h* 的敏感性;其次,通过混凝土梁断裂裂纹形态、内部力-裂缝张口位移响应曲线(P-CMOD)与 文献模拟结果进行比对,证明了相场理论法可以用于模拟TPB 混凝土梁力学响应以及裂纹扩展;最后,

模拟分析五种不同厚度的混凝土梁的断裂性能。

结果表明: 1) 跨高比 S/h = 4 的梁,厚度在 100~300 之间,随着厚度的增加,最大荷载 P<sub>max</sub>不断增加。2) 将试验所得到的最大荷载平均值与相场模拟所得到的最大荷载进行比对,五组数据相对误差均小于 7%,验证了相场模拟的合理性。



# 2. 有限元数值模型

## 2.1. 三点弯曲(TPB)梁几何尺寸

TPB 梁的几何尺寸及加载如图 2 所示,左端采用较支座,右端采用滑动支座。试件长为 L,跨度长为 S,深度长为 T,截面高为 H。在梁跨中的下部预制一条切口,预制缺口长 *a*<sub>0</sub>=60 mm,宽 w=3 mm,跨中上部承受向下的位移荷载 P。试验采取了五种不同厚度 T 的混凝土梁,即 T=100,150,200,250,300,编号为 TPB-T。每种类型的混凝土梁都做了六组对比试验来确定断裂参数。



Figure 2. Geometry of TPB beams 图 2. TPB 梁几何尺寸

### 2.2. 材料参数

本文所模拟构件参数均采用文献[10]中的参数,其中断裂能 G<sub>F</sub>与弹性模量 E 取五组对比试验的平均

值, 泊松比 v 取混凝土经验值 v = 0.2 (见表 1)。

| Table  | 1. Material      | parameters |
|--|------------------|------------|
| and the second s | 1 1 1.1.1 25 302 |            |

**表 1.** 材料参数

| 试件<br>参数                             | TPB-100                    | TPB-150                    | TPB-200                    | TPB-250                    | TPB-300                    |
|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| $L \times H \times B \text{ (mm}^3)$ | $1400\times 300\times 100$ | $1400\times 300\times 150$ | $1400\times 300\times 200$ | $1400\times 300\times 250$ | $1400\times 300\times 300$ |
| S (mm)                               |                            |                            | 1200                       |                            |                            |
| $a_0 \text{ (mm)}$                   |                            |                            | 120                        |                            |                            |
| E (Gpa)                              |                            |                            | 25.39                      |                            |                            |
| <i>G</i> <sub>F</sub> (N/m)          | 167.45                     | 179.04                     | 170.18                     | 179.56                     | 173.04                     |

从文献中已知混凝土抗压强度  $f_{cu} = 54.2$  Mpa,并未给出抗拉强度的值,因此根据公式(1)来确定混凝土抗拉强度[11]:

$$f_t = 0.395 f_{\rm cu}^{0.55} \tag{1}$$

### 2.3. 相场法模拟的建立

本文设置相场长度尺寸参数  $l_0 = 3 \text{ m}$ ,为了分析相场模型对尺寸效应的敏感性问题,以 TPB-200 为例,对相场长度尺寸参数  $l_0$ 以及网格划分尺度参数 h进行讨论。

### 2.3.1. 模型建立

模型网格划分如图 3 所示。为了模型分析速率,对于可能发生裂纹扩展的区域,设置网格尺寸 *h*=1 mm,其他区域设置为 10 mm。单元类型设置为温度 - 位移耦合的平面应力单元,四结点平面应力热耦合 四边形单元(CPS4T),双向线性位移,双向线性温度。将构件划分为 75,622 个离散单元。



Figure 3. Mesh division 图 3. 网格划分

# 2.3.2. 尺寸效应的敏感性分析

为了分析相场长度尺寸参数 lo 的敏感性问题,设置相场长度尺寸参数 lo: 3 mm、5 mm、8 mm,其他 条件不变(如图 4(a))。为了分析网格划分尺度参数 h 的敏感性问题,固定相场长度尺寸参数 lo = 5 mm 不 变,设置网格尺寸参数 h: 1/8 lo、1/5 lo、1/3 lo (如图 4(b))。分析结果如图所示,结果表明:利用相场理 论法模拟得到的荷载 - 裂缝开口位移曲线,相场长度尺寸参数 lo以及网格划分尺度参数 h 的影响基本可 以忽略。



图 4. 尺寸效应分析

## 3. 模拟结果分析

#### **3.1. P-CMOD**

图 5 为混凝土梁不同厚度试件的相场模拟结果与试验结果 P-CMOD 曲线对比图。模拟曲线与试验 曲线的形状及变化规律基本吻合,曲线图的走势分为:首先上升阶段,构件的 P-CMOD 曲线呈现线性 上升趋势;到达一定荷载值后,材料进入损伤发展阶段后,荷载不断增加,弹性模量降低,P-CMOD 呈 非线性上升;最后,当混凝土材料达到峰值荷载后,构件截面的有效荷载减少,P-CMOD 曲线呈下降 阶段。

材料的受力状态表现为: 首先, 在加载初期, 混凝土试样的变形处于稳定阶段, 裂缝的扩展几乎 没有变化, 试件是处于一种弹性状态; 其次, 非线性增长阶段, 当荷载达到一定水平后, 试样中的预 制裂缝开始显现; 最后, 随着断裂口位移的增加, 裂纹迅速扩展, 承载能力大大降低, 最终导致材料 断裂。





# 3.2. 裂纹扩展

图 6 为相场模拟裂纹扩展图,选取 TPB-200 试件完全破坏时的云图状态,由于试件梁为对称结构, 左端铰支座,右端滑动支座,且是在梁中间部位有个缺口,所以裂缝形状为向上逐渐裂开,直到完全破 坏。本文模拟混凝土采用素混凝土,裂缝扩展与试验结果基本吻合,破坏形态不会有太多的弯折。



Figure 6. Crack propagation 图 6. 裂纹扩展

### 3.3. 不同厚度的可行性分析

表 2 对比了试验所得到的最大荷载平均值与相场模拟所得到的最大荷载的相对误差

(试验值-模拟值 试验值 \*100%),五组对照组数值相对误差均小于7%,可见相场模拟可以很好的模拟出混凝土

梁断裂的裂缝扩展。

#### Table 2. Pmax comparison

#### 表 2. P<sub>max</sub> 对比

|              | TPB-100 | TPB-150 | TPB-200 | TPB-250 | TPB-300 |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 试验平均值        | 4.9187  | 8.0965  | 10.3949 | 11.7358 | 14.4221 |
| 相场模拟值        | 5.1036  | 7.6554  | 10.2072 | 12.4565 | 15.2112 |
| 试验平均值与相场模拟误差 | -3.8%   | 5.4%    | 1.8%    | -6.1%   | -5.5%   |

# 4. 结论

在混凝土断裂特性的研究领域,大部分试验和模拟都以跨高比 S/D = 4 的标准混凝土三点弯曲梁为 研究对象。本文通过相场理论开展模拟研究,并对现有试验文献的数据进行模拟,结果表明:

1) 对相场长度尺寸参数 l<sub>0</sub>以及网格划分尺度参数 h 的敏感性问题进行分析,结果表明:利用相场理 论法模拟得到的荷载 - 裂缝开口位移曲线,相场长度尺寸参数 l<sub>0</sub>以及网格划分尺度参数 h 的影响基本可 以忽略。

2) 对比相场模拟与试验得到的 P-CMOD (裂缝张开位移)和裂纹扩展,表明了相场法可以用于模拟 TPB 混凝土梁力学响应以及裂纹扩展。将试验所得到的最大荷载平均值与相场模拟得到的荷载值进行对 比,五组试验值与相场模拟值相对误差均小于 7%,验证了本次模拟的合理性。

3) TPB 混凝土梁的最大荷载 P<sub>max</sub>,随着构件厚度的增大逐渐增大,厚度由 100 增加到 300,荷载值 从 4.9187 kN 增加至 14.4221 kN,可见混凝土厚度的改变对于混凝土的强度影响很大,对于后续研究混 凝土的厚度特性提供参考。

# 参考文献

- Flatt, R.J., Roussel, N. and Cheeseman, C.R. (2012) Concrete: An Eco Material That Needs to Be Improved. *Journal of the European Ceramic Society*, 32, 2787-2798. <u>https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.11.012</u>
- [2] Babu, S.V. and Ramana, D.N.V. (2019) Performance of Polymer Concrete Seeded with Steel Fibres and Stone Powder. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8, 9844-9847. https://doi.org/10.35940/ijrte.d9136.118419
- [3] Jaiswal, A.K., Agrawal, R. and Trivedi, M.K. (2023) Development of High-Performance Concrete Using Ultrafine Flyash. *Journal of Physics: Conference Series*, 2484, Article ID: 012022. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2484/1/012022
- [4] Wang, C., Cheng, L., Ying, Y. and Yang, F. (2024) Utilization of All Components of Waste Concrete: Recycled Aggregate Strengthening, Recycled Fine Powder Activity, Composite Recycled Concrete and Life Cycle Assessment. *Journal* of Building Engineering, 82, Article ID: 108255. <u>https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108255</u>
- [5] 曹亚阔. 基于相场法的含缺陷材料静动态损伤与断裂过程模拟[D]: [硕士学位论文]. 保定: 河北大学, 2021.
- [6] 王学滨. 应变软化材料变形、破坏、稳定性的理论及数值分析[D]: [博士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006.
- [7] 钟小青. 基于双 K 断裂理论的混凝土性能试验研究与分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [8] 王煜杰. 模拟酸雨侵蚀环境下含I/I-II型裂缝混凝土断裂特性研究[D]:[硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.

- [9] 胡响, 武杰, 张宝虎. 基于内聚力模型的钢筋混凝土梁断裂模拟[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(33): 14281-14286.
- [10] 徐世烺, 熊松波, 李贺东, 等. 混凝土断裂参数厚度尺寸效应的定量表征与机理分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(5): 57-71.
- [11] Guan, J., Hu, X. and Li, Q. (2016) In-depth Analysis of Notched 3-P-B Concrete Fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, **165**, 57-71. <u>https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.08.020</u>