

混凝土劈裂抗拉试验的离散元数值模拟细观参数研究

杨凯龙^{1,2}, 郭 鸿^{1,3}, 谢晓龙^{1,2}, 王 雅^{1,2}, 杜甜甜^{1,2}, 程月新^{1,2},
罗 滔^{4,5}, 蒋 红^{1,3}

(1. 陕西理工大学 土木工程与建筑学院, 陕西 汉中 723001; 2. 陕西理工大学 人居环境科研学社, 陕西 汉中 723001;
3. 陕西理工大学 秦巴山地岩土环境与灾害防治研究中心, 陕西 汉中 723001;
4. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 5. 西京学院 土木工程学院, 陕西 西安 710123)

摘 要: 基于颗粒流软件 PFC^{3D} 研究细观参数对混凝土劈裂抗拉试验应力-应变曲线的影响, 为离散元数值模拟的细观参数标定提供理论依据。通过控制变量法, 研究摩擦系数 μ 、平行黏结模型的有效模量 E^* 、黏聚力 c 、拉应力 σ_c 、摩擦角 φ 和法向阻尼率 β_n 等细观参数对混凝土劈裂抗拉试验的影响。研究结果表明: 平行黏结模型的有效模量 E^* 对宏观弹性模量的影响显著。随着有效模量的增加, 宏观弹性模量逐渐增大, 有显著的线性关系; 平行黏结模型的黏聚力 c 、拉应力 σ_c 和摩擦角 φ 决定了宏观材料的峰值强度。其中拉应力 σ_c 和摩擦角 φ 的影响较小, 黏聚力 c 对峰值强度具有决定性作用。随着黏聚力 c 增大, 峰值强度线性增加; 摩擦系数 μ 和法向阻尼率 β_n 对应力-应变曲线的影响可忽略不计。研究成果对快速、合理的确定混凝土数值模拟中平行黏结模型细观参数标定具有参考价值。

关键词: 劈裂抗拉; 离散元数值模拟; 平行黏结模型; 细观参数; 应力-应变

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)04-0029-06

Meso-parameters Analysis of Discrete Element Numerical Simulation of Concrete Splitting Tensile Test

YANG Kailong^{1,2}, GUO Hong^{1,3}, XIE Xiaolong^{1,2}, WANG Ya^{1,2}, DU Tiantian^{1,2},
CHENG Yuexin^{1,2}, LUO Tao^{4,5}, JIANG Hong^{1,3}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China;
2. Student Research Society of Human Settlements, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China;
3. Research Center of Geotechnical Environment and Geological Hazards Control in Qinling-Daba Mountains, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China;
4. School of Water Resources and Building Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
5. School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an, Shaanxi 710123, China)

Abstract: Based on the particle flow software PFC^{3D}, the influence of mesoscopic parameters on the stress-strain curve of concrete splitting tensile test is analyzed, which provides a theoretical basis for the calibration of mesoscopic parameters of discrete element numerical simulation. The influence of micro parameters such as friction coefficient, effective modulus of parallel bonding model, cohesive force, tensile stress, friction angle, and normal damping rate on the results of concrete splitting tensile test was investigated by controlling variables. The research results indicate that the effective modulus of the parallel bonding model has a significant impact on the macroscopic elastic modulus. As the ef-

收稿日期: 2024-04-03

修稿日期: 2024-05-07

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2023-YBSF-324); 陕西省教育厅服务地方专项计划项目 (23JC019); 陕西理工大学科研能力提升专项项目 (SLGNI202415); 陕西理工大学研究生创新基金项目 (GFC2403)

作者简介: 杨凯龙 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土与地下工程。E-mail: klyang1019@163.com

通讯作者: 郭 鸿 (1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事颗粒物质力学、岩土工程理论及数值模拟等方面工作。E-mail: hguo@snut.edu.cn

fective modulus increases, the macroscopic elastic modulus gradually increases, showing a significant linear relationship. The cohesion, tensile stress, and friction angle of the parallel bonding model determine the peak strength of macroscopic materials. The influence of tensile stress and friction angle is relatively small, while cohesion plays a decisive role in the peak strength. As the cohesion increases, the peak strength increases linearly. The influence of friction coefficient and normal damping rate on the stress-strain curve can be ignored. The research results are of great significance for quickly and reasonably determining the micro parameter calibration of parallel bonding models in concrete numerical simulation.

Keywords: splitting tensile strength; discrete element numerical simulation; parallel bond model; microscopic parameters; stress-strain

随着自然环境、灾害和施工技术的影响,大坝在长期运行过程中,坝体避免不了会出现裂纹、老化和侵蚀。为防止大坝发生溃坝,需对混凝土大坝进行加固维修。对于混凝土坝加固而言,其承受拉力的部位往往是最薄弱的部位,是需要重点关注的对象。劈裂抗拉试验是评估混凝土抗拉强度的重要手段^[1-2],但由于传统试验方法周期长、成本高,且受试件制备、试验环境等多种因素影响,结果存在一定的离散性。随着计算机技术的发展,离散元数值模拟方法在混凝土力学性能模拟分析中得到广泛运用。这种方法不仅能够模拟混凝土在劈裂抗拉试验中的破坏过程,并且还能分析混凝土内部的细观力学行为。因此,开展混凝土劈裂抗拉试验的离散元数值模拟细观参数标定的研究,对于深入理解混凝土的宏细观力学特性具有重要意义。

现阶段,国内外学者对混凝土的数值模拟和理论研究取得了丰硕的成果。Chowdhury 等^[3]在 ANSYS10.0 有限元平台上建立了素混凝土和钢纤维混凝土 (SFRC) 圆柱体试件模型,并进行了劈裂抗拉试验,并对试验结果和失效模式进行了对比。Szechorzewski 等^[4]基于混凝土圆柱试件在劈裂抗拉试验中的尺寸效应进行了试验和数值研究,在离散元中对断口进行宏观和微观分析,并与显微 CT 扫描直接对比,离散元模拟揭示了材料强度和延性随着试样尺寸的增大而降低的现象。魏杉等^[5]通过 ABAQUS 软件对立方体试件劈裂抗拉试验开展了二维和三维数值模拟,研究了试件的应力状态以及垫条宽度的影响,并结合 Griffith 强度准则分析了试件的起裂点位置。杜立峰等^[6]采用有限元方法数值模拟混凝土试件的细观损伤断裂和劈裂抗拉并对其劈裂抗拉强度尺寸效应进行了研究。姜玥等^[7]基于空心圆柱灰砂岩单轴压缩和常规三轴压缩试验特性,分别采用单因素分析法、响应曲面分析法和回归分析法,研究了离散元软件 PFC^{3D} 中平行黏结模型

宏细观参数的敏感性特征。Ma 等^[8]利用有限元软件 LS-DYNA 和随机骨料细观模型模拟了碱性硫酸镁水泥混凝土在动态劈裂载荷下的破坏过程。郭鸿等^[9]针对二维规则排列颗粒组成的宏观介质,建立了一种离散元平行黏结模型细观参数和宏观力学参数的定量关系。钟惟亮等^[10]通过对 BP 神经网络模型的训练,建立了地聚物混凝土宏、细观参数之间的非线性映射关系。然而,上述研究并未系统、全面的研究平行黏结模型中细观参数对试样宏观力学响应的影响规律,尤其在三维数值模拟方面,几乎未见相应的成果发表。

本文采用颗粒流软件 PFC^{3D},模拟混凝土劈裂抗拉试样的破坏机理,通过分析摩擦系数平行黏结模型的拉应力、黏聚力、摩擦角、有效模量和法向阻尼率参数对混凝土试样力学性能的影响规律,以期快速标定离散元数值模拟混凝土劈裂抗拉试验细观参数提供理论参考。

1 离散单元法的原理

离散单元法是 Cundall 等^[11]1979 年提出专门用来解决不连续介质问题的数值模拟的方法。其基本原理是将实际的颗粒组离散为若干个单独的颗粒,并对颗粒赋予不同的位置、质量、密度和力等特性。颗粒之间通过排斥力和摩擦力相互作用,模拟颗粒间的力学相互作用。离散单元法可以模拟颗粒物体之间的运动,将连续的物体离散化,使其分解为离散的小元素,并通过力的作用模拟整个系统的运动。离散元法在众多领域都有着及其重要的应用,例如岩土工程、矿业和冶金领域、食品加工等^[12-14]。

针对混凝土这种脆性材料,本文在颗粒流数值模拟中采用的是平行黏结模型,它是一种描述黏结材料力学行为的模型。平行黏结模型将黏结材料看为由一组平行排列的弹簧组成,这些弹簧具有恒定的法向刚度和切向刚度,并均匀地分布在接触区域

内。平行黏结模型可以同时传递力和弯矩。图 1 为平行黏结模型的示意图^[15]。平行黏结模型是一种基于弹簧模型用来描述黏结材料力学行为的工具,用它来预测和分析黏结材料的性能和行为,并为实际应用提供重要的参考依据。

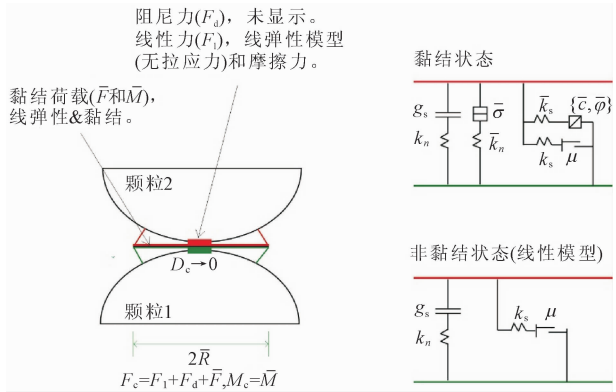


图 1 平行黏结模型示意图

注: D_c 为颗粒间接触点的刚度, $\bar{R}$ 为黏结半径, F_c 、 F_l 、 F_d 和 $\bar{F}$ 分别为合力、线性接触力、阻尼力和平行黏结力, M_c 、 $\bar{M}$ 分别为总力矩和平行黏结模型的力矩, g_s 和 μ 分别为表面间隙和摩擦系数, k_n 、 k_s 分别为线性模型的法向、切向刚度, $\bar{k}_n$ 、 $\bar{k}_s$ 分别为平行黏结模型的法向刚度、切向刚度, $\bar{\sigma}_c$ 、 $\bar{c}$ 、 $\bar{\varphi}$ 分别为平行黏结模型的抗拉强度、黏聚力和摩擦角。

2 数值模拟

2.1 数值模型建立

运用离散元数值模拟软件 PFC^{3D},对混凝土的劈裂抗拉试验进行数值模拟,并分析影响平行黏结模型细观参数标定的因素。数值模拟过程分为三个步骤:生成试样、设置接触模型、试样加载。该模型的底部和顶部的垫条尺寸为 5 mm×5 mm×20 mm,分别采用刚性墙进行加载。除上下垫条外,其余部位均无约束,如图 2(a)所示。生成的混凝土试样模型为三维模型,其尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 的标准立方体试件,如图 2(b)所示。模拟试样中粒径为 8±20% mm,设置平行黏结模型的法向与切向刚度比为 1($\bar{k}^* = \frac{\bar{k}_n}{\bar{k}_s} = 1$)。混凝土试样生成后,通过设置 0.1 m/s 的加载速度,实现上下垫条双向加载。

2.2 数值模拟方案

数值模拟方案中,混凝土细观参数的取值见表 1。采用单一变量控制法,研究各细观参数对劈裂抗拉应力-应变曲线的影响。即在保持其它所有参数恒定的情况下,逐一调整某一细观参数,分析单一参

数变化对混凝土的劈裂抗拉性能的影响。

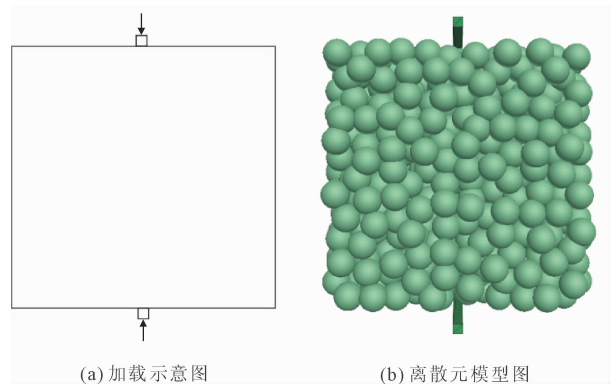


图 2 劈拉试验模拟示意图

表 1 混凝土细观参数

摩擦系数 μ	法向 阻尼率 β_n	黏聚力 c /MPa	摩擦角 φ /(°)	拉应力 σ_c /MPa	有效模量 E^* /MPa
0.5					
0.6	0.7	5	75	50	1000
0.7					
	0.6				
0.6	0.7	5	75	50	1000
	0.8				
		5			
0.6	0.7	10	75	50	1000
		50			
			25		
			35		
			45		
0.6	0.7	10	55	100	500
			65		
			75		
			85		
				5	
0.6	0.7	5	75	10	1000
				50	
					500
0.6	0.7	5	75	50	1000
					5000

注: $E^* = L \cdot \bar{k}_n$ (L 为两颗粒之间半径之和, $\bar{k}_n$ 为平行黏结模型的法向刚度)。

3 模拟结果分析

采用平行黏结模型,在细观参数标定过程中,分别设定不同的摩擦系数、平行黏结模型的法向阻尼率、黏聚力、摩擦角、拉应力和有效模量参数,分析不同参数对劈裂抗拉试验应力-应变曲线的影响规律。

3.1 细观参数分析

3.1.1 摩擦系数 μ

颗粒间的摩擦系数在宏观上表现为骨料表面的

粗糙程度。 μ 决定了混凝土材料之间的黏结性能和滑移行为,对混凝土结构的承载能力和稳定性具有重要影响。由表 1 可得,形成三种仅 μ 不同的数值试样,对三种试样逐一模拟劈拉过程。模拟计算得到的应力-应变曲线,如图 3 所示。

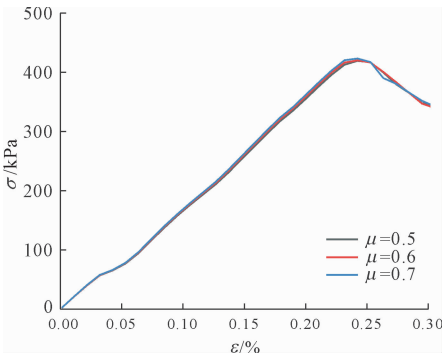


图 3 摩擦系数对应力-应变的影响

由图 3 可得,随着 μ 的增加,图中三条曲线基本重合,因此说明混凝土中颗粒间的 μ 对试样的力学性能影响较小。产生这种现象的原因是在平行黏结模型分为黏结状态和非黏结状态。黏结状态由黏结单元和摩擦单元组成,在进行劈拉试验模拟中黏结单元起主要作用,与摩擦单元关系不大。在非黏结状态下,混凝土为脆性材料,发生脆性破坏,故非黏结状态中的 μ 没有起作用。因此,该计算模型由黏结状态中的黏结单元控制。这与潘贵阳^[16] 在文中提到的结论相符。

3.1.2 法向阻尼率 β_n

法向阻尼率 β_n 参数指平行黏结模型下的法向阻尼率。 β_n 的大小会影响颗粒材料在受到法向载荷时的力学响应。参数选取如表 1 中所示,通过劈裂抗拉试验,得到宏观的应力-应变曲线,如图 4 所示。

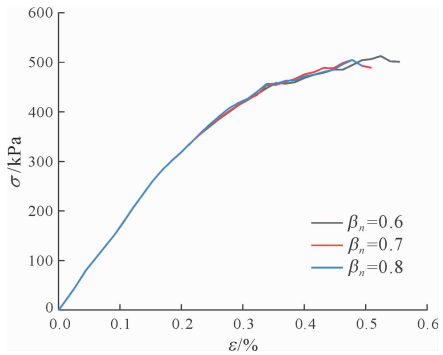


图 4 法向阻尼率对应力-应变曲线的影响

由图 4 可得,随着 β_n 的不同,图中三条曲线基

本重合,因此可得 β_n 对试样的力学性能影响较小。产生这种现象的原因是 β_n 用于描述系统或材料在动态加载条件下能量耗散的能力。在动态加载过程中,阻尼率会影响系统或材料的振动特性和能量耗散行为。然而,在准静态加载条件下,系统的变形和应力响应是缓慢的,因此阻尼率对应力应变曲线的直接影响并不显著。

3.1.3 黏聚力 c

黏聚力 c 参数指平行黏结模型下颗粒间的黏聚力。在平行黏结模型中,它影响着混凝土在剪切应力作用下的行为表现。参数选取如表 1 中所示,通过劈裂抗拉试验,得到宏观的应力-应变曲线,如图 5(a) 所示。

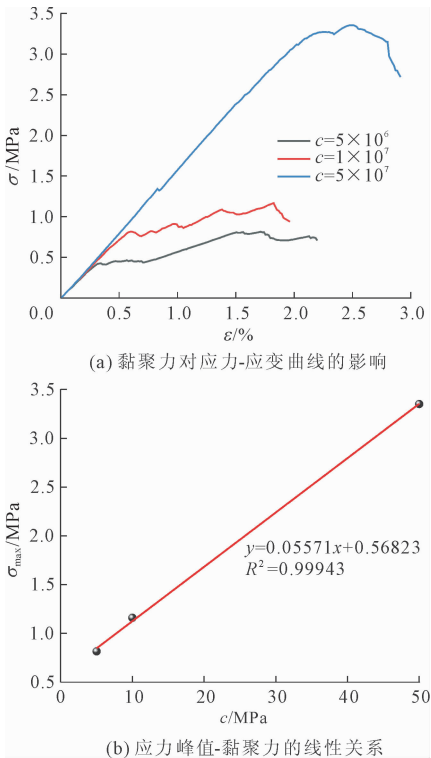


图 5 黏聚力的影响规律

由图 5(a) 可知, c 参数对试样的力学性能影响较大。主要影响应力-应变曲线的应力峰值和应变。随着 c 参数的增大,其劈拉强度逐渐增大,且符合线性关系。因此 c 参数是影响峰值应力的主要因素。产生这一现象的原因是随着 c 的增大,颗粒间的黏结力增强,材料抵抗破坏的能力增强,同时也表示着颗粒间的相互作用能更好地抵抗外力作用,因此曲线峰值增高。

3.1.4 摩擦角 φ

摩擦角 φ 参数指平行黏结模型的摩擦角,是一

个用于描述颗粒间滑动摩擦行为的参数。它定义了材料在剪切面上开始发生相对滑动的临界条件,同时也影响着材料的宏观剪切强度和破坏模式。参数选取如表 1 中所示,通过劈裂抗拉试验,得到宏观的应力-应变曲线,如图 6 所示。

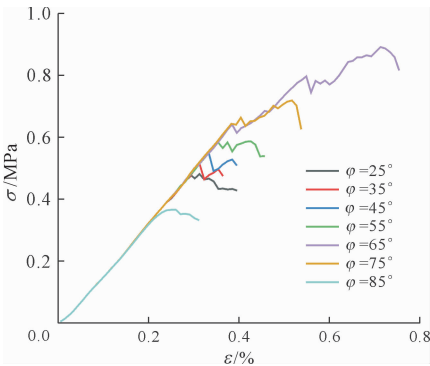


图 6 摩擦角对应力-应变曲线的影响

如图 6 所示, φ 小于 55° 时,随着 φ 的增加,应力峰值增加。大于 55° 时,应力峰值随着 φ 的增加而减小。其原因是随着 φ 的增加,颗粒间的摩擦阻力也在增加。因此在受到外部应力作用时,颗粒之间更难发生相对滑动。当 φ 大于 55° 时, φ 对材料强度的影响可能不再占据主导地位。

3.1.5 抗拉强度 σ_c

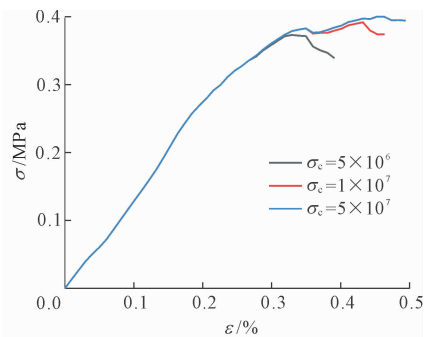
抗拉强度 σ_c 参数指的是平行黏结模型下颗粒间的抗拉强度。由表 1 可得,保持其它参数不变,取三种不同的 σ_c 参数,进行劈裂抗拉试验,模拟得到的应力-应变曲线,如图 7(a) 所示。

由图 7(a) 可得,在峰值应力之前三条曲线基本重合,但对于峰值应力具有一定的影响。随着 σ_c 的增加,其应力-应变曲线的峰值应力显示上升趋势,如图 7(b) 所示。

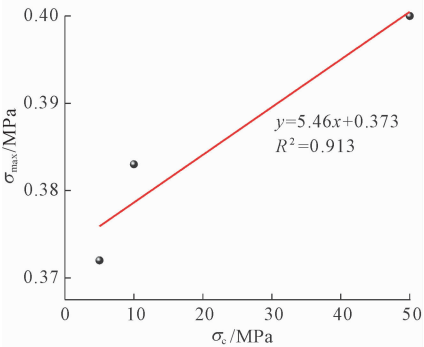
对比分析 c 、 φ 和 σ_c 参数对应力峰值的影响,如图 8 所示。可以看出 φ 和 σ_c 参数对应力-应变曲线中峰值应力的影响较小,而 c 的影响显著。因此,在具体的调参过程中, c 对应力峰值起主要控制作用, φ 和 σ_c 可以用于对曲线的微调。

3.1.6 有效模量 E^*

混凝土的 E^* 指平行黏结模型的有效模量,是描述颗粒材料在受到外力作用时的整体响应特性。在混凝土劈拉试验数值模拟中,参数选取如表 1 所示,通过劈裂抗拉试验,得到的宏观的应力-应变曲线,如图 9(a) 所示。



(a) 拉应力对应力-应变曲线的影响



(b) 应力峰值-拉应力的线性关系

图 7 拉应力的影响规律

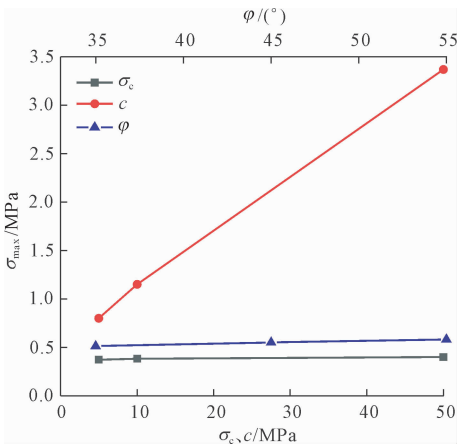


图 8 细观参数对应力峰值的影响趋势

由图 9(a) 可得, E^* 的变化主要影响曲线的初始斜率,即对弹性模量的影响显著。随着 E^* 的增加,曲线的初始斜率增大。由图 9(b) 可知,显线性增长。产生这种现象的原因是 E^* 直接反映了材料的刚度。当 E^* 增大时,意味着材料的刚度增加,同时抵抗变形的能力增强。因此,在相同的应力作用下,应变减小,导致弹性模量增大,也意味着应力-应变曲线的初始斜率会发生变化。

4 混凝土细观参数标定

由上文可知,为确保计算模型与混凝土试验力

学性能相符,关键需调试 E^* 和 c 两个参数,分别用于调控应力-应变曲线的初始斜率和应力峰值强度。本文对李晓龙等^[17]文章中的纤维混凝土的劈裂抗拉试验的应力-应变曲线进行标定,使得模型的宏观力学响应逐渐接近物理试验的结果,最终确定的细观参数详见表 2。

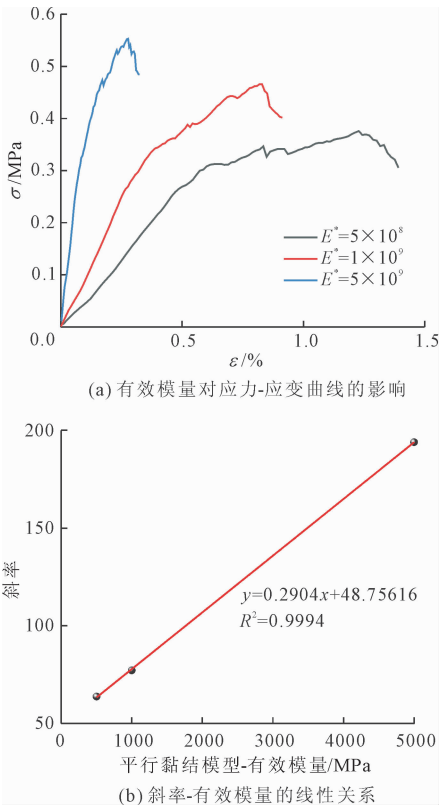


图 9 有效模量的影响规律

表 2 本文的离散元细观参数

E^* /MPa	c /MPa	σ_c /MPa	φ /(°)	μ	β_n
41	2.34	1	85	0.5	0.5

同时,图 10 展示了模拟试验与物理试验的应力-应变曲线对比,从中可以明显看出得到的混凝土的劈裂抗拉应力-应变曲线基本吻合,因此数值模拟得到的结果是合理的。模拟结果与试验结果在峰值后略有不同,原因是模拟过程中颗粒半径的大小会影响峰后应力和应变。未来可对颗粒半径和其他参数进行深入研究。

5 结 论

本文采用离散元颗粒流软件 PFC^{3D}进行了混凝土劈裂抗拉试验的数值模拟,并研究了在平行黏结模型中摩擦系数 μ 、拉应力 σ_c 、有效模量 E^* 、黏聚力

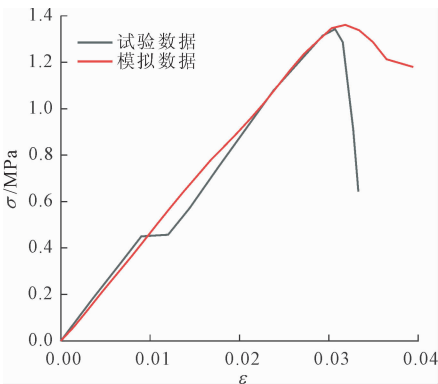


图 10 试验与模拟的应力-应变曲线对比

c 、摩擦角 φ 和法向阻尼率 β_n 等对混凝土力学性能的影响,得到如下结论:

- (1) E^* 是影响应力-应变曲线的初始斜率的主要因素,随着 E^* 的增加,曲线的初始斜率逐渐增大,其大致显线性增长。
- (2) c 、 σ_c 和 φ 决定了宏观材料的峰值强度,其中 σ_c 和 φ 影响较小, c 对峰值强度具有决定性作用。随着 c 的增大,峰值强度显线性增加。
- (3) μ 和 β_n 对应力-应变曲线的影响关系不大,应力-应变曲线几乎重合,因此, μ 和 β_n 对混凝土劈裂试验应力-应变曲线的影响可忽略不计。
- (4) 在采用离散元数值模拟中,为了使计算模型与混凝土试验力学性能相一致,主要调试两个参数,即 E^* 调控应力-应变曲线斜率, c 来调控峰值强度。

参考文献:

[1] 罗 滔,黄陈霖,张天祺,等.堆石混凝土劈裂抗拉破坏过程中声发射特征分析[J].水利水电技术(中英文),2024,55(1):40-50.

[2] 赵亚军,李桂祥,冀晨宇.喷涂聚脲纤维混凝土劈裂抗拉性能试验研究[J].混凝土,2023(10):72-76,86.

[3] Chowdhury A, Islam M, Zahid I Z. Finite element modeling of compressive and splitting tensile behavior of plain concrete and steel fiber reinforced concrete cylinder specimens [J]. Advances in Civil Engineering, 2016:277-287.

[4] Suchorzewski J, Nitka M. Size effect at aggregate level in microCT scans and DEM simulation-Splitting tensile test of concrete[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 264:108357.

[5] 魏 杉,程 炯,黎 冰.立方体劈裂抗拉试验数值模拟与强度计算分析[J].建筑科学,2023,39(7):17-27.

[6] 杜立峰,杨 茜,屈彦玲,等.混凝土劈裂抗拉强度尺寸效应的细观数值研究[J].铁道建筑,2008(7):112-113.

(3) 长期水环境会降低普通沥青混凝土的愈合率和形变率,但对玄武岩纤维沥青混凝土未产生不利影响,其仍具有良好的抗弯能力及裂缝愈合能力。

参考文献:

- [1] 岳跃真,渠守尚. 抽水蓄电站沥青混凝土防渗护面的技术综述[J]. 水力发电,2008(10):45-47.
- [2] 徐小东,汪正兴,朱安龙,等. 环境因素对水库大坝沥青混凝土面板温度的影响分析[J]. 水利与建筑工程学报,2023,21(4):15-20,29.
- [3] 林云腾. 适用于高温地区的非聚合物改性沥青性能研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(2):19-25.
- [4] 彭振宇. 添加剂对高模量沥青及其混合料性能的影响[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(5):228-231.
- [5] 要海亮. 橡胶沥青应力吸收层试验及应用研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(3):234-237,242.
- [6] 袁旭锋,殷建刚. 玻璃纤维增强多孔沥青混合料的性能评价[J]. 科学技术创新,2023(13):140-143.
- [7] 尹波. 掺钢纤维沥青混合料路用性能研究[J]. 交通世界,2023,1(26):42-44.
- [8] 张丽,汪春梅,张文,等. 路用纤维性能及应用综述[J]. 城市道桥与防洪,2009,1(11):41-43,7.
- [9] 韦佑坡,张争奇,司伟,等. 玄武岩纤维在沥青混合料中的作用机理[J]. 长安大学学报(自然科学版),2012,32(2):39-44.
- [10] 黄想禄,栗学超,冯翔. 聚酯纤维与抗车辙剂对沥青混合料路用性能的影响[J]. 合成纤维,2024,53(4):96-99.
- [11] 栾利强,任俊颖,余和德,等. 导电作用下碳纳米管-碳纤维沥青混合料的自愈合研究[J]. 功能材料,2024,55(1):1151-1157.
- [12] 彭海东. 玄武岩纤维沥青混合料损伤演化规律研究[J]. 合成纤维,2024,53(4):90-95.
- [13] 张珂苑,赵涛. 冻融循环条件下玄武岩纤维改性桥面沥青混凝土抗裂性能研究[J]. 合成材料老化与应用,2023,52(2):96-98.
- [14] 张少欣. 玄武岩纤维沥青路面在公路建设中的应用[J]. 交通科技与管理,2024,5(1):119-121.
- [15] 宋彦军. 石灰-偏高岭土胶凝材料的制备及其天然矿物纤维改性研究[D]. 西安:长安大学,2017.
- [16] 王柳江,张清远,毛航宇,等. 不同温度下掺玄武岩纤维水工沥青混凝土劈裂试验研究[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(5):177-186.
- [17] Jamshaid H, Mishra R. A green material from rock: basalt fiber-a review[J]. The Journal of the Textile Institute, 2016,107(7):923-937.
- [18] Sim J, Park C. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures[J]. Composites Part B: Engineering, 2005,36(6-7):504-512.
- [19] 何孝万. 沥青-集料粘附性及水在沥青中的扩散过程研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2017.
- [20] 吕泉. 沥青与集料粘附性评价方法的研究[D]. 上海:同济大学,2018.

(上接第34页)

- [7] 姜玥,邹文栋. 基于PFC3D的空心圆柱灰砂岩宏观参数相关性研究[J/OL]. 煤炭科学技术,2024:1-13 [2024-02-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20231204.1309.003.html>.
- [8] Ma Haiyan, Guo Jianbo, Liu Ting, et al. Experimental and numerical studies on the mechanical behaviors of basic magnesium sulfate cement concrete under dynamic split-tension[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 77:107525.
- [9] 郭鸿,王普,张科强,等. 离散元平行黏结模型的细观参数标定[J]. 中国科技论文,2019,14(6):610-613.
- [10] 钟惟亮,丁昊,范立峰. 基于BP神经网络的地聚物混凝土细观参数标定研究[J/OL]. 工程力学,2024:1-10 [2024-02-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20231226.0959.016.html>.
- [11] Cundall P A, Strack O. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 2008,30(3):331-336.
- [12] 郭鸿,黄文华,李军,等. 非饱和重塑黄土的一种简化离散元模型[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2016,14(6):448-453.
- [13] 刘康,王现文,李骖,等. 基于DEM联用Box-Behnken响应面法优化磨煤机破碎参数[J/OL]. 矿产综合利用,2024:1-9 [2024-03-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20230904.1609.004.html>.
- [14] 徐玉菁. 基于DEM离散元建模技术的双轴桨叶式食品混合机运动仿真分析[J]. 食品与机械,2021,37(8):115-118,125.
- [15] Itasca Consulting Group. PFC3D(Particle flow code in 3 dimensions). Version 6.00.13 [Z]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, 2019.
- [16] 潘贵阳. 混凝土破坏过程离散元细观参数确定及仿真[D]. 南京:东南大学,2022.
- [17] 李晓龙,何盛东,林玉婷,等. 加入纤维前后混凝土的劈裂抗拉性能研究[J]. 高科技纤维与应用,2022,47(6):49-54.