材料导报 MATERIALS REPORTS
研究论文
2023, Vol.37, No.8 www.mater-rep.com

基于分段步进式弹塑性格构模型的混凝土破坏过程细观模拟

张洪智[1,2], 金祖权[3,✉], 姜能栋[1], 葛　智[1], Erik Schlangen[4], 凌一峰[1], Branko Šavija[4], 王　铮[5]

1 山东大学齐鲁交通学院,济南 250100
2 山东大学苏州研究院,江苏 苏州 215021
3 青岛理工大学土木工程学院,山东 青岛 266033
4 代尔夫特理工大学土木工程与地球科学学院,荷兰 代尔夫特市 2628 CN
5 山东高速股份有限公司,济南 250100

经典格构模型理论假设单元服从完全脆性的线弹性本构关系,忽略了砂浆基体的延性,导致预测的混凝土荷载-位移曲线延性不足。针对该问题,基于分段步进式方法描述砂浆单元弹塑性本构关系,通过序列线性理论模拟试件受荷损伤破坏过程及力学响应。基于混凝土单轴拉伸和压缩试验对模型进行了校验,发现该模拟方法可以精确模拟混凝土的开裂及荷载-位移曲线。同时,该模型可用于模拟混凝土受拉开裂的尺寸效应问题,以及受压破坏时受力端横向约束程度和试件长细比对开裂行为的影响,为研究混凝土的断裂行为提供了新的理论方法和途径。

关键词　混凝土　细观尺度　格构模型　断裂过程　弹塑性本构关系
中图分类号:TU528　**文献标识码**:A

Fracture Modelling of Concrete at Meso-scale Using Piece-wise Based Elastic-Plastic Lattice Model

ZHANG Hongzhi[1,2], JIN Zuquan[3,✉], JIANG Nengdong[1], GE Zhi[1], Erik Schlangen[4], LING Yifeng[1], Branko Šavija[4], WANG Zheng[5]

1 School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250100, China
2 Suzhou Research Institute, Shandong University, Suzhou 215021, Jiangsu, China
3 School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, China
4 Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft 2628 CN, the Netherlands
5 Shandong Hi-speed Company Limited, Jinan 250100, China

The classically lattice model assumes the local elements behave elastic brittle, neglecting the ductility of the mortar matrix. This leads to the simulated load-displacement response more brittle than the realistic. To solve the aforementioned issue, a piece-wise approach was introduced to describe the elastic-plastic constitutive relation of lattice element. The fracture process and the load-displacement response were obtained through the sequentially-linear solution approach. The model was calibrated using the uniaxial tension and compression tests. It is found that the model can precisely simulate the fracture process and load-displacement response. Moreover, the model was used to model the size effect in uniaxial tension and the influence of the specimen's slenderness and boundary confinement on the fracture behavior under compression. It offers a new theoretical method and approach for studying the fracture of concrete.

Key words　concrete, meso-scale, lattice model, fracture process, elastic-plastic constitutive relation

0　引言

在荷载和环境作用下,混凝土裂缝问题突出,引发耐久性问题,严重缩短结构服役寿命,甚至造成结构性破坏。因此,有必要研究混凝土裂缝的产生及发展机理,为裂缝防控提供理论依据。

混凝土材料的非均质性决定了其开裂行为的复杂特征。根据特征尺寸和研究方法侧重点的不同,可将混凝土的研究分为四个层次,即宏观、细观、微观及纳观。在细观尺度上,混凝土被视为由粗骨料、砂浆基质及界面过渡区(Interfacial transition zone, ITZ)组成的多相复合材料[1-3]。混凝土细观断裂分析方法是解决混凝土裂缝萌生、扩展路径分析和断裂性能研究的有效手段[4-6]。准确预测混凝土的应力-应变关系,揭示峰后行为与裂缝演化过程、边界条件的内在联系,是细观方法研究的关键问题。但是,混凝土的软化段除了受材料自身特性的影响外[7-8],也受试件尺寸[8-9](如试件长细比等)、边界条件[10](如受压端面约束等)的影响。因此,准确模拟不同条件下混凝土的软化段,对于揭示混凝土材料的损伤劣化机理以及抗裂增韧具有重要意义。

国内外学者相继提出了多种混凝土细观断裂力学模型,如格构模型理论[11-12](Lattice model)、M-H 细观力学模型[13-15](Micro-mechanical model)、随机粒子模型[16](Random particle model)、随机骨料模型[13,17-18](Random aggregate model)、随机力学特性模型[19-20](Random mechanical characteristics model)和近场动力学模型[21]等。不同的细观力学模型具有各自的适应性和优势,可用于解释混凝土的非线性力学行为[4, 22-23]、尺寸效应[24-25]和裂缝开展[26-28]等特征。其中,格构模型理论始于 20 世纪 40 年代,是以物理学为基础求解经典弹性力学问题的网格模型[29]。20 世纪 90 年代,Schlangen 和 van Mier[30]最先将格构模型理论应用于混凝土的断裂模拟,通过单轴拉伸和单轴压缩数值试验模拟了混凝土材料的损伤破坏机理及裂缝发展规律。国内外其他学者也利用格

基金项目:山东省泰山学者青年基准纯水泥专家计划(tsqn201909032);国家自然科学基金(52008234;51978387);江苏省自然科学基金(BK20200235)
This work was financially supported by Taishan Scholar Foundation of Shandong Province (tsqn201909032), National Natural Science Foundation of China (52008234, 51978387) and Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20200235).

✉ jinzuquan@126.com

DOI:10.11896/cldb.21100198

构模型进行了一系列研究,郭丽萍等[31]用二维格构模型模拟了混凝土的疲劳破坏,Caduff 和 van Mier[32]采用格构模型研究了普通混凝土以及高强混凝土的单轴受压力学性能,肖建庄等[33]采用格构模型研究再生混凝土的单轴受压应力应变曲线。该模型证实了混凝土力学行为的非线性特征来源于材料的非均质性,其虽然可以模拟混凝土受荷开裂过程,但由于模型没有考虑砂浆基体或更低尺度材料的延性[34-35],预测的荷载-位移曲线延性不足[36-37],难以解释混凝土细观结构与宏观力学性能的关系。

基于此,本工作提出了基于分段步进式描述格构单元弹塑性本构关系的方法,通过序列线性(Sequentially-linear solution)理论模拟试件受荷损伤破坏过程及力学响应。基于混凝土的单轴拉伸和压缩试验对模型进行了校验,发现该模拟方法可以精确模拟混凝土的开裂及荷载-位移曲线,解决了经典弹性格构模型理论预测的荷载-位移曲线延性不足的问题。同时,该模型可用于模拟混凝土受拉开裂的尺寸效应问题,以及受压破坏时受力端横向约束程度和试件长细比对开裂行为的影响,为研究混凝土的断裂行为提供新的理论方法和途径。

1 模型和方法

1.1 格构模型理论

格构模型的核心思想是将计算区域离散为若干个梁单元组成的背景网格,将生成的混凝土细观模型映射到由梁单元构成的背景网格上,根据梁单元在细观模型中所处的位置确定其单元属性,表征材料的细观非均质性。根据模拟工况,施加边界条件,进行有限元分析。基于事件驱动(Event-driving 或 Event-by-event)的机制,找出当前求解步损伤比例因子(应力/强度比,β)最大的单元,并记录为失效单元从模型中去除,将其表征为裂缝,单元被破坏后荷载将进行重新分配,再次计算单元应力并表征裂缝单元,直至整个模型达到预设的阈值(力或位移),从而获得混凝土的裂纹形态以及扩展过程。其中单元损伤比例因子(β_i)计算公式如下:

$$\beta_i=\frac{\sigma_i}{f_i} \tag{1}$$

式中:i 为单元编号;σ 为单元所受应力(MPa);f_i 为单元强度(MPa);不同类型的单元具有不同的 f(MPa)。

最大损伤比例因子记为 $\beta_{\max}$,假设体系在每个求解步中均为弹性,则每一个求解步对应的真实开裂位移为 $1/\beta_{\max}$,开裂荷载 F_j 通过下式计算:

$$F_j=\frac{F_v}{\beta_{\max}} \tag{2}$$

式中:F_v 表示单位虚位移作用下的结构力学响应。

1.2 网格划分

本工作基于文献[38]提出的随机三角形网格法构建格构系统,具体步骤如下:首先,构建正方形网格系统,单位网格边长为 1 mm,如图 1 所示。在正方形中定义子正方形单元用于控制节点生成的范围。基于 Delaunay 三角网格法,连接距离最近的三个节点,建立网格。通过调整子正方形的边长控制格构体系的随机程度,定义子正方形与正方形的边长之比为自由度。自由度在影响模拟裂缝走向[12]的同时,也决定了格构系统的泊松比。当自由度为 0.5 时,泊松比约为 0.2,与混凝土材料相近[36],因此本工作中网格的自由度采用 0.5。

由于网格中单元长细比较小,本工作采用铁木辛柯梁单元考虑剪切变形的影响。通过 Monte-Carlo 法产生随机骨料模型,将骨料模型映射到格构网格中,根据网格节点与骨料的相对位置定义三类单元类型,即骨料单元、砂浆单元和界面单元,如图 1 所示。当单元连接的两个节点均位于骨料内部时,定义为骨料单元;当单元连接的两个节点均位于砂浆内部时,定义为砂浆单元;当单元连接的两个节点分别位于砂浆和骨料内部时,定义为界面单元。

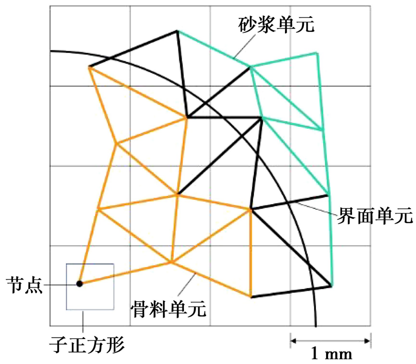

图 1 单元类型定义

Fig.1 Element type definition

1.3 单元本构

经典格构模型单元采用线弹性本构关系(见图 2a)。当单元应力水平达到极限强度时,认为单元失效,将其从体系中移除,表征裂缝产生。为了考虑砂浆基体的塑性变形能力,

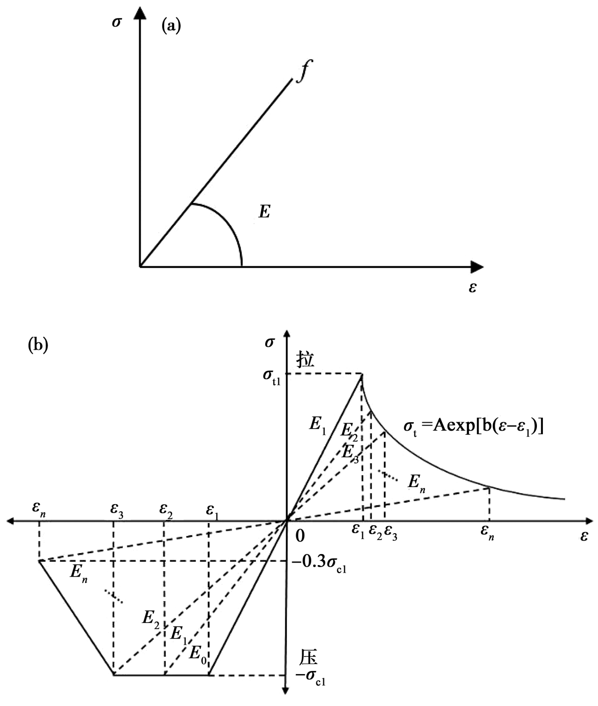

图 2 格构单元本构关系:(a)线弹性本构关系;(b)弹塑性本构关系(拉为正,压为负)

Fig.2 Constitutive relation of lattice element: (a) linear elastic constitutive relation; (b) elastic-plastic constitutive relation (The tension is positive, and the compression is negative)

本工作采用分段步进式方法描述图 2b 所示的砂浆弹塑性本构关系。该方法通过多段割线表征单元的塑性损伤，通过弹性模量和强度等指标的退化来反映单元的损伤或破坏。当单元应力在当前分析步中超过某一阈值之后，判定单元状态。若单元本构在最后一条割线位置处，即判定单元失效，产生裂缝；否则单元本构退化为下一段割线所代表的弹性模量和强度。由于骨料和界面过渡区塑性应变较小，为简化模型，本模型骨料和界面过渡区单元采用线弹性本构关系。

1.4 破坏准则

模型中的单元应力计算只考虑轴向作用力 N(N)和弯矩 M_X、M_Y(N · mm)，计算公式如下[36,39]：

$$\sigma=\alpha_{\mathrm{N}}\frac{N}{A}+\alpha_M\frac{\max(M_X,M_Y)}{W} \tag{3}$$

式中：A 为格构单元截面面积(mm^2)；W 为截面惯性矩(mm^4)；α_{N} 为轴力系数；α_{M} 为弯矩系数。其中 α_{N} 和 α_{M} 分别代表轴力和弯矩的作用效果，文献[40]研究了其对模拟结果的影响，当 $\alpha_{\mathrm{N}}=1$、$\alpha_{\mathrm{M}}=0.05$ 时，该模型可较好地模拟混凝土材料的断裂行为[41]，因此本工作采用相同取值。

1.5 模型实现

上述建立的混凝土细观格构模型可以用于计算混凝土在不同边界条件下的力学响应，模型实现流程如图 3 所示。其中 E_j 和 σ_j 分别为单元在当前求解步骤对应的弹性模量和强度，E_n 和 σ_n 分别为单元本构最后一段割线所对应的弹性模量和强度。

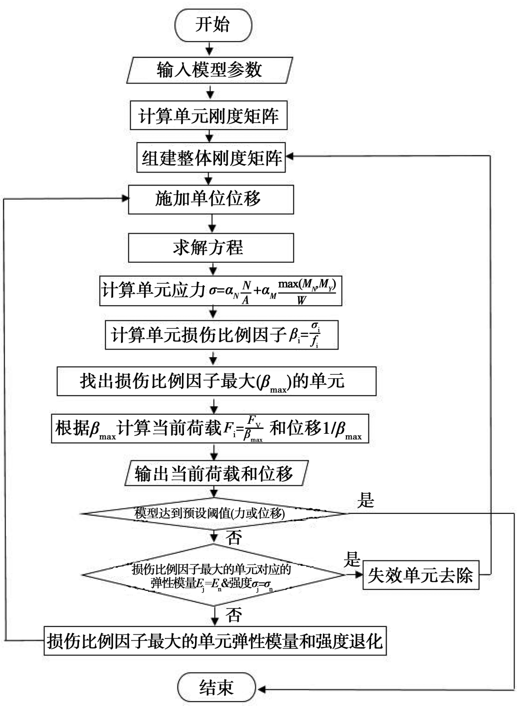

图 3 模型算法流程图

Fig.3 Flow chart of model algorithm

2 数值算例

2.1 单轴拉伸

2.1.1 模型校正

本工作采用文献[42]中 C50 混凝土 C 型试件(见图 4)单轴拉伸试验的荷载-位移响应对模型进行校正。选取试件的几何尺寸见表 1，其中试件Ⅱ用以模型校正，试件Ⅰ和Ⅲ用于模型验证。为简便计算，采用圆形骨料，其面积比为 22.8%，与文献[42]一致。模型边界条件为底部各节点施加法向约束，顶部施加法向荷载。

表 1 C 型单轴拉伸试件尺寸[42]

Table 1 Size of type C uniaxial tension specimens[42]

试件	D/mm	r/mm
Ⅰ	50	75
Ⅱ	100	150
Ⅲ	200	300

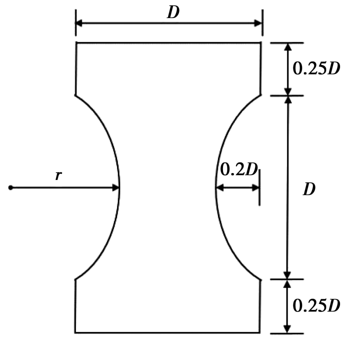

图 4 C 型单轴拉伸试件

Fig.4 Type C uniaxial tensile specimen

砂浆单元的本构关系通过 15 段割线进行表征(见图 5)，其弹性段的弹性模量和强度分别为 38.5 GPa 和 6 MPa，软化段曲线表达式为 $\sigma=7.02e^{-0.336\varepsilon}$。由于界面过渡区强度低于砂浆，假设界面单元强度为砂浆单元的 0.6 倍，通过试错法发现，利用表 2 所示参数模拟的荷载-位移响应与试验值吻合较好(见图 6)。其中，骨料的强度最高，在计算中不发生破坏，因此对计算结果不存在影响。需要说明的是，在单轴拉伸边界条件下，裂缝均由拉应力造成，不发生受压破坏，因此不需要考虑单元在受压状态下的本构关系。

表 2 单元弹性段输入参数

Table 2 Input parameters of lattice element at elastic stage

单元类型	E/GPa	f_t/MPa	泊松比
砂浆	38.5	6	0.3
骨料	70	10	0.3
界面过渡区	38.5	3.8	0.3

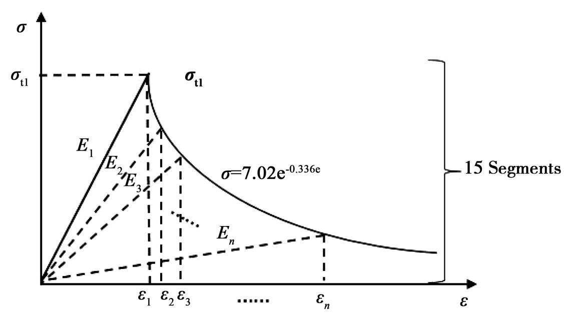

图 5 砂浆单元受拉本构关系

Fig.5 Constitutive relation of mortar element under tension

图 6 对比了两种单元本构关系对模型计算结果的影响，由图可知两种单元本构关系均能较好地反映荷载-位移曲线的上升阶段。对于软化段，当采用线弹性本构关系进行分析

时,获得的曲线脆性过大;采用分段步进式方法的弹塑性本构关系可以精确模拟混凝土的软化行为,解决经典格构模型理论难以精确模拟混凝土荷载-位移曲线的问题。

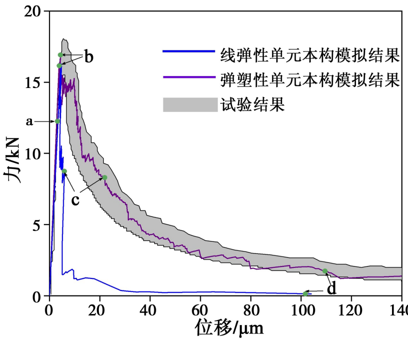

图 6　采用线弹性本构关系和弹塑性本构关系模拟结果对比(试件 Ⅱ)(电子版为彩图)

Fig.6　Comparison of simulated results between models using linear elastic and elastic-plastic constitutive relation (specimen Ⅱ)

图 7 为基于线弹性格构模型理论模拟的试件Ⅱ在单轴拉伸条件下裂缝的发展过程。图 7a 为荷载-位移曲线上升段 0.75 倍峰值荷载(a 点)对应的裂缝开展状态,该阶段裂缝分布于界面过渡区,处于线弹性状态[43];达到峰值荷载点时(b 点),界面过渡区与砂浆基体中微裂缝开始合并贯通,形成局部开裂带(见图 7);随后裂缝稳定发展(见图 7c),形成主裂缝,贯穿试件(见图 7d),造成材料失效。图 8 为通过单元弹塑性本构获得的试件Ⅱ的裂缝开展过程,不同于线弹性本构模型,弹塑性模型获得的最终断裂形态包含两条主裂缝,这也在一定程度上增加了软化段的延性。

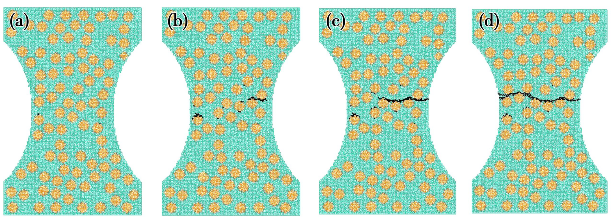

图 7　混凝土线弹性本构关系对应裂缝发展(试件Ⅱ):(a) $F=0.75f_t$;(b) $F=f_t$;(c) $F=0.5f_t$;(d) $F=0.15f_t$

Fig.7　Fracture development of concrete with the linear elastic constitutive relation (specimen Ⅱ): (a) $F=0.75f_t$; (b) $F=f_t$; (c) $F=0.5f_t$; (d) $F=0.15f_t$

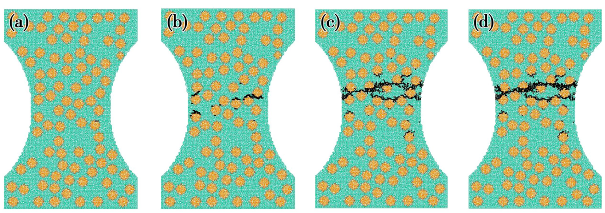

图 8　混凝土弹塑性本构关系对应裂缝发展(试件Ⅱ):(a) $F=0.75f_t$;(b) $F=f_t$;(c) $F=0.5f_t$;(d) $F=0.05f_t$

Fig.8　Fracture development of concrete with the elastic-plastic constitutive relation (specimen Ⅱ): (a) $F=0.75f_t$;(b) $F=f_t$;(c) $F=0.5f_t$;(d) $F=0.05f_t$

2.1.2　模型验证

为了验证模型,保持模型单元本构参数不变,模拟具有不同尺寸的试件Ⅰ和试件Ⅲ的受拉开裂行为。图 9 对比了荷载-位移曲线的模拟与试验结果。由图 9 可知,在输入参数保持不变的情况下,模型可以很好地预测不同尺寸试件的荷载-位移曲线。图 10 为试件失效时的裂缝分布情况,可以发现试件Ⅰ和试件Ⅲ在破坏时不仅形成一条裂缝贯穿试件,同时存在局部的分散裂缝,与试验结果较好吻合[44]。

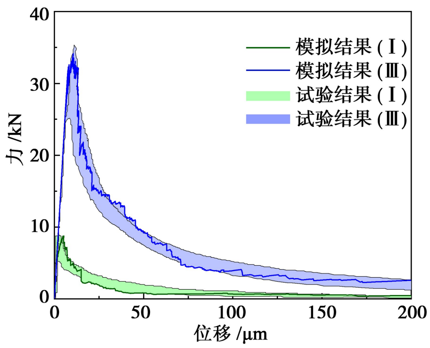

图 9　混凝土试件Ⅰ和Ⅲ模拟结果和试验结果对比(电子版为彩图)

Fig.9　Comparison between simulated results and experimental results of concrete specimen Ⅰ and Ⅲ

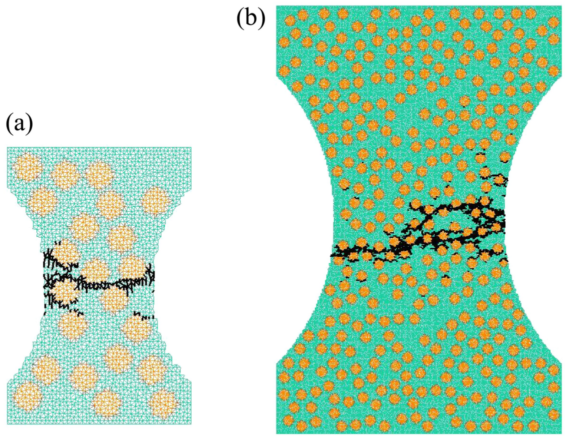

图 10　混凝土单轴拉伸破坏形态:(a) 试件 Ⅰ;(b) 试件 Ⅲ

Fig.10　Uniaxial tensile failure mode of concrete: (a) specimen Ⅰ; (b) specimen Ⅲ

2.2　单轴压缩

2.2.1　模型校正

Van Mier 等[45]进行了 C50 混凝土单轴压缩试验,测试了试件长细比和受力端横向约束程度(高摩擦和低摩擦)对测试结果的影响。表 3 为选取试件的几何尺寸,其中正方体试件 A1 用于模型参数校正,试件 A2、B1 和 B2 用于对模型的验证。模型中粗骨料的面积比为 22.8%,与文献[45]中保持一致。边界条件是高摩擦的数值模型是通过限制底部和顶部端面各节点横向位移实现。而边界条件为低摩擦的数值模型,只在顶部施加法向荷载。

表 3　单轴压缩试件几何尺寸和边界条件[45]

Table 3　Size and boundary conditions of specimens for uniaxial compression[45]

试件编号	尺寸/mm	长细比	边界条件
A1	100×100×100	1	高摩擦
A2	100×100×100	1	低摩擦
B1	100×100×200	2	高摩擦
B2	100×100×200	2	低摩擦

因为本工作中单轴拉伸和压缩试验所用混凝土配合比相近,强度标号相同,所以保持单元在受拉状态下的本构关系不变,通过试错法确定单元受压状态下的本构关系参数。图 11 为砂浆单元的本构关系,其中$f_{c1}=90$ MPa,$\varepsilon_1=0.002\ 3$,$\varepsilon_2=0.095\ 6$,下降段斜率为$-0.2E_0$。三类单元弹性段本构参数如表 4 所示。如图 12 所示,采用上述本构参数可以较好地模拟混凝土受压破坏的荷载-位移曲线。

表 4 单元弹性段输入参数
Table 4 Input parameters in elastic stage of lattice model

单元类型	E/GPa	f_c/MPa	泊松比
砂浆	38.5	90	0.3
骨料	70	200	0.3
界面过渡区	38.5	45.2	0.3

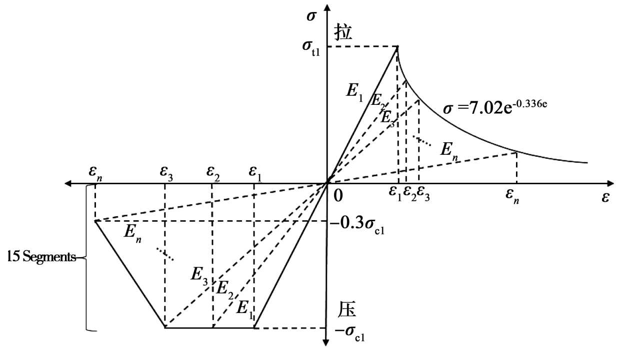

图 11 砂浆单元受压本构关系
Fig.11 Constitutive relation of mortar element under compression

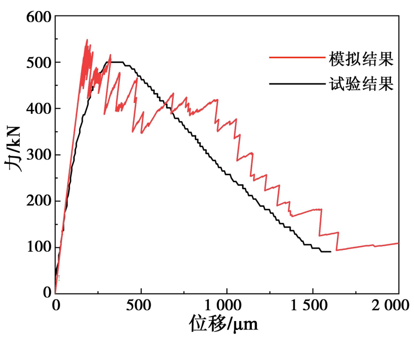

图 12 模拟结果与试验结果的对比(A1)
Fig. 12 Comparison between simulated results and experimental results (A1)

图 13 是试件 A1 单轴压缩的裂缝发展图,当试件荷载加载到极限荷载的 75%时,裂缝多集中于界面薄弱位置。到达极限荷载时,砂浆基体开始发生破坏,微裂纹在个别骨料周围聚集;之后微裂缝逐渐连通,形成贯通裂缝,荷载位移曲线开始进入软化段,由于试件顶端和底端处于双向受压状态,不存在开裂现象。该裂缝发展规律符合试验观察规律[45]。

2.2.2 模型验证

保持模型单元本构输入参数不变,通过模拟不同边界条件和不同长细比试件的单轴压缩破坏对模型进行验证。

图 14 为模拟和试验的力-位移曲线对比,由图可知试验与模拟结果相近。对于高摩擦边界条件,长细比对混凝土的极限强度和软化段均有显著的影响,主要表现为长细比增大导致极限强度和软化段延性均有降低;对于低摩擦边界条件,长细比的增大对混凝土极限强度的影响较小, 但会导致

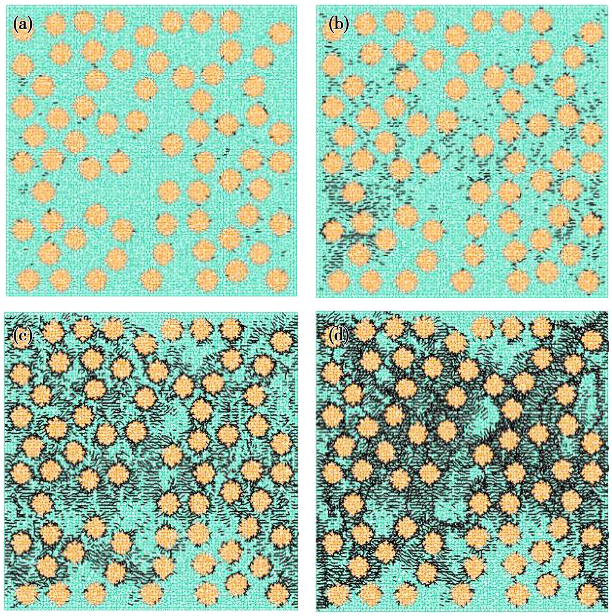

图 13 试件 A1 轴压模拟裂缝发展图:(a) $F=0.75f_c$;(b) $F=f_c$;(c) $F=0.5f_c$;(d) $F=0.15f_c$
Fig.13 Simulated crack development pattern of specimen A1 under uniaxial compression: (a) $F=0.75f_c$; (b) $F=f_c$; (c) $F=0.5f_c$; (d) $F=0.15f_c$

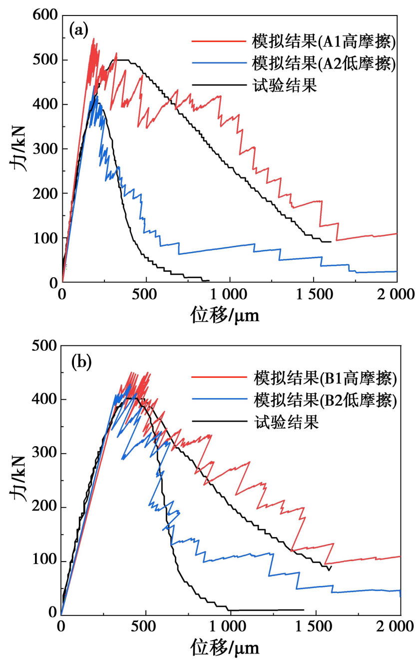

图 14 混凝土单轴压缩力-位移曲线模拟结果和试验结果的对比:(a)长细比为 1;(b)长细比为 2(电子版为彩图)
Fig.14 Comparison of simulated and experimental values of concrete under uniaxial compression with the (a) slenderness ratio of 1 and (b) slenderness ratio of 2

混凝土软化段延性提高。

如图 15 所示,边界横向约束程度不同导致试件的断裂形态产生较大的差异。对于低摩擦边界条件,试件端部产生大量微裂纹,局部贯通裂纹与所施加的荷载方向平行。对于高摩擦边界条件,试件中间位置产生倾斜的贯通裂缝,试件的顶端和底端由于横向约束的限制,出现双向受压区域,几乎不产生微裂缝。上述现象与试验观察相近[45],说明本研究提出的分段步进式弹塑性格构模型理论可以较为精确地模拟

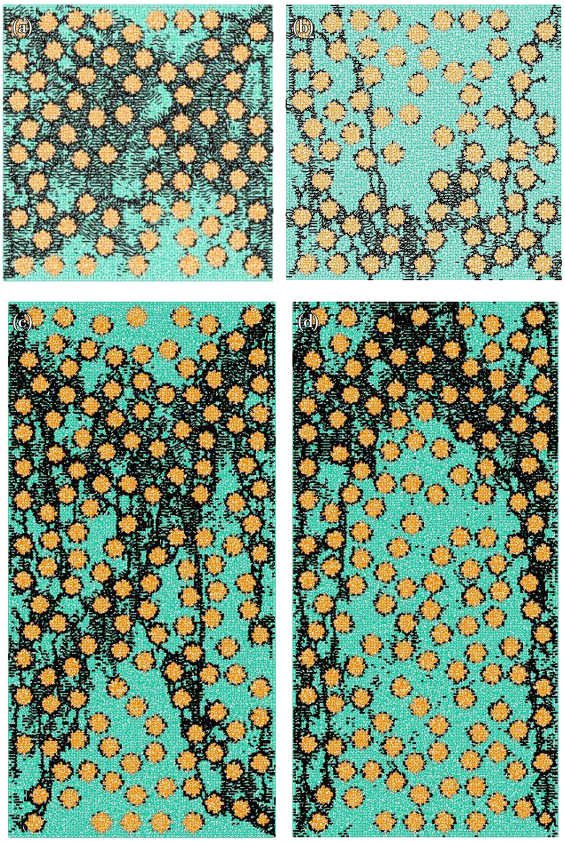

图 15 混凝土单轴压缩最终破坏形态:(a)试件 A1(高摩擦);(b)试件 A2(低摩擦);(c)试件 B1(高摩擦);(d)试件 B2(低摩擦)

Fig.15 The final failure mode of concrete under uniaxial compression: (a) specimen A1 (high friction); (b) specimen A2 (low friction); (c) specimen B1 (high friction); (d) specimen B2 (low friction)

混凝土单轴压缩的裂缝发展情况。

3 讨论

本工作的重点在于验证分段步进式方法是否能够模拟混凝土的软化段曲线和尺寸,以及受荷边界条件对应力-应变响应的影响。因此,研究中所用的单元弹塑性本构关系通过试错法获得,校验过程需要假设本构关系形状,进行重复试算。当采用三维模型或不同网格尺寸时,该单元本构关系不再适用。这是因为网格的分辨率代表单元所包含的材料体积,单元所包含材料的体积会随网格尺寸变大和所包含缺陷的增加而增加,进而使性能(弹性模量、强度)降低。

4 结论

(1)相比经典的弹性格构模型理论,分段步进式弹塑性格构模型理论可以有效解决前者预测荷载-位移曲线延性不足的问题,在细观尺度上精确模拟混凝土的非线性力学行为。

(2)分段步进式弹塑性格构模型理论可以有效模拟混凝土受拉破坏的尺寸效应、受压破坏时试件几何形状(长细比)及受力端横向约束程度(高摩擦和低摩擦)对力学响应的影响。

本工作侧重于对分段步进式弹塑性格构模型理论适用性的研究,未考虑细观尺度骨料形状、缺陷、模型分辨率及模型维度等方面的影响。同大多数细观模型一样,本工作中的本构关系仅适用于相同分辨率、骨料粒径及强度等级的混凝土模型,当混凝土或模型参数改变后需要重新进行校验,耗费大量计算资源。在未来的工作中,可以采用多尺度的模拟方法,通过微观模型确定细观本构输入参数,缩短细观模型的校验过程,使其具有真正的预测性和对试验的指导作用。

参考文献

1 Snozzi L, Caballero A, Molinari J F. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(11), 1130.
2 Zhou X Q, Hao H. *International Journal of Solids and Structures*, 2008, 45(17), 4648.
3 Li G, Xu Z H, Niu J G. *Materials Reports B:Reaearch Papers*, 2018, 32(7), 2412(in Chinese).
李革, 徐泽华, 牛建刚. *材料导报:研究篇*, 2018, 32(7), 2412.
4 Du X L, Jin L. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(2), 82(in Chinese).
杜修力, 金浏. *工程力学*, 2013, 30(2), 82.
5 Yang Z J, Huang Y J, Yao F, et al. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(8), 158(in Chinese).
杨贞军, 黄宇劼, 尧锋,等. *工程力学*, 2020, 37(8), 158.
6 Chen S, Wang Y, Ning C. *Materials Reports B:Reaearch Papers*, 2016, 30(6), 153.(in Chinese).
陈松, 王岩, 宁聪. *材料导报:研究篇*, 2016, 30(6), 153.
7 Mahmud G H, Yang Z J, Hassan A M T, et al. *Construction and Building Materials*, 2013, 48, 1027.
8 Sangha C M, Dhir R K. *Matériaux et Construction* 1972, 5, 361.
9 Huang L, Chen L X, Yan L B, et al. *Construction and Building Materials*, 2017, 154, 123.
10 Kumar S, Mukhopadhyay T, Waseem S A, et al. *Strength of Materials* 2016, 48, 592.
11 Jiang N D, Zhang H Z, Chang Z, et al. *Construction and Building Materials*, 2020, 263, 120153.
12 Schlangen E. *Engineering Fracture Mechanics*,1997, 57(2), 319.
13 Kwan A K H, Wang Z M, Chan H C. *Computers and Structures*, 1999, 70(5), 545.
14 Ragab A, Hansen W. *Materials Journal*, 1999, 96(3), 354.
15 Mohamed A R, Hansen W. *Cement and Concrete Composites*, 1999, 21(5-6), 349.
16 Cundall P A, Strack O D L. *Géotechnique*, 1979, 29(1), 47.
17 Wang Z M, Kwan A K H, Chan H C. *Computers and Structures*, 1999, 70(5), 533.
18 Liu G T, Wang Z M. *Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition)*, 1996(1), 84(in Chinese).
刘光廷,王宗敏. *清华大学学报(自然科学版)*, 1996(1), 84.
19 Zhu W C, Tang C A, Wang S Y. *Structural Engineering and Mechanics*, 2005, 19(5), 519.
20 Zhu W C, Tang C A, Teng J G, et al. *Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences)*, 2004, 26(1), 22(in Chinese).
朱万成, 唐春安, 滕锦光,等. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2004, 26(1), 22.
21 Hou D S, Zhang W, Ge Z, et al. *Construction and Building Materials*, 2021, 267, 120939.
22 Liu Z G, Chen J Y. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(7), 136(in Chinese).
刘智光, 陈健云. *工程力学*, 2012, 29(7), 136.
23 Ma H F, Chen H Q, Yang C L. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(7), 175(in Chinese).
马怀发, 陈厚群, 阳昌陆. *土木工程学报*, 2012, 45(7), 175.
24 Jin L, Li X L, Fan L L, et al. *Journal of Composites for Construction*, 2020, 24(5), 04020038.
25 Wu Z Y, Zhang J H, Yu H F, et al. *Composites Part B*, 2020, 200(108299).
26 Zhao X K, Dong Q, Chen X Q, et al. *Construction and Building Materials*, 2021, 272, 121669.
27 Hu Q Y, Chang X L, Feng C Q, et al. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2018, 52(8), 1596(in Chinese).
胡倩筠, 常晓林, 冯楚桥,等. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52

(8),1596.

28 Li D, Jin L, Du X L, et al. *China Civil Engineering Journal* 2020, 53(2), 48(in Chinese).
李冬, 金浏, 杜修力,等. *土木工程学报*, 2020, 53(2), 48.

29 Hrennikoff A. *Journal of Applied Mechanics*, 1941, 8(4), A169.

30 Schlangen E, Van Mier J G M. *Materials and Structures*, 1992, 25(9), 534.

31 Guo L P, Carpinteri A, Roncella R, et al. *Computational Materials Science*, 2009, 44(4), 1098.

32 Caduff D, Van Mier J G M. *Cement and Concrete Composites*, 2010,32(4), 281.

33 Xiao J Z, Du J T, Liu Q. *Journal of Building Materials*, 2009, 12(5), 511.
肖建庄, 杜江涛, 刘琼. *建筑材料学报*,2009, 12(5), 511.

34 Zhang H Z, Xu Y, Gan Y D, et al. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 110, 103567.

35 Van Mier J G M. *Concrete fracture: a multiscale approach*, CRC Press, US, 2012.

36 Chang Z, Zhang H Z, Schlangen E, et al. *Applied Sciences*, 2020, 10, 14.

37 Karavelić E, Nikolić M, Lbrahimbegovic A, et al. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 2017, 344, 1051.

38 Yip M, Mohle J, Bolander J E. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2005, 20(6), 393.

39 Zhang H Z, Šavija B, Xu Y D, et al. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 94, 264.

40 Lilliu G, Van Mier J G M. *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, 70(7), 927.

41 Lilliu G. *3D analysis of fracture processes in concrete*. Eburon Uitgeverij BV, The Netherlands, 2007.

42 Van Vliet M R, Van Mier J G M. *Engineering Fracture Mechanics*, 2000, 65(2), 165.

43 Shan Z, Fang L M, Gao J. *Concrete*, 2015(7), 11(in Chinese).
单智,方联民,高晶. *混凝土*, 2015(7), 11.

44 Van Mier J G M, Van Vliet M R. *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, 70(16), 2281.

45 Van Mier J G M, Shah S P, Arnaud M, et al. *Materials and Structures*, 1997, 30(4), 195.

(责任编辑 汪芸竹)

张洪智,山东大学教授,国家优青(海外),山东省泰山学者青年专家。2013 年获哈尔滨工业大学土木工程专业学士学位;2015 年获哈尔滨工业大学土木工程专业硕士学位;2019 年获代尔夫特理工大学结构工程博士学位。主要从事水泥基材料的多尺度测试和模拟等方面的科学研究。在 *Cement and Concrete Research*、*Cement and Concrete Composites* 等著名 SCI 期刊发表论文 60 余篇。

金祖权,通信作者,青岛理工大学教授、博士研究生导师,国家杰青,国家万人计划科技创新领军人才,山东省泰山学者特聘专家。英国伦敦大学学院(UCL)访问学者、兼职博士研究生导师。1999 年获河南理工大学硅酸盐工艺学士学位;2003 年获河南理工大学采矿专业硕士学位;2006 年获东南大学材料学博士学位。主要从事海洋钢筋混凝土腐蚀与防护研究。在《硅酸盐学报》、*Cement and Concrete Research* 等国内外著名刊物上发表 SCI 和 EI 检索论文近 100 篇。获得教育部自然科学一等奖、科技进步二等奖各 1 项。