

DOI:10.11918/202401084

早龄期三维随机骨料混凝土劈裂抗拉数值模拟

赵卫平¹, 刘英健¹, 何华飞², 韩雪刚², 姚洋²

(1. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083; 2. 北京市政建设集团有限责任公司, 北京 100048)

摘要: 为研究早龄期混凝土劈裂抗拉性能, 基于 ABAQUS 软件平台使用 Python 脚本语言进行二次开发, 建立粗骨料体积分数为 35% 的三维细观混凝土模型, 在砂浆单元界面和砂浆-骨料界面过渡区 (ITZ) 嵌入三维零厚度内聚力单元, 分别对 4、5、6 mm 3 种网格尺寸以及不同龄期的混凝土圆柱体进行劈裂抗拉数值模拟。结果表明: 三维随机多面体骨料细观混凝土模型与内聚力单元相结合适用于早龄期混凝土圆柱体劈裂抗拉的破坏模拟, 可以真实地展现出实际骨料的几何形状和空间分布, 并能预测混凝土的力学性能和破坏状态, 具有很高的可视化程度; 3 种不同网格尺寸对劈裂抗拉强度影响较小, 但对荷载-位移曲线下降段有一定的影响; 混凝土劈裂抗拉强度公式计算值、拉应力平均值和试验值之间的误差均在 1 d 时最大, 最大误差分别为 17.65% 和 16.18%, 在其余龄期的误差均小于 5%, 验证了模型的适用性和可靠性; 不同龄期模型的破坏过程以及最终破坏状态相似, 微裂缝在 ITZ 处萌生并发展, 局部区域混凝土出现压碎的现象, 最终形成贯穿混凝土圆柱体横截面的竖向主裂缝。

关键词: 早龄期混凝土; 参数化建模; 内聚力模型; 随机骨料

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)05-0114-13

3D numerical simulation on splitting tensile strength of early-age concrete with random aggregates

ZHAO Weiping¹, LIU Yingjian¹, HE Huafei², HAN Xuegang², YAO Yang²

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Beijing Municipal Construction Co., Ltd., Beijing 100048, China)

Abstract: In order to study the splitting tensile properties of early-age concrete, a 3D meso-concrete model with a 35% coarse aggregate volume content was established using Python scripting language for secondary development based on ABAQUS software platform. 3D zero-thickness cohesive elements were embedded in the mortar elements interface and the mortar-aggregate interface transition zone (ITZ). The splitting tensile strength of concrete cylinders with three mesh sizes of 4, 5 and 6 mm and different ages were simulated. The results show that the combination of 3D random polyhedral aggregates meso-concrete model and cohesive elements is suitable for the fracture simulation of early-age concrete cylinders, which can not only accurately show the geometric shape and spatial distribution of actual aggregates, but also predict the mechanical properties and failure state of concrete with a high degree of visualization. The three different mesh sizes have minimal influence on the splitting tensile strength, but they do have some influence on the descending section of load-displacement curves. The maximum error between the calculated value of the formula, the simulated average value and the test value is 17.65% and 16.18% at the first day, and the errors are less than 5% in other ages, which validates the applicability and reliability of the model. The failure processes and final failure states of models at different ages are similar. Microcracks initiate and propagate in the ITZ, and localized areas of concrete experience crushing, ultimately resulting in vertical main cracks that traverse the cross-section of the concrete cylinder.

Keywords: early-age concrete; parametric modeling; cohesive model; random aggregate

随着中国基建事业快速发展, 建筑主体结构的施工进度加快, 混凝土在早龄期会处于受荷状态, 若混凝土强度不满足设计要求, 就无法保证结构的自身安全^[1]。目前, 混凝土抗拉性能多为试验研究,

单轴拉伸试验是获取混凝土抗拉强度最直接的方法, 但操作过程中荷载偏心、试件形状不对称、材料分布不均匀等因素都会导致混凝土试件发生不对称变形, 进而影响试验结果的准确性^[2]。混凝土圆柱

收稿日期: 2024-01-26; 录用日期: 2024-03-18; 网络首发日期: 2024-04-26

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20240426.0953.002>

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目 (U22A20244)

作者简介: 赵卫平 (1981—), 男, 副教授, 博士生导师

通信作者: 赵卫平, zhaowp@cumtb.edu.cn

体劈裂抗拉试验方法简单、操作方便并且结果与单轴拉伸强度较为接近,被广泛用于测试混凝土的抗拉强度^[3-5]。实际工程中,混凝土模板拆除、高层建筑爬架提升、大体积混凝土水化产生温度应力和桥梁工程中的预应力张拉均需要考虑早龄期混凝土的抗拉性能,因此,通过数值模拟的方法研究早龄期混凝土的抗拉力学性能对于建筑结构安全具有重要意义^[6]。

早龄期混凝土中砂浆和的砂浆-骨料界面过渡区(interface transition zone, ITZ)材料性能随着龄期在不断变化,进而直接影响混凝土的宏观力学性能,通过对细观混凝土的研究可以更深入地揭示混凝土损伤破坏的机制,更准确地预测评估早龄期混凝土的宏观力学性能^[7]。1985年, Wittmann首次将“细观混凝土”这一概念引入混凝土力学性能研究中,混凝土在细观层次上被视为由骨料、砂浆和ITZ组成的非均质材料,生成精确的几何形状是发展细观模型的重要挑战^[8]。目前,细观混凝土模型主要由数字图像法和参数化建模两种方法生成。数字图像法虽可以准确地提供材料的几何形状和实际位置,但相关设备十分昂贵,模型生成耗时较长,计算效率较低,操作流程相当复杂^[9-10]。参数化建模利用参数化语言描绘细观结构的几何形状,包括间接法参数化建模和直接法参数化建模两种方法。间接法参数化建模将不同材料参数的空间变量随机映射到有限元网格或将随机分布的网格单元作为砂浆和骨料^[11-13]。尽管间接法参数化建模方法简单,并且可以考虑到混凝土材料的非均质性,但是此方法假设每一个网格单元直到脆性破坏为止都表现出线弹性行为^[14-15]。在直接法参数化建模中,可以直接生成所需的形状尺寸、体积分数和空间分布的骨料^[16-17]。混凝土中骨料、砂浆和ITZ之间的力学性能存在显著差异,在外部荷载作用下会产生局部应力集中现象,当应力超过材料强度时,混凝土形成微裂缝,微裂缝逐渐扩展并相互连接,最终形成宏观裂缝。目前,大多数学者均采用形状不规则的三维多面体来描述天然粗骨料的外形,可以更真实地模拟裂缝的产生和发展过程^[18-20]。为实现混凝土裂缝发展的过程分析, Hillerborg等^[21]提出了内聚力模型来表征材料的断裂行为,为材料非线性断裂力学开辟了新思路。由于存在内聚力区域,裂缝尖端将会保持闭合趋势,这很好地解决了线弹性断裂力学中裂缝尖端应力无穷大的问题,内聚力模型已经发展成为混凝土较为稳健的断裂模型^[22-23]。

目前混凝土数值模拟常停留在宏观和二维细观层面,罕有三维细观混凝土数值模拟的报道,三维骨

料模型相较于二维骨料模型可以更真实地展现出实际骨料的几何形状和空间分布,准确地模拟预测混凝土的力学性能和破坏状态,具有更高的真实性、准确性和可视化程度。本文基于ABAQUS软件平台使用Python脚本语言进行二次开发建立三维随机多面体骨料细观混凝土模型,在砂浆单元界面和ITZ嵌入三维零厚度内聚力单元,赋予不同龄期的材料参数,将细观混凝土模型与内聚力单元相结合,对早龄期混凝土圆柱体进行劈裂抗拉数值模拟,为细观混凝土建模提供技术支持,为实际工程的早龄期混凝土设计施工提供参考。

1 有限元建模

1.1 随机多面体骨料细观混凝土模型

在细观混凝土模型中,骨料的几何形状和空间分布直接影响混凝土的相关力学性能,并对裂缝的发展路径产生一定的影响,因此,骨料的生成和投放过程是影响数值模拟分析结果的重要环节。为了使数值模拟中的骨料更加接近于真实骨料形态,进而更好地模拟出混凝土模型的破坏形态,基于ABAQUS软件平台使用Python脚本语言通过二次开发建立了三维随机多面体骨料细观混凝土模型。

在三维球坐标系中可以通过 r 、 θ 、 φ 3个参数确定空间中任意一点的位置。取 r 为骨料的半径,在天顶角 θ 和方位角 φ 方向每间隔 45° 确定一个节点,共可确定26个节点。图1为骨料模型的初始节点示意,节点1和节点26分别为上下两顶点,节点2~9、10~17、18~25分别为同一圆形平面的节点。将节点1和节点2~9连接形成8个三角形封闭面,节点2~9和节点10~17连接形成16个三角形封闭面,节点10~17和节点18~25连接形成16个三角形封闭面,将节点18~25和节点26连接形成8个三角形封闭面,最终组合形成一个骨料模型。

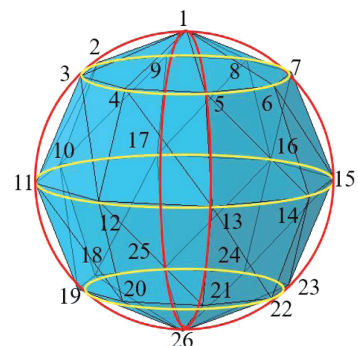


图1 骨料模型初始节点

Fig. 1 Initial nodes of aggregate model

设骨料的初始三参数分别为 r_0 、 θ_0 、 φ_0 ,将骨料的节点沿径向、天顶角和方位角进行随机波动,骨料

最终节点的三参数 r_n, θ_n, φ_n 可以由随机函数得到, 表达式为

$$\begin{cases} r_n = r_0 + r_r \cdot \text{random}(-1, 1) & r_r \in (-r_0, r_0) \\ \theta_n = \theta_0 + \theta_r \cdot \text{random}(-1, 1) & \theta_r \in (-22.5^\circ, 22.5^\circ) \\ \varphi_n = \varphi_0 + \varphi_r \cdot \text{random}(-1, 1) & \varphi_r \in (-22.5^\circ, 22.5^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\text{random}(-1, 1)$ 为在 $(-1, 1)$ 之间随机生成的一个数字。节点的波动范围越小, 所形成的骨料越接近于球体; 节点的波动范围越大, 所形成的骨料越不规则。骨料粒径的波动范围为 $0.4r_0$, 即 r_r 取 $0.2r_0$ 时, 天顶角和方位角的波动范围为 24° , 即 θ_r 与 φ_r 取 12° 时, 可以获得与天然骨料形状相似的随机多面体骨料^[24]。

图 2 为坐标系转换示意, 利用转换公式将最终节点由球坐标系转换为笛卡尔坐标系, 骨料最终节点坐标的转换公式为

$$\begin{cases} x = r_n \sin \theta_n \cos \varphi_n \\ y = r_n \sin \theta_n \sin \varphi_n \\ z = r_n \cos \theta_n \end{cases} \quad (2)$$

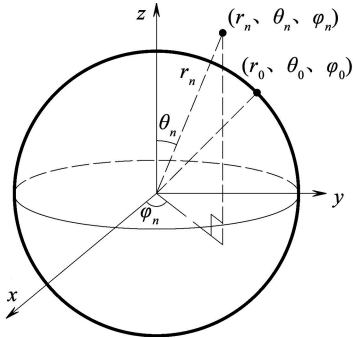


图 2 坐标系转换

Fig. 2 Coordinate system transformation

将 26 个波动后的节点按图 1 所示方式连接组合形成单个三维随机多面体骨料, 图 3 为节点随机波动后生成的三维随机多面体骨料模型样例。

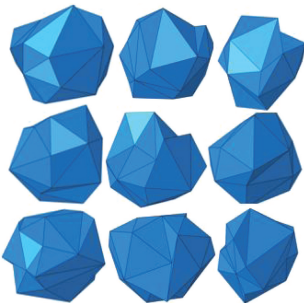


图 3 三维随机多面体骨料模型样例

Fig. 3 Samples of 3D random polyhedral aggregate model

Fuller 级配中骨料粒径级配表达式为^[25]

$$P(d) = \frac{d^n}{d_{\max}^n}, d \in [0, d_{\max}] \quad (3)$$

式中: d 为骨料的粒径; d_{\max} 为骨料的粒径; $P(d)$ 为粒径小于 d 的骨料占有所有骨料的累计质量分数; n 为参数, 通常取 $0.3 \sim 0.7$, 当 n 取 0.5 时即满足 Fuller 级配。

混凝土圆柱体劈裂抗拉模型的尺寸为 $\phi 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ ^[26], 粗骨料总体积分数取 35% 。图 4 为 Fuller 级配下骨料数目与粒径的关系, 图中粒径为 1 mm 的骨料数目已超过 10^5 的量级, 由于式 (3) 中骨料的最小粒径为 0 mm , 会使得生成的骨料数目趋近于无穷大。

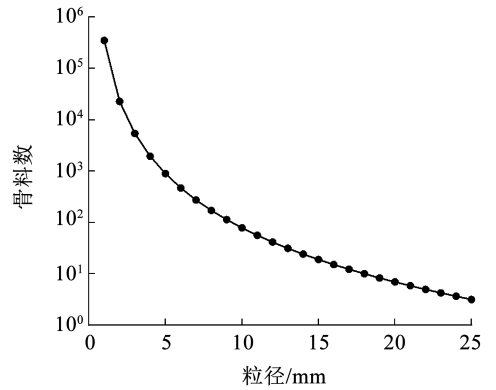


图 4 Fuller 级配下骨料数目与粒径的关系

Fig. 4 Relationship between aggregate number and particle size under Fuller gradation

为了提高生成骨料的效率, 并减少生成模型所需的时间, 可根据实际工程引入骨料的最小粒径 d_{\min} , 本文的研究对象为 $10 \sim 25 \text{ mm}$ 的粗骨料, 根据文献^[27]将骨料粒径级配的表达式改写为

$$P(d) = \frac{d^n - d_{\min}^n}{d_{\max}^n - d_{\min}^n}, d \in [d_{\min}, d_{\max}] \quad (4)$$

生成 $10 \sim 25 \text{ mm}$ 的三维随机多面体骨料, 表 1 为三维骨料粒径分布, $10 \sim 16 \text{ mm}$ 粗骨料的体积分数为 16.0% , $> 16 \sim 20 \text{ mm}$ 粗骨料的体积分数为 8.9% , $> 20 \sim 25 \text{ mm}$ 粗骨料的体积分数为 10.1% , 符合混凝土粗骨料连续级配的要求^[28]。

表 1 骨料粒径分布

筛孔尺寸/mm	累计通过率/%	累计体积分数/%
10	0	0
16	45.6	16.0
20	71.3	24.9
25	100.0	35.0

图 5 为三维随机多面体骨料细观混凝土模型生成算法, 通过 Python 脚本语言二次开发实现。模型主要参数包括骨料个数、粒径范围、节点波动系数、预设骨料体积分数和混凝土模型尺寸。根据骨料粒

径分布随机生成每个骨料的初始粒径,根据预设的节点波动系数对各个节点进行随机波动,之后进行节点坐标系转换,最终组合形成随机多面体骨料 Part- n 。将生成的骨料按照编号顺序依次随机投放到指定空间区域内,若投放的骨料与之前投放的骨料以及模型边界相交重叠,则该骨料投放失败,并重新投放;若投放的骨料与之前投放的骨料以及模型边界不相交重叠,则该骨料投放成功并更新模型数据。当累计随机多面体骨料的体积分数大于预设骨料体积分数时完成骨料投放,最后,使用布尔运算切分功能形成砂浆和骨料部件,图6为混凝土圆柱体模型的砂浆和粗骨料两个部件。

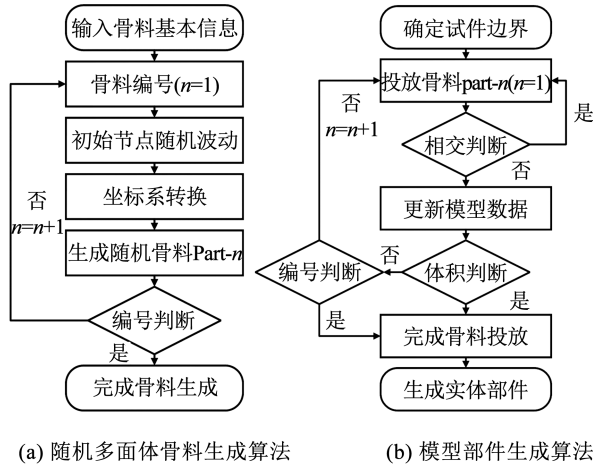


图5 三维随机多面体骨料细观混凝土模型算法

Fig. 5 Algorithm of 3D random polyhedral aggregates meso-concrete model

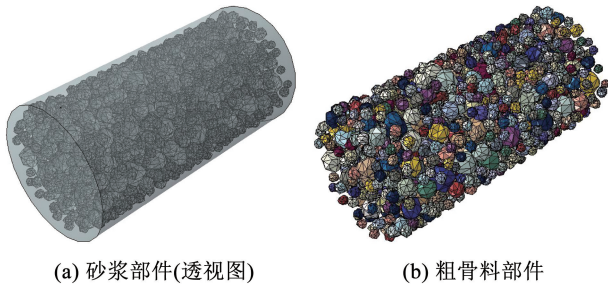


图6 混凝土圆柱体模型

Fig. 6 Concrete cylinder model

1.2 内聚力模型

在相邻的实体单元之间嵌入内聚力单元,可以实现相邻单元之间的破坏分离。图7为线性损伤牵引分离法则,图中 t_{\max} 为满足损伤起始准则时的最大应力; δ_0 为满足损伤起始准则时的有效位移; δ_{\max} 为有效位移的最大值;断裂能 G 为折线与坐标轴所围成的面积。内聚力单元的本构关系分为损伤起始阶段和损伤演化阶段,在损伤起始阶段内聚力区域的单元开始受力,应力随着张开位移的增大而增大,当内聚力单元满足损伤起始准则后进入损伤演化阶

段,应力随着张开位移的增大逐渐减小至零,当张开位移达到最大值时相邻单元彻底分离。

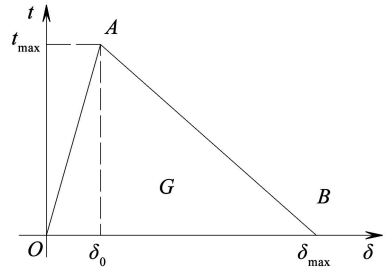


图7 牵引分离法则

Fig. 7 Traction separation rule

图8为内聚力单元的3种破坏模式,分别为张开型破坏、滑移型破坏和撕裂型破坏, t_n 为法向应力, t_s 和 t_t 分别为两个不同方向的切向应力。

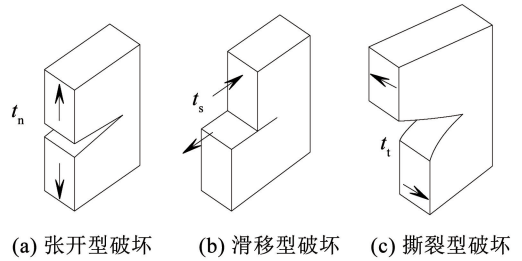


图8 内聚力单元的破坏模式

Fig. 8 Destruction modes of cohesive elements

内聚力单元损伤起始阶段的线弹性本构关系为^[29]

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{nn} & E_{ns} & E_{nt} \\ E_{sn} & E_{ss} & E_{st} \\ E_{tn} & E_{ts} & E_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = \mathbf{E}\boldsymbol{\delta} \quad (5)$$

式中: \mathbf{E} 为内聚力单元弹性矩阵; $\boldsymbol{\delta}$ 为内聚力单元的相对位移矢量,其由法向相对位移分量 δ_n 和两个不同方向的切向相对位移分量 δ_s, δ_t 组成。

混凝土的多向性和非均质性会导致混凝土圆柱体发生混合型断裂,产生由3种破坏模式组成的混合型裂缝,3种破坏模式采用的二次名义应力准则表达式^[29]为

$$\left(\frac{\langle t_n \rangle}{t_n^{\max}} \right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_s^{\max}} \right)^2 + \left(\frac{t_t}{t_t^{\max}} \right)^2 = 1 \quad (6)$$

式中 $\langle \rangle$ 为 Macaulay 括号, $\langle t_n \rangle$ 表示

$$\langle t_n \rangle = \begin{cases} t_n, t_n \geq 0 \\ 0, t_n < 0 \end{cases} \quad (7)$$

内聚力单元满足损伤起始准则后进入损伤演化阶段,采用 BK (Benzeggagh-Kenane) 准则对混合断裂能的损伤演化过程进行表征^[30]。该阶段引入刚度退化系数 k ,其表达式为

$$k = \frac{\delta(\delta_{\max} - \delta_0)}{\delta_{\max}(\delta - \delta_0)} \quad (8)$$

退化后的刚度 K 表达式为

$$K = K_0(1 - k) \quad (9)$$

式中 K_0 为材料初始刚度。

2 混凝土圆柱体劈裂抗拉模拟

2.1 混凝土圆柱体劈裂抗拉原理

均匀的压应力施加在混凝土圆柱体上下的圆弧

上,混凝土圆柱体在竖向直径方向上被压缩直至发生破坏。为了避免混凝土圆柱体在荷载作用下发生局部受压破坏的情况,混凝土圆柱体劈裂抗拉试验使用木质垫条^[27]。木质垫条长度为 320 mm,宽度为 20 mm,厚度为 4 mm,上下两块钢夹板定义为刚体。图 9(a)为整体模型,图 9(b)为模型正截面,混凝土圆柱体模型位于钢夹板中间位置,钢夹板和混凝土圆柱体之间使用木质垫条。图 9(c)为劈裂抗拉示意,图 9(d)为截面应力示意。

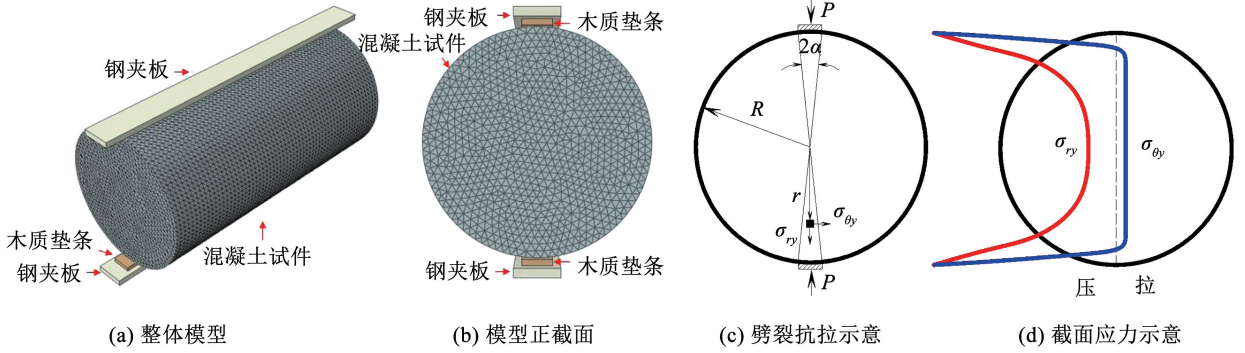


图 9 劈裂抗拉模型

Fig. 9 Splitting tensile model

在劈裂抗拉过程中,混凝土圆柱体截面沿竖向直径方向的应力表达式为^[31]

$$\begin{cases} \sigma_{\theta y} = + \frac{2p}{\pi} \left[\frac{(1 - r^2/R^2) \sin 2\alpha}{1 - 2r^2/R^2 \cos 2\alpha + r^4/R^4} - \tan^{-1} \left(\frac{1 + r^2/R^2}{1 - r^2/R^2} \right) \tan \alpha \right] \\ \sigma_{ry} = - \frac{2p}{\pi} \left[\frac{(1 - r^2/R^2) \sin 2\alpha}{1 - 2r^2/R^2 \cos 2\alpha + r^4/R^4} + \tan^{-1} \left(\frac{1 + r^2/R^2}{1 - r^2/R^2} \right) \tan \alpha \right] \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\sigma_{\theta y}$ 为混凝土圆柱体竖向直径上任一点处的切向应力, σ_{ry} 为混凝土圆柱体竖向直径上任一点处的径向应力, p 为作用在圆柱体两端圆弧上单位面积的荷载, 2α 为荷载圆弧部分对圆柱体中心的角度, r 为任一点处与圆心的径向距离, R 为圆柱体半径。

竖向的压力会产生垂直于直径方向的横向拉应力,对于圆柱体中心点切向应力表达式为

$$\sigma_{\theta y} = + \frac{2p}{\pi} (\sin 2\alpha - \alpha) \approx \frac{2p\alpha}{\pi} \quad (11)$$

图 9(c) 中施加在圆柱体上下的荷载表达式为

$$P = p\alpha D l \quad (12)$$

式中: D 为圆柱体直径, l 为圆柱体高度。

将式(12)代入式(11)可得圆柱体劈裂抗拉强度的表达式为

$$f_{ct} = \sigma_{\theta y} = \frac{2P}{\pi D l} \quad (13)$$

2.2 网格敏感性分析

混凝土圆柱体模型共有两种几何组成部分,即砂浆和粗骨料,为了更好地模拟混凝土的断裂过程,在每个砂浆实体单元间嵌入的零厚度内聚力单元为砂浆单元界面,在砂浆和粗骨料实体单元间嵌入的零厚度内聚力单元为 ITZ。砂浆和粗骨料均采用四面体实体单元 C3D4;砂浆单元界面和 ITZ 中均采用零厚度内聚力单元 COH3D6;文献[32]试验研究表明普通混凝土在劈裂抗拉过程中粗骨料未发生损伤和断裂,在粗骨料基体内部不嵌入内聚力单元;木质垫条没有发生破坏,将木质垫条视为线弹性材料,木质垫条和钢夹板均采用六面体实体单元 C3D8R。表 2 为材料参数,砂浆的材料参数取自文献[5,33],粗骨料的材料参数取自文献[34],ITZ 的材料参数取自文献[35],木质垫条的材料参数取自文献[36]。

对同一模型使用不同尺寸的网格进行划分,表 3 为采用不同网格尺寸模型的单元种类和数量统计,当网格尺寸分别为 4、5、6 mm 时模型的单元总数之比为 1.51:1:0.71,3 种不同网格尺寸模型的计算机时之比为 1.43:1:0.73,不同网格尺寸模型计算机时与模型的单元总数基本呈正比。

表2 材料参数

Tab.2 Material parameters

材料	弹性模量/ GPa	密度/ ($10^{-9}t \cdot mm^{-3}$)	泊松比	抗拉强度/ MPa	抗剪强度/ MPa	拉伸断裂能/ ($N \cdot mm^{-1}$)	剪切断裂能/ ($N \cdot mm^{-1}$)
钢夹板	210	7.8	0.30	—	—	—	—
木质垫条	8	0.8	0.30	—	—	—	—
粗骨料	70	2.8	0.16	—	—	—	—
砂浆	25	1.8	0.20	—	—	—	—
砂浆单元界面	—	1.8	—	2.70	9.450	0.040 50	1.012 50
ITZ	—	1.8	—	1.35	4.725	0.020 25	0.506 25

表3 不同网格尺寸模型的单元统计

Tab.3 Statistics of model elements in different mesh sizes

网格尺寸/mm	实体单元	内聚力单元	单元总数	计算机时/h
4	1 018 154	1 482 089	2 500 243	139
5	683 153	969 629	1 652 782	97
6	492 955	680 336	1 173 291	71

图10为不同网格尺寸模型的荷载-位移曲线,当模型的网格尺寸分别采用4、5、6 mm时,劈裂抗拉峰值荷载分别为244.59、241.52、237.43 kN,根据式(13)可得混凝土圆柱体的劈裂抗拉强度分别为3.46、3.42、3.36 MPa,劈裂抗拉强度的比值为1.01:1:0.98,不同网格尺寸模型的劈裂抗拉强度间的误差在2%以内。由于混凝土抗拉强度取决于薄弱位置的力学性能^[37],内聚力单元尺寸对同一模型内破坏截面的面积并无显著的影响,劈裂抗拉强度受4、5、6 mm 3种网格尺寸的影响不明显。应当指出,网格尺寸变大使得模型的内聚力单元数量减少,因此,网格尺寸对荷载下降段存在一定的影响,并且网格尺寸越大,荷载下降速度越快。

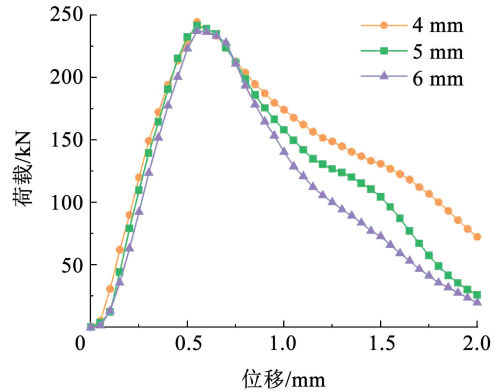


图10 不同网格尺寸的模型荷载-位移曲线

Fig.10 Load-displacement curves of models in different mesh sizes

将长度为300 mm的混凝土圆柱体模型等间距取7个截面,每个截面间隔50 mm,图11(a)为混凝土圆柱体模型截面示意,图11(b)~(h)为提取混凝土圆柱体模型7个不同位置截面处沿竖向直径方向的单元。

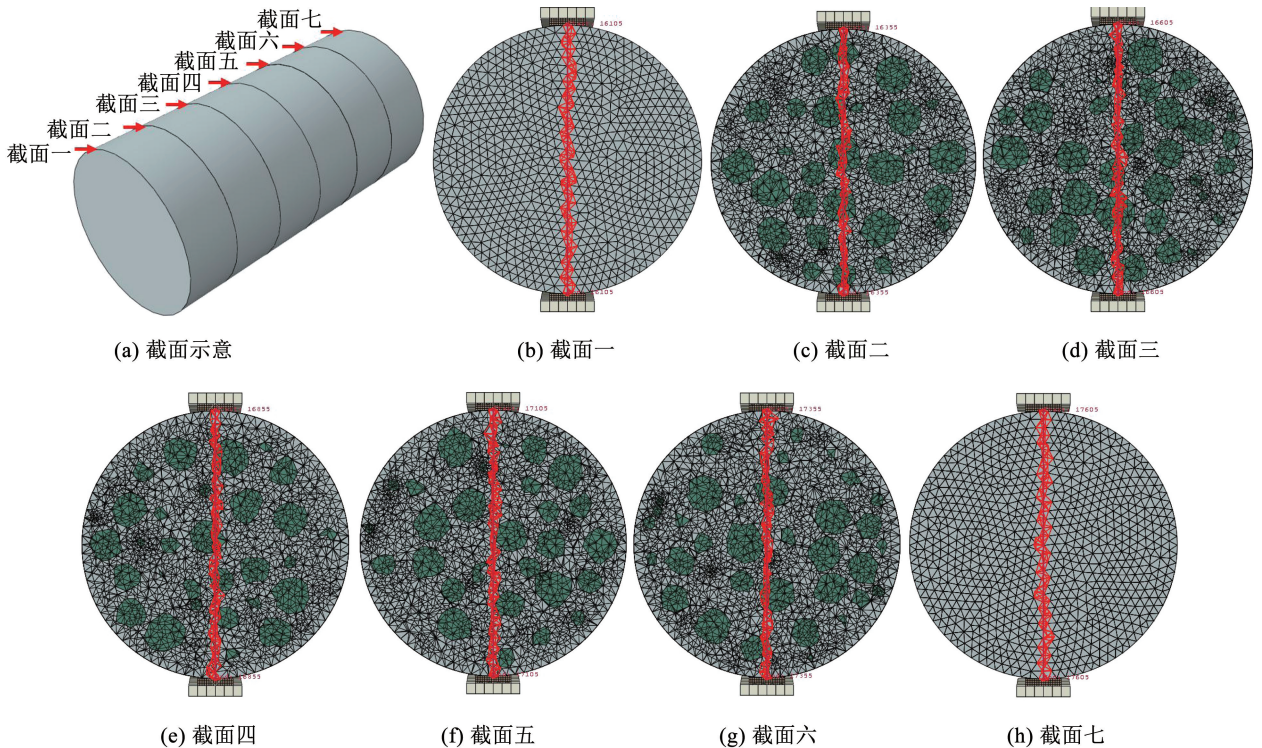


图11 提取混凝土圆柱体不同截面单元

Fig.11 Extract elements with different sections of concrete cylinder specimen

图 12 为不同网格尺寸模型达到劈裂抗拉峰值荷载时按照图 11 提取 7 个不同截面单元的应力分布曲线,并分别计算不同网格尺寸模型截面受拉区的

的平均拉应力,当模型网格尺寸分别采用 4、5、6 mm 时各截面红线上单元的拉应力平均值分别为 3.40、3.35、3.24 MPa,并在图 12 中用粗实线标注。

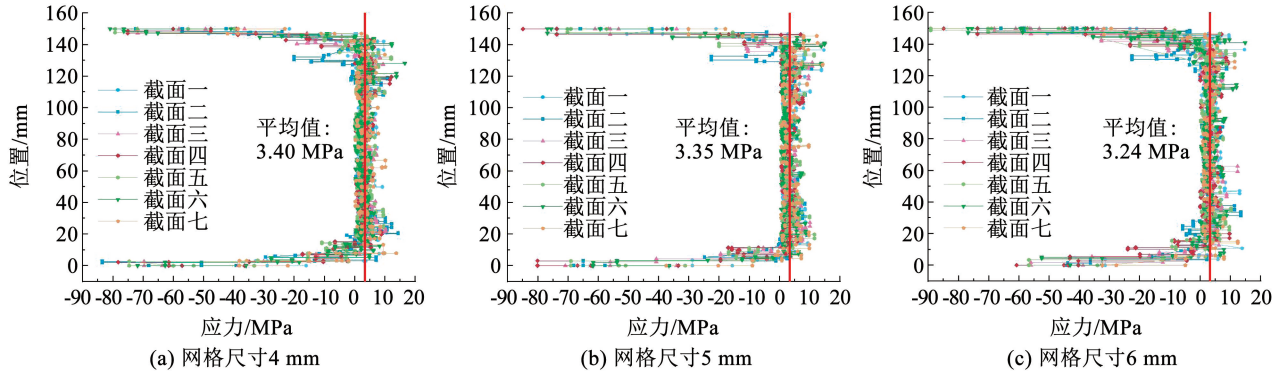


图 12 不同网格尺寸下混凝土圆柱体应力分布曲线

Fig. 12 Stress distribution curves of concrete cylinders at different mesh sizes

表 4 为不同网格尺寸混凝土圆柱体劈裂抗拉强度结果对比,随着模型网格尺寸的增大,式(13)劈裂抗拉强度计算值与模拟拉应力平均值之间的误差逐渐增大,模型的网格尺寸为 4、5 mm 时,两者之间的误差相差 0.32%,并未出现突增的情况;而当模型的网格尺寸为 6 mm 时,误差显著增加,相比模型网格尺寸为 5 mm 时误差增加了 1.52%。鉴于研究重点为混凝土圆柱体的劈裂抗拉强度,网格尺寸选取 5 mm 时,模型具有较高的计算精度和较快的计算效率,因此,采用 5 mm 的网格尺寸为不同龄期模型划分网格。

表 4 不同网格尺寸劈裂抗拉强度结果对比

Tab. 4 Comparison of splitting tensile strength results at different mesh sizes

网格尺寸/mm	式(13)劈裂抗拉强度 计算值/MPa	拉应力平均 值/MPa	误差/%
4	3.46	3.40	1.73
5	3.42	3.35	2.05
6	3.36	3.24	3.57

2.3 早龄期混凝土劈裂抗拉模拟

表 5 为不同龄期的材料参数^[5,33-35],分别建立龄期为 1、3、5、7、14、28 d 的混凝土圆柱体劈裂抗拉模型。

表 5 不同龄期的材料参数

Tab. 5 Material parameters at different ages

材料	弹性模量/ GPa	密度/ (10 ⁻⁹ t·mm ⁻³)	泊松比	抗拉强度/ MPa	抗剪强度/ MPa	拉伸断裂能/ (N·mm ⁻¹)	剪切断裂能/ (N·mm ⁻¹)
砂浆(龄期 1 d)	14.6	1.8	0.20	—	—	—	—
砂浆(龄期 3 d)	19.3	1.8	0.20	—	—	—	—
砂浆(龄期 5 d)	21.1	1.8	0.20	—	—	—	—
砂浆(龄期 7 d)	22.1	1.8	0.20	—	—	—	—
砂浆(龄期 14 d)	23.7	1.8	0.20	—	—	—	—
砂浆(龄期 28 d)	25.0	1.8	0.20	—	—	—	—
砂浆单元界面(龄期 1 d)	—	1.8	—	0.50	1.750	0.007 50	0.187 50
砂浆单元界面(龄期 3 d)	—	1.8	—	1.20	4.200	0.018 00	0.450 00
砂浆单元界面(龄期 5 d)	—	1.8	—	1.50	5.250	0.022 50	0.562 50
砂浆单元界面(龄期 7 d)	—	1.8	—	1.80	6.300	0.027 00	0.675 00
砂浆单元界面(龄期 14 d)	—	1.8	—	2.30	8.050	0.034 50	0.862 50
砂浆单元界面(龄期 28 d)	—	1.8	—	2.70	9.450	0.040 50	1.012 50
ITZ(龄期 1 d)	—	1.8	—	0.25	0.875	0.003 75	0.093 75
ITZ(龄期 3 d)	—	1.8	—	0.60	2.100	0.009 00	0.225 00
ITZ(龄期 5 d)	—	1.8	—	0.75	2.625	0.011 25	0.281 25
ITZ(龄期 7 d)	—	1.8	—	0.90	3.150	0.013 50	0.337 50
ITZ(龄期 14 d)	—	1.8	—	1.15	4.025	0.017 25	0.431 25
ITZ(龄期 28 d)	—	1.8	—	1.35	4.725	0.020 25	0.506 25

图 13 为不同龄期模型的荷载 - 位移曲线, 当龄期为 1、3、5、7、14、28 d 时, 劈裂抗拉峰值荷载分别为 56.19、119.97、143.96、167.76、206.04、241.52 kN, 根据式 (13) 可得不同龄期模型的劈裂抗拉强度分别为 0.80、1.70、2.04、2.37、2.92、3.42 MPa。

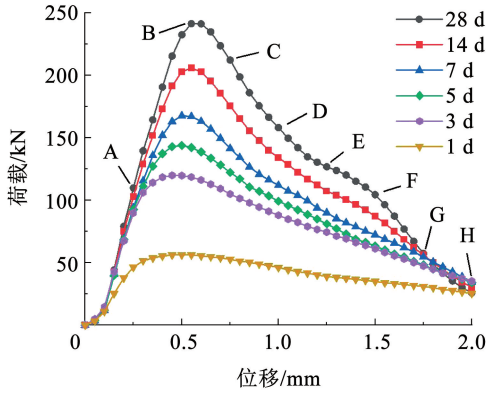


图 13 不同龄期模型荷载 - 位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves of models at different ages

图 14 为 28 d 龄期模型截面二在图 13 中 A ~ H 时刻的破坏过程。在 B 时刻之前, 由于没有达到劈裂抗拉的峰值荷载, 混凝土圆柱体的截面没有出现裂缝; 在 B ~ D 时刻, 由于 ITZ 是混凝土材料最为薄弱的区域, 混凝土截面从 ITZ 处萌发多条微小裂缝, 随着微裂缝宽度逐渐变大, 在局部区域形成主裂缝, 并向截面上下两端延伸发展; 在 E ~ H 时刻, 形成了贯穿截面的竖向主裂缝, 主裂缝宽度迅速扩张, 截面上下部分区域的混凝土被压碎, 试件完全破坏。

图 15 为当不同龄期模型达到劈裂抗拉峰值荷载时模型正截面 S11 应力云图。混凝土龄期越长, 截面的拉压应力越大, 模型正截面的 S11 应力云图越能清晰直观地表现出模型的拉压受力情况。以 28 d 龄期模型为例, 此时混凝土圆柱体沿竖向直径方向上部和下部的很小部分区域受压, 中间大部分区域受拉, 与圆柱体劈裂抗拉试件截面的拉应力分布吻合^[38]。

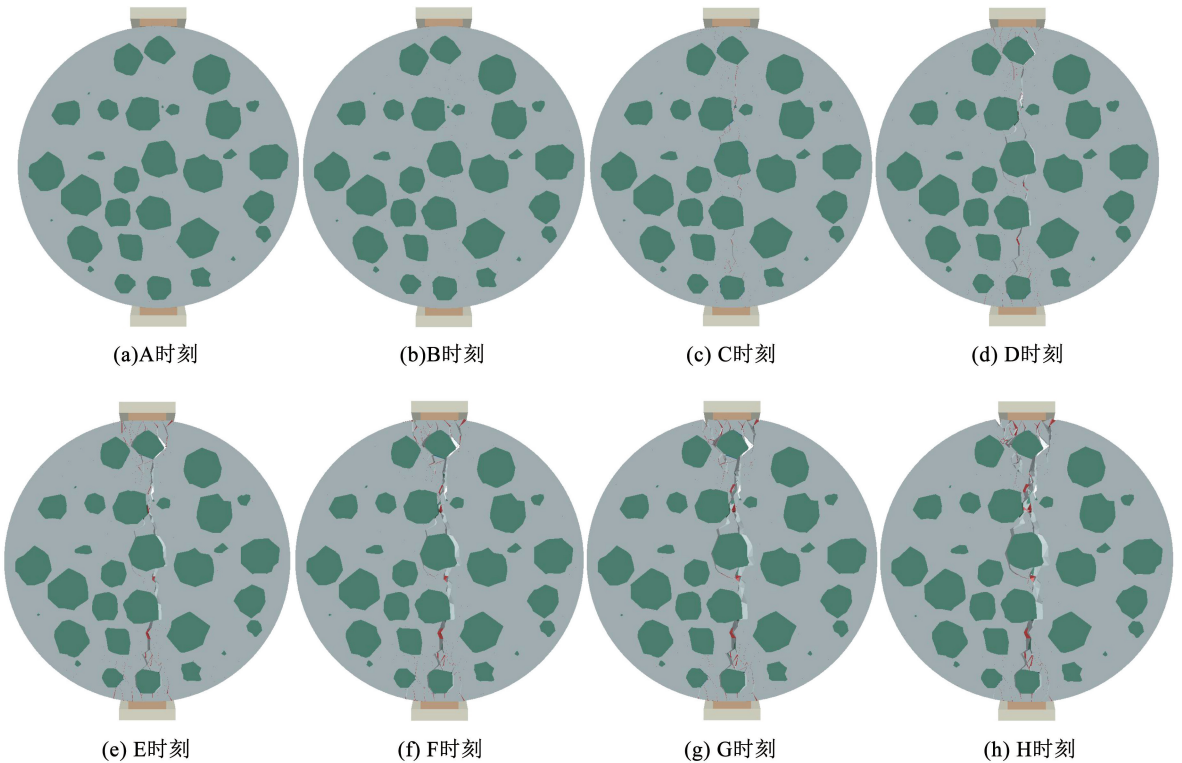


图 14 混凝土圆柱体截面二的破坏过程

Fig. 14 Failure process of concrete cylinder section II

在细观混凝土数值模拟计算中难免会出现单元之间的相互碰撞, 由于混凝土中骨料、砂浆和 ITZ 之间的力学性能存在显著差异, 并且多面体骨料存在明显的尖角, 会出现应力集中的现象, 导致图 15 中不同龄期模型的拉压应力显著升高。以 28 d 龄期的模型为例, 图 16 (a) 为拉应力的应力集中, 提取模

型中的骨料部分, 骨料之间的相互作用使得模型整体的拉应力急剧升高。图 16 (b) 为压应力的应力集中, 由于混凝土圆柱体模型由骨料和砂浆共同组成, 骨料、砂浆与木质垫条间的相互挤压也使得模型的压应力显著变大, 出现压应力的应力集中现象。

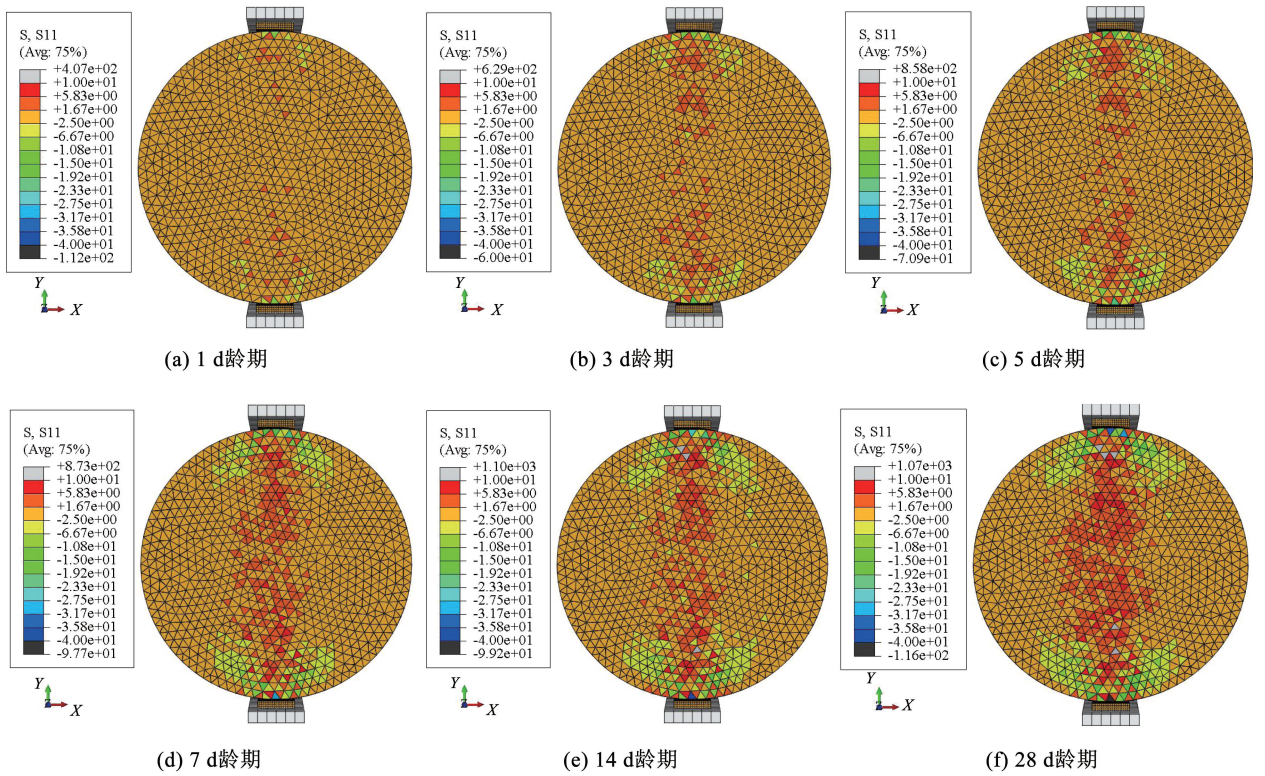


图 15 不同龄期模型正截面 S11 应力云图

Fig. 15 Model normal section S11 stress nephogram at different ages

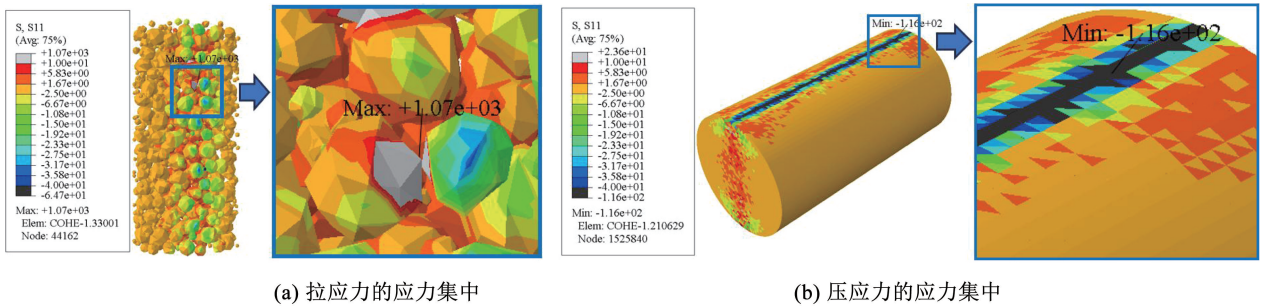


图 16 应力集中

Fig. 16 Stress concentration

图 17 为不同龄期模型达到劈裂抗拉峰值荷载时按照图 11 提取 7 个不同截面单元的应力分布曲线,分别计算模型截面受拉区域的平均拉应力,可得当龄期为 1、3、5、7、14、28 d 时的拉应力平均值分别为 0.79、1.67、1.97、2.32、2.82、3.35 MPa,并在图 17 中用粗实线标注。

表 6 为不同龄期混凝土劈裂抗拉强度结果对比,随着混凝土龄期的增加,劈裂抗拉强度公式计算值、拉应力平均值和文献[39]的试验值均在不断地增大。相比文献[39]的试验数据,本文劈裂抗拉强度公式计算值、拉应力平均值和文献[39]试验值间

的误差均在 1 d 时最大,最大误差为 17.65% 和 16.18%,由于在 1 d 的极早龄期时混凝土强度极不稳定,出现了较大的误差;在其余龄期的误差均小于 5%,由此验证了细观混凝土模型的准确性与可靠性。

图 18 为不同龄期模型正截面的最终破坏形态。6 种不同龄期有限元模型正截面劈裂抗拉的破坏形态相似,从宏观层面上均形成了一条贯穿混凝土圆柱体模型的竖向主裂缝,在靠近木质垫条的受压区域存在部分竖向微小裂缝,与混凝土劈裂抗拉试验中的试件破坏状态一致^[40]。

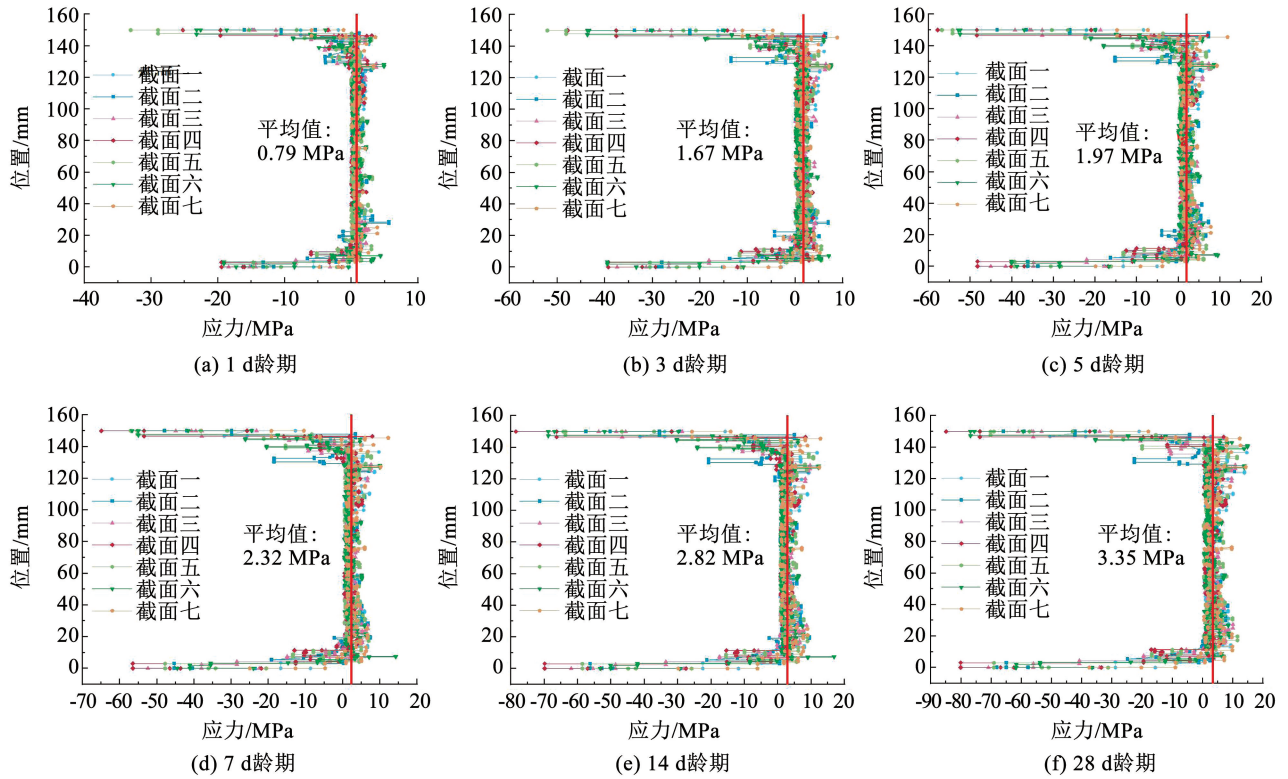


图 17 不同龄期混凝土圆柱体应力分布曲线

Fig. 17 Stress distribution curves of concrete cylinders at different ages

表 6 不同龄期混凝土劈裂抗拉强度结果对比

Tab. 6 Comparison of splitting tensile strength results of concrete at different ages

龄期/d	式(13)计算值/MPa	拉应力平均值/MPa	文献[39]试验值/MPa	误差①/%	误差②/%
0	—	—	0.13	—	—
1	0.80	0.79	0.68	17.65	16.18
3	1.70	1.67	1.65	3.03	1.21
5	2.04	1.97	—	—	—
7	2.37	2.32	2.32	2.16	0.00
14	2.92	2.82	2.96	-1.35	-4.73
28	3.42	3.35	3.45	-0.87	-2.90

注:误差① = (式(13)计算值 - 试验值) / 试验值 × 100%; 误差② = (拉应力平均值 - 试验值) / 试验值 × 100%。

各龄期模型不同截面的破坏状态相似,以 28 d 龄期模型为例,图 19 为按照图 11 提取 7 个不同截面的最终破坏形态。竖向主裂缝的发展会绕过骨料

单元,最终形成了贯穿横截面的竖向主裂缝,同时,混凝土圆柱体模型的上下两端受压区的砂浆明显出现了被压碎的现象。

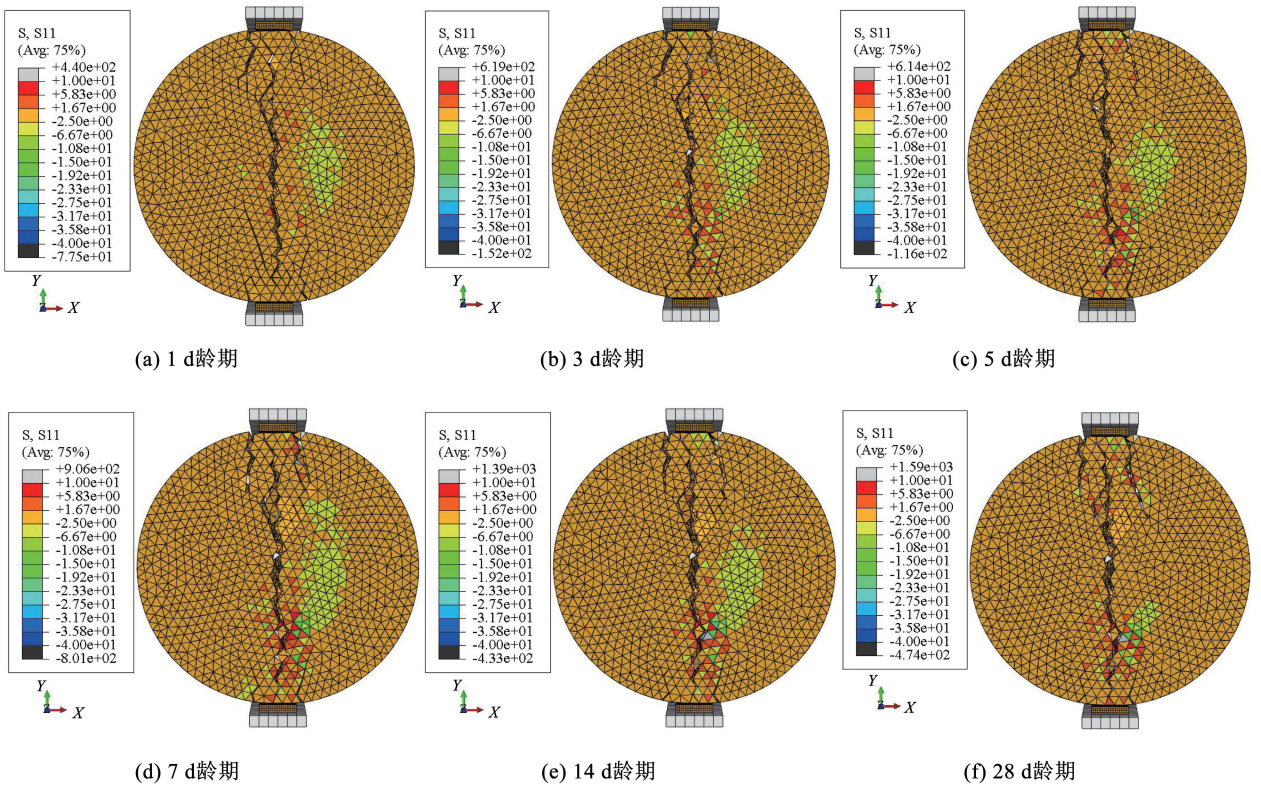


图 18 不同龄期混凝土圆柱体正截面的最终破坏形态

Fig. 18 Final failure patterns of normal sections of concrete cylinders at different ages

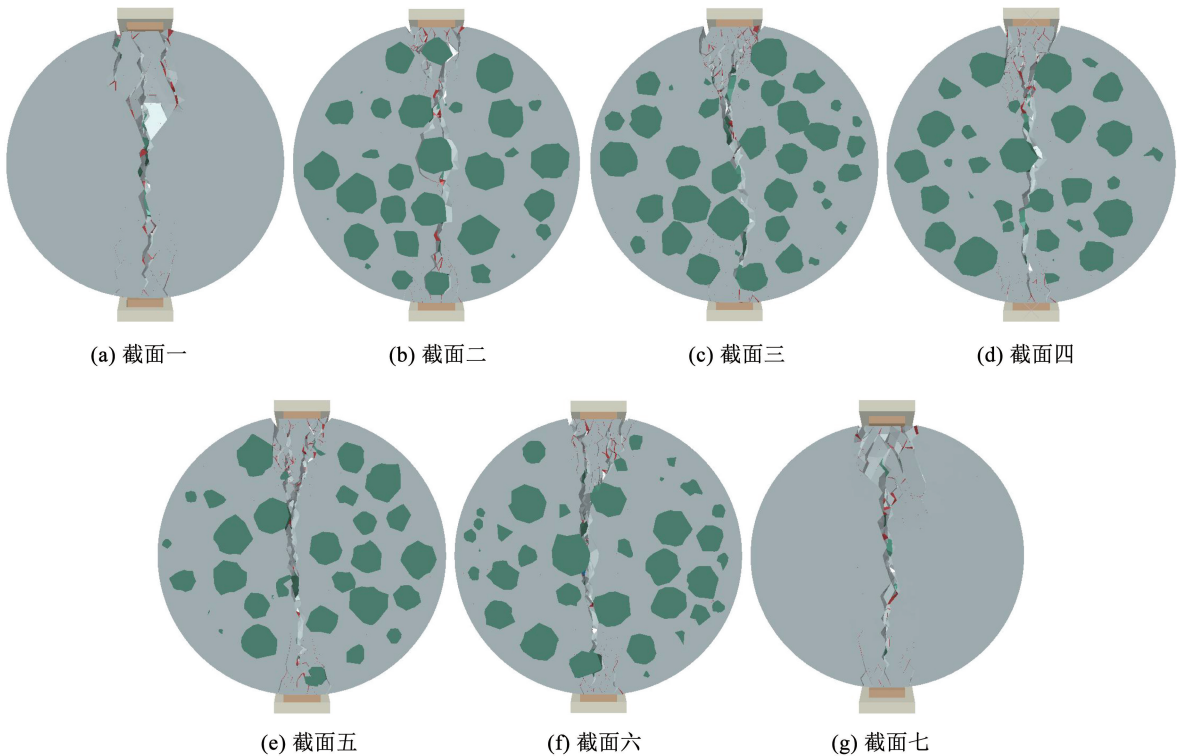


图 19 混凝土圆柱体不同截面最终破坏形态 (28 d 龄期)

Fig. 19 Final failure patterns of concrete cylinder with different sections (28 days-age)

3 结 论

1) 三维细观混凝土模型结合内聚力单元为研究混凝土的劈裂抗拉过程提供了一种有效的方法,三维随机骨料模型不仅可以真实地展现出实际骨料的几何形状和空间分布,并可以较为准确地模拟预测混凝土的力学性能和破坏状态,具有很高的可视化程度。

2) 对比 4、5、6 mm 不同网格尺寸的模型,网格尺寸对劈裂抗拉强度影响较小,但对荷载-位移曲线下降段有一定的影响,并且网格尺寸越大荷载下降速度越快。随着模型网格尺寸增大,3 种不同网格尺寸模型的计算机时逐渐减少,劈裂抗拉强度计算值与拉应力平均值间的误差逐渐增大,网格尺寸为 6 mm 时的误差为 3.57%。

3) 对比分析 1、3、5、7、14、28 d 龄期的混凝土劈裂抗拉模型,劈裂抗拉强度计算值、拉应力平均值和试验值之间的误差均在 1 d 时最大,最大误差分别为 17.65% 和 16.18%,在其余龄期的误差均小于 5%,验证了模型的适用性和可靠性,可以准确地预测评估早龄期混凝土的宏观抗拉性能。

4) 不同龄期模型横截面劈裂抗拉的破坏过程和最终破坏形态相似,在未达到劈裂抗拉强度峰值荷载之前,混凝土圆柱体的截面没有出现裂缝;在达到劈裂抗拉强度峰值荷载后,微裂缝在 ITZ 处萌生并发展,最终形成贯穿混凝土圆柱体横截面的竖向主裂缝。

参 考 文 献

- [1] 张福亮. 混凝土结构早拆模板体系与拆模时间的研究[D]. 上海: 同济大学, 2007
ZHANG Fuliang. The study of early-dismantling template system and dismantling template time of concrete structure [D]. Shanghai: Tongji University, 2007
- [2] BARR B I G, LEE M K, BARRAGAN B, et al. Round-robin analysis of the RILEM TC 162-TDF uni-axial tensile test: part 1[J]. Materials and Structures, 2003, 36(4): 265. DOI: 10.1007/BF02479620
- [3] MARTA S, AMANDA A. Length effect at testing splitting tensile strength of concrete[J]. Materials, 2021, 15(1): 250. DOI: 10.3390/MA15010250
- [4] CAO Shaojun, HOU Xiaomeng, RONG Qin, et al. Dynamic splitting tensile test of hybrid-fiber-reinforced reactive powder concrete[J]. Emerging Materials Research, 2018, 7(1): 1. DOI: 10.1680/jemmr.16.00070
- [5] BELLA C D, MICHEL A, STANG H, et al. Early age fracture properties of microstructurally-designed mortars [J]. Cement and Concrete Composites, 2017(75): 62. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.11.004
- [6] 傅金阳, 徐光阳, 杨曾, 等. 高地温隧道衬砌混凝土早期开裂机理及防控措施[J]. 铁道学报, 2022, 44(3): 105
FU Jinyang, XU Guangyang, YANG Zeng, et al. Early cracking mechanism and prevention measures for lining concrete in high geotemperature tunnel [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(3): 105. DOI: 1001-8360(2022)03-1015-10
- [7] YANG B, KAMALI-BERNARD S, BERNARD F. Microstructure, tensile strength and shear strength of aggregate-mortar interface: effect of aggregate mineralogy [J]. Construction and Building Materials, 2023(388): 40. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131721
- [8] WITTMANN F H, ROELFSTRA P E, SADOUKI H. Simulation and analysis of composite structures [J]. Materials Science and Engineering, 1985, 68(2): 239. DOI: 10.1016/0025-5416(85)90413-6
- [9] MAO Lingtao, LIU Haizhou, ZHU Ying, et al. 3D strain mapping of opaque materials using an improved digital volumetric speckle photography technique with X-ray microtomography [J]. Applied Sciences, 2019, 9(7): 1418. DOI: 10.3390/app9071418
- [10] NGUYEN T, GHAZLAN A, KASHANI A, et al. 3D meso-scale modelling of foamed concrete based on X-ray computed tomography [J]. Construction and Building Materials, 2018, 188(10): 583. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.085
- [11] LEITE J P B, SLOWIK V, MIHASHI H. Computer simulation of fracture processes of concrete using mesolevel models of lattice structures [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(6): 1025. DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.11.011
- [12] LI Hui, YANG Zhenjun, LI Beibei, et al. A phase-field regularized cohesive zone model for quasi-brittle materials with spatially varying fracture properties [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021(17): 256. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2021.107977
- [13] SHI Wenkang. Numerical modeling of quasi-brittle materials using a phase-field regularized cohesive zone model with optimal softening law [J]. Applied Sciences, 2022(12): 23. DOI: 10.3390/app122312077
- [14] JIVKOV A P, ENGELBERG D L, STEIN R, et al. Pore space and brittle damage evolution in concrete [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013(110): 378. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2013.05.007
- [15] CHANG Ze, ZHANG Hongzhi, SCHLANGEN E, et al. Lattice fracture model for concrete fracture revisited: calibration and validation [J]. Applied Sciences, 2020, 10(14): 4822. DOI: 10.3390/app10144822
- [16] 张锦华, 方秦, 龚自明, 等. 基于三维细观模型的全级配混凝土静态力学性能的数值模拟 [J]. 计算力学学报, 2012, 29(6): 927
ZHANG Jinhua, FANG Qin, GONG Ziming, et al. Numerical simulation of static mechanical properties based on 3D mesoscale model of fully-graded concrete [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012, 29(6): 927. DOI: 10.1063/1.2187934
- [17] ZHANG Zihua, SONG Xiaogang, LIU Yan, et al. Three-dimensional mesoscale modelling of concrete composites by using random walking algorithm [J]. Composites Science and Technology, 2017, 149(8): 235. DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.06.015
- [18] ZHANG Huan, SHENG Peiyao, ZHANG Jizhi, et al. Realistic 3D modeling of concrete composites with randomly distributed aggregates by using aggregate expansion method [J]. Construction and Building Materials, 2019, 225: 927. DOI: 10.1016/

- j. conbuildmat. 2019. 07. 190
- [19] WANG Lixiao, CHEN Qidong, LIU Xin, et al. Research on damage of 3D random aggregate concrete model under ultrasonic dynamic loading[J]. *Computers and Concrete*, 2020, 26(1): 11. DOI:10.12989/cac.2020.26.1.011
- [20] ZHANG Zhiqiang, LI Yonglong, ZHU Xingyu, et al. Meso-scale corrosion expansion cracking of ribbed reinforced concrete based on a 3D random aggregate model[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2021, 22(11): 924. DOI:10.1631/JZUS.A2100304
- [21] HILLERBORG A, MODEER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements science direct [J]. *Cement and Concrete Research*, 1976, 6(6): 773. DOI:10.1016/0008-8846(76)90007-7
- [22] REN Wenyuan, YANG Zhenjun, SHARMA R, et al. Three-dimensional in situ XCT characterization and FE modelling of cracking in concrete[J]. *Complexity*, 2018, 2018: 1. DOI:10.1155/2018/3856584
- [23] ZHOU Rongxin, SONG Zhenhuan, LU Yong. 3D mesoscale finite element modelling of concrete [J]. *Computers and Structures*, 2017, 192(9): 96. DOI:10.1016/j.compstruc.2017.07.009
- [24] 汪奔, 王弘, 张志强, 等. 三维随机凹凸型混凝土骨料细观建模方法研究[J]. *应用力学学报*, 2018, 35(5): 1072
WANG Ben, WANG Hong, ZHANG Zhiqiang, et al. Study on mesoscopic modeling method for three-dimensional random concave-convex concrete aggregate [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2018, 35(5): 1072. DOI:10.11776/cjam.35.05.B062
- [25] FULLER W B, THOMPSON S E. The laws of proportioning concrete [J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1906, 57(2): 67. DOI:10.1061/TACEAT.0001979
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019
- [27] 潘子超, 陈艾荣. 基于任意级配的二维随机骨料生成方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(5): 759
PAN Zichao, CHEN Airong. Simulation method of random aggregate in two dimension based on arbitrary gradation[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2013, 41(5): 759. DOI:10.3969/j.issn.0253-374x.2013.05.021
- [28] 王尚伟, 朱海堂, 王博, 等. 混凝土配合比优化设计的紧密堆积理论综述[J]. *材料导报*, 2021, 35(3): 3085
WANG Shangwei, ZHU Haitang, WANG Bo, et al. Review of the packing theory for optimization design of concrete mix proportion [J]. *Materials Reports*, 2021, 35(3): 3085. DOI:10.11896/cldb.20010108
- [29] 寇剑锋, 徐菲, 郭家平, 等. 黏聚力模型破坏准则及其参数选取[J]. *机械强度*, 2011, 33(5): 714
KOU Jianfeng, XU Fei, GUO Jiaping, et al. Damage laws of cohesive zone model and selection of the parameters[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2011, 33(5): 714. DOI:10.16579/j.issn.1001.9669.2011.05.003
- [30] BENZEGGAGH M L, KENANE M. Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus [J]. *Composites Science and Technology*, 1996, 56(4): 439. DOI:10.1016/0266-3538(96)00005-X
- [31] FAIRHURST C. On the validity of the 'Brazilian' test for brittle materials[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1964, 1(4): 535. DOI:10.1016/0148-9062(64)90060-9
- [32] 徐仲卿. 早龄期混凝土材料与构件力学性能试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016
XU Zhongqing. Experimental research on mechanical properties of early age concrete materials and structures [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016
- [33] NGUYEN D H, DAO V T N. A novel approach to estimate the evolution of fracture energy and tensile softening curve of concrete from very early age [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 196: 43. DOI:10.1016/j.engfractmech.2018.02.026
- [34] CABALLERO A, LOPEZ C M, CAROL I. 3D meso-structural analysis of concrete specimens under uniaxial tension [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2006, 195(52): 7182. DOI:10.1016/j.cma.2005.05.052
- [35] XI Xun, YIN Ziqing, YANG Shangdong, et al. Using artificial neural network to predict the fracture properties of the interfacial transition zone of concrete at the mesoscale [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 242: 1. DOI:10.1016/j.engfractmech.2020.107488
- [36] 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
WEI Shan, CHENG Jiong, LI Bing. Numerical simulation and strength calculation analysis of cubic splitting test [J]. *Building Science*, 2023, 39(7): 17. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2023.07.00
- [37] 熊学玉, 肖启晟. 基于内聚力模型的混凝土细观拉压统一数值模拟方法[J]. *水利学报*, 2019(4): 15
XIONG Xueyu, XIAO Qisheng. A unified meso-scale simulation method for concrete under both tension and compression based on cohesive zone model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019(4): 15. DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20181061
- [38] LI D, WONG L N Y. The brazilian disc test for rock mechanics applications: review and new insights[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2013, 46(2): 269. DOI:10.1007/s00603-012-0257-7
- [39] 顾文发. C40 商品混凝土早龄期力学性能试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012
GU Wenfa. Experimental study on mechanical properties of C40 commercial concrete at early age [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012
- [40] 张楠. 混凝土劈裂抗拉强度尺寸效应及破坏特性[D]. 大连: 大连理工大学, 2016
ZHANG Nan. Size effect and failure characteristics on splitting tensile strength of concrete [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016