

混凝土动态双轴拉压破坏准则细观数值模拟研究

金 浏, 李 健, 余文轩, 杜修力

MESOSCOPIC NUMERICAL SIMULATION ON DYNAMIC BIAXIAL TENSION-COMPRESSION FAILURE CRITERION OF CONCRETE

Jin Liu, Li Jian, Yu Wenxuan, and Du Xiuli

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/0459-1879-21-563>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单一水平轴风电机组尾迹的模拟方法与流动机理研究综述

REVIEW OF RESEARCH ON THE SIMULATION METHOD AND FLOW MECHANISM OF A SINGLE HORIZONTAL-AXIS WIND TURBINE WAKE

力学学报. 2021, 53(12): 3169-3178

低频振动隔离和能量采集双功能超材料

LOW-FREQUENCY VIBRATION ISOLATION AND ENERGY HARVESTING SIMULTANEOUSLY IMPLEMENTED BY A METAMATERIAL WITH LOCAL RESONANCE

力学学报. 2021, 53(11): 2972-2983

一种从离散模拟到连续介质弹性模拟的过渡方法

A TRANSITION METHOD FROM DISCRETE SIMULATION TO ELASTIC FEA OF CONTINUOUS MEDIA

力学学报. 2021, 53(11): 3080-3096

活性流体流变行为的布朗动力学模拟研究

BROWNIAN DYNAMICS SIMULATION OF RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF ACTIVE FLUIDS

力学学报. 2021, 53(11): 3071-3079

基于S-ALE方法的圆柱体垂直出水破冰研究

RESEARCH ON VERTICAL MOVEMENT OF CYLINDRICAL STRUCTURE OUT OF WATER AND BREAKING THROUGH ICE LAYER BASED ON S-ALE METHOD

力学学报. 2021, 53(11): 3110-3123



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

混凝土动态双轴拉压破坏准则细观数值模拟研究¹⁾金 浏 李 健 余文轩 杜修力²⁾

(北京工业大学城市减灾与防灾防护教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要 正常服役期内的混凝土结构往往处于复杂应力状态, 并且不可避免地会受到偶发动力载荷作用. 对于复杂载荷作用下的混凝土力学性能研究, 破坏准则是基础. 受试验设备等条件限制, 现有的动态双轴拉压破坏准则形式复杂、缺乏更高应变率和侧应力比范围且尚未综合考虑应变率和侧应力比的耦合作用. 为进一步提出适用范围更高且更准确的混凝土动态双轴拉压破坏准则, 在细观尺度上建立了混凝土立方体三维随机数值模型, 模拟了不同应变率和侧应力比下混凝土材料的动态双轴拉压破坏行为, 分别讨论了应变率和侧应力比对混凝土破坏模式和动态双轴强度的影响, 总结提出了混凝土动态双轴拉压破坏准则. 研究结论如下: 随应变率和侧应力比增大, 混凝土试件内部损伤增多, 裂纹数量增加. 动态双轴拉压工况下, 混凝土动态主轴压缩强度和侧轴拉伸强度均随应变率的增大而增大. 随侧应力比增大, 动态主轴压缩强度减小, 而动态侧轴拉伸强度增大. 本文提出的混凝土动态双轴拉压强度准则具有应变率和侧应力比适用范围大, 形式精炼简洁, 不再受物理试验条件限制和考虑了应变率和侧应力比的耦合作用等优点, 并且该准则得到了不同角度的验证.

关键词 混凝土, 应变率, 侧应力比, 动态双轴载荷, 拉压破坏准则

中图分类号: TU528.1 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-21-563

MESOSCOPIC NUMERICAL SIMULATION ON DYNAMIC BIAXIAL TENSION-COMPRESSION FAILURE CRITERION OF CONCRETE¹⁾Jin Liu Li Jian Yu Wenxuan Du Xiuli²⁾

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract Concrete structures in normal service are often subject to complex stresses and are inevitably subject to the sporadic dynamic loads. The failure criterion is the foundation for the study of mechanical properties of concrete under complex loads. Limited by the test equipment and other conditions, the existing dynamic biaxial tension-compression strength failure criterion has a complex form, lacks of higher strain rate and lateral stress ratio range and has not yet considered the coupling effect of strain rate and lateral stress ratio comprehensively. In order to further propose a more applicable and accurate failure criterion of concrete dynamic biaxial tension-compression strength, a 3D random numerical model of cubic concrete is established on a mesoscale in this study. The dynamic tension-compression failure behavior of concrete materials under different strain rates and lateral stress ratios are simulated. The influence of strain rate and lateral stress ratio on the failure modes and dynamic biaxial strengths of concrete are discussed respectively. The failure criterion of dynamic biaxial tension-compression strength of concrete is put forward. The simulation results

2021-11-01 收稿, 2022-01-24 录用, 2022-01-25 网络版发表.

1) 国家重点研发计划 (2018YFC1504302) 和国家自然科学基金 (51822801) 资助项目.

2) 杜修力, 教授, 主要研究方向: 工程结构防灾减灾. E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn

引用格式: 金浏, 李健, 余文轩, 杜修力. 混凝土动态双轴拉压破坏准则细观数值模拟研究. 力学学报, 2022, 54(3): 800-809

Jin Liu, Li Jian, Yu Wenxuan, Du Xiuli. Mesoscopic numerical simulation on dynamic biaxial tension-compression failure criterion of concrete. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(3): 800-809

indicated that with the increase of strain rate and lateral stress ratio, the internal damage of concrete specimen increases and the number of cracks increase. Under dynamic biaxial tension-compression loads, with the increasing strain rate, the dynamic spindle compressive strength and dynamic lateral tensile strength of concrete increase gradually. With the increasing lateral stress ratio, the dynamic spindle compressive strength decreases while the dynamic lateral tensile strength increases. The dynamic biaxial Tension-Compression failure criterion of concrete proposed in this paper has the advantages of wide range of applicable strain rate and lateral stress ratio, concise form, no longer restricted by physical test conditions and considering the coupling effect of strain rate and lateral stress ratio, etc. The established failure criterion of concrete has been verified from different angles.

Key words concrete, strain rate, lateral stress ratio, dynamic biaxial loading, tension-compression failure criterion

引言

混凝土是一种拉伸强度较低的脆性材料,其广泛应用于土木工程中。混凝土的拉伸强度只有其压缩强度的 $1/8 \sim 1/10$ ^[1]。当混凝土材料强度降低时,混凝土结构内部产生的裂纹数量逐渐增多,进而降低结构使用寿命。在日常结构设计中,混凝土轴心抗拉强度普遍作为结构计算的安全系数指标之一。如《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)^[2]第 7.1.1 条规定,在正常使用极限状态下对混凝土构件进行裂缝控制验算时,对于二级裂缝控制等级构件,在荷载标准组合下,受拉边缘应力应不超过混凝土轴心抗拉强度标准值。从空间受力维度来看,正常服役期内的混凝土结构往往处于复杂应力(双轴、多轴)状态中。但是,在双轴拉压组合荷载下,混凝土的主轴压缩强度和侧轴拉伸强度均低于其单轴强度^[3]。Shang 等^[3]对不同类型的混凝土在静态双轴拉压荷载下的力学行为进行了研究,得出对于所有类型的混凝土在结构设计和验算时都应考虑双轴拉压荷载下混凝土强度降低的结论。因此,只把混凝土单轴抗拉强度作为结构设计参考值是不安全的,有必要针对混凝土在双轴拉压荷载作用下的拉伸强度进一步研究。

通常情况下,普通混凝土结构常处于准静态荷载下,即应变率 $\dot{\varepsilon} \leq 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。但是,混凝土结构不可避免地会受到偶发动力荷载作用。不同的动力荷载作用于结构的应变率范围不同,如遭到地震时,应变率一般在 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 范围内;遭到冲击荷载时,应变率一般在 $10^{-2} \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 范围内;遭到爆炸荷载时,应变率一般在 $1 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 范围内。混凝土材料在动态荷载下的力学性能较静荷载下有明显不同^[4-5]。但是,目前对于动态荷载下混凝土力学性能的研究,大多集中在动态单轴工况。由于拉伸试验对试验设备要求

高、开展难度大,目前对于动态双轴荷载下的混凝土力学行为研究大多集中在动态双轴压缩工况,而动态双轴拉压工况相对较少且仅处于低应变率范围内^[6]。因此,对于动态拉压荷载下的混凝土力学性能研究尚不充分,亟需进一步研究。

对于混凝土力学性能的研究,破坏准则是基础。目前,少数学者已经对混凝土双轴拉压破坏准则开展了相关研究。表 1 列出了目前一些学者所提出的混凝土双轴拉压破坏准则。一方面,对于静态拉压工况,基于 Kupfer 破坏准则^[6],文献 [3, 5, 7-8] 考虑侧应力比(本文用 λ 表示)影响,通过真三轴试验系统研究了不同类型混凝土在静态双轴拉压荷载下的力学行为并提出了不同形式破坏准则。此外,《混凝土结构设计规范》^[2]和《日本坝工设计规范》^[9]分别对双轴拉压破坏准则进行了规范。另一方面,对于动态拉压工况,Shang 和 Song^[4]开展了不同侧应力比和不同应变率下混凝土动态加载试验,得出混凝土动态侧拉强度随侧应力比的增大而增大,随应变率的增大而增大的结论。文献 [10-12] 也得出同样的结论,并在此基础上分别提出了不同类型混凝土在动态拉压工况下的动态破坏准则,如表 1 所示。目前,对于混凝土双轴拉压破坏准则的研究,处于静态荷载下的研究较多,而动态荷载下的研究很少。另外,由于试验设备和条件限制,大多数物理试验研究范围处于低应变率 ($10^{-5} \text{ s}^{-1} \leq \dot{\varepsilon} \leq 10^{-2} \text{ s}^{-1}$) 和低侧应力比 ($-0.5 \leq \lambda \leq 0$) 范围内,在更高范围内的物理试验研究目前还几近空白。近来,细观数值分析方法为讨论混凝土的损伤机理和力学行为提供了一种有效手段。Tine 等^[13]和 Prasad 等^[14]通过数值模拟分析方法研究了混凝土在双轴拉压荷载作用下的力学行为并与物理试验结果进行了对比。吻合良好的对比结果说明合理的数值模拟分析模型可以扩充物理试验

表 1 不同学者提出的破坏准则

Table 1 Summary of failure criteria proposed by different scholars

Data sources	Type of loadings	Failure criterion
Ref. [2]	static	$\frac{\sigma_x}{f_t} + \frac{\sigma_z}{f_c} = 1$
Ref. [3]	static	$\frac{\sigma_x}{f_t} = a \frac{\sigma_z}{f_c} + b$
Ref. [5]	static	$a \frac{\sigma_x}{f_t} + \frac{\sigma_z}{f_c} = 1$
Ref. [6]	static	$\frac{\sigma_x}{f_t} + 0.8 \frac{\sigma_z}{f_c} = 1$
Ref. [7-8]	static	$\frac{\sigma_x}{f_t} + c \frac{\sigma_z}{f_c} = 1$
Ref. [9]	static	$\frac{\sigma_x}{f_t} + \frac{\sigma_z}{f_c} = 1$
Ref. [4]	dynamic	$\frac{\sigma_x}{f_t} = a + b \frac{\sigma_z}{f_c} + c \left(\frac{\sigma_z}{f_c} \right)^2$
Ref. [5]	dynamic	$\frac{\sigma_x}{f_t} = a + b \lg \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s} \right) + c \frac{\sigma_z}{f_c}$
Ref. [10]	dynamic	$\frac{\sigma_x}{f_t} = \frac{\alpha \lambda}{1 + \alpha \lambda} + b (1 - e^{-c \lambda}) \lg \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s} \right)$
Ref. [11]	dynamic	$\frac{\sigma_x}{f_t} = a \frac{\sigma_z}{f_c} + b \lg \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s} \right) + 1$
Ref. [12]	dynamic	$\begin{cases} \frac{\sigma_x}{f_t} = \frac{\sigma_z/f_c}{\lambda + 0.05 - 1.07143(f_t/f_c)} & (-\infty \leq \lambda \leq -0.05) \\ \frac{\sigma_x}{f_t} = \frac{0.7\lambda}{\lambda - 0.7} \frac{f_t}{f_c} & (-0.05 \leq \lambda \leq 0) \end{cases}$

Note: σ_x and σ_z represent the lateral tensile strength and spindle compressive strength of concrete under biaxial loads, respectively. f_t and f_c represent the uniaxial tensile strength and uniaxial compressive strength of concrete under biaxial loads, respectively. Parameters a , b and c represent fitting parameters of different failure criteria. The research scope of strain rate in dynamic loads is $10^{-5} \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.

受限的研究范围. 因此, 该方法也得到了众多学者的广泛应用.

综上, 本文应用细观力学分析模型和数值模拟分析方法, 将混凝土材料看作由骨料颗粒、砂浆基质及两者间的过渡区 (interfacial transition zone, ITZ) 等介质组成的多相复合材料, 研究应变率及侧应力比对混凝土动态双轴拉压力学行为的影响, 并在此基础上建立静、动态双轴拉压破坏准则.

1 细观数值模型的建立与验证

1.1 数值模型与边界条件

图 1 展示了混凝土三维细观模型. 本文选用边长 $D = 100 \text{ mm}$ 的混凝土立方体试件, 将混凝土看作由骨料颗粒、砂浆基质及 ITZ 组成的多相复合材料^[15-17]. 假定骨料颗粒为球体, 所占体积分数约为 40%. 采用二级配混凝土, 包含两种骨料粒径颗粒: 中石颗粒粒径 $d = 30 \text{ mm}$, 小石颗粒粒径 $d = 12 \text{ mm}$. 参考文献^[15-17]中的骨料分布表示方法及骨料投放方式建立随机骨料模型, 定义骨料周围 1 mm 厚

的薄层区域为界面过渡区. 考虑计算量等因素, 设置本模型的基本单元尺寸为 2 mm 并对局部单元尺寸进行细化. 为减缓网格敏感性问题, 参考文献^[15-17], 在材料达到其峰值强度后采用应力-开裂位移形式的 Hordijk^[18] 模型来替代应力-应变曲线下降段. 这本质上使得断裂能具有唯一性, 即与网格尺寸无关, 因而可以有效地解决网格敏感性问题. 如图 1 所示, 为研究动态双轴拉压载荷下混凝土的力学行为, 本细观模型的边界条件设置如下: 定义 Z 轴方向为主轴, 在试件顶部设置竖直向下的恒定速度 $v_z = \dot{\epsilon}D$

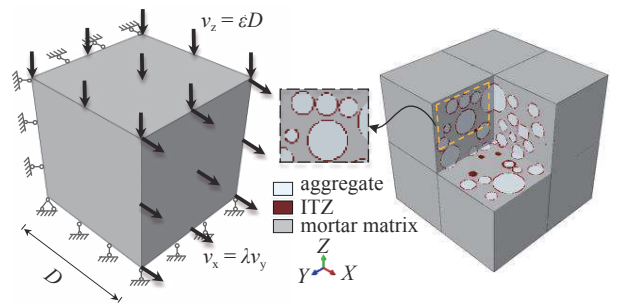


图 1 细观模型

Fig. 1 Meso-finite element model

($\dot{\varepsilon}$ 为名义应变率), 在底部设置竖向固定约束; 定义 X 轴方向为侧轴, 在试件一侧施加水平横向速度 $v_x = \lambda v_z = \lambda \dot{\varepsilon} D$ (λ 为侧应力比), 在对侧设置水平固定约束; 定义 Z 轴为自由轴, 试件两侧均设置为自由边界. 同时, 定义混凝土受拉为正, 受压为负.

1.2 细观本构关系

由 Lubliner 等^[19] 首先提出而后由 Lee 和 Fenves^[20] 进行扩展修正的混凝土塑性损伤 (concrete damaged plasticity, CDP) 模型目前广泛应用于混凝土的力学行为细观模拟中. 该模型的核心是假定混凝土材料的破坏形式主要是受拉时开裂破坏和受压时压碎破坏. 同时, 由于混凝土材料损伤而导致的刚度退化和不可恢复的塑性永久变形问题也可由该改进后的 CDP 模型表征^[19-20], 该 CDP 模型定义混凝土破坏面主要由等效塑性应变张量 ε^{pl} 确定, 具体应力应变关系可表述为

$$\sigma = (1 - D) D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (1)$$

式中, 参数 D 代表各向同性损伤变量; D_0^{el} 代表初始无损伤各向同性线弹性张量.

有效应力张量 $\bar{\sigma}$ 和总应力 σ 之间可通过以下两式换算

$$\bar{\sigma} = D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (2)$$

$$\sigma = (1 - d) \bar{\sigma} \quad (3)$$

其中, 刚度退化因子 d 分别由两个独立的压、拉损伤变量 d_c 和 d_t 决定. 拉、压刚度损伤因子均由有效应力和等效塑性应变来确定, 即: $\bar{\varepsilon}^{pl} : d = d(\bar{\varepsilon}^{pl}, \bar{\varepsilon}^{pl})$.

对于改进后的 CDP 模型, 经典的 Drucker-Prager 屈服面函数 F 可由以下形式表示

$$F = F(\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}^{pl}) = [\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\bar{\varepsilon}^{pl})\langle\bar{\sigma}_{\max}\rangle - \gamma\langle-\bar{\sigma}_{\max}\rangle] \cdot [1/(1 - \alpha)] - \bar{\sigma}_c(\bar{\varepsilon}^{pl}) \leq 0 \quad (4)$$

$$\bar{p} = -\frac{1}{3}\bar{\sigma} : I \quad (5)$$

$$\bar{q} = \sqrt{\frac{3}{2}\bar{S} : \bar{S}} \quad (6)$$

$$\bar{S} = \bar{p}I + \bar{\sigma} \quad (7)$$

式中, $\bar{p}$ 为有效静压力; I 为应力不变量; $\bar{q}$ 为有效应力; $\bar{S}$ 为有效应力张量 $\bar{\sigma}$ 的偏分量; $\bar{\sigma}_{\max}$ 为 $\bar{\sigma}$ 的最大特征值. 运算符 $\langle \cdot \rangle$ 可由 $\langle x \rangle = 0.5(|x| + x)$ 表示. α , γ 为

无量纲参数, 函数 $\beta(\bar{\varepsilon}^{pl})$ 可由下式表示

$$\beta(\bar{\varepsilon}^{pl}) = [\bar{\sigma}_c(\bar{\varepsilon}^{pl})/\bar{\sigma}_t(\bar{\varepsilon}^{pl})](1 - \alpha) - (1 + \alpha) \quad (8)$$

式中, $\bar{\sigma}_c$ 为有效压应力; $\bar{\sigma}_t$ 为有效拉应力. 在双轴载荷下, 参数 α 和 γ 可表示为

$$\alpha = (\bar{\sigma}_{b0}/\bar{\sigma}_{c0} - 1)/(2\bar{\sigma}_{b0}/\bar{\sigma}_{c0} - 1) \quad (9)$$

$$\gamma = 3(1 - K_c)/(2K_c - 1) \quad (10)$$

式中, $\bar{\sigma}_{b0}$ 为单轴初始屈服压应力, $\bar{\sigma}_{c0}$ 为双轴初始屈服压应力, K_c 为屈服常数.

特别地, 基于以上描述的 CDP 模型, Tine 等^[13] 通过有限元分析方法研究了混凝土类材料在双轴载荷下的力学行为并且对 CDP 模型的可行性进行了试验验证. 结果表明, CDP 模型可以很好的模拟混凝土类材料在双轴复杂应力下的破坏演化过程和力学行为, 尤其是存在拉伸应力的工况下. 以上结果表明, CDP 模型可以较精确地反映出双轴载荷下混凝土的力学性能和损伤机理. 因此, 该模型也已被许多学者广泛使用, 如文献 [15-16, 21-23].

另外, 参考文献 [15-16, 24], 对于混凝土内部组分, 本文同样仅考虑强度的放大行为, 用强度放大因子来表征材料应变率效应, 强度放大因子 (dynamic increase factor, DIF) 即为材料动态强度和静态强度的比值. 在动态双轴拉压工况下^[10, 25], 混凝土强度放大因子 DIF 可以表示为

$$DIF = k \lg(\dot{\varepsilon}_d/\dot{\varepsilon}_s) + 1 \quad (11)$$

其中, k 是材料参数, 反映混凝土材料受压时的率效应; $\dot{\varepsilon}_s$ 为静态应变率; $\dot{\varepsilon}_d$ 为动态应变率.

参考文献 [15-17], 对于描述混凝土内部组分的力学性能可采用如下处理方式: 对于砂浆基质, 其力学性能与混凝土类似; 对于界面过渡区, 其可被看作是孔隙率较高的砂浆, 因此其力学性能可在砂浆基础上进行弱化; 对于骨料颗粒, 在动态载荷下, 混凝土内部骨料并不都是弹性体, 而是会在应变率作用下被拉断或劈裂, 其力学性能可在砂浆基础上进行强化. 因此, 对于本研究中混凝土的三相内部组分, 均采用上述考虑应变率效应的 CDP 模型来表述其力学性能, 这种处理方法的可行性已得到了商怀帅^[26] 和申佳玉^[27] 等学者的物理试验验证.

1.3 数值模型验证

在本节中, 将用上述建立的细观数值模型对

Shen 等^[10]开展的动态双轴拉压试验进行验证,以此来验证细观数值模型的可行性.表2列出了本文所采用的混凝土各细观组分的具体力学参数.其中,混凝土的立方体压缩强度,密度和弹性模量等物理参数参考 Shen 等^[10]的物理试验,泊松比 ν 和其他物理参数并未给出,本文的确定方法参考了文献[15-

17].至于界面过渡区的压缩强度等物理参数,参考文献[15-17],采用反复试算的方式具体确定.采用以上力学参数进行细观数值模拟得到的最终混凝土破坏模式、主轴压缩强度和侧轴拉伸强度分别与 Shen 等^[10]物理试验结果的对比如图2所示.

表 2 数值模拟中使用的物理参数

Table 2 Mechanical parameters used in simulations

Parameter	Young's modulus E/GPa	Poisson ratio ν	Eccentricity $\eta/\%$	Stress ratio $f_{b0}=f_{c0}$	Dilatant angle $\psi/(\text{^\circ})$	Fracture energy $G_c/(\text{m}^2\cdot\text{J}^{-1})$	K_c	Compressive yield strength σ_c/MPa	Tensile yield strength σ_t/MPa
aggregate	60.0 ^b	0.16	0.1	1.16	30	60	0.667	80.0 ^c	8.0 ^c
mortar matrix	32.5 ^a	0.20	0.1	1.16	18	50	0.667	40.0 ^a	4.0 ^a
ITZ	26 ^b	0.22	0.1	1.16	15	30	0.667	32.0 ^c	3.2 ^c

Note: Data “a” is determined by Ref. [10], data “b” is determined by Ref. [15-17] and data “c” is determined by inversion method.

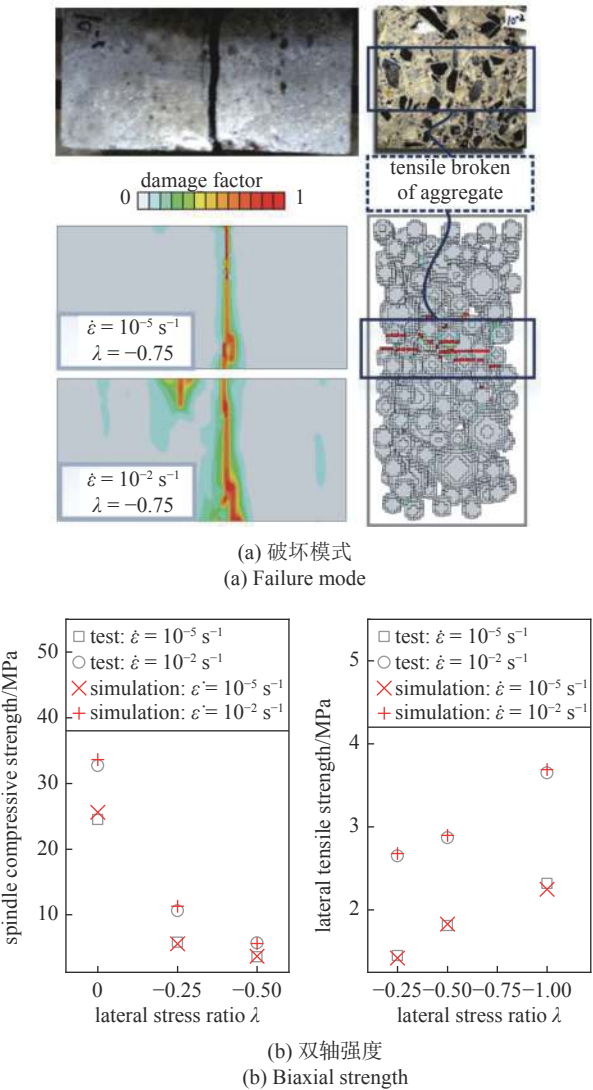


图 2 数值模拟结果与试验^[10]的对比

Fig. 2 Comparison of numerical results and test^[10]

比较混凝土整体和内部骨料破坏模式可知,在 $\dot{\epsilon}=10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 和 $\dot{\epsilon}=10^{-2}\text{ s}^{-1}$ 下分别加载获得的各个破坏模式与试验结果基本一致,具体表现为均在试件中部区域出现一条明显贯穿的直拉裂缝.另外,从混凝土强度的对比结果可以发现,不同工况下细观模拟得到的混凝土双轴强度与试验结果变化趋势相同、差别不大.综上,上述建立的细观数值模型和确定的各组分力学参数具有可行性和准确性.

2 结果与分析

为了研究混凝土动态双轴拉压强度及破坏准则,本研究设置中、低两个应变率范围(低应变率: $\dot{\epsilon}=10^{-5}\text{ s}^{-1}$, 10^{-3} s^{-1} 和 10^{-2} s^{-1} ;中应变率 10^{-1} s^{-1} 和 1 s^{-1})以及不同侧应力比 $\lambda=0$ (单轴压缩), -0.25 , -0.50 , -0.75 , -1.00 和 $-\infty$ (单轴拉伸)共计30种工况,对尺寸为 $D=100\text{ mm}$ 的立方体混凝土试件进行了静、动态双轴拉压数值模拟研究.本研究采用有限元分析软件ABAQUS中的显式算法.每个试件包含约 1.4×10^5 个计算单元,计算成本3~5 h.

2.1 破坏模式

图3展示了应变率和侧应力比对混凝土破坏模式的影响.可以看出,在低应变率范围内($10^{-5}\text{ s}^{-1}\leq\dot{\epsilon}\leq 10^{-2}\text{ s}^{-1}$),不同侧应力比下的混凝土内部破坏模式相似.具体体现为试件内部较为薄弱的区域(ITZ)首先破坏然后扩展到砂浆基质.随着损伤区域不断扩展,最终形成主要沿骨料和砂浆的黏结面劈开的拉断面,并且试件的破坏面上被拉断的粗骨料

较少. 在中应变率范围内 ($10^{-2} \text{ s}^{-1} \leq \dot{\varepsilon} \leq 1 \text{ s}^{-1}$) 破坏面上被拉断的粗骨料的数量增多, 混凝土内部损伤变大, 并且裂纹数量增加. 这是由于当应变率较大时, 混凝土试件内部破坏响应较迅速, 侧拉力直接作用于骨料, 导致破坏面不再沿 ITZ 扩展到砂浆基质最后穿过骨料展开. 另外, 从图 3 可以看出, 在不同工况下, 侧应力比对于混凝土材料内部组分破坏的影响要远小于应变率效应.

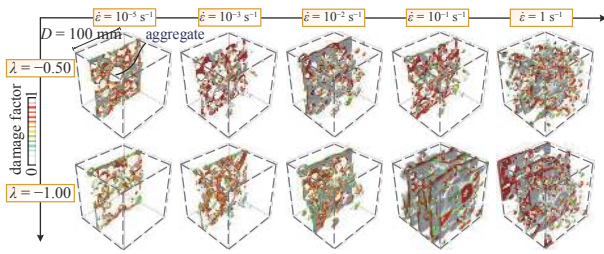


图 3 不同工况下混凝土破坏模式

Fig. 3 Failure modes of concrete under different loading conditions

2.2 混凝土强度

图 4 展示了不同工况下的混凝土动态主轴压缩

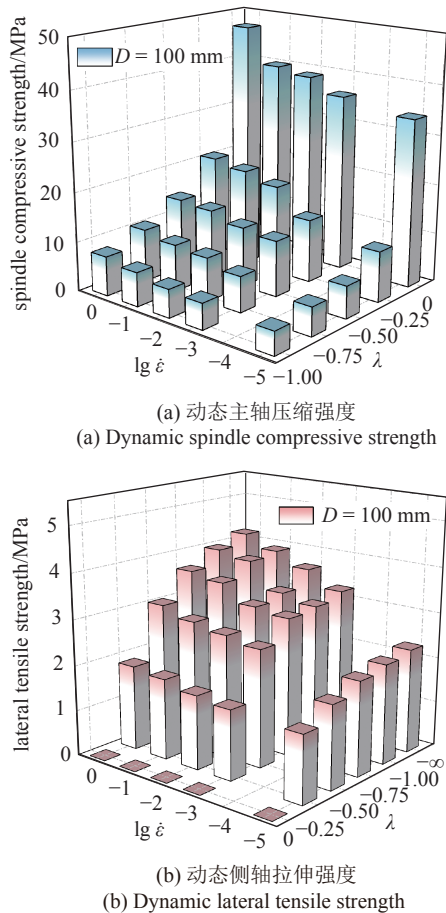


图 4 不同工况下混凝土双轴强度

Fig. 4 Biaxial strength of concrete under different loading conditions

强度和侧轴拉伸强度. 可以看出, 混凝土动态主轴压缩强度和侧轴拉伸强度均随应变率的增大而增大. 但是, 随侧应力比增大, 动态主轴压缩强度减小, 而侧轴拉伸强度增大. 这是由于逐渐增大的拉应力使侧向约束能力逐渐降低, 从而加速了裂缝扩展, 削弱了耗能能力, 最终导致主轴压缩强度下降. 同时, 随着侧应力比增大, 混凝土内部在侧拉力反向形成的抵抗力逐渐增大, 导致内部损伤区域和裂缝数量增多, 从而耗散了更多的能量, 因此, 混凝土侧轴拉伸强度也随之增大.

2.3 试验结果对比

为了验证以上数值模型的合理性以及试验结果的准确性, 本节将数值模拟得到的强度数据点与文献 [5,10,28-29] 的物理试验强度数据点进行了对比.

图 5 为不同工况下主轴压缩强度数据点和试验结果的对比. 由于不同试验所选取的混凝土强度不同, 这里暂且采取归一化处理来进行对比, 即 $f_{\varepsilon,\lambda}^c/f_0^c$ (动态主轴压缩强度/静态单轴压缩强度). 通过图 5 所示的对比结果可以看出, 主轴压缩强度数据结果的变化趋势与试验结果的保持一致.

图 6 为不同工况下侧轴拉伸强度数据点和试验结果的对比. 同样地, 这里采用统一标准 (DIF) 来进行对比. 通过图 6 可以看出, 本文模拟得到的侧轴拉伸强度数据结果在不同试验的数据点变化范围内, 这进一步说明了以上数值模拟结果的准确性.

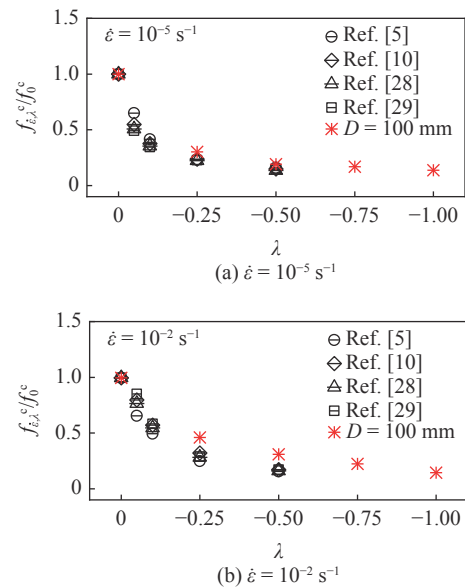


图 5 主轴压缩强度数据点与试验结果的对比

Fig. 5 Comparison of spindle compressive data and test results

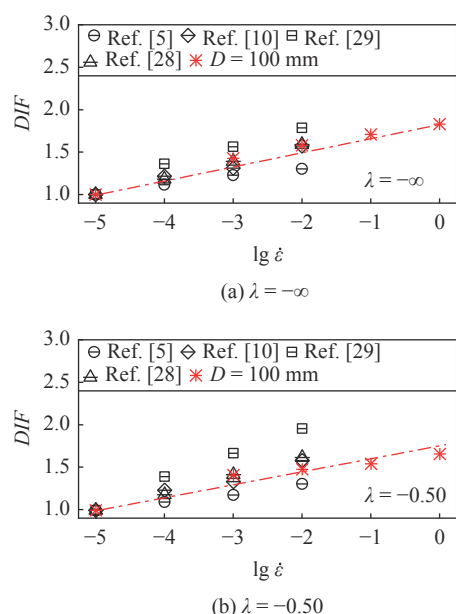


图6 侧轴拉伸强度数据点与试验结果的对比

Fig. 6 Comparison of lateral tensile data and test results

3 混凝土双轴拉压破坏准则

目前,对于双轴拉压载荷下的混凝土破坏准则,大多数研究主要集中在静态工况下展开,而对考虑应变率影响的动态破坏准则研究较少.本节主要从静态和动态两个角度来讨论混凝土双轴拉压破坏准则.

3.1 静态破坏准则对比

如表1所示,对于静态双轴拉压载荷下的混凝土破坏准则,不同学者提出的破坏准则具有相似的比例关系^[2-3,5-9],即

$$\frac{\sigma_x}{f_t} + c \frac{\sigma_z}{f_c} = 1 \quad (12)$$

因此,本文将数值模拟数据点与不同学者的物理试验数据点^[2-10,30-35]进行了对比,如图7所示.通过对比可以看出,在静态双轴拉压工况下,本文数值模拟结果的变化趋势与不同物理试验点的变化趋势基本一致.另外,参考式(12)对本文数值模拟结果进行拟合,得到了如图7所示的函数关系式.在本文中,参数 $c = 1.050$.同时,从图7可以看出,张丽等^[8]和刘学波^[31]的物理试验点基本在本文的拟合曲线上,这也进一步验证了本文数值模拟结果的准确性.

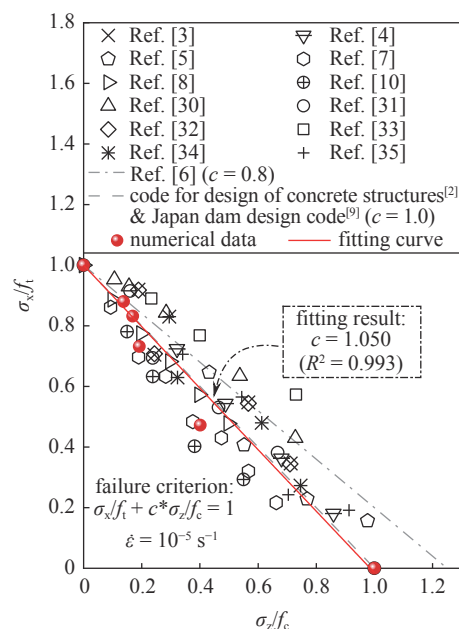


图7 静态双轴拉-压强度破坏准则

Fig. 7 Failure criterion of static biaxial tensile-compressive strength

3.2 动态破坏准则建立

通过表1可以看出,对于动态双轴拉压载荷下的混凝土破坏准则,式(11)将不再适用,并且动态载荷下的双轴拉压破坏准则尚没有统一的准则关系式.为了进一步验证本文模拟结果的准确性,本文首先将数值模拟数据点与不同物理试验点^[10,35]进行了对比,如图8所示.可以看出,本文得到的混凝土动态双轴强度变化趋势是合理的.

如前节所述,动态双轴拉压载荷下,应变率和侧应力比是影响混凝土强度的主要影响因素.但是,由表1可知,目前已提出的不同形式动态破坏准则存

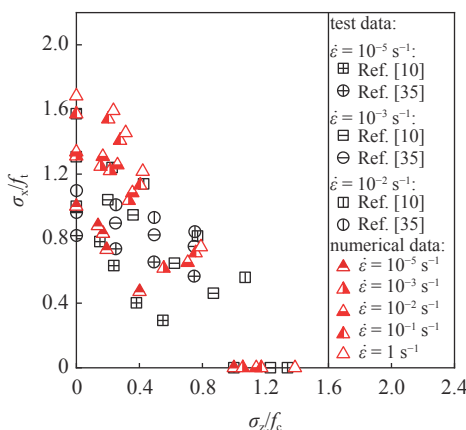


图8 动态双轴拉-压强度与试验结果的对比

Fig. 8 Comparison of dynamic biaxial tensile-compressive strength and test results

在以下几个问题:

(1) 形式较为复杂;

(2) 应变率和侧应力比研究范围集中在低应变率 ($10^{-5} \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 10^{-2} \text{ s}^{-1}$) 和低侧应力比 ($-0.5 \leq \lambda \leq 0$) 的范围, 缺乏更高应变率和侧应力比范围;

(3) 未能综合反映应变率和侧应力比的耦合作用.

因此, 本节将针对以上问题开展研究与讨论. 参考文献 [10, 35], 动态双轴拉压破坏准则可以通过侧轴拉伸强度比 f_t^d/f_t^s 、应变率 $\dot{\epsilon}$ 和侧应力比 λ 来表示, 这种表示方法可以同时反映应变率和侧应力比的耦合效应.

首先, 考虑应变率对混凝土强度的影响, 文献 [10, 25] 对试验数据进行回归分析, 得到了侧轴拉伸强度和应变率之间的关系为 (研究范围: 应变率 $10^{-5} \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 10^{-2} \text{ s}^{-1}$)

$$f_t^{d,0}/f_t^s = k \lg\left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s}\right) + 1 \quad (13)$$

式中, $f_t^{d,0}$ 为不同应变率下混凝土动态侧轴拉伸强度; f_t^s 为混凝土准静态单轴拉伸强度; k 为拟合参数. 基于式 (13) 对不同工况下的数值模拟数据点进行拟合, 得到结果如图 9 所示. 可以发现, 式 (13) 的关系尚且适用于中应变率. 随着侧应力比逐渐增大, 参数 k 也不断增大.

然后, 考虑侧应力比对混凝土强度的影响, 初步分析不同工况下侧应力比和侧轴拉伸强度之间的关系, 如图 10 所示. 参考文献 [10] 的工作, 这里选取指数函数进行回归分析. 由图 10 可知, 该函数关系可以较好的反映混凝土强度与侧应力比间的变化关

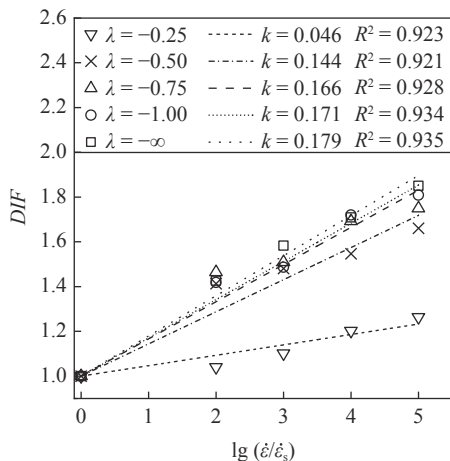


图 9 不同侧应力比下式 (13) 的拟合结果

Fig. 9 Fitting results of Eq. (13) under different lateral stress ratios

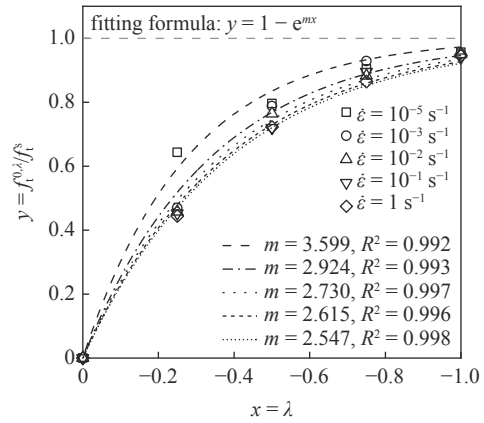


图 10 不同应变率下式 (14) 的拟合结果

Fig. 10 Fitting results of the Eq. (14) under different strain rates

系. 因此, 可以提出侧轴拉伸强度和侧应力比之间的关系式为

$$f_t^{0,\lambda}/f_t^s = 1 - e^{m\lambda} \quad (14)$$

式中, $f_t^{0,\lambda}$ 为不同侧应力下混凝土动态侧轴拉伸强度; m 为拟合参数. 本文不同工况下对式 (14) 的拟合结果如图 10 所示. 可以看出, 随着应变率增大, 参数 m 逐渐减小.

最后, 综合式 (13) 和式 (14) 可得到动态双轴拉压工况下, 考虑应变率和侧应力比影响的混凝土双轴拉压破坏准则

$$f_t^d/f_t^s = K_1 \lg\left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s}\right) - K_2 e^{m\lambda} + K_3 \quad (15)$$

其中, K_1, K_2, K_3 和 m 为拟合参数.

3.3 破坏准则验证

为了进一步验证上述提出的混凝土动态双轴拉压破坏准则的合理性和准确性, 本节选取了文献 [5, 11] 的物理试验数据来与式 (15) 进行拟合与对比. 不同试验工况下得到的式 (15) 中各参数拟合结果如表 3 和表 4 所示. 由拟合结果可以得出, 式 (15) 中的参数 K_3 可在不影响拟合公式结果的基础上进一步精炼为 $K_3 = 1.00$, 这进一步简化了混凝土动态双轴拉压破坏准则.

图 11 和图 12 展示了不同工况下由动态双轴破坏准则得到的拟合值与文献 [5, 11] 的物理试验值的对比结果. 可以看出, 在不同工况下, 由相应参数拟合得到的拟合值与文献 [5, 11] 的试验值均吻合良好, 这证明了上述提出的混凝土动态双轴拉压破坏准则的可行性和准确性. 另外, 通过试验数据的对比,

表 3 与文献 [5] 对比得到的式 (15) 各参数拟合结果

Table 3 Fitting results in Eq. (15) comparing with Ref. [5]

$\dot{\epsilon} / \text{s}^{-1}$	K_1	K_2	K_3	m
10^{-5}	—	0.831	1.000	2.800
10^{-4}	0.112	0.914	1.000	2.700
10^{-3}	-0.003	0.722	1.000	2.640
10^{-2}	0.055	0.905	1.000	2.510

表 4 与文献 [11] 对比得到的式 (15) 各参数拟合结果

Table 4 Fitting results in Eq. (15) comparing with Ref. [11]

$\dot{\epsilon} / \text{s}^{-1}$	K_1	K_2	K_3	m
10^{-5}	—	0.836	1.000	3.200
10^{-4}	0.231	0.975	1.000	3.000
10^{-3}	0.432	1.624	1.000	2.920
10^{-2}	0.497	2.207	1.000	2.730

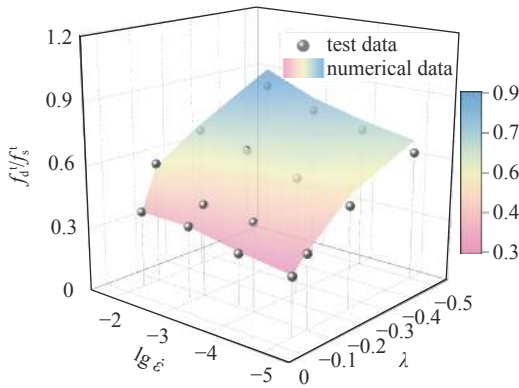


图 11 破坏准则拟合值与文献 [5] 试验值的对比结果

Fig. 11 Comparison between the fitted data and the experimental data of Ref. [5]

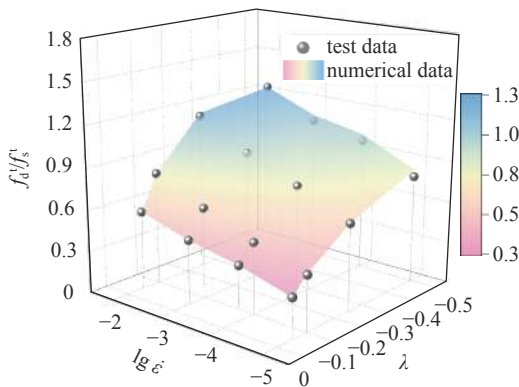


图 12 破坏准则拟合值与文献 [11] 试验值的对比结果

Fig. 12 Comparison between the fitted data and the experimental data of Ref. [11]

进一步得到了精炼后的混凝土动态双轴拉压破坏准则, 即

$$f_t^d / f_t^s = K_1 \lg \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s} \right) - K_2 e^{m\lambda} + 1 \quad (16)$$

需要说明的是, 受物理试验设备和条件限制, 目前可收集到的物理实验数据点仅处于低应变率、低侧应力比范围内. 因此, 本文只能暂且在此范围内对动态双轴拉压破坏准则的合理性进行了验证, 对于更高范围的物理试验验证工作将在未来开展.

4 结论

本文建立了混凝土立方体三维随机细观数值模型, 研究了在不同应变率和侧应力比下混凝土动态双轴拉压的破坏行为, 分别讨论了应变率和侧应力比对混凝土动态双轴强度的影响, 总结提出了混凝土动态双轴拉压强度破坏准则, 具体结论如下.

(1) 混凝土内部组分破坏模式随应变率增大而呈现不同形式. 中应变率范围内混凝土内部骨料破坏较多, 损伤区域较大.

(2) 在不同工况下, 混凝土动态主轴压缩强度和侧轴拉伸强度均随应变率的增大而逐渐增大. 但是, 动态主轴压缩强度随侧应力比增大而减小, 而侧轴拉伸强度随侧应力比增大而增大.

(3) 本文提出的混凝土动态双轴拉压强度破坏准则与现有研究成果相比, 扩大了应变率和侧应力比的适用范围, 凝练了破坏准则复杂的形式, 考虑了应变率和侧应力比的耦合作用, 并且得到了不同角度的验证.

参 考 文 献

- 1 Shang HS, Song YP. Experimental study of strength and deformation of plain concrete under biaxial compression after freezing and thawing cycles. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(10): 1857-1864
- 2 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015 (Code for design of concrete structures: GB 50010-2010. Beijing: China architecture and building press, 2015 (in Chinese))
- 3 Shang HS, Yang ST, Niu XY. Mechanical behavior of different types of concrete under multiaxial tension-compression. *Construction and Building Materials*, 2014, 73(12): 764-770
- 4 Shang SM, Song YP. Dynamic biaxial tensile-compressive strength and failure criterion of plain concrete. *Construction and Building Materials*, 2013, 40(3): 322-329
- 5 Wang HT, Sun HY, Shen JY, et al. Experimental study on dynamic biaxial tension-compression properties of hydraulic concrete. *Australian Journal of Civil Engineering*, 2021, 19(1): 1-9

- 6 Kupfer HB, Hilsdorf KH, Rush H. Behavior of concrete under biaxial stresses. *Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE*, 1969, 99(8): 853-866
- 7 Yu ZP, Huang Q, Li FR, et al. Experimental study on mechanical properties and failure criteria of self-compacting concrete under biaxial tension-compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(5): 1-10
- 8 张丽, 余振鹏, 沈丽等. 混凝土双轴拉-压试验研究与破坏准则分析. 混凝土, 2019, 10: 14-17, 21 (Zhang Li, Yu Zhenpeng, Shen Li, et al. Experimental study and failure criterion analysis of concrete under biaxial tension compression test. *Concrete*, 2019, 10: 14-17, 21 (in Chinese))
- 9 日本大坝委员会编. 坝工设计规范. 北京: 水利出版社, 1981 (Japan Dams Committee. Dam design code. Beijing: Water Conservancy Press, 1981 (in Chinese))
- 10 Shen L, Wang LC, Song YP, et al. Comparison between dynamic mechanical properties of dam and sieved concrete under biaxial tension-compression. *Construction and Building Materials*, 2017, 132: 43-50
- 11 沈璐, 宋玉普, 陈仁进. 湿筛二级配大坝混凝土动态双轴拉压强度与破坏准则. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2016, 32(4): 584-590 (Shen Lu, Song Yupu, Chen Renjin. Dynamic strength and failure criterion of two-graded wet-screened dam concrete under biaxial tension-compression loading. *Journal of Shenyang Jianzhu University*, 2016, 32(4): 584-590 (in Chinese))
- 12 Pan JL, Wu D, Qi CY. Mechanical behavior and failure criterion of high performance concrete under biaxial tension-compression loading condition. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2018, 27(3): 433-441
- 13 Tine T, Maciej W, Olivier R, et al. Finite element modelling of the biaxial behaviour of high-performance fibre-reinforced cement composites (HPFRCC) using Concrete Damaged Plasticity. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2015, 100: 47-53
- 14 Prasad M, Huang CJ, Song XB, et al. Concrete behavior in steel-concrete-steel panels subjected to biaxial tension compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 167: 105947
- 15 Jin L, Li J, Yu WX, et al. Mesoscopic simulations on the strength and size effect of concrete under biaxial loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 253(6): 107870
- 16 Jin L, Li J, Yu WX, et al. Size effect modelling for dynamic biaxial compressive strength of concrete: Influence of lateral stress ratio and strain rate. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 156(4): 103942
- 17 金浏, 余文轩, 杜修力. 应变率突增对混凝土动态拉伸破坏影响的细观模拟. 振动与冲击, 2021, 40(2): 39-48 (Jin Liu, Yu Wenxuan, Du Xiuli. Effect of the sudden increase of strain rate on concrete dynamic tensile failure based on 3 D meso-scale simulation. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(2): 39-48 (in Chinese))
- 18 Hordijk DA. Tensile and tensile fatigue behaviour of concrete; experiments, modelling and analyses. *Heron*, 1992, 37(1): 1-79
- 19 Lubliner J, Oliver J, Oller S, et al. A plastic-damage model for concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 1989, 25(3): 299-326
- 20 Lee J, Fenves GL. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8): 892-900
- 21 Zhang YH, Chen QQ, Wang ZY, et al. 3D mesoscale fracture analysis of concrete under complex loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 220: 106646
- 22 方秦, 还毅, 张亚栋等. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型的静力性能分析. 解放军理工大学自然科学版, 2007, 3: 254-260 (Fang Qin, Huan Yi, Zhang Yadong, et al. Investigation into static properties of damaged plasticity model for concrete in ABAQUS. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2007, 3: 254-260 (in Chinese))
- 23 Farahmandpour C, Dartois S, Quiertant M, et al. A concrete damage-plasticity model for FRP confined columns. *Materials and Structures*, 2017, 50(2): 156-173
- 24 Dilger WH, Koch R, Kowalczyk R. Ductility of plain and confined concrete under different strain rates. *Journal of the American Concrete Institute*, 1984, 81(1): 73-81
- 25 Yan DM, Lin G. Dynamic properties of concrete in direct tension. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(7): 1371-1378
- 26 商怀帅, 杨鲁生. 基于损伤理论的混凝土双轴压本构模型. 中南大学学报 (自然科学版), 2013, 44(1): 340-344 (Shang HS, Yang LS. Constitutive model of damage of concrete under biaxial compression. *Journal of Central South University*, 2013, 44(1): 340-344 (in Chinese))
- 27 申佳玉. 全级配混凝土动态双轴压试验及其损伤本构模型研究. [博士论文]. 大连: 大连交通大学, 2018 (Shen Jiayu. Experimental study on dynamic biaxial compression test and damage constitutive model of full-graded concrete. [PhD Thesis]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2018 (in Chinese))
- 28 陈仁进, 沈璐, 宋玉普. 大骨料混凝土动态双轴拉压强度试验研究. 大连理工大学学报, 2015, 55(3): 292-297 (Chen Renjin, Shen Lu, Song Yupu. Experimental study of dynamic strength of large aggregate concrete under biaxial tension-compression. *Journal of Dalian University of Technology*, 2015, 55(3): 292-297 (in Chinese))
- 29 王浩. 饱和大骨料混凝土双轴动态力学性能试验研究. [博士论文]. 大连: 大连理工大学, 2017 (Wang Hao. Study on the dynamic behavior of saturated large aggregate concrete under biaxial loading with tests. [PhD Thesis]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017 (in Chinese))
- 30 何振军. 高温前后高强混凝土多轴力学性能试验研究 [博士论文]. 大连: 大连理工大学, 2008 (He Zhenjun. Experimental study on the multiaxial mechanical behavior of plain high-strength concrete before and after high temperatures. [PhD Thesis]. Dalian: Dalian university of technology, 2008 (in Chinese))
- 31 刘学波. 湿筛大骨料混凝土冻融循环后多轴强度的试验研究 [博士论文]. 大连: 大连理工大学, 2009 (Liu Xuebo. Experimental study on the strength of wet-screened large aggregate concrete under multiaxial loads after freeze-thaw cycles. [PhD Thesis]. Dalian: Dalian university of technology, 2009 (in Chinese))
- 32 Shang HS, Song YP, Ou JP. Performance of plain concrete under biaxial tension-compression after freeze-thaw cycles. *Magazine of Concrete Research*, 2010, 62(2): 149-155
- 33 王立成, 刘汉勇, 王海涛. 冻融循环后轻骨料混凝土双轴拉 (劈拉) 压强度试验和破坏准则研究. 岩石力学与工程学报, 2006, S2: 3847-3853 (Wang Licheng, Liu Hanyong, Wang Haitao. Experiments and failure criterion of lightweight aggregate concrete after freeze-thaw cycling under biaxial stress of splitting tension and compression. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, S2: 3847-3853 (in Chinese))
- 34 Wang HL, Song YP. Behavior of mass concrete under biaxial compression-tension and triaxial compression-compression-tension. *Materials and Structures*, 2009, 42(2): 241-249
- 35 宋玉普, 陈飞, 张众等. 冻融环境下引气混凝土双轴拉-压强度和破坏准则的试验研究. 水利学报, 2006, 37(8): 932-937 (Song Yupu, Chen Fei, Zhang Zhong, et al. Strength reduction of air-entrained concrete under biaxial tension-compression after freeze-thaw cycles and its failure criterion. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(8): 932-937 (in Chinese))