

高压物理学报

超声动态载荷下混凝土过渡区域的损伤演化

王力晓 陈启东 刘鑫

Damage Evolution in Concrete Interfacial Transition Zone with Ultrasonic Dynamic Load

WANG Lixiao, CHEN Qidong, LIU Xin

引用本文:

王力晓, 陈启东, 刘鑫. 超声动态载荷下混凝土过渡区域的损伤演化[J]. 高压物理学报, 2020, 34(4):044205. DOI: 10.11858/gywlb.20190833

WANG Lixiao, CHEN Qidong, LIU Xin. Damage Evolution in Concrete Interfacial Transition Zone with Ultrasonic Dynamic Load[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(4):044205. DOI: 10.11858/gywlb.20190833

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190833>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超声动载荷下三维随机骨料混凝土的损伤

Damage of 3D Random Aggregate Concrete under Ultrasonic Dynamic Load

高压物理学报. 2020, 34(3): 034203 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190855>

具有不同界面相厚度的混凝土动态特性

Dynamic Mechanical Behavior of Concrete with Different Sizes of Interface Transition Zone

高压物理学报. 2017, 31(3): 249 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.03.006>

在顶爆作用下含裂隙锚固洞室的损伤演化及动态响应规律

Damage Evolution and Dynamic Response of Anchorage Caverns with a Crack under Top Explosion

高压物理学报. 2018, 32(6): 064103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180561>

超声波作用下SiO₂纳米颗粒的分离

Separation of Two SiO₂ Nanoparticles under Ultrasonic Vibration

高压物理学报. 2018, 32(4): 042401 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180526>

高速侵彻混凝土弹体在横向非对称作用下的动态响应

Dynamic Response of High-Speed Projectiles Penetrating into Concrete Target by Asymmetric Load

高压物理学报. 2017, 31(1): 73 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.01.011>

不同材料弹体超声速侵彻钢筋混凝土靶的结构破坏对比实验

Comparative Experiment on Structural Damage of Supersonic Projectiles with Different Metal Materials Penetrating into Reinforced Concrete Targets

高压物理学报. 2020, 34(2): 025101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190841>

超声动态载荷下混凝土过渡区域的损伤演化

王力晓¹, 陈启东², 刘鑫²

(1. 苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215000;

2. 常熟理工学院机械工程学院, 江苏 常熟 215500)

摘要: 混凝土是由粗骨料、水泥砂浆以及过渡区域组成的三相非均质复合材料。混凝土过渡区域 (Interfacial transition zone, ITZ) 是三相中最薄弱的环节, 且难以观测, 对混凝土的宏观力学性能有着重要影响。基于 ABAQUS 的 Dynamic/Explicit 模块, 建立了能反映混凝土基质、骨料形状和 ITZ 等真实细观结构的有限元模型, 并应用该模型研究了过渡区域对混凝土损伤破坏的影响。研究表明: 粗骨料的形状对混凝土损伤性能有一定影响, 当骨料形状为凸多边形时, 其抗损伤性能最弱; 混凝土的抗损伤性能随着 ITZ 强度的降低而减弱, 当 ITZ 的强度高干砂浆的 60% 时, 抗损伤性能逐渐增强; 随着 ITZ 厚度的增加, 混凝土的抗损伤能力减弱。

关键词: 混凝土; 过渡区域; 损伤性能; 超声波破碎

中图分类号: O347.3; TU528

文献标识码: A

混凝土作为一种非均质复合材料, 是目前城市道路与基础设施建设中应用最广泛的工程材料。混凝土经过长年累月的使用, 磨损破坏严重, 因此对这类混凝土材料的回收利用就显得非常重要, 现已受到国内外许多学者的广泛关注。而从细观层次研究混凝土的损伤破坏机理, 能够更有效地解决这类工程问题。

在混凝土三相介质中, 过渡区域 (Interfacial transition zone, ITZ) 是最弱相, 对混凝土损伤破坏性能有着重要影响。陈惠苏等^[1] 研究指出: ITZ 是水泥砂浆与骨料之间接触的薄层, 在实际应用中难以分辨, 并且对于不同骨料以及同一骨料的不同区域, 其性质不一致。徐晶等^[2] 发现, ITZ 厚度在 0~50 μm 之间, 并且其开裂方式是沿着 ITZ 开裂方向延伸的。Yang 等^[3] 通过研究 ITZ 的密实度与强度, 证明了 ITZ 的孔隙率高于水泥砂浆基体 2~3 倍, 从而影响混凝土结构的退化性能。Aquino 等^[4] 采用试验解析方法研究了 ITZ 的力学特性, 如 ITZ 的刚度、强度、抗压抗剪能力。Lee 等^[5] 利用数值模拟方法证明了 ITZ 对混凝土宏观弹性模量的影响。

王怀亮等^[6] 研究表明, 动态加载下混凝土的损伤模式与静态加载具有显著的区别。目前, 许多学者研究了 ITZ 性质对混凝土材料静态性能的影响^[4-5, 7]。王哲^[8] 利用电液伺服系统对混凝土试块进行了三轴加载试验, 探究其极限应力状态; Guinea 等^[9] 采用巴西圆盘试验与三点弯曲试验研究了 ITZ 对混凝土裂纹扩展的影响; 马巍等^[10] 以霍普金森压杆 (SHPB) 冲击试验为依据, 运用混凝土损伤理论, 分析了不同冲击加载下混凝土动态性能的变化。由此得出, 动态加载下混凝土损伤演化总是在瞬间形成, 最终导致破坏; 而静态加载下的混凝土损伤则是一种积累过程。

然而, 混凝土结构在工程中更多的是承受地震、碰撞甚至爆炸等动态荷载作用。本研究基于 ABAQUS 的 Dynamic/Explicit 模块, 完成超声波动态激励下混凝土损伤演化的有限元模拟。针对混凝土的三相细观结构, 建立能反映水泥砂浆、骨料形状和 ITZ 的混凝土有限元模型, 并利用该模型研究粗骨

* 收稿日期: 2019-09-06; 修回日期: 2019-09-29

作者简介: 王力晓 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事机械振动与混凝土仿真研究。

E-mail: wanglx94@163.com

通信作者: 陈启东 (1962—), 男, 教授, 主要从事机械振动与流体力学研究. E-mail: cq666@163.com

料形状、ITZ 厚度与强度对混凝土损伤演化特征的影响。研究成果可为动态加载下界面过渡区对混凝土的影响以及宏观破坏提供参考。

1 破碎混凝土的数值模拟

1.1 随机骨料模型的建立

采用随机骨料模型^[11]以描述混凝土试件的细观力学性能,该模型包括粗骨料、水泥砂浆和 ITZ。将骨料设置为圆形、椭圆形以及凸多边形 3 种形状,基于蒙特卡洛方法,通过参数化建模在规定区域内生成随机骨料^[11]。基本步骤为:(1)确定骨料投放的区域;(2)判断骨料中心位置,并计算所需骨料数量;(3)投放骨料并判断骨料是否互相侵入,删除不符合条件的骨料,并继续投放。在随机骨料模型中,骨料粒径的变化范围为 5~10 mm,并满足 Fuller 级配曲线。采用瓦拉文平面转化公式,将三维骨料的体积关系转化为二维骨料的面积关系,且满足粗骨料的体积分数为 40%。建立的 3 种骨料模型如图 1 所示。

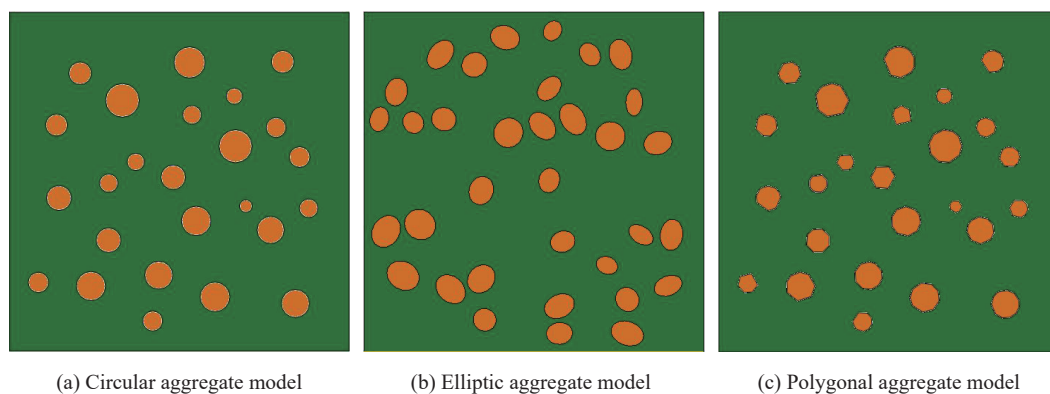


图 1 不同形状的随机骨料模型

Fig. 1 Random aggregate models of different shapes

根据研究,ITZ 的厚度介于 0~50 μm 之间^[12]。为了更全面地探讨 ITZ 厚度在数值模拟中对混凝土损伤破碎强度的影响,依次取 0~300 μm 厚度的 ITZ 界面放入计算模型^[13]。

1.2 细观模型的力学参数

采用实测 C30 强度的混凝土试件,运用 ABAQUS 软件中混凝土塑性损伤的本构关系,即 CDP 模型,泊松比统一取 0.167。研究表明,ITZ 强度介于砂浆的 40%~80% 之间^[12]。为了分析 ITZ 强度对混凝土损伤破坏的影响,取不同 ITZ 强度放入模型中进行计算。混凝土三相材料的力学参数如表 1 所示。

表 1 混凝土各相材料参数
Table 1 Concrete material parameters of each phase

Material	Elastic model/GPa	Poisson's ratio μ	Bulk density t/m^3	Expansion angle/(°)	Flow potential offset ε	Ratio of double and uniaxial compressive strength α_r	Constant stress ratio K_c
Aggregate	30.00	0.167	2.6				
Mortar	10.66	0.167	2.1	30	0.1	1.16	0.666 7
ITZ		0.167	2.1	30	0.1	1.16	0.666 7

根据过镇海模型^[14],把 C30 混凝土的应力-应变关系转化为受拉压的损伤关系,并输入具体的行为参数,为描述损伤状态,根据 CDP 模型定义损伤变量 d

$$d = 1 - (1 - S_c d_c)(1 - S_t d_t) \quad (1)$$

式中: d_c 、 d_t 分别表示混凝土在受压和受拉时损伤引起的刚度退化; S_c 、 S_t 为压应力和拉应力状态函数, 描述刚度恢复的影响。

损伤时的有效应力可以表示为

$$\sigma = (1 - d)\bar{\sigma} \quad (2)$$

式中: d 为损伤因子, 其值在 0~1 之间变化(无损到完全失效); $\bar{\sigma}$ 为有效应力。

有效应力和弹性应力之间的关系表达为

$$\bar{\sigma} = D_0^{\text{el}}(\varepsilon - \varepsilon^{\text{pl}}) \quad (3)$$

式中: D_0^{el} 为材料初始(无损)刚度, ε^{pl} 为塑性应变。应力-应变关系表示为弹性标量之间的损伤关系

$$\sigma = (1 - d)D_0^{\text{el}}(\varepsilon - \varepsilon^{\text{pl}}) \quad (4)$$

以单轴受力为例

$$D_c = (1 - d_c)D_0^{\text{el}} \quad (5)$$

$$D_t = (1 - d_t)D_0^{\text{el}} \quad (6)$$

由式 (5) 和式 (6) 及图 2 可知, 混凝土在受压和受拉损伤后, 从初始的 E_0 , 分别退化为 $(1 - d_c)E_0$ 、 $(1 - d_t)E_0$ 。

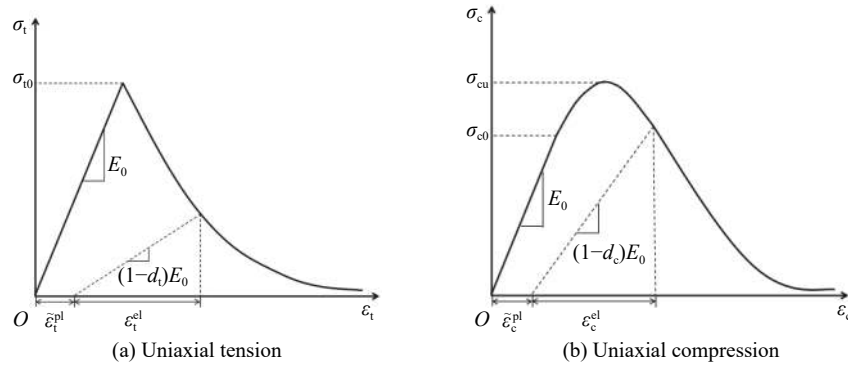


图 2 混凝土拉伸和压缩应力-应变曲线

Fig. 2 Tensile and compressive stress-strain curves of concrete

而 CDP 模型中的屈服函数为

$$F = (\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}_c^{\text{p}}) = \frac{1}{1 - \alpha} (\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\bar{\varepsilon})\langle\bar{\sigma}_{\text{max}}\rangle - \gamma\langle-\bar{\sigma}_{\text{max}}\rangle) - \bar{\sigma}_c(\bar{\varepsilon}_c^{\text{p}}) \quad (7)$$

式中: $\bar{q}$ 为等效应力, $\bar{p}$ 为有效静水压力, $\bar{\sigma}_{\text{max}}$ 为最大主应力, $\bar{\sigma}_c(\bar{\varepsilon}_c^{\text{p}})$ 为有效单轴受压强度, α 、 β 为无量纲常数。同时为了考虑剪胀性能, 在 CDP 模型中采用非关联流动法则, 塑性势函数

$$G = \sqrt{(\varepsilon\sigma_0 \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{q} \tan \psi \quad (8)$$

式中: ε 为势函数偏心率, σ_0 为单轴抗拉强度, ψ 为 $(\bar{q} - \bar{p})$ 面内高围压时的膨胀角。

1.3 超声动态载荷属性

混凝土模型底部施加位移边界条件, 限制其移动与旋转自由度。混凝土模型顶部加载应力载荷, 同时创建具有超声波频率(> 20 kHz)的应力波, 以模拟超声动态加载。各相间采用绑定约束, 以保证单元失效后各相间力的传递。粗骨料与水泥砂浆的网格尺寸为 1 mm, ITZ 网格尺寸为 0.1 mm。将超声波加载到混凝土, 完成混凝土破碎过程, 这是一个复杂的非线性过程。为了更好地模拟该过程, 本研究在 Dynamic/Explicit 模块下建立两个 Step, 第 1 个 Step 加载静载荷完成预紧, 即模型预加载过程。静态力

的大小与超声应力波最大幅值相同,加载时间为 $100\ \mu\text{s}$ 。第 2 个 Step 加载超声动态载荷,动态加载时间为 $100\ \mu\text{s}$,且应力波幅值在 $0\sim 25\ \text{MPa}$ 之间变化。在本研究的仿真过程中,选择频率为 $50\ \text{kHz}$ 、能量较集中的 HANNING 窗调制的正弦波,表达式为

$$F(t) = \sin(2\pi f_c t) \times h(t) \quad (9)$$

当 $0 \leq t \leq 100$ 时, $h(t) = \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi f_c t}{n}\right)\right]/2$; 当 $t > 100$ 时, $h(t) = 0$ 。其中:时间 t 的单位是 μs ; 为了不让信号发生重叠,本研究选取周期数 $n = 5$ 。最终的激励信号如图 3 所示。

1.4 数值模拟与试验结果的对比

3 种骨料模型在混凝土动态载荷下的损伤分布历程如图 4(a)、图 4(b)、图 4(c) 所示。在 3 种有限元模型中,粗骨料占比均为 40%,粗骨料粒径为

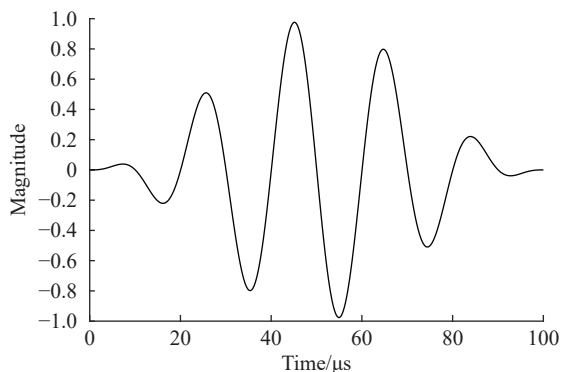


图 3 超声波激励信号

Fig. 3 Ultrasonic excitation signal

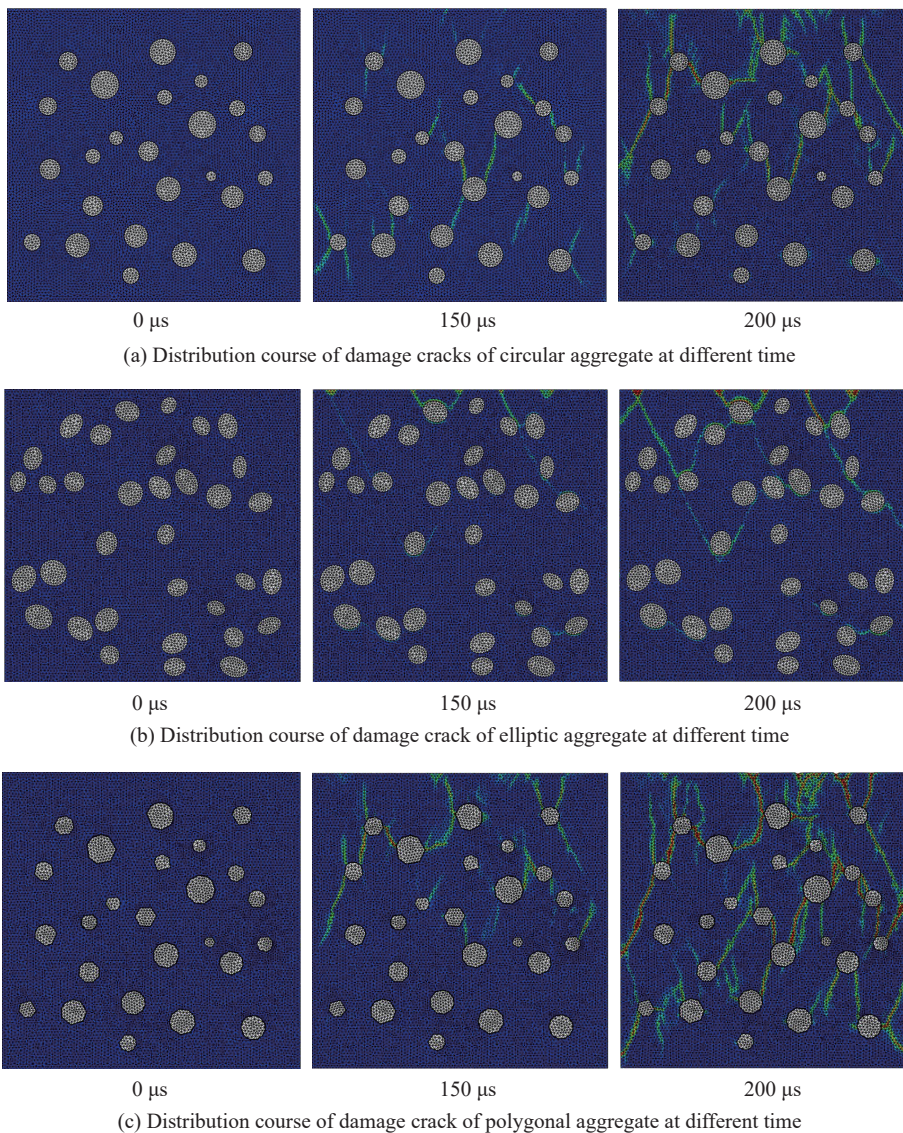


图 4 模拟试验的损伤裂纹分布

Fig. 4 Damage crack distributions of simulation tests

5~10 mm, 超声动态应力波幅值均为 10 MPa。从图 4 可看出, 超声波加载下混凝土损伤裂纹扩展的实质是 ITZ 内裂纹的联结与 ITZ 外裂纹的贯通, 而裂纹的走向则是随机的, 为典型的随机裂缝分布模式^[10]。

研究表明^[7], 超声波动态加载过程中混凝土裂纹最先在强度最弱的 ITZ 界面开始生成, 此时的裂纹是由混凝土中的 ITZ 界面发生损伤破坏引起的。随着加载时间的推移, 裂纹逐渐向水泥砂浆内部扩展, 并且部分裂纹联结成片。由于动载荷是从顶部施加的, 因此裂纹有着明显的向下蔓延的趋势。最后随着加载时间不断增加, 裂纹会贯穿整个混凝土导致混凝土试件的破碎。

超声动态载荷试验结果如图 5 所示。试验选择了尺寸为 100 mm × 100 mm 的立方体试块, 骨料粒径以及骨料占比都与数值模拟一致, 且骨料为凸多边形骨料。试验结果显示, 宏观破坏为典型的随机裂缝分布模式, 与数值模拟的结论相符合。为证明模型可靠性, 本研究进行了与文献 [15] 相同的冲击载荷试验, 经过与刘海峰等^[15]的试验对比, 可以看出, 本研究所建立的有限元模型及参数是可靠的, 可应用于超声波破碎混凝土激励研究。



图 5 超声动态载荷试验与裂纹分布

Fig. 5 Ultrasonic dynamic load experiment and crack distribution

2 模拟结果分析

2.1 骨料形状对混凝土损伤破坏的影响

已有研究表明^[12], 粗骨料的形状直接影响混凝土在单轴受压时的力学性能, 并且骨料表面的粗糙度也会对界面的黏结强度造成影响。在有限元分析中, 骨料表面的粗糙度不易通过直观参数表示。由于骨料形状不一, 其周围形成的每片微小 ITZ 之间都有一定夹角, 这种夹角会导致混凝土的 ITZ 率先产生应力集中。因此利用骨料形状的不规则程度来描述骨料形状对超声波破碎混凝土损伤性能的影响。选取 3 种模型, 其骨料占比同为 40%, 考虑到 ITZ 很薄, 可以近似认为其面积大致相等, 厚度为 50 μm , 强度为砂浆的 40%, 3 种骨料形状的损伤-动态应力曲线如图 6 所示。当超声动态应力波峰值为 10 MPa 时, 凸多边形骨料的累积损伤值为 0.440, 而圆形骨料与椭圆形骨料的累积损伤值为 0.354 和 0.219。从图 6 中可以看出, 由于凸多边形骨料的边界凸出, 性质不稳定, 其形状相对于其他两种骨料更加不规则, 因此在超声动态载荷条件下, 凸多边形骨料对载荷条件变化更敏感, 也更易破坏^[16]。因此, 在随后的数值模拟中, 在骨料体积分数不变的情况下, 使用凸多边形骨料进行有限元模拟。

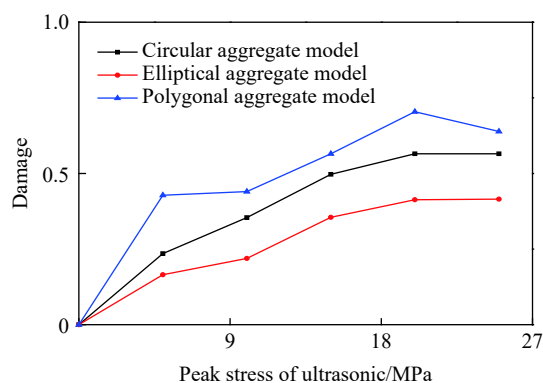


图 6 不同骨料形状的损伤应力

Fig. 6 Damage stress for different aggregate shapes

2.2 ITZ 强度对混凝土损伤破坏的影响

ITZ 的强度依次取为砂浆的 20%~80% 进行计算,得到的损伤应力曲线如图 7 所示。每种弹性模量计算得到的混凝土损伤累积值分别为 0.716、0.680、0.704、0.665、0.635、0.621、0.628。由图 7 可知,随着 ITZ 强度的增大,在相同超声动载荷条件下的损伤值逐步减小,表明 ITZ 强度越高,混凝土越难损伤破坏。从图 7 还能看出,ITZ 强度为混凝土的 60%、70%、80% 时,这 3 组数据与其他数据有着明显的差别,表明一旦 ITZ 强度低于混凝土的 60% 时,混凝土的承载能力明显降低;当超声动载荷达到 25 MPa 时,部分数据段呈现微小下降趋势,这是由于混凝土承受过大的动载荷而导致混凝土内局部应力过于集中,损伤能量无法顺利传导,这也解释了图 6 出现下降现象的原因。根据最弱环理论^[17],ITZ 作为三相材料中最薄弱的环节,其弹性模量决定了试件的损伤破坏强度。

2.3 ITZ 厚度对混凝土损伤破坏的影响

为了研究 ITZ 厚度对混凝土抗损伤性能的影响^[17],将模型中 ITZ 厚度依次设为 0、50、100、150、200、300 μm ,其中 0 μm 表示二相骨料模型中不包含 ITZ 界面,结果如图 8 所示。由图 8 可知,300 μm 界面的抗损伤能力明显低于其余厚度模型,说明 ITZ 作为三相界面中的最弱相,影响着混凝土的整体强度,对混凝土的抗损伤破坏性能产生不利影响。随着 ITZ 厚度的增加,混凝土抗损伤能力下降,所能达到的损伤最大值也随之增加,且增长幅度随动载荷逐渐攀升。研究表明 ITZ 厚度对混凝土抗载荷性能产生不利影响,ITZ 越厚,混凝土抗损伤破坏能力越弱。

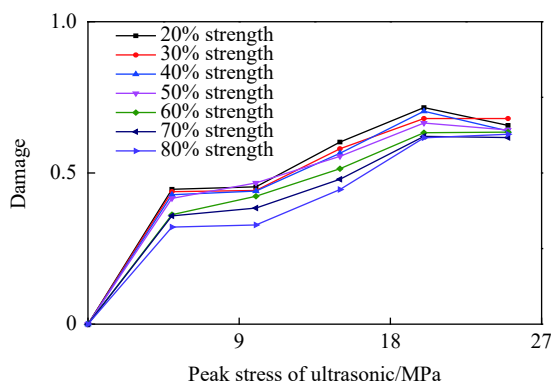


图 7 不同 ITZ 强度的损伤应力

Fig. 7 Damage stress maps of different ITZ intensities

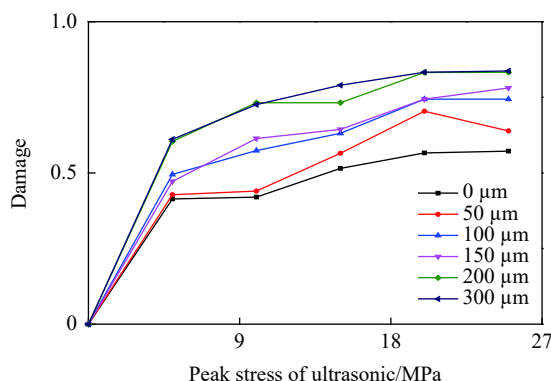


图 8 不同 ITZ 厚度的损伤应力

Fig. 8 Damage stress maps of different ITZ thicknesses

3 结 论

参照超声波破碎混凝土试验装置,在 ABAQUS 中建立了混凝土细观有限元计算模型,对超声动载荷下的混凝土损伤演化进行了模拟。将模拟结果与试验结果进行对比,探讨了 ITZ 界面的强度、厚度以及粗骨料形状对混凝土损伤破坏强度的影响。

(1) ITZ 作为混凝土三相材料中的最弱相,对混凝土的强度有着很大的影响。超声波破碎混凝土的强度随着 ITZ 强度的降低而降低,当低于水泥砂浆强度的 60% 时,损伤破坏强度明显降低。

(2) 随着 ITZ 厚度的增加,混凝土的抗损伤破坏能力减弱。

(3) 粗骨料形状的不同会对混凝土损伤破坏造成影响。凸多边形骨料相对于其他两种骨料形状更加不规则,因此在相同条件下凸多边形骨料对条件变化更敏感也更易损伤破坏。

参考文献:

- [1] 陈惠苏, 孙伟, STROEVEN P. 水泥基复合材料集料与浆体界面研究综述 (二): 界面微观结构的形成、劣化机理及其影响

- 因素 [J]. *硅酸盐学报*, 2004, 32(1): 70–79.
- CHEN H S, SUN W, STROEVEN P. Interfacial transition zone between aggregate and paste in cementitious composites (II): mechanism of formation and degradation of interfacial transition zone microstructure, and its influence factors [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2004, 32(1): 70–79.
- [2] 徐晶, 王先志. 纳米二氧化硅对混凝土界面过渡区的改性机制及其多尺度模型 [J]. *硅酸盐学报*, 2018, 46(8): 1053–1058.
- XU J, WANG X Z. Effect of nano-silica modification on interfacial transition zone in concrete and its multiscale modelling [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 46(8): 1053–1058.
- [3] YANG C C, CHO S W. Approximate migration coefficient of percolated interfacial transition zone by using the accelerated chloride migration test [J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35: 344–350.
- [4] AQUINO M J, LI Z, SHAH S P. Mechanical properties of the aggregate and cement interface [J]. *Advanced Cement Based Materials*, 1995, 2(6): 211–223.
- [5] LEE K M, PARK J H. A numerical model for elastic modulus of concrete considering interfacial transition zone [J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(3): 396–402.
- [6] 王怀亮, 宋玉普. 多轴应力状态下混凝土的动态强度准则 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46(4): 93–97.
- WANG H L, SONG Y P. A dynamic strength criterion of concrete under multiaxial stress state [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46(4): 93–97.
- [7] 杜修力, 金浏. 考虑过渡区界面影响的混凝土宏观力学性质研究 [J]. *工程力学*, 2012, 29(12): 72–79.
- DU X L, JIN L. Research on the influence of interfacial transition zone on the macro-mechanical properties of concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(12): 72–79.
- [8] 王哲. 沿应变路径准静态加载时混凝土的极限状态现象 [J]. *北京交通大学学报*, 2010, 34(1): 30–34.
- WANG Z. Phenomena of concrete limit state under quasi-static loading along strain paths [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2010, 34(1): 30–34.
- [9] GUINEA G V, EL-SAYED K, ROCCO C G, et al. The effect of the bond between the matrix and the aggregates on the cracking mechanism and fracture parameters of concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(12): 1961–1970.
- [10] 马巍, 任建伟, 胡俊, 等. 基于不同加载制度的轻骨料混凝土动态冲击性能 [J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(4): 974–982.
- MA W, REN J W, HU J, et al. Dynamical shocking property of light-weighting aggregates concrete based on impact loading regimes [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(4): 974–982.
- [11] 阮欣, 李越, 金泽人, 等. 混凝土二维细观骨料建模方法综述 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(5): 604–612.
- RUAN X, LI Y, JIN Z R, et al. Review of two-dimensional meso-modeling methods of concrete aggregate [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2018, 46(5): 604–612.
- [12] 刘建南, 张昌锁. 过渡区界面对混凝土劈裂性能影响的试验与数值模拟 [J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(18): 269–274.
- LIU J N, ZHANG C S. Experiment and numerical simulation on the influence of interfacial transition zone on concrete splitting performance [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(18): 269–274.
- [13] YANG C C. Effect of the interfacial transition zone on the transport and the elastic properties of mortar [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2003, 55(4): 305–312.
- [14] 过镇海, 李卫. 混凝土在不同应力-温度途径下的变形试验和本构关系 [J]. *土木工程学报*, 1993, 26(5): 58–69.
- GUO Z H, LI W. Deformation testing and constitutive relationship of concrete under different stress-temperature paths [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1993, 26(5): 58–69.
- [15] 刘海峰, 韩莉. 二维骨料随机分布混凝土的动态力学性能数值模拟 [J]. *高压物理学报*, 2016, 30(3): 191–199.
- LIU H F, HAN L. Numerical simulation of dynamic mechanical behavior of concrete with two-dimensional random distribution of coarse aggregate [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2016, 30(3): 191–199.
- [16] 蒋橙炜, 陈启东, 顾泽堃. 超声破碎混凝土的力学模型与仿真分析 [J]. *机械制造与自动化*, 2019, 48(2): 84–88.
- JIANG C W, CHEN Q D, GU Z K. Mechanical model and simulation analysis of ultrasonic crushed concrete [J]. *Machine Building & Automation*, 2019, 48(2): 84–88.
- [17] WEIBULL W. A statistical distributions function of wide applicability [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1951, 18: 293–297.

Damage Evolution in Concrete Interfacial Transition Zone with Ultrasonic Dynamic Load

WANG Lixiao¹, CHEN Qidong², LIU Xin²

(1. *School of Mechanics, Soochow University, Suzhou 215000, Jiangsu, China;*

2. *School of Mechanical Engineering, Changshu Institution of Technology, Changshu 215500, Jiangsu, China*)

Abstract: Concrete is a three-phase material composed of coarse aggregate, cement mortar and interfacial transition zone (ITZ). The ITZ is the weakest of the three phases and difficult to observe, but it has a significant impact on the efficiency of concrete crushing. In order to study the impact of ITZ on the damage performance of concrete crushing, the finite element model that reflects real mesoscopic structure of concrete matrix, aggregate shape, and ITZ was established on the Dynamic/Explicit model in ABAQUS. The results showed that the shape of coarse aggregate has a certain influence on the damage performance of concrete, and when the shape is convex polygonal, its damage resistance is the weakest. The damage resistance ability of concrete decreases with the decrease of ITZ strength. When ITZ strength is higher than 60% of mortar, the damage resistance ability gradually increases. As the thickness of the ITZ area increases, the damage resistance ability decreases.

Keywords: concrete; interfacial transition zone; damage performance; ultrasonic crushing