

围压作用下再生混凝土细观数值模拟研究

Mesoscopic Numerical Simulation of Recycled Concrete under Confining Pressure

王 宇¹, 吴亚敏²

1. 济南东铁轨道交通建材有限公司, 山东 济南 250000;
2. 郑州工业应用技术学院 建筑工程学院, 河南 新郑 451100)

摘要: 为对高围压下再生混凝土进行细观分析, 在有限元软件中应用改进的混凝土塑性损伤模型, 通过 Python 建立五相随机骨料模型, 探究 3、15 及 24 MPa 围压下不同再生粗骨料取代率时的混凝土应力-应变曲线与损伤破坏形态。结果表明: 该材料模型的准确度远高于传统模型, 其应力-应变曲线发展趋势及结果与试验值基本相同, 最大差距不超过 10%; 该方法能有效模拟混凝土在围压下的力学性能, 低围压时混凝土的破坏裂缝较多, 高围压时混凝土产生的初始裂缝较多, 但最终只会形成 1 条破坏裂缝。

关键词: 再生混凝土; 围压; 细观有限元; 混凝土塑性损伤模型

中图分类号: TU528.041

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 05-0038-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.05.008

WANG Yu¹, WU Yamin²

- (1. Ji'nan East Rail Transit Building Materials Co., Ltd., Ji'nan 250000, China;
2. School of Architectural Engineering, Zhengzhou University of Industrial Technology, Xinzheng 451100, China)

Abstract: To perform a microscale analysis on recycled concrete under high confinement pressure, an improved concrete damage plasticity model was applied to finite element software. A five-phase random aggregate model was established using Python to investigate the stress-strain curve and damage failure morphology of concrete under 3, 15, and 24 MPa confinement pressures with different replacement rates of recycled coarse aggregates. The results show that the accuracy of this material model is much higher than that of traditional models, and its stress-strain curve development trend and results are basically the same as the experimental values, with a maximum difference of no more than 10%; This method can effectively simulate the mechanical properties of concrete under confinement pressure, when the confinement pressure is low, there are more failure cracks in the concrete. When the confinement pressure is high, there are more initial cracks in the concrete, but ultimately only one failure crack will form.

Keywords: recycled concrete; confining pressure; mesoscopic finite element; concrete damage plasticity model

0 引言

再生混凝土是一种将废弃混凝土经过破碎后再利用的环保型混凝土, 近年来在建筑领域得到广泛的应用。国内外学者对再生混凝土的力学性能研究已取得很多成果, HAMEED 等^[1]发现 100% 取代率的再生混凝土抗压性能比普通混凝土低 26%。肖建

庄等^[2]研究了再生混凝土的细观损伤本质与应力 - 应变本构关系。白卫峰等^[3]经过统计发现建筑物中的混凝土长期处于多轴受力状态,在这种情况下其力学特性与单轴受力有较大差异;而再生混凝土中存在着大量的旧混凝土,其单轴受压性能较普通混凝土更低。陈宇良等^[4]发现三轴受压时混掺玻璃纤维的再生混凝土应力 - 应变曲线的上升段斜率远大于普通混凝土。陈宗平等^[5-6]对再生混凝土在三轴受压时的受力性能进行了大量试验研究,发现再生骨料取代率对围压作用下的混凝土峰值应力影响不大,并对应力 - 应变本构关系进行了推导分析。

胡力绳等^[7]认为细观分析是深入研究混凝土不同层次组合与结构内在联系的有效方法,主要通过数值模拟建立细观模型,揭示再生混凝土不同界面过渡区的裂缝发展规律;邢心魁等^[8]通过离散元方法揭示了单轴受压下旧砂浆强度与厚度对再生混凝土细观破坏的影响;邓友生等^[9]通过建立二维随机骨料模型对纳米碳酸钙改性再生混凝土单轴受压时的力学特性进行了分析。当前混凝土细观分析中最常用的材料本构关系为混凝土塑性损伤模型 (Concrete Damage Plasticity Model, CDPM),这是一种基于单一的拉伸和压缩损伤系数定义的模型,其仅适用于单调荷载作用与较低围压时的场景,当围压升高时 CDPM 不再适用,使细观模拟大多集中于单轴受力的情况,对于围压下的再生混凝土细观模拟研究还较少。鉴于此,通过引入 Grassl 等^[10]开发的混凝土塑性损伤模型 2 (Concrete Damage Plasticity Model2, CDPM2) 和 Python 结合有限元方法建立二维随机骨料再生混凝土细观模型^[5],对围压作用下的再生混凝土细观力学进行分析,以期对围压下再生混凝土的细观数值分析提供新方法,揭示再生混凝土塑性

损伤发展规律。

1 细观模拟建模

通过有限元软件 ABAQUS 结合 Python 二次开发完成再生混凝土细观随机骨料模型的建立,混凝土材料部分采用 ABAQUS 用户自定义子程序 VUMAT 实现 CDPM2 材料。

1.1 骨料级配

通过混凝土最大连续级配理论的二维平面转化公式^[11],计算出平面内任意点骨料直径 $D < D_0$ 时的概率。

$$\begin{cases} P = P_k (1.065q^{\frac{1}{2}} - 0.053q^4 - 0.012q^6 - \\ 0.0045q^8 + 0.0025q^{10}) \\ q = D_0/D_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_k 为混凝土与骨料的体积比; D_0 为骨料颗粒粒径; D_{\max} 为骨料的颗粒最大粒径。

1.2 模型建立

再生混凝土分为骨料、旧砂浆 - 骨料界面过渡层 (ITZ1)、旧硬化砂浆层、新砂浆 - 骨料界面过渡层 (ITZ2) 以及新硬化砂浆组成的五相非均质复合材料^[12]。以非再生混凝土为基准对照组,以再生混凝土取代率为 30%、70% 和 100% 为主要分析组,试块尺寸为 100 mm × 200 mm,骨料粒径为 5 ~ 20 mm,根据式 (1) 即可计算出不同粒径骨料的数量。通过 Python 编写基于 Monte-Carlo 算法的脚本随机生成圆形骨料,并在此基础上建立多重界面模型。界面过渡区 (ITZ) 层定义为 0.4 mm 厚,旧硬化砂浆层定义为 0.7 mm 厚,通过 ABAQUS-Python 联合建立再生混凝土随机骨料模型,如图 1 所示。网格尺寸设置为 1.5 mm,网格划分情况如图 2 所示 (以取代率

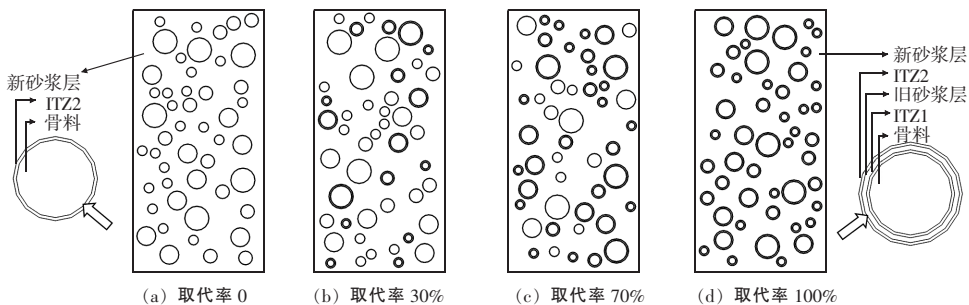


图 1 不同骨料取代率下的再生混凝土模型

Fig. 1 Modelling of recycled concrete with different aggregate replacement rates

材料科学

30%为例), 加载方式采用三轴加载, 先在模型侧面施加 3、15、24 MPa 围压, 待稳定后在模型顶面施加应力来模拟压缩加载情况, 研究不同围压作用下的再生混凝土性能。

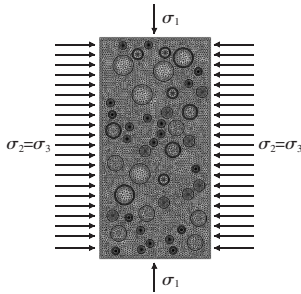


图2 网格划分与加载设置
Fig.2 Grid division and loading setup

1.3 材料参数设置

细观分析中各组成材料参数的取值无法直接通过试验测得, 现有研究主要将混凝土的整体参数近似作为砂浆材料参数, 其余材料通过简单的折减得到。已有研究通过分析提出了具体的参数计算公式, 但多不成体系, 且不适用于再生混凝土。通过收集整理, 系统地提出再生混凝土各细观组分材料参数的计算方法, 如下所示:

砂浆强度通过文献 [13] 中的修正公式计算:

$$f_{\text{mor}} = f_{\text{con}}(0.71\varphi + 1) \quad (2)$$

式中: f_{mor} 为砂浆抗压强度; f_{con} 为混凝土抗压强度; φ 为粗骨料的体积分数。

采用文献 [14] 的公式即由砂浆抗压强度 f_{mor} 推导出砂浆的弹性模量 E 与抗拉强度 f_{mor}^t :

$$E = 1000(7.7 \ln f_{\text{mor}} - 5.5) \quad (3)$$

$$f_{\text{mor}}^t = 1.4 \ln f_{\text{mor}} - 1.5 \quad (4)$$

根据相关文献 [15-16] 研究, 选取 ITZ2 的强度为砂浆强度的 70%, ITZ1 的强度为砂浆强度的 50%。由于骨料强度明显高于其余组分, 不考虑骨

料的破坏, 将骨料定义为弹性, 弹性模量取 70 GPa, 泊松比为 0.16。

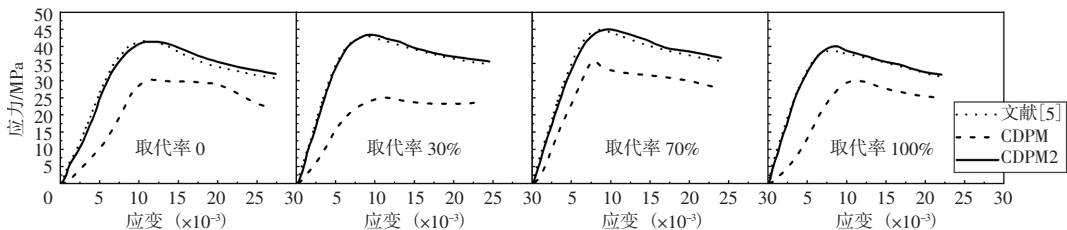
为对比分析 CDPM2 材料本构, 分别赋予模型 CDPM 与 CDPM2 材料参数, 其中 CDPM 的材料参数根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》计算得出。CDPM2 所需参数主要在 ABAQUS 的“User Material”中定义, 分别为: 弹性模量、泊松比、单轴抗压强度、单轴抗拉强度、断裂能以及延展性测量参数 (a_h 、 b_h 、 c_h 、 d_h 、 G_F 和 a_s , 依据文献 [10] 中的建议取值以及试算结果, 最终取值分别为 0.08、0.003、2、 1.0×10^{-6} 、0.01、15), 断裂能 G_F 根据文献 [17] 公式计算:

$$G_F = (0.0469D_{\text{max}}^2 - 0.5D_{\text{max}} + 26)(0.1f_{\text{con}})^{0.7} \quad (5)$$

2 结果与讨论

2.1 应力-应变曲线

图3为不同再生混凝土取代率与不同围压作用下的混凝土应力-应变曲线。对比试验数据与应用 CDPM 与 CDPM2 本构模型的结果, CDPM2 的结果与文献中的试验数据较为接近, 不论围压大小, 其与试验之间的最大差距均不超过 10%, 且其曲线的基本发展趋势与试验值几乎相同, 在低围压下呈现先增大后减小的趋势, 较高围压下则表现为逐渐上升。横向对比不同的再生混凝土取代率, 围压作用下的再生混凝土性能基本不受取代率的影响, 这是由于围压会增加再生粗骨料破碎, 这一过程中会吸收水分, 从而提升混凝土的水胶比使强度提升, 但由于再生粗骨料的较多微裂缝又使强度有所下降, 二者相互抵消使强度基本维持不变。而 CDPM 在低围压下的趋势基本与试验值相同, 但数值显著小于试验值, 随着围压的增加, CDPM 与试验值之间的差距逐渐变大, 且曲线发展趋势出现较大差异, 形成了先上升后下降的过程。上述分析表明, 数值模拟中 CDPM



(a) 3 MPa

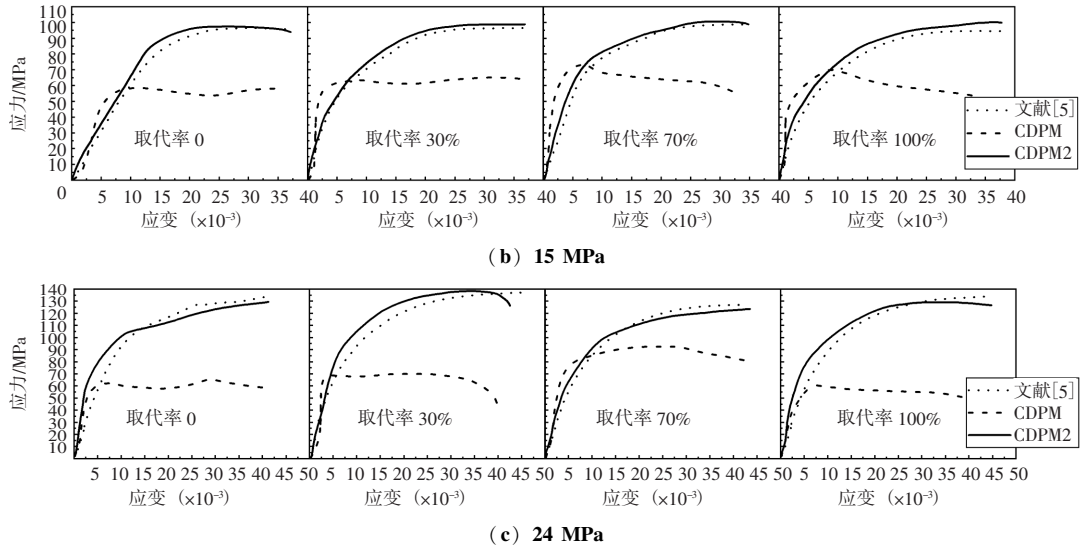


图3 不同方法得出的再生混凝土应力-应变曲线

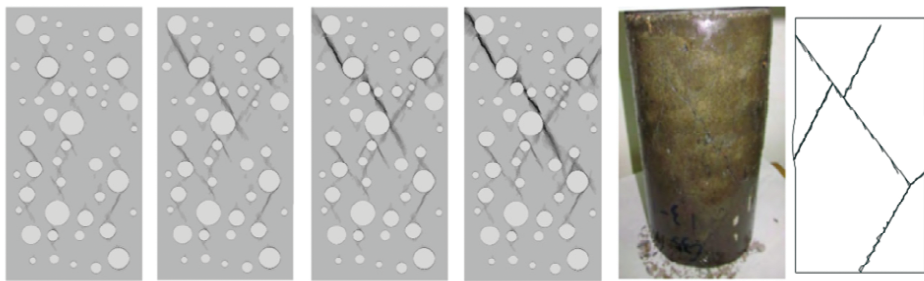
Fig. 3 Stress-strain curves of recycled concrete derived from different methods

材料本构仅适用于低围压状态，而CDPM2在不同围压强度作用下均具有有效性与优越性。

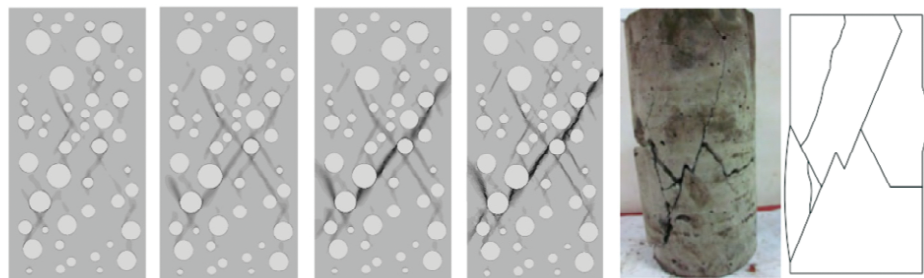
2.2 破坏形态

提取采用CDPM2本构的各围压下细观混凝土损伤发展情况，并与试验破坏情况对比，如图4所示。由于混凝土的破坏和损伤均与再生粗骨料的取代率无关^[5]，因此不考虑再生取代率的影响。通过细观数值模拟可以有效观察混凝土的裂纹发展情况，裂缝基本率先出现在中心处骨料周围的ITZ1或ITZ2层，随后裂缝发展到砂浆层，形成2个ITZ层间的贯

穿裂缝，多个这样的贯穿裂缝逐渐开裂并向四周延伸，直至最终发生破坏。随着围压的增加，混凝土内部出现的初始裂缝也随之增加。但低围压下的最终破坏裂缝较多，混凝土破坏为多个碎块。高围压下最终破坏裂缝的出现均要早于低围压，除了破坏裂缝外其余裂缝的发展较小，基本仅形成单一的主裂缝。基于CDPM2的混凝土最终裂纹发展情况基本与试验结果相同，拟合程度较好。因此，对于再生混凝土，考虑改善ITZ1与ITZ2层的强度，缓解ITZ层的开裂时间，是提升其整体强度的关键。



(a) 3 MPa



(b) 15 MPa

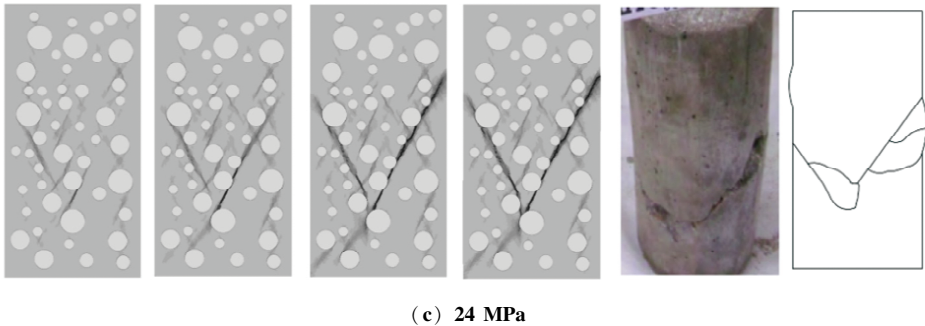


图 4 不同围压下再生混凝土损伤过程

Fig. 4 Damage process of recycled concrete under different perimeter pressures

3 结论

将 CDPM2 材料本构模型运用于有限元细观混凝土模拟中, 与试验研究相对比验证了 CDPM2 的有效性, 主要结论如下:

(1) Python 结合有限元软件进行随机骨料建模的方法与再生混凝土真实结构一致, 根据混凝土整体力学性能推算各细观材料性能的方法与 CDPM2 本构相结合得到的结果与试验值基本相同, 具有较强可行性。

(2) 相较于传统的 CDPM, 在考虑围压时采用 CDPM2 本构进行混凝土的细观模拟能获得较好的效果, 尤其是高围压作用时得到的结果与试验拟合程度较好, 最大差值不超过 10%, 且应力-应变曲线的发展趋势基本一致, 可以满足工程需要。

(3) 细观模拟得出混凝土裂缝均出现在 ITZ 层并逐渐向砂浆层发展。在低围压作用时混凝土的最终破坏裂缝较多, 高围压时混凝土的初始裂缝较多, 但最终形成的破坏裂缝仅有 1 条。

参 考 文 献

[1] HAMEED R, TAHIR M, ZAIBU N, et al. Impact of compression casting technique on the mechanical properties of 100% recycled aggregate concrete [J]. Sustainability, 2023, 15 (10): 8153.

[2] 肖建庄, 唐宇翔, 张凯建, 等. 再生粗骨料混凝土应力-应变关系 [J]. 工程力学, 2024, 41 (2): 43-55.

[3] 白卫峰, 王路静, 管俊峰, 等. 考虑围压效应的混凝土统计损伤模型 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29 (6): 1500-1511.

[4] 陈宇良, 王双翼, 李洪, 等. 复杂应力状态下玻璃纤维再生混凝土损伤演变及应力-应变本构关系研究 [J/OL]. 材料导报, 1-16 [2024-09-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/>

50. 1078. TB. 20240325. 1338. 002. html.

[5] 陈宗平, 李玲, 陈宇良, 等. 再生混凝土三轴受压力学性能试验研究 [J]. 工程力学, 2015, 32 (7): 56-63.

[6] 陈宗平, 陈宇良, 徐金俊, 等. 多轴受力状态下再生混凝土的破坏准则及应力-应变本构关系研究 [J]. 土木工程学报, 2015, 48 (12): 23-33. DOI: 10.15951/j.tmgx. 2015. 12. 006.

[7] 胡力绳, 曹浪, 王红强, 等. 混凝土细观试验方法及力学理论研究综述 [J]. 混凝土与水泥制品, 2022 (9): 33-37.

[8] 邢心魁, 唐润东, 刘晶, 等. 再生混凝土单轴压缩破坏过程细观离散元研究 [J]. 混凝土, 2024 (6): 110-115, 120.

[9] 邓友生, 张克钦, 付云博, 等. 纳米碳酸钙改性再生混凝土抗压性能研究 [J]. 公路, 2023, 68 (4): 319-324.

[10] GRASSL P, XENOS D, NYSTRÖM U, et al. CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 50 (24): 3805-3816.

[11] SCHUTTER GD, TAERWE L. Random partical model for concrete based on Delaunay triangulation [J]. Materials and Structures. 1993, 26 (2): 67-73.

[12] 刘琼, 肖建庄, 李文贵. 再生混凝土轴心受拉性能试验与格构数值模拟 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2010, 42 (增刊1): 119-124.

[13] 阮征, 陈力, 洪建, 等. 骨料和砂浆等影响混凝土强度的细观层次机理分析 [J]. 建筑材料学报. 2014, 17 (6): 952-958.

[14] KOHEI N, YASUHIKO S, TAMON U. Mesoscopic simulation of failure of mortar and concrete by 2D RBMS [J]. Journal of Advanced Concrete Technology. 2004, 3 (2): 359-374.

[15] SONG ZH, LU Y. Mesoscopic analysis of concrete under excessively high strain rate compression and implications on interpretation of test data [J]. International Journal of Impact Engineering. 2012, 46 (6): 41-55.

[16] LIAO K Y, CHANG P K, PENG Y N, et al. A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete [J]. Cement and Concrete Research. 2004, 34 (6): 977-989.

[17] CEB, 1991. CEB-FIP Model Code. Design Code, Thomas Telford, London, 1990.