

基于摩擦脱黏法三维细观混凝土受压模型

刘利宝,李效民,程昱,李艺烁,刘茜茜,白峰涛

(中国海洋大学土木工程系,266000 青岛)

摘 要:为了解决传统三维细观混凝土数值模型难度大、效率低,阻碍了其应用等问题,采用一种三维模型中摩擦脱黏失效方法,避免了传统建立实体过渡层或编写程序进行黏结单元插设的复杂性。采用简便高效的方法替代建立实体过渡层,其用时仅为同条件下建立实体过渡层的1/6左右,且在保证其结果准确性的基础上,大大提升了计算效率。其适用于建立碎石、珊瑚等骨料的三维细观混凝土模型,可用于模拟单轴受压、单轴受拉、单轴劈裂等多种应力条件。通过此数值模型计算分析得出:骨料的弹性模量和体积占比影响混凝土整体的弹性模量和峰值强度;骨料的弹性模量、体积占比均与混凝土整体弹性模量成正比,与混凝土的整体强度成反比;骨料的弹性模量与体积占比相比,体积占比对混凝土整体强度的影响相对更大,这些因素将帮助配置性能更优的混凝土时提供参考。

关键词:随机骨料模型;摩擦脱黏;细观混凝土;数值模拟;单轴受压

中图分类号:TU528

文献标志码:A

文章编号:1000-4939(2025)05-1129-10

Compression simulation of three-dimensional meso-scale concrete based on friction debonding method

LIU Libao, LI Xiaomin, CHENG Yu, LI Yishuo, LIU Xixi, BAI Fengtao

(Department of Civil Engineering, Ocean University of China, 266000 Qingdao, China)

Abstract: This study aimed to solve the problems that the traditional 3D meso-concrete numerical model is difficult and inefficient, which hinders its application. In this paper, a method of friction debonding failure in three-dimensional model is adopted, which avoids the complexity of traditional establishment of solid transition layer or programming of bonding element insertion. A simple and efficient method is employed to replace the solid transition layer, which takes only 1/6 of the time of the establishment of solid transition layer under the same conditions. This method ensures the accuracy of the results and greatly improves the calculation efficiency. It is suitable for establishing three-dimensional meso-concrete models of crushed stone, corals and other aggregates, and can be used to simulate various stress conditions such as uniaxial compression, uniaxial tension, and uniaxial splitting. Through numerical simulation, it is concluded that the elastic modulus and volume proportion of aggregate affect the overall elastic modulus and peak strength of

收稿日期:2022-11-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51979257)

通信作者:白峰涛,副教授。E-mail:baifengtao@ouc.edu.cn

引用格式:刘利宝,李效民,程昱,等. 基于摩擦脱黏法三维细观混凝土受压模型[J]. 应用力学学报, 2025, 42(5):1129-1138.

LIU Libao, LI Xiaomin, CHENG Yu, et al. Compression simulation of three-dimensional meso-scale concrete based on friction debonding method[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2025, 42(5):1129-1138.

concrete. The elastic modulus and volume proportion of aggregate are proportional to the overall elastic modulus of concrete and inversely proportional to the overall strength of concrete. The elastic modulus of aggregate has a greater influence on the overall strength of concrete than the volume ratio. These factors will provide us with reference when configuring better performing concrete.

Key words: random aggregate model; friction debonding; meso-scale concrete; numerical simulation; uniaxial compression

宏观混凝土构件的力学分析有着简单高效,在一定程度上体现破坏位置以及破坏形态等特点,被广泛用于混凝土数值模拟中,但由于宏观的整体性,无法揭示内部组分的随机非均匀性以及内部裂纹的扩展状态。为了更好地了解混凝土内部破坏形态,更直观地展现内部裂纹的扩展,学者们对混凝土开展了细观尺度的随机非均匀数值模拟。

二维模型具有计算效率高,模型建立简单等特点,因此二维模型成为了众多学者^[1-3]首选的方式。陈青青^[2]进行了有无孔隙的二维多边形的模拟,探讨了孔隙形状等因素变化对其强度的影响。但二维模拟中指出,由于二维平面模型相较于实际三维空间缺少第3个维度的约束,模拟得到的峰值应变将小于实际实验(图1)。

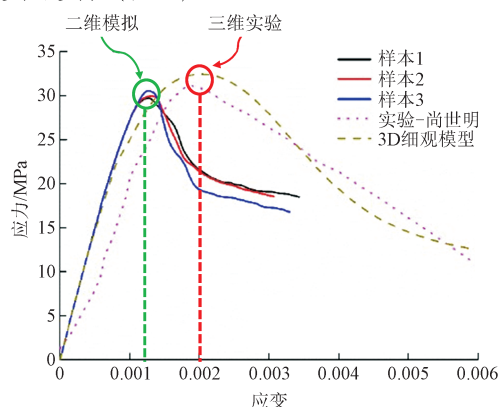


图1 二维单轴受压应力-应变曲线^[2]

Fig. 1 Two-dimensional uniaxial compression curves of stress-strain^[2]

球体、椭球体、凸多面体是数学中最常见的3种三维图形,因此也被用于模拟三维细观混凝土中的骨料。梁昕宇等^[4]采用球体模拟圆柱体混凝土试件中的骨料,对比了不同建模方式的优缺点,提供了一种CT扫描建模及数值模拟的有效方法。UNGER等^[5]采用椭球体模拟骨料,采用内聚界面模型模拟了细观混凝土受拉下的破坏。阮征等^[6]采用实验与数值模型的方法对混凝土中砂浆和骨料等各组分的受力进行分析,研究表明加入骨料后混凝土的强度将小于砂浆的强度,且强度修正系数为1.2,这也是

目前为数不多通过实验测定的相同条件下砂浆与混凝土强度关系的数据。ZHOU等^[7]采用传统延拓方法建立了含有过渡层(interface transition zone, ITZ)的三相模型,通过向骨料空余处添加骨料的方式建立满足要求的骨料模型,模拟了单轴、三轴等复杂受力,并指出三维细观模型的计算时间成本高昂。张熠航^[8]采用三维Voronoi图建立了三维细观混凝土骨料,通过降落的方法建立满足要求的模型,模拟了单轴、双轴及三轴等复杂条件下的应力,并分析了其破坏机理。XU等^[9-11]分别对不同形状的凸骨料进行了细观混凝土的数值模拟,但大多数骨料率均为30%,SHENG等^[12]提出,对于体积占比大于30%的多面体骨料模型很少见到。对于常用的混凝土试件,其粗骨料的占比在30%~50%^[11]之间,采用传统三维中直接延拓生成方法得到的凸多面体模型难以满足要求。为解决三维中骨料含量较低的问题,“分层摆放法^[13]”“随机游走法^[14]”等数学方法和“自由降落法^[12]”“温度膨胀法^[15]”等物理方法被提出,其中“自由降落法”由于其实现简便且能够有效模拟浇筑的过程,被广泛使用^[8]。THILAKARATHNA等^[16]以综述的形式对不同的三维随机中尺度模型建立方法等进行了比较,展示了目前三维细观混凝土的进展及各种建模方式的优缺点。尽管如此,三维细观模型时间成本高昂始终成为其难以应用于实际的困难之一,因此有效缩短三维细观数值模拟的时间对其应用于实际工程至关重要。

本研究基于MATLAB编程对大量随机分布的混凝土骨料模型进行初步建模,通过降落加密模拟振捣或浇筑过程,建立满足实际体积占比的细观混凝土模型;三维中采用一种摩擦脱黏与受拉失效结合的方法,无需建立物理过渡层即可有效模拟混凝土的受力破坏,其时间成本仅为传统建立实体过渡层模型的1/6左右;除此之外,本研究对球形、凸多面体2种不同的骨料类型进行压缩数值模拟对比,分析了二者破坏的细观机理。从模拟结果看,二者

的压缩强度是较为接近的,这与先前部分学者采用球形骨料模拟的结果较为一致,探讨了骨料弹性模量、骨料体积占比等因素对混凝土整体强度的影响。

1 模型的建立

1.1 初步凸骨料模型的建立

传统的骨料模型^[17]建立采用先生成后投放的原则,其中生成采用延拓法构建,投放的相交检测需要采用数学的方法进行方程的联立等方式,过程复杂,计算效率低。

为了克服传统方法的弊端,此项研究采用基于球体的内接凸多面体的方法,其相交判断简便高效,且基于球体表面上取点构建的凸多面体具有天然凸性,两球体不相交即可保证两骨料不相交,如图2(a)所示;凸骨料的建立采用球体内接的方法进行,即直接在球面上取一定数量的点构建凸包,同时使用MATLAB作为编程语言,可快速构建凸包,时间效率大大提高,如图2(b)所示。

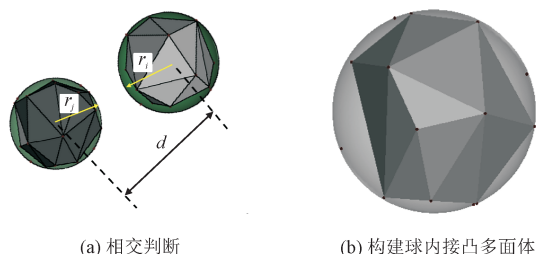


图2 球内接相交判断

Fig. 2 Judgment of ball interconnecting intersection

除此之外,为了避免极短边和片状骨料的出现,导致后期的网格划分困难和计算时间成本的增加,编写程序中设定了短边控制和体积控制。

1.2 网格的划分与降落加密

由于骨料、砂浆等独立的部分组成了混凝土整体,划分网格时需要保证各部分网格对齐,以保证位移及力的传递。目前使用最多的为背景网格法^[18],此方法将试件划分为众多背景网格,然后对每部分进行识别,该方法由于编程的直观性被广泛应用^[19-21]。同时该方法也存在边界不够清晰,易受背景网格选择的影响等不足。

本研究基于面网格生成所需实体网格,即通过设置网格参数等条件,由边界面网格映射生成实体网格,该方法在划分网格时和降落后生成实体网格

均可实现,且能够保证各部分的网格对齐。

由于直接生成难以满足传统混凝土30%~50%的占比要求,因此初始生成后对其进行降落加密,以得到满足要求的细观混凝土模型,同时该过程也模拟了浇筑过程,骨料加密示意图(图3)。

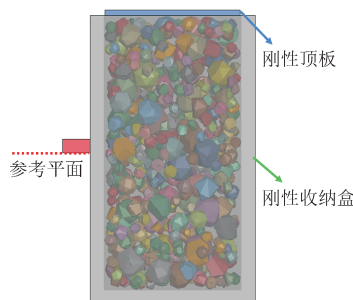


图3 骨料加密示意图

Fig. 3 Aggregate encryption diagram

在降落加密过程中,收纳容器、顶部平板及骨料均设置为刚体,基准块设置为弹性体,底部高度为所需实际试件高度,当骨料降落至基准弹性体下表面时,降落结束,图4展示了降落结束后生成的有限元模型,其中三相模型的建立是为了对比传统方法数值模拟所用时间。

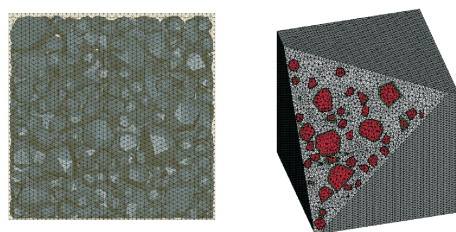


图4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

2 摩擦脱黏与受拉失效

目前细观混凝土数值模型大多建立实体过渡层,虽然已经将过渡层ITZ厚度放大至毫米级别以方便模拟,但其厚度仍然较小,在进行有限元计算时效率非常低。因此简化过渡层是提高其计算效率的重要途径之一。杨贞军等^[22-23]均采用编写程序插设黏结单元的方法以替代建立实体过渡层,对混凝土受拉进行了数值模拟,模拟性能较好。ZHOU等^[24]早已指出,对于仅采用黏结单元模拟过渡层,在受拉时能够展现出较好的性能,但在其受压时表现较差,由于黏结单元的提前断裂将导致受压时缺少摩擦,可能产生刺穿等系列问题,因此ZHOU等^[24]在二维提供了一种新思路,即采用插设黏结层

与摩擦脱黏结合的方法可有效模拟混凝土复杂受力下的破坏,其中受拉的插设黏结单元需要开发程序进行,遗憾的是并未在三维进行尝试。

本研究基于 ZHOU 等^[24]的思路,受压采用摩擦脱黏,受拉采用直接失效的方式,简化了受拉黏结单元的插设的复杂过程,提高计算效率的同时,能够有效模拟混凝土的受压、受拉失效过程。

2.1 单轴受拉工况中关键参数校核

对于混凝土破坏来说,接触面通常先于砂浆发生破坏,因此为了防止砂浆先于接触面破坏,这一破坏机理需要设置材料参数。由于有限元分析是基于节点和插值函数的失效判断,与物理上的面失效存在较大不同,所以可通过设置如图 5 所示的简化受拉模型探求受拉失效时的材料参数上限,保证其破坏机理相同。

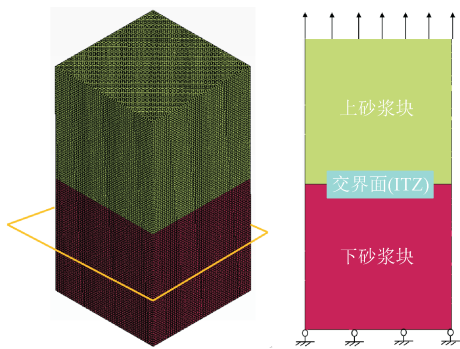


图 5 受拉模型示意图

Fig. 5 Tension model diagram

将不同参数设置值所得到的受拉数值列于表 1,并展示了几个不同值的破坏位置图。

表 1 不同参数破坏位置统计

Tab. 1 Statistics of damage positions with different parameters

设置值/MPa	峰值应力/MPa	破坏位置
3.0	1.48	接触面
4.0	1.98	接触面
4.5	2.19	接触面
5.0	2.45	接触面
5.5	3.17	接触面
6.0	3.32	下砂浆块底部
7.0	3.31	下砂浆块底部
8.0	3.32	下砂浆块底部

可见在此模型中,保证符合混凝土破坏特性的设置值上限为 5.5 MPa,该值仅适用于本研究受压强度为 30 MPa 的混凝土,对于其他强度的建议设置简

易模型并将接触参数设置在 2 倍受拉强度附近尝试,保证其破坏机理的合理性即可。同时,图 6 ~ 图 7 展示了设置不同值的受力及破坏,其中,图 6 中拉升应力为下砂浆试块中部位置截面(图 5 中黄色截面)平均应力,即截面合力除以截面面积。

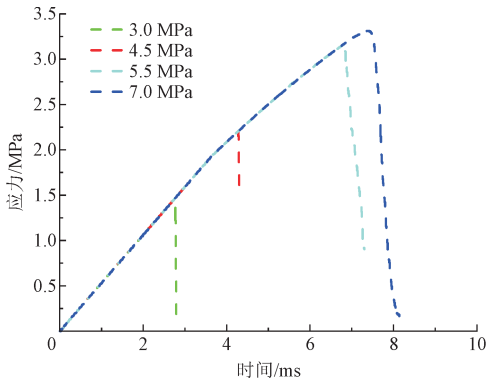


图 6 砂浆拉升应力时效曲线

Fig. 6 Tension stress aging curve of mortar

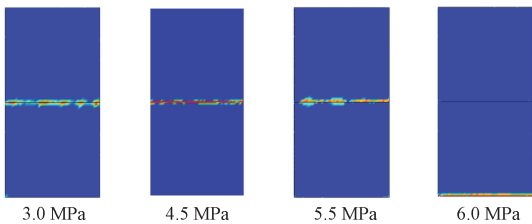


图 7 不同参数破坏位置

Fig. 7 Failure position of different parameters

由上述结果可知,当设置值在 5.5 MPa 时,峰值强度可达到 3.17 MPa,这一强度值能够达到所需混凝土的受拉峰值。此时接触层先于砂浆发生失效,其破坏机理与实际相同。

受拉上限设置值为 5.5 MPa,需要保证点接触的设置值小于等于该值,因此本研究取 4.0 MPa,进行单轴受拉与单轴劈裂模拟,其中各部分参数收集于文献[7-8],劈裂抗拉垫条的尺寸及厚度均采用 JIN 等^[25]中所用比值,各部分参数设置见表 2。

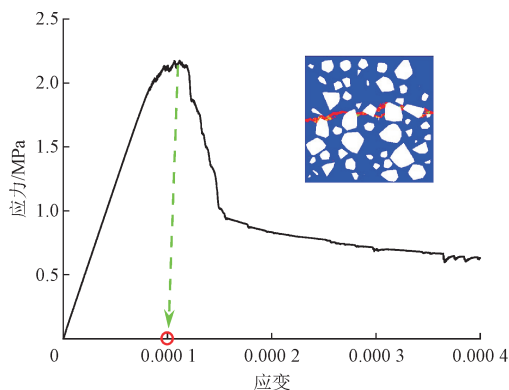
表 2 各组分参数

Tab. 2 Parameters of each component

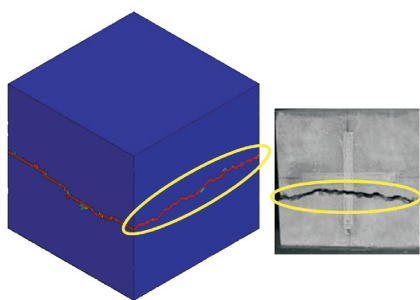
名称	骨料	基质
材料	线弹性	KCC(72r3)
弹性模量/GPa	43	23
密度/(kg · m ⁻³)	2.6 × 10 ³	2 × 10 ³
泊松比	0.23	0.2
抗压强度/MPa	—	35

由图 8 进行单轴受拉及劈裂抗拉结果可知,单轴抗拉值约为 2.2 MPa,与单轴抗压强度比值为

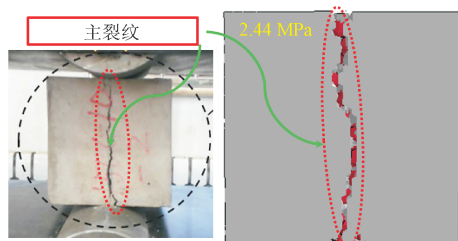
2. $2/30 \approx 1/13.5$, 这一值符合混凝土抗拉与抗压强度之比 $1/15 \sim 1/10$ 的要求^[26], 破坏形态也与田梦云^[26]给出的相似。其次可以看出劈裂抗拉强度略大于抗拉强度, 破坏形态也与 JIN 等^[25]实验相似。



(a) 单轴拉伸应力-应变曲线



(b) 单轴拉伸破坏对比^[26]



(c) 劈裂抗拉破坏对比^[25]

图8 受拉破坏模拟结果

Fig. 8 Simulation results of tensile failure

2.2 单轴受压模拟

为与单轴受压实验相似, 上下设置刚性顶板, 上顶板只允许加载方向位移, 下刚性板全固定(图9), 进行加载模拟。同时设置了采用节点加载作为对比, 以排除加载板带来的动态效应, 为保证边界相同, 加载板设置为无摩擦。

节点加载与加载板加载的应力-应变绘制如图10所示, 采用2种加载方式加载的应力-应变曲线几乎完全重合, 即采用刚性板加载并不会导致其结果产生差异, 且采用刚性板更易设置摩擦, 更接近真实

实验。

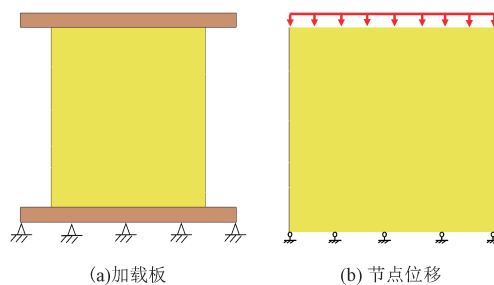


图9 不同加载方式示意图

Fig. 9 Models of different loading modes

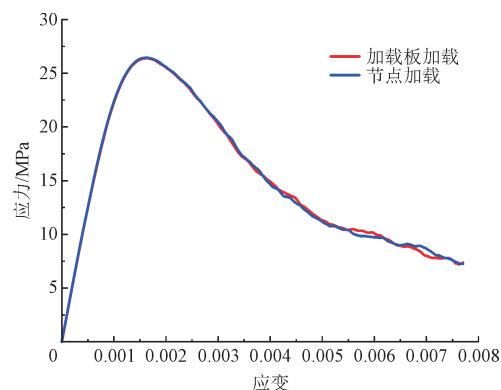


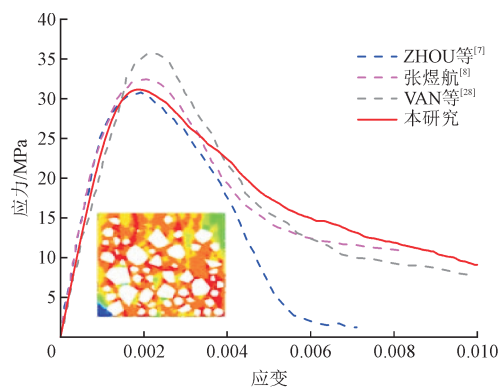
图10 不同加载方式应力-应变曲线对比

Fig. 10 Comparison of stress-strain curve under different loading modes

文献[7-8]对于砂浆强度的选择及对比的实验均相同, 模拟的整体混凝土强度约为30 MPa, 砂浆强度选用35 MPa, 砂浆与混凝土强度修正系数为 $35/30 = 1.17$, 这一数值与阮征等^[6]实验中测定的修正系数1.2基本吻合, 也说明了这一参数的可靠性。

有所不同的是, 对于低摩擦下, 并未给定统一的静摩擦因子, 本研究根据文献[27]中给出的实验采用的低摩擦情况静摩擦因子为0.05。虽然这一值相较于张煜航^[8]所采用的0.1小, 但由于来源于实验, 其可靠性较好。使用此摩擦因子后, 压缩模拟结果如图11所示。

图11(a)对比了实验及部分学者^[7-8, 28]的数值模拟结果, 可以看出弹性段及软化段的走向与实验较为相似, 即在误差允许范围内, 其应力-应变曲线具有较好的拟合性。对比图11(b)可以看到, 在低摩擦下裂纹呈现竖向发展, 整体破坏图与实验所得到的较为相似。图12展示了单轴压缩下的内部破坏图, 试件内部裂纹绕开骨料并贯通, 最终形成沿着加载方向的竖向宏观裂纹, 这一现象与实验所得结果较为吻合。



(a) 单轴受压应力-应变曲线

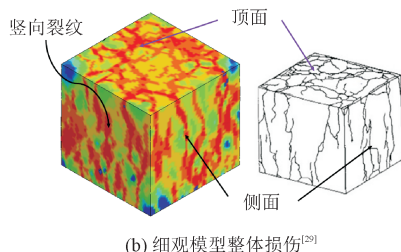
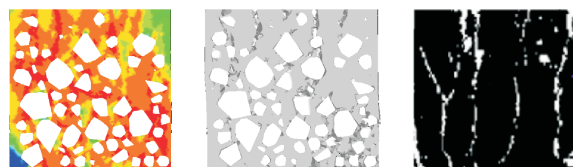
(b) 细观模型整体损伤^[29]

图 11 单轴受压应力-应变曲线及损伤图

Fig. 11 Stress-strain curve and damage of uniaxial compression

图 12 单轴受压内部破坏^[29]Fig. 12 Internal damage of uniaxial compression^[29]

同时,分别从3个相互垂直的方向进行单轴压缩模拟,3个不同方向的压缩结果如图13所示。图13中可以看到,对于弹性模量、峰值强度等重要参数并不会因为降落加密而导致其产生较大差异,其压缩结果基本一致,有效避免了因采用降落方法导致不同方向压缩结果的不可控性,同时这也证明了本研究建模方法的有效性。

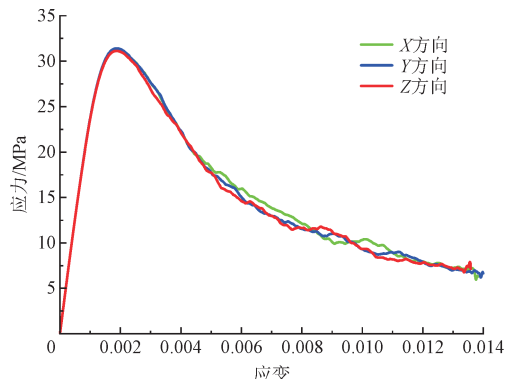


图 13 不同加载方向的压缩应力-应变曲线

Fig. 13 Compressive stress-strain curve under different loading directions

将本研究采用的不建立实体过渡层的摩擦脱黏方法与传统建立过渡层与压缩下的数据及所用时间对比。由表3可知,采用摩擦脱黏加失效的方式单轴受压模拟时,能够较好地模拟受压与受拉,且每单元所用核时仅为建立过渡层三相模型的1/6,时间成本大大降低。

表 3 2种方法用时及相关数据对比

Tab. 3 Comparison of time consumption and relevant data of the two methods

类别	摩擦脱黏失效加法向失效				含过渡层三相模型				
	骨料	砂浆	刚性板	共计	骨料	砂浆	ITZ	刚性板	共计
节点数/ 10^4	7.694 5	11.401 4	4.84×10^{-2}	19.144 3	7.443 6	11.485 9	1.294 3	4.84×10^{-2}	20.272 2
单元数/ 10^4	23.699 8	49.099 1	2×10^{-2}	72.818 9	22.863 1	47.246 6	37.941 7	2×10^{-2}	108.071 4
计算机核数/核			8				48		
时间/min		1.865×10^3					2.832×10^3		
总核时/(核·小时)		1.492×10^4					$13.593 6 \times 10^4$		
每单元核时/(核·小时)		2×10^{-2}					12.6×10^{-2}		

3 不同形状骨料单轴受压下破坏分析

3.1 随机分布的影响

骨料随机分布可能导致受压结果产生差异,本研究对骨料占比相同的3组随机分布模型进行了压

缩模拟,采用理想无摩擦条件以排除摩擦边界带来的干扰。图14结果中可以看出,骨料的随机产生会对其强度产生一定的影响,对比文献[26]中二维随机分布的影响,可以判断三维中骨料的随机影响相对更大。

因此仅采用一个随机生成不同的模型来探求形状、体积占比等条件改变所引起的混凝土性质的改

变是不合理的,因为其不仅包含所改变的条件,还包括由随机性带来的影响,尤其是对于条件改变所带来的变化较小时,是不能够说明该改变来自于骨料分布随机性还是条件的变化。但对于单个模型的实验拟合及应用,如表4所示,3个样本的峰值应力的平均值为27.97 MPa,随机性带来的误差均在5%以内,这是可被工程所接受的。

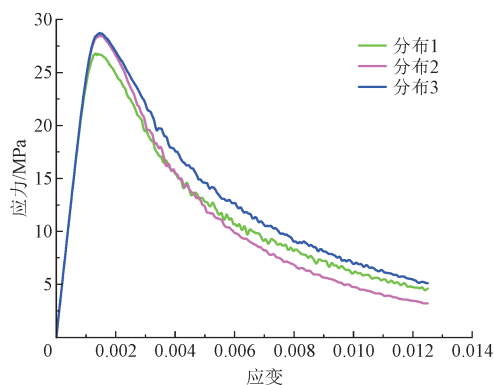


图 14 随机分布应力-应变曲线

Fig. 14 Stress-strain curve of random distribution

表 4 骨料随机分布误差

Tab. 4 Error of aggregate random distribution

类目	分布 1	分布 2	分布 3
峰值强度/MPa	26.75	28.47	28.68
相对差值/MPa	1.22	0.50	0.71
相对误差/%	4.36	1.79	2.54

3.2 球形与凸多面体形

由于随机分布可能产生差异,原则上需要压缩足够多的样本获取统计值,但考虑三维中时间成本的高昂性,本研究压缩3个样本,取其应力-应变曲线的平均值作为代表值。图15展示了球形骨料与凸多面体骨料的应力-应变图,为了排除多因素干扰,采用理想无摩擦条件压缩对比。可以看到,对于弹性段,二者几乎重合,应力-应变曲线在弹塑性段开始产生变化,峰值处,凸多面体骨料峰值强度仅略小于球形峰值,几乎可认为二者的峰值强度基本相同,但凸多面体形状的峰值应变较球形的大。

挑选其中2个典型代表性的压缩试件展示(图16)。整体试件破坏形态较为相似,均为沿着加载方向的宏观裂纹。对比其内部裂纹可知,多面体微观裂纹更多。这主要是由于多面体的棱角较为明显,因此应力集中点较多,能量耗散在多个尖端处,微观裂纹在更多地方进行扩展,因此其贯穿的宏观裂纹相较于球形较少,展示出了更多分散、非贯穿的微裂

纹;球形相对较为光滑,应力集中点相对较少,裂纹扩展仅从少有的几处扩展贯穿,展现出更为明显的贯穿宏观主裂纹,微观裂纹相对较少,这一特点与采用的球形骨料进行细观模拟文献[30]展现的一致。

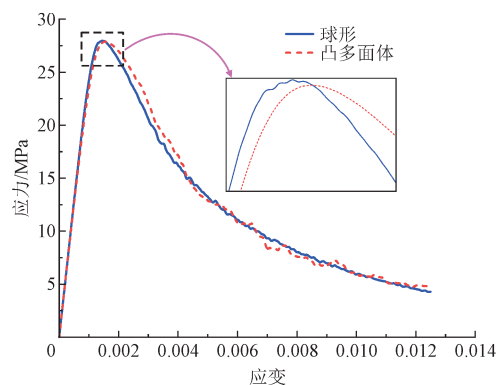


图 15 不同形状骨料压缩应力-应变曲线

Fig. 15 Compressive stress-strain curve of aggregates with different shapes

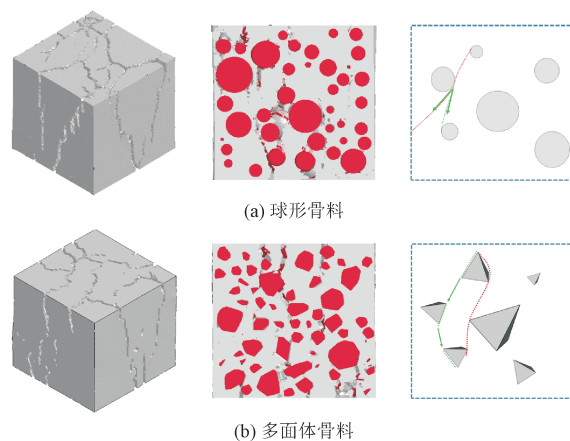


图 16 不同骨料形状压缩破坏对比图

Fig. 16 Comparison of compression damage of different aggregate shapes

4 各因素对其强度影响

4.1 骨料弹性模量对强度的影响

根据张煜航^[8]给出的结果,常见骨料弹性模量约在26.7~67.8 GPa之间。因此本研究设置了6组弹性模量,由于仅改变弹性模量,模型并未发生改变,因此不涉及随机分布的影响。

由图17可以看出随着骨料弹性模量的增加,应力-应变曲线的弹性段逐渐上抬,这一点也显示了砂浆性质恒定时,随着骨料弹模的增加,混凝土的弹性

模量也随之增加。对于整体混凝土的强度而言,随着骨料弹性模量的增加,混凝土强度呈现降低的趋势。即砂浆与接触面强度恒定时,骨料弹性模量与混凝土的弹性模量呈现正相关,与混凝土的强度呈现负相关。

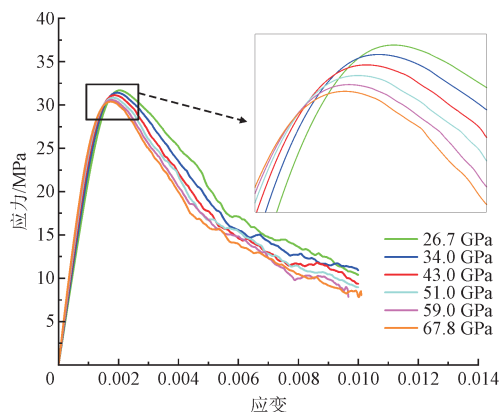


图 17 骨料弹性模量与混凝土强度关系

Fig. 17 Relationship between aggregate elastic modulus and concrete strength

4.2 体积占比对强度的影响

通常而言,混凝土测定的较为关键参数即为峰值强度与弹性模量,从图 15 可得出,对于球形和多面体形状,应力-应变曲线中得到的弹性模量和强度是较为相近的,因此在不考虑破坏形态时,采用球形骨料替代多面体获得弹性模量与抗压强度是可行的。球形无需降落等过程即可建立满足常用骨料占比要求的模型,因此用球形来探求骨料体积变化引起的强度的变化是简便高效的。

分别设置 10%、20%、30%、40%、50% 这 5 种骨料占比,每一种设置 3 个随机组,以降低骨料随机性差异带来的影响,每组取 3 个随机组样本的平均值作为其代表,得到不同体积占比压缩的应力-应变曲线。

图 18 展示了不同体积占比压缩的应力-应变曲线代表值。随着骨料体积分数的增加,混凝土强度呈现降低的趋势,这主要是由于骨料基质之间薄弱的过渡层导致的,骨料体积的增加将导致骨料数量增加,从而使薄弱部分的增加,而薄弱部分将直接影响其整体强度。因此,薄弱部分越多的混凝土整体强度将越低。这一结果与张煜航^[8]的结果也较为吻合。同时由图 18 中也可得出,随着骨料体积占比的

增加,混凝土弹性模量也随之增加,即骨料体积占比与混凝土弹性模量呈现正相关。

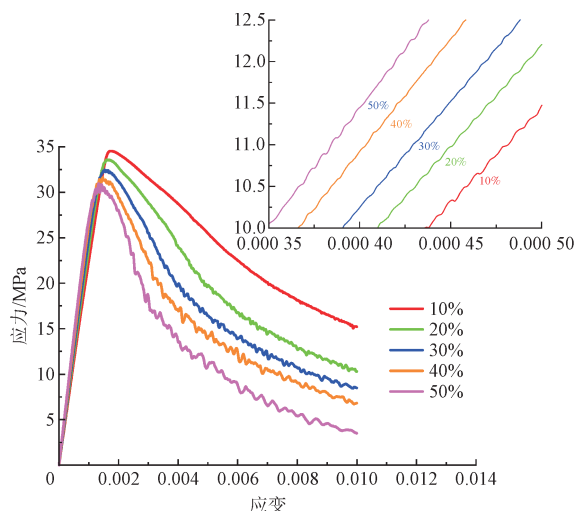


图 18 骨料体积占比与混凝土强度关系

Fig. 18 Relationship between aggregate volume ratio and concrete strength

5 结 论

采用摩擦脱黏与受拉失效能够高效地模拟三维细观混凝土受压、受拉的受力及破坏,相较于传统建立三相模型效率更高,且无需考虑由于过渡层厚度的变化导致结果的差异性。此项研究基于实验数据,开展了验证和相关分析,表明此模型在精度和准确性方面均有优势。所以,通过对比传统方法以及本研究模拟得出以下结论。

1) 摩擦脱黏方法是高效模拟细观混凝土受压的高效可行方法,其时间成本较低,在此项研究中仅为传统建立过渡层方法的 1/6 左右,在保证高效性的同时能够模拟受压、受拉以及劈裂等多种情况下的受力及破坏。

2) 本研究建立多模型将有利于利用统计规律获得更具有代表性的数据,对于分析各因素影响时将能够有效避免随机偶然性的发生,而传统方法中采用单个模型进行对比分析所得到的结果是不够完善的。但建立多模型的模型数量的确定需要在时间和准确性之间平衡。一方面,模型建立过多,时间成本随之增加;另一方面,过少数量又难以避免偶然性。因此,选择合适的数量将有利于高效且准确地模拟三维混凝土的破坏。

3)对比3个随机样本的单轴受压可知,球形骨料与凸多面体骨料的单轴受压应力-应变曲线模型模量与峰值强度较为接近,因此,对于获取强度及弹性模量等参数,可采用球形骨料代替多面体骨料;但对于真实模拟时,需要建立真实的多面体骨料进行,因为其峰值应变及破坏的形态均与球体存在差异,其鲜明的棱角更接近真实骨料的特点。

4)混凝土整体弹性模量与骨料的弹性模量呈现正相关,但整体强度与骨料的弹性模量呈现负相关;混凝土整体弹性模量与骨料的体积占比呈现正相关,整体强度与骨料的体积占比呈现负相关。

参考文献:

- [1] 宋力,王大国,杨阳,等. 基于细观力学的混凝土弹塑性脆性损伤研究[J]. 应用力学学报,2013,30(4):480-487.
SONG Li, WANG Daguo, YANG Yang, et al. Studies on the microscopic elastic-plastic brittle damage of concrete[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2013, 30(4): 480-487 (in Chinese).
- [2] 陈青青. 含孔隙混凝土细观建模方法与数值研究[D]. 太原:太原理工大学,2020.
- [3] 田梦云,张恩,曹瑞东,等. 基于细观尺度的混凝土单轴力学性能仿真计算分析[J]. 应用力学学报,2020,37(3):975-981.
TIAN Mengyun, ZHANG En, CAO Ruidong, et al. Meso-scale simulation analysis of uniaxial mechanical behavior of concrete[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(3): 975-981 (in Chinese).
- [4] 梁昕宇,党发宁,田威,等. 基于细观力学的混凝土数值模型研究[J]. 应用力学学报,2011,28(2):129-134.
LIANG Xinyu, DANG Faning, TIAN Wei, et al. Study on numerical model of concrete based on 3D meso-mechanics[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2011, 28(2): 129-134 (in Chinese).
- [5] UNGER J F, ECKARDT S. Multiscale modeling of concrete[J]. Archives of computational methods in engineering, 2011, 18(3): 341-393.
- [6] 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.
RUAN Zheng, CHEN Li, HONG Jian, et al. Mesoscopic analysis on the mechanism of effects of aggregate and mortar on concrete strength[J]. Journal of building materials, 2014, 17(6): 952-958 (in Chinese).
- [7] ZHOU R X, SONG Z H, LU Y. 3D mesoscale finite element modelling of concrete[J]. Computers & structures, 2017, 192: 96-113.
- [8] 张煜航. 基于三维细观模型的混凝土损伤力学行为研究[D]. 太原:太原理工大学,2020.
- [9] XU Y, CHEN S H. A method for modeling the damage behavior of concrete with a three-phase mesostructure[J]. Construction and building materials, 2016, 102, Part 1: 26-38.
- [10] XIONG Q R, WANG X F, JIVKOV A P. A 3D multi-phase meso-scale model for modelling coupling of damage and transport properties in concrete[J]. Cement and concrete composites, 2020, 109: 103545.
- [11] NADERI S, TU W L, ZHANG M Z. Meso-scale modelling of compressive fracture in concrete with irregularly shaped aggregates[J]. Cement and concrete research, 2021, 140: 106317.
- [12] SHENG P Y, ZHANG J Z, JI Z. An advanced 3D modeling method for concrete-like particle-reinforced composites with high volume fraction of randomly distributed particles[J]. Composites science and technology, 2016, 134: 26-35.
- [13] 唐欣薇,张楚汉. 随机骨料投放的分层摆放法及有限元坐标的生成[J]. 清华大学学报(自然科学版),2008,48(12):2048-2052.
TANG Xinwei, ZHANG Chuhan. Layering disposition and FE coordinate generation for random aggregate arrangements[J]. Journal of Tsinghua University (science and technology), 2008, 48(12): 2048-2052 (in Chinese).
- [14] ZHANG Z H, SONG X G, LIU Y, et al. Three-dimensional mesoscale modelling of concrete composites by using random walking algorithm[J]. Composites science and technology, 2017, 149: 235-245.
- [15] ZHANG H, SHENG P Y, ZHANG J Z, et al. Realistic 3D modeling of concrete composites with randomly distributed aggregates by using aggregate expansion method[J]. Construction and building materials, 2019, 225: 927-940.
- [16] THILAKARATHNA P S M, KRISTOMBU BADUGE K S, MENDIS P, et al. Mesoscale modelling of concrete — a review of geometry generation, placing algorithms, constitutive relations and applications[J]. Engineering fracture mechanics, 2020, 231: 106974.
- [17] 武亮,王菁,何修伟,等. 多面体骨料大体积混凝土三维细观模型生成[J]. 应用力学学报,2015,32(4):657-663.
WU Liang, WANG Jing, HE Xiuwei, et al. Generation of 3-D mesoscale models for massive concrete with polyhedral aggregates[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2015, 32(4): 657-663 (in Chinese).
- [18] 秦川,郭长青,张楚汉. 基于背景网格的混凝土细观力学预处理方法[J]. 水利学报,2011,42(8):941-948.
QIN Chuan, GUO Changqing, ZHANG Chuhan. A pre-processing scheme based on background grid approach for meso-concrete mechanics[J]. Journal of hydraulic engineering, 2011, 42(8): 941-948 (in Chinese).
- [19] WU Z Y, ZHANG J H, FANG Q, et al. Mesoscopic modelling of concrete material under static and dynamic loadings; a review[J]. Construction and building materials, 2021, 278: 122419.

- [20] 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):1072-1076.
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):1072-1076(in Chinese).
- [21] WU Z Y, ZHANG J H, YU H F, et al. 3D mesoscopic analysis on the compressive behavior of coral aggregate concrete accounting for coarse aggregate volume and maximum aggregate size[J]. Composite structures, 2021,273:114271.
- [22] 杨贞军,黄宇劼,尧锋,等. 基于粘结单元的三维随机细观混凝土离散断裂模拟[J]. 工程力学,2020,37(8):158-166.
YANG Zhenjun, HUANG Yujie, YAO Feng, et al. Three-dimensional meso-scale cohesive fracture modeling of concrete using a python script in ABAQUS[J]. Engineering mechanics, 2020,37(8):158-166(in Chinese).
- [23] GUO C, LU Z R. A 3D FEM mesoscale numerical analysis of concrete tensile strength behaviour[J]. Advances in materials science and engineering, 2021,2021(1):5538477.
- [24] ZHOU R X, LU Y. A mesoscale interface approach to modelling fractures in concrete for material investigation[J]. Construction and building materials, 2018,165:608-620.
- [25] JIN L, YU W X, DU X L, et al. Mesoscopic numerical simulation of dynamic size effect on the splitting-tensile strength of concrete[J]. Engineering fracture mechanics, 2019,209:317-332.
- [26] 田梦云. 基于细观尺度的混凝土单轴力学性能的数值计算[D]. 太原:太原理工大学,2019.
- [27] HUGHES B P, BAHRAMIAN B. Cube tests and the uniaxial compressive strength of concrete[J]. Magazine of concrete research, 1965,17(53):177-182.
- [28] VAN VLIET M, VAN MIER J. Softening behaviour of concrete under uniaxial compression[J]. Fracture mechanics of concrete structures, 1995,1:383.
- [29] VONK R A. Softening of concrete loaded in compression[D]. Eindhoven:Eindhoven University of Technology, 1992.
- [30] JIN L, LI J, YU W X, et al. Mesoscopic simulations on the strength and size effect of concrete under biaxial loading[J]. Engineering fracture mechanics, 2021,253:107870.

(编辑 吕茵)