基于激光扫描的细观混凝土模型

张龙飞¹, 谢浩^{2,3}, 陈燕伟¹, 李二强⁴, 冯吉利^{1*}

1. 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083;

2. 济南轨道交通集团有限公司, 济南 250014;

3. 山东大学齐鲁交通学院, 济南 250002;

4. 洛阳理工学院土木工程学院, 洛阳 471000

* E-mail: fjl@cumtb.edu.cn

收稿日期: 2021-07-02; 接受日期: 2021-11-16; 网络版发表日期: 2021-12-22

国家重点研发计划(编号: 2016YFC0600901)和国家自然科学基金(批准号: 41172116, U1261212)资助项目

摘要 将激光扫描技术与发展的状态点阵骨料投放算法相结合, 实现了三维、二维细观混凝土几何建模. 三维模型的构建通过激光扫描仪对骨料进行信息采集进而构建骨料库, 结合骨料投放算法, 构建出反映真实骨料形态、分布和级配等特征的三维混凝土细观模型. 二维模型的构建仅需对三维模型进行剖切. 激光扫描技术能给出骨料的真实空间形态, 骨料库的构建保证了骨料的随机多样性, 骨料投放算法则将整个建模过程程序化. 为了验证该方法, 选取典型切面构造二维模型, 结合室内实验, 利用内聚力模型研究了骨料空间分布对混凝土单轴压缩破坏的影响规律.

关键词 激光扫描, 骨料, 细观混凝土, 骨料投放算法, 内聚力模型

1 引言

混凝土是一种典型的复合材料, 由于其内部组分性质差异较大且分布极不均匀, 导致混凝土在外荷载作用下不论是裂纹的萌生位置还是扩展路径都具有随机性^[1,2]. 因此, 混凝土破坏模型表征时需要考虑混凝土材料细观结构.

为了构建能够真实反映混凝土细观结构特征的数值模型, 国内外学者做了大量研究. 目前常用的混凝土细观建模方法可分为两类. 第一类是基于X射线的计算机断层扫描(X-ray computed tomography, XCT)技术. 如Huang等人^[3,4]基于试件内部各相组分的密度差

异, 利用高精度XCT技术对混凝土试件分层扫描获取每层细观结构灰度图, 根据各相组分之间灰度值的差异运用图像处理技术重构混凝土三维、二维细观有限元模型. 基于混凝土塑性损伤(concrete damaged plasticity, CDP)模型对比分析了数值模型单轴拉伸、单轴压缩下力学响应特征和裂纹扩展模式. Trawiński等人^[5]和Ren等人^[6]同样采用XCT技术对试件分层扫描重构混凝土三维、二维细观数值分析模型, 基于内聚力模型(cohesive zone model, CZM)研究了细观参数对混凝土试件承载力和宏观断裂特征的影响. 基于XCT的混凝土细观模型建模方法虽然能够真实描述混凝土的细观结构特征, 但前期需要经过试件浇筑、试件养

引用格式: 张龙飞, 谢浩, 陈燕伟, 等. 基于激光扫描的细观混凝土模型. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 1121–1133

Zhang L F, Xie H, Chen Y W, et al. Meso-concrete modeling based on laser scanning technology (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 1121–1133, doi: 10.1360/SST-2021-0267

护、XCT扫描和模型重构等步骤,人力物力成本较高,耗时较长,特别是试件尺寸受限,并且三维有限元模型网格数量巨大,计算效率较低,因此该方法仍面临巨大挑战。

第二类是参数化建模技术。马怀发等人^[7,8]运用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法在截面内随机生成骨料位置,将骨料假定为圆形,采用网格映射法构建混凝土二维细观有限元分析模型。Wang等人^[9,10]利用随机生成的圆形、椭圆形作为骨料,依次随机投放构建混凝土二维细观分析模型。Yilmaz和Molinari^[11]将骨料形状假定为球体构建三维混凝土多相细观模型,基于CZM理论对比分析了二维、三维模型在不同加载速率下裂纹的扩展演化和应力-应变曲线变化规律。为了更好地反映骨料形状的随机性和凹凸性,王宗敏^[12]、Ma等人^[13,14]、Qin等人^[15]将骨料的形状进一步简化为随机生成的凸多边形或凸多面体,基于随机骨料投放算法构建二维、三维细观混凝土多相数值分析模型。上述将骨料形状简化为圆形、椭圆形或者多边形等简单几何形状的参数化建模方法,虽然在模型构建和数值计算效率方面具有显著的优势,但混凝土中的真实骨料形态各异,上述骨料简化方法显然与真实骨料形状仍然存在较大差距。熊学玉等人^[16]对圆形、正六边形、正五边形和正方形骨料细观模型单轴压缩数值分析结果表明,圆形骨料会减少混凝土内部的应力集中程度,进而导致混凝土试件强度偏大,并且骨料越光滑则模型整体的受力和出现的损伤会更趋向于平均分布。洪丽等人^[17]对具有不同表面粗糙度骨料的混凝土试件单轴压缩和劈裂拉伸实验结果表明,随着骨料表面粗糙度的增大混凝土试件单轴抗压强度和劈裂拉伸强度随之增大。此外,周双喜等人^[18]、Chen等人^[19]、梁敏飞等人^[20]研究表明骨料含量和界面过渡区等对混凝土的断裂、氯离子扩散和渗透性有着极大的影响。因此,构建能够反映混凝土真实骨料形状、骨料含量、骨料空间分布和界面过渡区的混凝土细观模型,对混凝土细观力学研究和实际工程具有重要理论意义和应用价值。近年来,Zhou等人^[21]采用激光扫描获取骨料三维形状,对骨料切割后获得骨料二维切面形状,基于骨料二维切面形状和随机骨料投放算法构建二维混凝土细观模型。谢浩等人^[22,23]借助激光扫描获取真实骨料三维形状信息,基于随机骨料投放算法构建的三维数值混凝土模型能够较好地反映骨料真实形状、空

间分布和级配等混凝土细观结构特征。由于真实骨料形状各异并且骨料的空间分布具有很大的随机性,如何投放避免骨料之间无侵入发生,并且能够达到较高的体积分数是混凝土细观模型构建的重点和难点。模型构建完成后在较高骨料含量情况下的网格划分和网格划分完成后单元数量巨大所带来的计算效率问题,仍然具有很大的挑战性。

本文基于激光扫描技术提出了一种混凝土细观模型构建方法:状态点阵法(state dot matrix method, SDMM)。其优点在于可以运用真实骨料形状构建混凝土细观模型,将判断复杂的骨料间侵入问题转化为判断集合内点的状态问题,能够控制骨料粒径、级配且能够达到较高的骨料体积分数;将所构建的混凝土三维模型切分获得切面,统计了切面内骨料数量、含量和级配,对比真实混凝土切面验证了模型的适用性;基于内聚力模型的连续-非连续数值分析方法对切分所得二维细观模型单轴压缩数值计算,分析探讨了其单轴受压状态下裂纹萌生、扩展和最终破坏模式,对比实验结果进一步验证了模型的有效性。

2 骨料形态的激光扫描获取

3D激光扫描技术,主要应用于零件制造、3D打印和变形监测等,是一种非接触式测量技术,激光光源投射在被测物体表面上,同时又被相机捕获,通过集合光学计算方法即可求解被测表面的点云数据,获取空间大量点的三维坐标等信息,进而构建空间三维模型,具有高精度、高效率、低成本和非接触等优势^[24,25]。

本实验采用北京天远三维科技股份有限公司FreeScan-Elite手持式蓝色激光3D扫描仪,对每个骨料进行扫描获取骨料表面特征点信息。该扫描仪光源由14条蓝色激光线+1条扫描深孔激光线+5条扫描细节激光线组成,扫描速度为650000点/秒,最高精度为0.02 mm,最大扫描景深为550 mm,最大扫描范围600 mm×550 mm,空间点距为0.05~3 mm,激光扫描设备如图1所示。为构建骨料库以保证骨料形态的多样性,随机选取了200块骨料进行扫描,典型骨料如图2所示,骨料扫描完成后采用软件Geomagic Wrap对扫描完成的骨料进行简化处理即可构建出满足细观建模精度的骨料三维几何形状,被扫描骨料的形态信息以STL格式保存。

图 1 (网络版彩图) 激光扫描设备. (a) 计算机; (b) 激光扫描仪; (c) 扫描中的骨料

Figure 1 (Color online) Laser scanning equipment. (a) Computer; (b) laser scanner; (c) an aggregate was scanning.

图 2 (网络版彩图) 激光扫描获取骨料表面形态信息

Figure 2 (Color online) The surface morphology informations of aggregates were obtained by laser scanning.

3 混凝土细观模型构建

由于自然界中真实骨料形态各异, 如何投放骨料以避免骨料间相互侵入且能够达到较高的骨料体积含量是混凝土细观模型构建的关键. 文献[22]提出一种称之为“点阵法”(dot matrix method, DMM)的骨料投放算法: 其通过已投骨料点集和待投骨料点集之间的关系来判断骨料之间是否存在侵入现象, 若两集合无交集则证明骨料间没有侵入, 本次投放成功; 否则骨料间有侵入, 需要重新投放. 本研究提出骨料投放算法SDMM解决骨料投放问题, 其将连续的空间计算域离散化为空间中有序排列的点阵, 如图3所示, 对每个点按顺序编号, 并用数字0和1标记每个点的状态; 初始

化所有点的状态为0, 并规定投放成功的骨料所包围的点的状态为1; 判断待投放骨料所包围点阵的状态是否全为0, 若全为0则证明无侵入现象发生, 投放成功, 否则需要重新投放. SDMM相比DMM而言, 不再判断集合间是否存在交集, 转而判断点的状态, 算法的逻辑更加简单, 在骨料投放效率上有了进一步的提高. 下面以 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的混凝土标准试件为例介绍骨料投放算法SDMM.

3.1 模型空间计算域点阵化

(1) 将模型计算域设置为长、宽、高分别为 L , W , H 的立方体, 并且在三个方向上分别设置 NumX , NumY ,

图3 (网络版彩图) 点阵示意图. (a) 三维空间计算域点阵; (b) 点阵中的某一层

Figure 3 (Color online) Lattice diagram. (a) 3D lattice; (b) one layer in the lattice.

NumZ个点, 如图3所示;

(2) 建立一个 $1 \times (\text{NumX} \times \text{NumY} \times \text{NumZ})$ 的状态矩阵States, 并将矩阵States中的每个元素初始化为0.

模型空间计算域点阵化之后, 点阵中的每个点都具有三种属性: 编号 N (矩阵States中每个元素的索引)、状态标识0或1(存储在矩阵States中)和空间坐标 $P(x, y, z)$. 这样便可以根据该点的编号 N 得知其对应的状态值States(N). 也可以根据式(1)通过编号 N 计算点 P 在点阵中所在的行、列和层(i, j, k), 式中 $\text{ceil}()$ 为向上取整函数. 由点 P 所在的行、列和层(i, j, k)进而根据式(2)计算点 P 在空间中的坐标(x, y, z).

$$\begin{cases} k = \text{ceil}(N / (\text{NumX} \times \text{NumY})), \\ i = \text{ceil}((N - (k - 1) \times (\text{NumX} \times \text{NumY})) / \text{NumX}), \\ j = (N - (k - 1) \times (\text{NumX} \times \text{NumY})) - (i - 1) \times \text{NumX}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x = (j - 1) \times L / (\text{NumX} - 1), \\ y = (i - 1) \times W / (\text{NumY} - 1), \\ z = (k - 1) \times H / (\text{NumZ} - 1). \end{cases} \quad (2)$$

3.2 按级配生成骨料库

制备良好的连续级配骨料是构建数值混凝土细观模型的关键. 20世纪初由Fuller提出的最大密度曲线(富勒级配曲线)为目前常见的三维理想级配曲线^[7,15,22,23], 采用该曲线所确定的级配浇筑的混凝土可以产生最优化的结构密度和强度, 其表达式为

$$P(D < D_i) = 100 \sqrt{D_i / D_{\max}}, \quad (3)$$

式中, $P(D < D_i)$ 表示通过筛孔 D_i 的骨料累计质量百分比, $D_{\max}$ 为最大骨料粒径.

从上述激光扫描所得骨料模型中随机选取骨料, 通过坐标缩放生成粒径 D 满足 $D \in [D_{i+1}, D_i]$ 范围的骨料并记录其体积. 最后将生成的骨料按从大到小排序并存入骨料库Agglibrary备用. 需要指出的是, 由于骨料形态多样, 无法直接测量其粒径大小, 本文采用与该骨料等体积的球体直径作为该骨料的等效粒径^[13,26].

3.3 骨料投放

(1) 输入模型长、宽、高分别为 L, W, H , 和三个方向上的点数NumX, NumY, NumZ, 以及目标骨料体积含量AggRatio.

(2) 参数初始化. 状态矩阵初始化, 即States(i) = 0, $i = 1, \dots, \text{NumX} \times \text{NumY} \times \text{NumZ}$; 初始化待投骨料集合SetTry = $\emptyset$, 投放成功的骨料体积AggTotal = 0;

(3) 按照从大到小的顺序依次从骨料库Agglibrary中取出一块骨料Agg;

(4) 生成随机数 N , $N \in [1, \text{NumX} \times \text{NumY} \times \text{NumZ}]$, 并通过式(2)计算 N 对应的空间坐标 P ;

(5) 判断States(N)=0是否满足, 若满足继续执行下一步(6), 若不满足返回第(4)步;

(6) 将骨料Agg绕 x, y, z 三个坐标轴分别随机旋转角度 α, β, γ (即将骨料Agg的每个顶点坐标乘以旋转矩阵 R)后将其平移至 P 点;

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\alpha)\cos(\beta) - \sin(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) & -\cos(\alpha)\sin(\gamma) - \sin(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma) & -\sin(\alpha)\cos(\beta) \\ \sin(\gamma)\cos(\beta) & \cos(\beta)\cos(\gamma) & -\sin(\beta) \\ \sin(\alpha)\cos(\gamma) + \sin(\gamma)\cos(\alpha)\sin(\beta) & -\sin(\alpha)\sin(\gamma) + \sin(\beta)\cos(\alpha)\cos(\gamma) & \cos(\alpha)\cos(\beta) \end{bmatrix}$$

(7) 判断骨料是否完全落入计算域内, 即判断骨料各顶点坐标是否完全在计算域内, 若完全落入计算域内进行(8), 否则返回第(4)步;

(8) 判断骨料Agg所包围的点集SetTry是否满足States(i)=0, $i \in \text{SetTry}$, 若满足则投放成功执行第(9)步, 否则SetTry = ϕ 并返回第(4)步;

(9) 投放成功. 更新投放成功骨料所包围点的状态, 即States(i)=1, $i \in \text{SetTry}$; 保存投放成功的骨料位置, 顶点坐标等信息; 将投放成功的骨料体积累加到AggTotal;

(10) 判断投放成功的骨料体积是否满足AggTotal $\geq \text{AggRatio} \times (L \times W \times H)$, 若满足则程序停止, 否则执行

$$T = \alpha \times \sqrt{(L/(\text{NumX}-1))^2 + (W/(\text{NumY}-1))^2 + (H/(\text{NumZ}-1))^2}, \alpha \in [1, 4]. \quad (4)$$

在SDMM骨料投放算法中, NumX, NumY, NumZ作为计算域点阵化的重要参数, 对骨料投放效率和所能达到的最大骨料含量影响较大, 随着点阵中点数的增加程序执行效率随之降低. 在满足普通混凝土骨料含量(粗骨料体积含量小于50%)^[10]情况下, 并考虑到骨料投放效率, 给出NumX, NumY, NumZ的参考取值为^[22]

$$\begin{aligned} L/(\text{NumX}-1) &= W/(\text{NumY}-1) \\ &= H/(\text{NumZ}-1) < D_{\min}/10, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $D_{\min}$ 表示骨料最小粒径. 当需要构建的模型骨料体积含量较低时, 对NumX, NumY和NumZ的取值可以适当放宽, 以提高程序的执行效率.

3.4 混凝土细观几何模型

基于上述骨料投放算法, 本文运用MATLAB编程实现了三维随机全级配骨料投放程序. 采用标准筛孔尺寸为: 2.36, 4.75, 9.5, 16 mm, 并限制最大粒径 $D_{\max}$ 为最大筛孔的1.2倍, 最小粒径 $D_{\min}$ 为最小筛孔的0.8倍. 按照富勒提出的骨料级配曲线构建边长为150 mm $\times$ 150 mm $\times$ 150 mm, 骨料体积含量为40%的混凝土标准试件细观模型, 如图5(a)所示, 该模型包含粗细骨料共

SetTry = ϕ 并返回第(3)步.

由于使用了离散的点阵代替了连续的空间区域, 上述骨料投放过程不能完全保证没有侵入现象发生, 如图4(a)所示, 从点阵上看, 投放完成后骨料包围的点阵的状态值都为1, 但从骨料几何形态上看却存在侵入现象. 为解决此问题, 在侵入判断时将待投骨料放大 $T/2$ 的长度, 如图4(b)所示, 其中 T 表示骨料间最小容许间隔, 其取值大小由式(4)确定^[22]. 将放大后的待投放骨料与已投放骨料进行侵入判断, 若无侵入发生, 则将放大前的骨料位置和相关数据进行保存. 参数 T 的引入也保证了骨料间有充分的间距, 可避免后期网格划分时的奇异性, 同时也反映了砂浆对骨料的包裹效应.

27947块, 建模用时29127 s. 对其进行切割获得四个切面Slice_1, Slice_2, Slice_3和Slice_4, 如图5(b)所示, 统计四个切面内骨料数量分别为646, 684, 686和676, 骨料面积占比分别为38.94%, 35.51%, 37.37%和37.21%, 与图5(c)真实混凝土切面对比, 本研究构造的细观混凝土模型具有较高的真实性.

本研究提出的基于激光扫描的骨料投放算法不涉及复杂的接触问题且不受骨料形状限制, 算法便于理解且具有较高的执行效率. SDMM骨料投放算法可根据实际研究需要构建满足要求的骨料库, 精确控制骨料投放粒径、级配和体积分数, 可作为混凝土、土石混合料等随机分布颗粒类材料细观模型研究的有效工具.

4 二维细观混凝土有限元模型

4.1 内聚力模型

内聚力模型理论最初由Dugdale^[27]和Barenblatt^[28]在20世纪60年代初提出. 它将裂纹视为两部分, 一部分为分离的两个自由面, 而在裂纹尖端部分微观层次上作用有内聚力, 致使材料开裂后并不立即完全断开, 这一部分即为内聚区, 如图6(a)所示. 在内聚区存在小

图 4 (网络版彩图) 骨料间侵入判断示意图. (a) 骨料间存在侵入现象; (b) 骨料间无侵入, 骨料投放成功

Figure 4 (Color online) The intrusion judgment between aggregates. (a) There is an overlap between aggregates; (b) there is no overlap between aggregates, and the aggregate is successfully placed.

图 5 (网络版彩图) 混凝土细观模型及真实试件切面. (a) 三维混凝土细观模型; (b) 三维细观模型切面; (c) 混凝土试件切面

Figure 5 (Color online) Mesoscopic concrete model and cross sections of specimen. (a) 3D mesoscopic concrete model; (b) cross sections of concrete model; (c) cross sections of specimen.

图 6 内聚力模型示意图. (a) 内聚力模型; (b) 牵引分离法则

Figure 6 Schematics of the cohesive zone model. (a) Cohesive zone model; (b) traction separation law.

于某一临界值 δ_m^f 的裂纹张开位移 δ , 而作用在裂纹面上的内聚力 f_t 定义为裂纹张开位移 δ 的函数, 称 f_t - δ 之间的关系为牵引分离法则, 如图6(b)所示. 内聚区开始

承载时, 内聚力 f_t 随裂纹张开位移 δ 的增大先逐渐增大, 当裂纹张开位移达到 δ_m^0 , 此时意味着材料开始出现损伤, 随后随着裂纹张开位移的增大内聚力开始减小至

图 7 (网络版彩图) 内聚力单元与实体单元兼容, 橘红色部分为内聚力单元, 其厚度为零

Figure 7 (Color online) The cohesive elements are compatible with the solid elements, where the cohesive elements are brick red and have a zero thickness.

零, 断裂能在此时达到材料破坏所需的临界断裂能 G^C (断裂能为 f_t - δ 曲线所包含的面积, 即 $G^C = \int f_t d\delta$), 此时内聚力单元完全失效并从整个计算模型中移除, 单元移除后结构中便产生了细微的裂纹, 随着计算的进行裂纹不断扩展, 进而引起整个模型的破坏。

内聚力单元与实体单元具有网格拓扑上的联系, 这种拓扑联系表现在内聚力单元可与ABAQUS中的三角形单元、四边形单元及四面体、六面体单元相互兼容, 如图7所示。但二者的本构模型相互独立, 因此实体单元本构模型可选用线弹性、弹塑性等。而内聚力单元的本构性态由牵引-分离、损伤起始、损伤演化三个阶段来定义。当内聚力单元在外力的作用下达到破坏标准时将从模型中移除并在此界面上形成断裂面。内聚力模型能够很好地模拟脆性材料的裂纹萌生、演化和破坏的全过程^[16,23,29]。

4.2 二维细观混凝土单轴压缩计算模型

编写程序将图5(b)中四个切面内等效粒径小于 $D_{\min}$ 的骨料融入砂浆之中, 统计四个切面内剩余骨料个数分别为323, 332, 329和319, 四个切面内剩余骨料面积占比分别为36.18%, 32.73%, 34.41%和34.22%, 统计得到4个模型骨料颗粒级配曲线如图8所示。统计结果表明: 4个模型内骨料数量和骨料含量波动较小, 由图8可知, 4个模型中骨料颗粒级配分布基本一致, 并且4个二维模型骨料级配分布在一定程度上也能够反映出三维模型的级配分布情况, 二维模型和三维模型级配分布差异性主要体现在大骨料级配区间, 产生这一规律的可能原因是三维模型中大骨料数量较少, 其分布随机性更大, 以至于各切面内大骨料分布表现出了一定的差异。

将模型信息导入到ABAQUS中进行有限元网格划分, 文献[16]研究表明单元尺寸与模型边长尺寸之比为1/150时模型具有较高的计算精度和效率, 故本模型中网格尺寸设置为1 mm, 网格划分完成后即可得到4个边长为150 mm×150 mm的二维全级配混凝土细观有限元模型Slice_1, Slice_2, Slice_3和Slice_4。网格划分完成后, 通过自主开发的内聚力单元嵌入程序, 将内聚力单元批量嵌入到有限元网格之间, 并将内聚力单元分为两类: 第一类记为MOR_COHE单元, 分布在砂浆单元之间; 第二类记为ITZ_COHE单元, 分布在砂浆和骨料单元之间, 即为砂浆-骨料之间的界面过渡区(interfacial transition zone)。骨料和砂浆单元采用线弹性的实体单元(C3D6), 内聚力单元采用零厚度的(COH3D8), 4个模型中单元总数分别为: 384146, 381215, 383143, 384100。模型中各类单元如图9所示。

借助ABAQUS提供的内聚力模型及其强大的并行计算功能, 对4个模型分别进行单轴压缩数值计算。

图 8 (网络版彩图) 骨料颗粒级配曲线

Figure 8 (Color online) Grading curve of aggregates.

图 9 (网络版彩图) 有限元模型及模型中不同类型单元. (a) 二维模型及其局部放大图; (b) 骨料单元; (c) 砂浆单元; (d) 界面内聚力单元; (e) 砂浆内聚力单元

Figure 9 (Color online) Finite element model and different types of elements in the model. (a) 2D model and its local enlargement; (b) aggregate elements; (c) mortar elements; (d) ITZ cohesive elements; (e) mortar cohesive elements.

表 1 计算模型参数

Table 1 Parameters of model

单元	密度 ρ (kg/m ³)	弹性模量 E (GPa)	泊松比 ν	法向刚度 K_n (N/m ³)	切向刚度 K_s (N/m ³)	抗拉强度 T_n (MPa)	抗剪强度 T_s (MPa)	法向断裂能 G_n (N/m)	切向断裂能 G_s (N/m)
骨料单元	2500	70	0.2	—	—	—	—	—	—
砂浆单元	2200	25	0.15	—	—	—	—	—	—
砂浆内聚力单元	2200	—	—	6×10^{12}	1.9×10^{13}	10	26	600	900
界面内聚力单元	2200	—	—	4×10^{12}	1.4×10^{13}	6	15	500	800

模型边界条件为: 下加载板固定, 上加载板以5 mm/s的速度加载, 加载时间 $t=0.3$ s, 上下加载板为刚体, 加载板与试件之间的摩擦系数为0.1, 为提高收敛性采用显示模块进行计算^[16,23]. 计算模型参数参考文献^[6,23], 见表1. 本次数值实验在Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU @2.6GHz计算机上完成, 单个模型数值计算时间约为18 h.

5 结果分析

单轴压缩物理实验3个试件尺寸为150 mm×150 mm×150 mm, 骨料含量为37%, 本实验在深部岩土力学与

地下工程国家重点实验室(北京)200 T电液伺服压力试验机上开展, 采用位移加载控制, 以0.1 mm/min的恒定速度加载, 直至试件破坏, 单轴压缩试件破坏图及其表面剥落后如图10所示, 应力-应变曲线如图11所示. 数值模拟4个模型裂纹演化和最终破坏模式如图12所示. 单轴压缩数值模拟和室内物理实验所得抗压强度和达到抗压强度所对应的应变见表2.

由数值计算结果对比实验可知.

(1) 骨料形状和空间位置具有很大的随机性, 使得试件内部不同位置处应力集中程度也不相同, 因此图12中各模型初始裂纹萌生位置也不尽相同, 但随着裂纹进一步扩展与贯通, 各试件主要呈现出不同形式

图 10 (网络版彩图) 混凝土立方体试件单轴压缩破坏图. (a) Test_1; (a) Test_2; (c) Test_3

Figure 10 (Color online) Failure patterns of concrete specimens under uniaxial compression. (a) Test_1; (a) Test_2; (c) Test_3.

图 11 (网络版彩图) 单轴压缩实验和数值计算应力-应变曲线对比

Figure 11 (Color online) Stress-strain curves of uniaxial compression experiments and numerical simulations.

的X型剪切破坏模式; 由图10可知物理实验各试件达到破坏, 试件外表剥落以后也呈现出不同形式的X型剪切破坏模式, 各试件外表剥落部分呈现出向内凸的锥形, 数值模拟与物理实验破坏模式相吻合. 产生此现象的可能原因是上下加载板对试件的端部约束效应, 限制了试件上下端部的横向变形, 并且端部约束效应自两端向中间逐渐减小. 虽然骨料空间分布对混凝土的单轴压缩状态下裂纹扩展路径有一定的影响, 但

在宏观破坏形态上仍具有统计学上的相似性.

(2) 由图11可知, 数值实验和物理实验应力-应变曲线大致可分为4个阶段: 压密阶段、线弹性阶段、裂纹扩展阶段和破坏阶段. 加载初期试件逐渐被压密, 其应力-应变曲线斜率逐渐增大; 随着荷载的增加试件进入线弹性阶段, 其应力-应变曲线近似直线; 随着试件内部裂纹萌生并不断扩展, 其应力-应变曲线斜率逐渐减小; 随着荷载的进一步增加, 试件内部裂纹贯通后承载力迅速减小, 应力-应变曲线呈下降趋势.

(3) 由图11可知, 在达到峰值应力以前室内实验3个试件的应力-应变曲线变化基本一致, 数值模拟4个模型的应力-应变曲线几乎重合, 随着荷载的增加, 应力-应变曲线差异逐渐增大, 这表明当骨料含量相近时, 试件弹性工作阶段力学响应特征基本一致, 但由于骨料空间分布的差异, 微裂纹的发展和演化路径也不相同, 以至于随着荷载的增加, 应力-应变曲线差异逐渐增大, 这也与文献[18]中数值计算结果相吻合.

(4) 由图11室内实验单轴压缩应力-应变曲线可知, 随着荷载的增加, 混凝土内部孔隙逐渐被压密, 其应力-应变曲线斜率逐渐增大, 但随着混凝土内部孔隙逐渐被压密, 室内物理实验所得应力-应变曲线与数值计算所得应力-应变曲线变化趋势基本吻合, 且数值计算和室内实验所得单轴抗压强度和极限应变平均值基本吻合, 分别为42.15、41.63 MPa和 2.17×10^{-3} 、 2.12×10^{-3} ,

图 12 (网络版彩图) 裂纹演化过程. (a) Slice_1; (b) Slice_2; (c) Slice_3; (d) Slice_4
Figure 12 (Color online) Crack evolution process. (a) Slice_1; (b) Slice_2; (c) Slice_3; (d) Slice_4.

表 2 数值计算结果和实验结果

Table 2 Numerical simulation results and experimental results

名称	Slice_1	Slice_2	Slice_3	Slice_4	Test_1	Test_2	Test_3
极限抗压强度 (MPa)	43.43	41.25	43.46	41.89	43.25	41.54	40.11
极限强度对应的应变 (10^{-3})	2.13	2.18	2.18	2.17	2.05	2.19	2.13

进一步验证了在该骨料范围内细观模型的适用性, 但由于二维数值计算无法模拟出三维空间约束效应, 二

维数值模拟应力-应变曲线下降段通常比物理实验曲线下下降速度更快.

6 结论

本研究借助三维激光扫描技术构建骨料库, 基于 MATLAB 编写骨料投放算法, 二者结合构造混凝土三维细观模型, 对三维模型剖切后获得二维全级配混凝土模型. 基于内聚力模型理论对二维模型进行单轴压缩数值计算, 对比实验结果分析了应力-应变曲线、裂纹扩展模式和破坏模式等. 本研究主要结论如下.

(1) 三维激光扫描技术能够保证骨料形态的真实性, 骨料库的构建则可以确保骨料的多样性, 结合 SDMM 骨料投放算法, 可根据设计要求精确控制骨料投放粒径、级配和体积分数等进行建模. 对比真实混凝土试件切面, 本研究所构建的二维混凝土细观模型符合实际, 可作为混凝土、土石混合料等随机分布颗

粒类材料细观模型研究的有效工具.

(2) 单轴压缩物理实验和数值计算结果均表明, 骨料级配和含量相近时混凝土单轴压缩试件应力-应变曲线峰值应力前变化趋势基本一致; 随着荷载的增加, 由于骨料形状和空间分布各不相同, 试件内部出现不同的裂纹扩展路径, 应力-应变曲线峰后段出现明显差异, 但是由于上下加载板的端部约束效应, 试件最终破坏模式主要以 X 型剪切破坏为主.

(3) 实验结果与数值计算结果具有较好的吻合性, 表明结合了三维激光扫描技术的混凝土细观力学建模法和基于内聚力模型的数值计算方法, 能够很好表征混凝土的破坏特征和力学响应特征. 但是鉴于二维模型的局限性, 为更好地研究混凝土细观层次的力学特性, 发展三维混凝土细观有限元模型很有必要.

参考文献

- Li J, Ren X D. Recent developments on stochastic damage mechanics for concrete (in Chinese). *J Build Struct*, 2014, 35: 20–29 [李杰, 任晓丹. 混凝土随机损伤力学研究进展. *建筑结构学报*, 2014, 35: 20–29]
- Liang S X, Li J. A two-phase random medium model for simulating the failure process of concrete (in Chinese). *Eng Mech*, 2018, 35: 116–123 [梁诗雪, 李杰. 基于两相随机介质的混凝土破坏全过程模拟. *工程力学*, 2018, 35: 116–123]
- Huang Y J, Yang Z J, Ren W Y, et al. 3D meso-scale fracture modelling and validation of concrete based on in-situ X-ray computed tomography images using damage plasticity model. *Int J Solids Struct*, 2015, 67: 340–352
- Huang Y J, Yan D M, Yang Z J, et al. 2D and 3D homogenization and fracture analysis of concrete based on in-situ X-ray computed tomography images and Monte Carlo simulations. *Eng Fract Mech*, 2016, 163: 37–54
- Trawiński W, Tejchman J, Bobiński J. A three-dimensional meso-scale modelling of concrete fracture, based on cohesive elements and X-ray μ CT images. *Eng Fract Mech*, 2018, 189: 27–50
- Ren W Y, Yang Z J, Sharma R, et al. Two-dimensional X-ray CT image based meso-scale fracture modelling of concrete. *Eng Fract Mech*, 2015, 133: 24–39
- Ma H F, Chen H Q, Li B K. Meso-structure numerical simulation of concrete specimens (in Chinese). *J Hydraulic Eng*, 2004, 10: 27–35 [马怀发, 陈厚群, 黎保琨. 混凝土试件细观结构的数值模拟. *水利学报*, 2004, 10: 27–35]
- Ma H F, Chen H Q, Li B K. Influence of meso-structure heterogeneity on dynamic bending strength of concrete (in Chinese). *J Hydraulic Eng*, 2005, 7: 846–852 [马怀发, 陈厚群, 黎保琨. 细观结构不均匀性对混凝土动弯拉强度的影响. *水利学报*, 2005, 7: 846–852]
- Wang X F, Yang Z J, Yates J R, et al. Monte Carlo simulations of mesoscale fracture modelling of concrete with random aggregates and pores. *Constr Build Mater*, 2015, 75: 35–45
- Wang X F, Yang Z J, Jivkov A P. Monte Carlo simulations of mesoscale fracture of concrete with random aggregates and pores: A size effect study. *Constr Build Mater*, 2015, 80: 262–272
- Yilmaz O, Molinari J F. A mesoscale fracture model for concrete. *Cement Concrete Res*, 2017, 97: 84–94
- Wang Z M. Numerical simulation of strain softening and localization for concrete materials (in Chinese). *J Basic Sci Eng*, 2000, 2: 187–194 [王宗敏. 混凝土应变软化与局部化的数值模拟. *应用基础与工程科学学报*, 2000, 2: 187–194]
- Ma H F, Xu W X, Li Y C. Random aggregate model for mesoscopic structures and mechanical analysis of fully-graded concrete. *Comput Struct*, 2016, 177: 103–113
- Ma H F, Song L Z, Xu W X. A novel numerical scheme for random parameterized convex aggregate models with a high-volume fraction of aggregates in concrete-like granular materials. *Comput Struct*, 2018, 209: 57–64

- 15 Qin X G, Gu C S, Shao C F, et al. Numerical analysis of fracturing behavior in fully-graded concrete with oversized aggregates from mesoscopic perspective. [Constr Build Mater](#), 2020, 253: 119184
- 16 Xiong X Y, Xiao Q S. A unified meso-scale simulation method for concrete under both tension and compression based on cohesive zone model (in Chinese). *J Hydraulic Eng*, 2019, 50: 448–462 [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. *水利学报*, 2019, 50: 448–462]
- 17 Hong L, Gu X L. Influences of Surface Roughness and Shape of Coarse Aggregates on Mechanical Properties of Concrete (in Chinese). Shanghai: Tongji University Press, 2018 [洪丽, 顾祥林. 骨料表面粗糙度及骨料形状对混凝土力学性能的影响. 上海: 同济大学出版社, 2018]
- 18 Zhou S X, Han Z, Wei X, et al. Influence of aggregate contents and volume of interfacial transition zone on chloride ion diffusion properties of concrete (in Chinese). *J Build Mater*, 2018, 21: 351–357 [周双喜, 韩震, 魏星, 等. 骨料含量和界面区体积对混凝土氯离子扩散性能的影响. *建筑材料学报*, 2018, 21: 351–357]
- 19 Chen Y W, Feng J L, Li H, et al. Effect of coarse aggregate volume fraction on mode II fracture toughness of concrete. [Eng Fract Mech](#), 2021, 242: 107472
- 20 Liang M F, Feng K, Xiao M Q, et al. Water permeability of concrete based on materials experiment and mesoscale model (in Chinese). *J Build Mater*, 2020, 23: 801–809 [梁敏飞, 封坤, 肖明清, 等. 基于材料试验和细观模型的混凝土渗透性研究. *建筑材料学报*, 2020, 23: 801–809]
- 21 Zhou Y L, Jin H, Wang B L. Modeling and mechanical influence of meso-scale concrete considering actual aggregate shapes. [Constr Build Mater](#), 2019, 228: 116785
- 22 Xie H, Feng J L. Implementation of numerical mesostructure concrete material models: A dot matrix method. [Materials](#), 2019, 12: 3835
- 23 Xie H. Study on failure process and mechanism of concrete with mesostructure based on cohesive zone model (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: China University of Mining and Technology, 2020 [谢浩. 基于内聚力模型的细观混凝土破坏过程及机理研究. 博士学位论文. 北京: 中国矿业大学(北京), 2020]
- 24 Sui S C, Zhu X S. Digital measurement technique for evaluating aircraft final assembly quality (in Chinese). [Sci Sin Tech](#), 2020, 50: 1449–1460 [隋少春, 朱绪胜. 飞机整机装配质量数字化测量技术. *中国科学: 技术科学*, 2020, 50: 1449–1460]
- 25 Anochie-Boateng J K, Komba J J, Mvelase G M. Three-dimensional laser scanning technique to quantify aggregate and ballast shape properties. [Constr Build Mater](#), 2013, 43: 389–398
- 26 Xu W X, Chen H S. Numerical investigation of effect of particle shape and particle size distribution on fresh cement paste microstructure via random sequential packing of dodecahedral cement particles. [Comput Struct](#), 2013, 114: 35–45
- 27 Dugdale D S. Yielding of steel sheets containing slits. [J Mech Phys Solids](#), 1960, 8: 100–104
- 28 Barenblatt G I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Adv Appl Mech*, 1962, 7: 55–129
- 29 Yang Z J, Huang Y J, Yao F. Three-dimensional meso-scale cohesive fracture modeling of concrete using a python script in abaqus (in Chinese). *Eng Mech*, 2020, 37: 158–166 [杨贞军, 黄宇劫, 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. *工程力学*, 2020, 37: 158–166]

Meso-concrete modeling based on laser scanning technology

ZHANG LongFei¹, XIE Hao^{2,3}, CHEN YanWei¹, LI ErQiang⁴ & FENG JiLi¹

¹ State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

² Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., Jinan 250014, China;

³ School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, China;

⁴ School of Civil Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471000, China

This contribution focuses on the construction of a 3D or 2D mesoscopic concrete model using laser scanning technology and the state dot-matrix method of aggregate placement. First, a 3D laser scanner was used to collect geometry information from real aggregates to create an aggregate library. The aggregates were then randomly selected from the aggregate library and placed according to the Fuller grading curve in order of reduction to produce a 3D mesoscopic concrete model. By cutting the 3D geometry model, a simplified two-dimensional plane geometry model was obtained. One of the benefits of laser scanning technology is that it ensures the realistic morphology of various aggregates while ensuring that the aggregate library perfectly meets the fundamental requirement for the construction of mesoscopic concrete models. Furthermore, the current aggregate placement algorithm allows for the efficient and rapid establishment of a concrete geometry model with microstructure. Finally, combined with the laboratory experiments of concrete, the influence of aggregate distribution on the failure mechanism of concrete was studied by the finite element method with the cohesive zone model under uniaxial compressions.

laser scanning, aggregate, mesoscopic concrete, aggregate placement algorithm, cohesive zone model

doi: [10.1360/SST-2021-0267](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0267)