

随机凹凸型骨料在混凝土细观数值模型中配置算法研究

李建波^{*1,2}, 林 泉^{1,2}, 陈健云^{1,2}

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 混凝土细观结构随机骨料数值模型的建立及其损伤破坏力学分析, 可为混凝土宏观强度分析研究提供依据. 适于满足各类指定的骨料级配曲线, 针对任意形状、大小的骨料颗粒的生成与投放过程提出了一种改进算法, 突破了传统凸形骨料的投放限制, 使细观数值模型更接近于混凝土试件断面的实际. 具体实现过程中, 基于计算机图形学多边形重叠判断及区域填充算法, 来消除预投放骨料间的交叠现象. 此外, 利用粒径极值比来控制骨料形状, 还提出骨料颗粒投放过程的用户微干预方法, 比较传统完全随机法, 提高了投放的成功率及效率. 算例验证了骨料的实际投放效果.

关键词: 混凝土; 细观数值模拟; 随机骨料模型; 有限元法

中图分类号: TU528; TV331 **文献标志码:** A

0 引言

通常认为, 宏观数值模型能较好地模拟混凝土材料的均质性, 但难以反映细观局部材料的非均匀性, 也难以捕捉局部材料破坏的随机性, 因此, 运用细观力学方法数值模拟全级配大体积混凝土试件的力学性能, 既可以弥补试验研究成果的不足, 也能通过细观机理研究为混凝土宏观结构分析, 及相关宏观力学参数的选择提供可靠的数值依据^[1].

在细观力学分析的实际运作中, 混凝土大多被认为是一种由粗骨料、水泥砂浆及二者间的粘结带所组成的三相非均质复合材料. 而首要的问题就是建立起能反映实际浇筑情况的混凝土随机骨料数值试件, 其中尤其需要注重粗骨料颗粒的形状、分布及总体填充率等几个控制条件^[2,3]. 而目前数值生成算法中, 对骨料颗粒的基本形状多限制于凸多边形或凸多面体假设, 这主要是受骨料“取放”填充算法的局限, 如凹骨料颗粒间难以进行准确的重叠判断等. 此外, 目前的混凝土细观本构研究主要集中在材料的准静态力学特征等方

面, 一般不考虑骨料本身被拉断或剪断的情况, 也容易使研究者忽略骨料颗粒形状的影响.

但实际上, 凹型骨料颗粒大量存在. 从混凝土试件的轴拉动载破坏试验的破坏断面上发现有破坏骨料明显增多的现象, 而且在混凝土试件的轴压动力破坏试验中也发现骨料有明显破坏的现象. 这些都表明, 在建立混凝土随机骨料数值模型中, 不仅要考虑骨料大小及分布的不均匀性, 而且应该重视骨料形状的作用, 主要体现在骨料之间凹凸面契合作用可能对混凝土试件动力破裂面的形状及位置产生影响, 不能片面地强调骨料分布的随机性, 也应该重视骨料颗粒凹凸形状的随机性.

文献[4]中提出了一种凹骨料填充算法, 但从文中填充效果来看, 奇形骨料大量存在, 表现在骨料的长宽比过大. 显然, 在目前先进的岩石破碎技术条件下, 这与较为规整的骨料实际颗粒之间有一定差距. 此外针对填充率较高的情况, 完全基于蒙特卡罗骨料随机填充算法, 必然会带来填充效率及成功率低下的问题, 而该方面的处理未见相关文献探讨. 本文通过提出骨料粒径极值比阈值

收稿日期: 2006-12-15; 修回日期: 2008-10-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90510018, 50578032); “973”重点基础研究发展计划资助项目(2007CB714107).

作者简介: 李建波^{*}(1977-), 男, 博士, 讲师, E-mail: jianboli@dlut.edu.cn; 林 泉(1929-), 男, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士.

的方法,剔除奇形骨料颗粒,并针对骨料填充过程采取半人工干预方式,切实做到在保证骨料目标填充效率及成功率条件下,兼顾骨料形状与分布的随机性。

1 任意凹凸型骨料颗粒的数值生成技术

在混凝土细观数值模型的形成过程中(实际混凝土试件的横截面见图1),首先遇到的问题便是各个骨料颗粒的生成,这其中应该考虑骨料粒径、形状等特征的随机性。

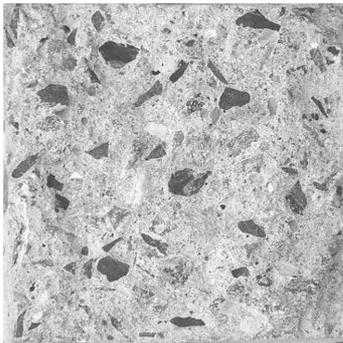


图1 实际混凝土试件横截面

Fig.1 Cross-section of concrete specimen

1.1 凹凸骨料颗粒数值模型的建立

实际工程中,混凝土的粗骨料常常是碎石子,那么在混凝土试件的任一截面上,这些骨料都是多边形。为生成 N 边形($N \geq 3$)的骨料数值模型,一种常用算法是选用极坐标系来确定各个角点的极半径 r_i 以及相邻极半径间的夹角 ϕ_i ^[1],如图2所示。

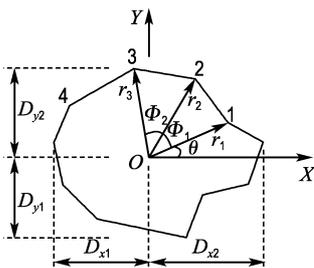


图2 随机骨料颗粒数值模型

Fig.2 Numerical model of random aggregate

如此,为定义一个多边形骨料数值模型,关键的随机参数有4个,分别是角点总数 N (随机量,如3~9的正态分布),描述骨料整体旋转角度的 θ ($0 \leq \theta \leq 2\pi$,均匀分布),以及每个角点对应的 r_i (可取0~1的均匀随机分布)、 ϕ_i (随机确定公式可参见文献[2])。其中,各相邻角点间的极角 ϕ_i 应

该满足

$$\sum_{i=1}^N \phi_i = 2\pi \quad (1)$$

在此基础上,基于坐标变换,可获得以 $O(0, 0)$ 为原点,直角坐标系 X - Y 下的各个角点局部坐标 $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$,如图2所示。

1.2 粒径及面积计算与骨料的形状控制

按1.1节生成的骨料粒径位于 $(0, 2)$,需要按照级配曲线进行粒径缩放;此外,颗粒往往存在极大的形状任意性,需要进行筛选。

针对骨料的粒径计算,通常采用“卡尺”算法,如图3所示。

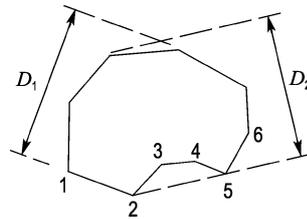


图3 凹多边形骨料粒径计算

Fig.3 Particle size of concave aggregate

以多边形的边进行循环,定义 D_i 为多边形角点距离该边线的距离最大值。细节上,涉及两种情况:

一是,凸轮廓边对应粒径值,如图中1-2边,记为 D_1 ;

二是,凹轮廓边,如图中2-3、3-4、4-5边,记为 D_2 ,其间凹点对应的 D_3 、 D_4 标记为无效。

遍历各个角点记录下的 D_i ($1 \leq i \leq N$),寻找出极大值 D_{\max} 和极小值 D_{\min} 。极小值即为该骨料颗粒的粒径。至于凹凸边的判断,也容易进行,只要将边两端点以外的其他点代入边方程中,如果存在异号,则为凹边,否则为凸边。该算法也适用于三维骨料中凹轮廓面与凸轮廓面的判断。

值得说明的是,破碎骨料因其破碎加工工艺,基本上不可能出现形状过长的骨料。但文献中通常未对骨料的形状进行控制。仅见文献[4]提出用全局的矩形包围盒作为量度来判断,而没有考虑骨料整体转角的影响。本文提出采用局部的骨料极值比 $\mu = D_{\max}/D_{\min}$ 限值的做法,控制骨料颗粒的形状。显然 μ 越接近于1,则骨料颗粒的形状也越规整。

将骨料多边形以原点为中心角点离散为三角形的集合体,进而累加各个三角形子域的面积即得颗粒面积。由于对应角点的夹角是按顺序生成,基本上各极半径严格按照逆时针顺序。

2 混凝土随机骨料模型的数值生成算法

2.1 符合级配曲线的骨料集合的生成算法

各种矿料混合料的配合比设计,往往是混凝土浇筑工程的首要任务,以确定不同级配曲线走向决定混合料的结构类型,从而影响其各项力学性能.数值上,体现在混凝土骨料粒径应该满足一定的级配曲线分布规律,以累积分布函数 $P_{2d}(d)$ 来表示.级配曲线类型很多,如两级配、四级配等.下面将以等体积的骨料全级配为例进行阐述:

$$P_{2d}(d) = \frac{d^2(d_m^2 - d_0^2)^{1.5} - d_0^2(d_m^2 - d^2)^{1.5}}{d^2(d_m^2 - d_0^2)^{1.5}} \quad (2)$$

其中 d_0 和 d_m 分别为最小和最大骨料粒径,具体图线可参考文献[2].于是,针对二维混凝土数值试件,在给定断面骨料填充比 A_a 的条件下,骨料颗粒集合的建立过程简述如下:

Step 1 基于蒙特卡罗法生成满足式(2)分布曲线的一个随机数,作为待求颗粒的粒径 d_i ;

Step 2 按第1章算法,生成一个具有任意凹凸性特点的骨料数值颗粒,并满足指定的骨料粒径极值比;

Step 3 将上步生成的骨料颗粒比例缩放,使其粒径正好为 Step 1 中指定的 d_i ;

Step 4 累加该颗粒的面积,并判断骨料颗粒的总面积是否超过指定的断面面积比;否,则转入 Step 1;是,则进行下一步.

Step 5 基于快速排序法,按粒径大小,建立从大至小的骨料集合,完毕.

2.2 投放的部分人工干预算法

一旦 2.1 中所述骨料集合生成完毕,就可以按顺序将它们逐一随机分布在指定的混凝土试件轮廓内^[2,3].为算法描述的方便,本节以典型的矩形混凝土试件断面的填充为例进行阐述.

首先,确定骨料的随机位置,关键是确定骨料颗粒多边形局部极坐标系原点 O 的位置,但同时应避免与其他骨料颗粒交叠.因而,选择合适的骨料颗粒多边形之间的交叠侵入判别准则对于提高填充效率十分重要,尤其针对凹凸型骨料颗粒多边形共存的情况.本文基于 VC++ 开发二维混凝土细观数值模型生成软件.为避免过多的交叠判断,借用计算机图形学中画家消隐算法的思想,提出了基于圆形包围盒的交叠预判做法.定义

骨料角点与局部极坐标原点 O 的最大距离为特征长度,当两骨料多边形局部极坐标原点之间的距离小于两者特征长度和时,两颗粒才需要进行交叠判别.进而,可直接利用 MFC 提供的库函数 $PtInRegion()$ 进行多边形交叠判断.该函数适用于各类型的凹凸多边形,且效率高.

为避免骨料颗粒间的交叠,通常做法是完全依靠随机填充,若始终出现交叠则回溯重新填充前一颗粒,直至当前颗粒也能填充下.但如图 4(b)所示,若骨料 4 尺寸较小,则能填充下.否则,只能追溯到骨料 2,需要骨料 2 随机排列到如图 4(a)的位置,才能保证骨料 3 和 4 得以顺利填充.

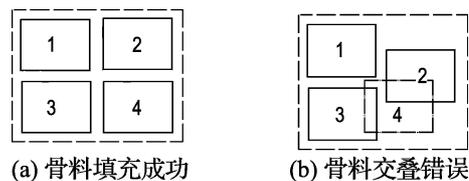


图4 随机骨料颗粒填充过程比较

Fig. 4 Comparison of the filling procedures for random aggregates

可见,将骨料颗粒按由大至小的顺序进行随机填充是必要的.但如此仍容易出现回代次数过多,导致填充效率低下或失败等情况.尤其对于含大规范骨料颗粒或很高骨料填充率的混凝土数值试件来说,完全依靠随机填充算法,成功率及填充效率是值得怀疑的.

由于以上缺陷,文献中出现了其他形式的混凝土细观数值模型的生成技术,如在三角形细观网格剖分的基础上,采用局部三角形合成或生长的方式,来形成骨料颗粒^[5].但从填充效果来看,除指定断面填充率容易满足外,骨料形状却易受基网格形状的影响,且多局限为凸多边形,同时最终延拓生成的骨料集合也难以严格满足级配曲线要求.

其实,从本文编制的二维相关软件的使用来看,经过大量的回溯填充之后,只有极少数骨料仍存在交叠,在 5% 之下.可以暂时忽略这些交叠的存在,而使填充完成.最后采用在保证骨料颗粒粒径及面积不变的条件下做人工修正,如原位旋转角度,或周围少量骨料位置调整的形式,来完成这少数骨料的投放过程.

3 混凝土随机骨料模型的有限元剖分技术

混凝土有限元细观分析模型的建立,需要对

上述的随机骨料模型进行网格剖分,并确定各单元的特征,如骨料单元、界面单元或者基质单元.文献中大多利用三角形单元,对随机模型中的骨料和基质分别进行网格划分^[6].如此,可能导致单元数目大量增加,并不能利用四边形等单元良好的力学性质.

其实,在细观力学的研究层次上,单元一般仅在毫米级上,如此针对一个二维的宏观试件数值模型,即使直接采用规则的矩形单元来进行混凝土试件轮廓内“马赛克式”的网格划分,边界描述的程度也是不错^[1].然后,再利用矩形很好的规则特性,计算单元内骨料和基质所占百分比,判别该单元的隶属特性,如可根据某些单元内骨料与基质分量来确定界面单元一些参数的变化,如下章算例.

4 算例应用验证

针对一 25 cm×25 cm 正方形区域的二维混凝土试件,建立其对应的随机骨料模型,并进行有限元网格剖分,确定各细观单元的基本特征.

骨料颗粒的粒径满足式(2)所描述的等体积全级配曲线,填充比 50%,最大粒径为 3.0 cm,最小粒径为 1.5 cm.骨料粒径极值比取 $\mu \leq 1.5$.

基于本文数值生成方法,建立了对应的骨料颗粒集合,实际的骨料颗粒,最大粒径 2.894 cm,最小粒径 1.51 cm,填充比为 50.329%.而且不难判断,这种事先骨料集合生成方法,级配曲线也将十分接近目标要求.

然后,将骨料颗粒按粒径由大至小的顺序,逐一进行完全的回溯型随机填充.在该过程中,每颗骨料的随机位置尝试最大次数 30 万次,若仍填充不下,则回溯重新填充上一骨料,最大的回溯层数为 10 层.若仍存在骨料交叠,将保留该交叠状态.初步的填充结果如图 5 所示,其中,凹骨料明显存在,且形状合理.图 5 也显示,在上述条件下,仍有少量的骨料未填充成功,可见完全基于随机填充,针对大填充率的情况其效率及成功性值得怀疑.

在图 5 基础上,尽量保证骨料颗粒形状不变,采用原位旋转角度,或周围少量骨料位置调整的形式,来完成这少数骨料的投放过程.最终填充效果见图 6.进而,采用本文提出的有限元剖分模式,基于计算机图形学方法,将区域先放大,进行有限元“马赛克式”网格剖分,并根据各细观单元网格中基质和骨料像素点的含量来确定单元类型及基本性质.图 7 为软件显示,给出试件左上角部

位局部放大效果的同时,给出了统计的基本填充信息.

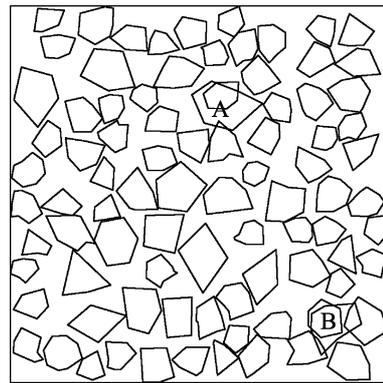


图 5 凹凸多边形骨料初步填充图

Fig. 5 Pre-filling results for random aggregates in a 2D rectangle specimen

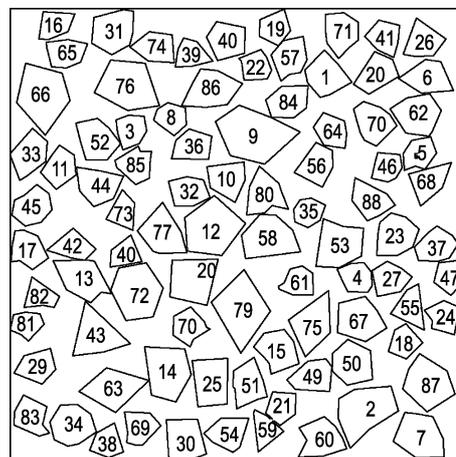


图 6 凹凸多边形骨料填充结果

Fig. 6 Final filling results for random aggregates

- 填充区域=矩形截面
水平长:25.000 cm
竖直宽:25.000 cm
- 骨料填充设计目标
级配类型:对等体积骨料级配
最小粒径:1.50 cm;
最大粒径:3.00 cm
区域填充比例:50.000%
- 骨料填充实际情况
最小粒径:1.510 cm;
最大粒径:2.894 cm
填充率:50.3290%
总填充数目:88 个
相交单元数:0 个
- 网格剖分情况
像素尺寸:0.0203 cm
网格尺寸 DX=0.2000 cm
网格尺寸 DY=0.2000 cm
网格数 NX=125
网格数 NY=125
总网格单元:NX * NY=15625
单元内像素数目 NIPT=81

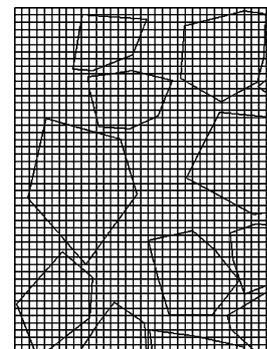


图 7 软件显示的有限元网格划分结果

Fig. 7 Numerical results of the finite element meshes

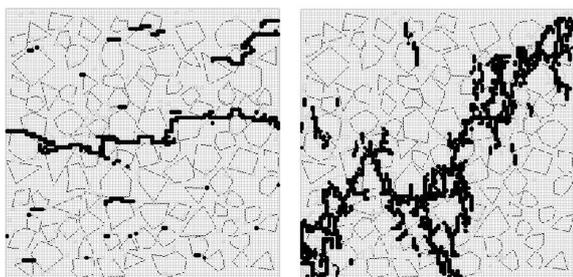
基于本章应用验证不难看出,采用本文建模方法,还可方便地计算出凹凸骨料的数目比、填充中出现的交叉骨料比、角点数目的随机分布情况、极大极小粒径比的随机分布等附加信息,并可尝试加以控制。

进而,基于混凝土试样损伤破坏的细观数值演化分析方法^[7],取按本文方法实现的10 cm×10 cm的混凝土细观数值试件,以1 mm边长进行规则化网格划分,细观单元的力学参数满足Weibull分布(取值见表1)。针对试件宏观表征的静态强度特征,进行分级静加载条件下试件的轴向拉压数值分析。采用位移控制的加载模式,试件上下端均匀受法向拉或压载荷,加载步长为0.001 mm/s(受拉)或0.004 mm/s(受压)。最终的计算破坏图见图8。

表1 细观单元的力学参数分布表

Tab. 1 Mechanical parameters for various meso-elements

类别	弹性模量	抗拉强度	均质度	变异系数	泊松比
	均值 /GPa	均值 /MPa			
骨料	55	6.0	9	0.15	0.2
基质	26	3.5	6	0.15	0.2
界面	23	2.8	4	0.20	0.2



(a) 上下端受拉破坏

(b) 上下端受压破坏

图8 混凝土细观试件的损伤破坏数值实验

Fig. 8 Numerical analysis of damage and fracture under uniaxial static loading

从图8看出,采用本文建立的混凝土试件的细观数值模型,宏观裂缝出现的位置及形状合理。

进一步,基于将骨料颗粒看做极坐标圆心出发的锥体的集合(局部可见图9)的本文随机骨料数值颗粒的生成思想,同样适用于三维骨料模型的生成,骨料的交叠判断可采用骨料的锥体子单元判断来代替。但三维环境下的填充过程,人为干

预将显得十分为难。类似于本文探讨的二维情况,就混凝土三维骨料模型的建立,目前同样主要有两条途径:一是,先形成骨料颗粒集合,再逐一填充。李运成等就此提出了骨料占位网格排除法^[8],可一定程度上提高投放的效率;二是,先将试件剖分为细观锥体网格,再基于网格合并或生长形成骨料颗粒^[9],但该方法中如何控制骨料形状仍是难点。

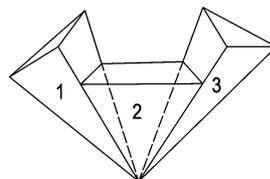


图9 三维混凝土凹凸型骨料局部锥体组合图

Fig. 9 Combination of local cones in a 3D numerical meso-model of concrete specimen

此外,值得注意的是,混凝土细观数值模型的随机性因素除几何特征外,还体现在诸多力学参数的分布上。这方面的研究目前还主要集中在材料的准静态特征方面,如唐春安等引入随机力学模型,考虑细观单元初始参数不均匀性对混凝土宏观力学性能的影响^[1];马怀发等则就细观单元的力学参数选取对试件弯拉强度的影响^[10]进行了对比分析等。

5 结 语

以细观力学理论和实际物理实验相结合为手段,去研究混凝土受力特性,可在细观裂缝发展和宏观力学性能研究之间架起一座桥梁。但通常采用的混凝土随机骨料数值模型的建立方法,往往偏重于骨料粒径及位置的分布,而忽略骨料颗粒形状的随机性。为反映试件中凹形状骨料颗粒的存在及在混凝土数值实验中反映凹凸骨料之间可能发生的契合作用,本文改进并提出了一种随机凹凸型骨料在混凝土细观数值模型中的配置算法。

由分析可知,在指定的相对较高骨料填充率条件下,为保证二维混凝土细观模型建立的成功率和高效性,利用成熟的计算机可视化技术及少量的人工干预是必要的。针对少量重叠骨料的人工干预调整方法也较多,如修正形体、挪动位置、旋转角度、删补骨料等,但前提是不明显改变骨料

的级配曲线及总体填充率。

文中应用实践证明本文方法的可行性及有效性,提高了二维骨料填充的成功率,并有效地反映了混凝土细观数值模型多方面的几何随机特征,如骨料颗粒形状(含凹凸、边数、粒径极值比)、颗粒大小、颗粒位置等。应用该算法,能严格保证混凝土细观试件骨料填充结果与指定级配曲线及断面填充率严格一致。

参考文献:

- [1] 唐春安,朱万成. 混凝土损伤与断裂——数值实验[M]. 北京:科学出版社, 2003
- [2] 张 剑,金南国,金贤玉,等. 混凝土多边形骨料分布的数值模拟方法[J]. 浙江大学学报, 2004, **38**(5): 581-585
- [3] WANG Z M, KWAN A K H, CHAN H C. Mesoscopic study of concrete I: Generation of random

aggregate structure and finite element mesh [J].

Computers & Structures, 1999, **70**(5):533-544

- [4] 王宗敏,邱志章. 混凝土细观随机骨料结构与有限元网格剖分[J]. 计算力学学报, 2005, **22**(6):728-732
- [5] 高政国,刘光廷. 二维混凝土随机骨料模型研究[J]. 清华大学学报, 2003, **43**(5):710-714
- [6] 孙立国,杜成斌,戴春霞. 大体积混凝土随机骨料数值模型[J]. 河海大学学报, 2005, **33**(3):291-295
- [7] 赵 娟. 混凝土试样损伤的细观数值演化分析[D]. 大连:大连理工大学, 2006
- [8] 李运成,马怀发,陈厚群,等. 混凝土随机凸多面体骨料模型生成及细观有限元剖分[J]. 水利学报, 2006, **37**(5):588-592
- [9] 刘光廷,高政国. 三维凸型混凝土骨料随机投放算法[J]. 清华大学学报, 2003, **43**(8):1120-1123
- [10] 马怀发,陈厚群,黎保琨. 混凝土试件细观结构的数值模拟[J]. 水利学报, 2004, **10**:27-35

Numerical generation and efficient distribution for random shape aggregates in mesoscopic concrete model

LI Jian-bo^{*1,2}, LIN Gao^{1,2}, CHEN Jian-yun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Earthquake Engineering Research Division, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The meso-mechanics analysis on the basis of numerical random aggregate model can provide convincing theoretical and numerical supports for the macroscopic strength analysis of concrete structure. According to the objective various aggregate grading curves, an improved numerical method is presented for the aggregate numerical generation with random shape and particle size, which breaks the numerical limit of convex aggregates in other common methods. During the aggregate generation process, techniques of distinguishing overlap regions and filling complex regions on the computer graphics are used to remove the regional overlap in the packing process. The definition of dimensional extreme ratio for particle size is proposed to control the figure of random rock aggregates. Also, an effective method under a little artificial interference is adopted in the forming process of concrete meso-mechanics model to improve the successful probability. The efficiency and feasibility of the presented random aggregate generation method is numerically validated by the practical generation results.

Key words: concrete; mesoscopic numerical simulation; random aggregate model; finite element method