

文章编号:0559-9350(2011)05-0609-07

混凝土三维随机凸型骨料模型生成方法研究

程伟峰

(中国水电顾问集团 昆明勘测设计研究院, 云南, 昆明 650033)

摘要: 为了较好地模拟混凝土的细观结构, 开展了混凝土三维细观随机骨料模型的算法研究, 比较分析了骨料生长、相交的算法特点。以随机球形骨料模型为基础, 以体积为标度, 在前人的基础上, 提出了一种新的混凝土三维凸型骨料的生长方式——射线延拓法和一种新的骨料相交判断方法——有约束非线性最优化方法, 避免了骨料传统相交判断算法中的多重循环。采用分割-填充法, 改善了骨料随机投放过程中的效率问题, 使得建模更快捷、有效。

关键词: 混凝土; 随机凸多面体骨料模型; 数值模拟; 射线延拓法; 约束非线性最优化方法

中图分类号: TV431

文献标识码: A

1 研究背景

骨料是混凝土的重要组成部分, 它的大小、分布、形状、种类、强度、体积率、最大粒径以及级配对硬化混凝土的力学、变形以及耐久性能等有着至关重要的影响。长期以来, 基于宏观层次的研究耗费大量的人力和物力, 而且试验周期长, 受材料、人为、环境和仪器设备等因素影响严重。为了避免上述不利因素的影响和更好地分析混凝土材料的力学性能和破坏过程的实质, 随着高速大容量计算机的快速发展, 基于骨料随机分布的混凝土计算材料科学随之产生。

早在20世纪80年代中期, Wittmann等^[1]就建立了圆形、角度和边数随机分布的多边形以及无规则的自然集料模型。基于此模型, 研究者作了大量工作, 钱觉时^[2]提出二维各种骨料模型投放算法。Wang等^[3]对一般的碎石骨料进行了计算机模拟, 实现了凸多边形骨料的投放算法。

为了得到更为真实的混凝土模型, 有必要对骨料形状的几何特征采用更为细致的方法进行模拟。为此, 刘光廷等^[4]、李运成等^[5]和杜成斌等^[6]针对混凝土的碎石骨料模拟进行了研究, 并选取凸型多面体骨料随机投放为研究对象, 旨在更最大限度地模拟混凝土实际结构。这些将混凝土骨料分布模拟成空间凸多面体随机分布的方法, 在统计特性上最能模拟实际混凝土构成。但文献[4]的方法所建立的模型骨料含量较低, 且没有考虑实际骨料级配, 难以实际应用。文献[5-6]虽然考虑了实际级配, 但是文献[5]在基骨料的生长方面明显存在效率问题, 同时在投放骨料的过程中未能及时限制单个骨料和球形骨料的偏差, 使得在最后的误差调整中再次影响了程序的效率, 因此, 程序的实用性欠佳。文献[6]在骨料的相交判断上沿袭了文献[4]的方法。这种通过体积和测试的方法, 在骨料的投放过程中需要多重循环来判断骨料是否相交, 严重影响程序的运行效率。本文在前人研究基础上, 提出一种新的空间三维凸形骨料的模拟方法和骨料相交判断方法。

收稿日期: 2009-06-29

作者简介: 程伟峰(1982-), 男, 安徽霍邱人, 硕士, 助理工程师, 主要从事混凝土细观结构的数值模拟及新材料在混凝土中应用研究。E-mail: chengwf@yahoo.cn

2 理论模型

2.1 基骨料的构造方法 凸形骨料空间形状复杂,因此很难在三维空间直接生成实现,传统算法是首先在一个虚拟的球体内部构造基骨料,然后通过对基骨料的面或边进行延拓以得到一个成品骨料。对于基骨料一般构造为四面体或六面体。四面体的构造主要是在球面上随机生成4个点组成四面体,通过控制四面体的体积大于某个值,使生成的随机四面体不至于太小,以利于后续的进一步延拓。对于基骨料为六面体的生成方法是首先在过球心的任一平面内生成一个内接正三角形,然后再在该平面所分的上下球面上各随机取一点,组成一个外表面都为三角形的六面体。为了降低对基骨料的延凸次数和限制畸形骨料的产生,上、下两点的选取位置必须符合程序中给定的限制值。

2.2 骨料的生长方式 当完成构造过程的第一步,即基骨料生成后,对基骨料有两种方式进行延凸^[4,6],本文将它们分别称之为边延凸法和面延凸法。边延凸法每次以延凸后的最长边为延凸对象,面延凸法每次以延凸后的最大面为延凸对象。其骨料生长方式如图1所示。边延凸和面延凸均有整体凸性限制,即新生成点与原凸多面体组成的新多面体如果失去凸性,则舍弃该点,重新生成新的延凸点。毫无疑问,该法需要频繁判断和舍弃,新生成的顶点不能一次到位,使得程序效率低下。为此,本文结合文献[7]提出一种新的骨料生长方式——射线延拓法(详见第3节),使得骨料的每次生长均有效,以提高骨料的生长速度。

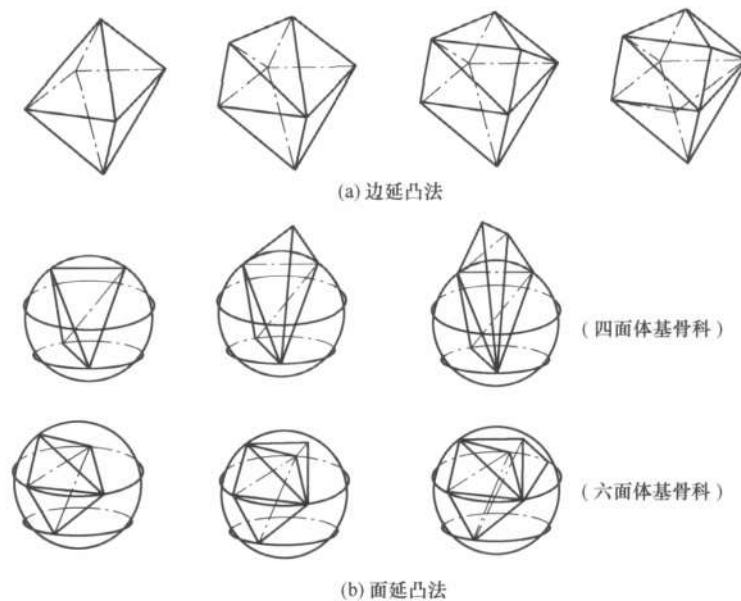


图1 骨料生长方式

2.3 骨料相交判断方法 要保证在投放区域中的碎石骨料不发生相互侵入,就要对其顶点所处位置进行判断。而凸多面体相互侵入存在两种方式,如图2所示。对于图2(a),通常的做法是体积和测试法。对于图2(b),一般是进行边检查,判断新生成多面体的每条边是否与其他多面体的各面存在相交情况。

3 算法改进

3.1 骨料延拓的整体思路 本文基骨料的生成方法有别于传统方法。首先以该级粒径下球体半径的一半,在该球体内部产生一虚拟球,然后在该球面上得到一六面体基骨料,基骨料的要求见如上所述。

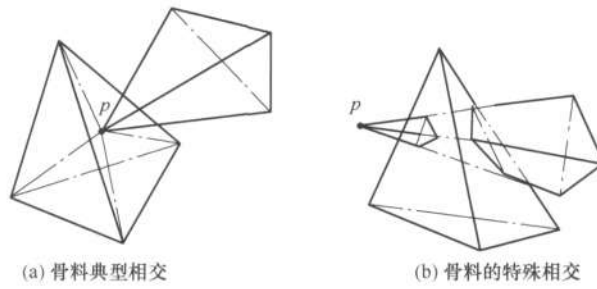


图2 骨料的相交情况

为了避免畸形骨料的产生，必须对骨料的延伸条件有所限制。凸多面体骨料的顶点生长条件是：求出多面体的每个三角侧面的面积，判断其是否大于给定值，本文取 $0.2\pi R_i^2$ (R_i 为第*i*个骨料的等价球形半径)。如果大于该值，则对该面进行延凸，以此避免片状骨料的产生。在不断生成新的顶点的过程中，该算法严格控制新顶点到产生基骨料的球的球心距离，使其不得大于1.5倍该级骨料平均半径，以此避免针状骨料的产生(针状颗粒：骨料颗粒长度大于平均粒径的2.4倍者；片状颗粒：石子颗粒厚度小于平均粒径的0.4倍者^[8])。另外，传统方法需要循环判断以确定骨料新顶点的生长方向，因此效率低下。为了提高程序运行速度，本文提出了一种新的有效延凸方法，即射线延拓法，具体方法是在骨料平移前，在基骨料延拓面 Π 的形心 O_i 处，沿外法线方向向外做一条虚拟的射线 ρ ，然后在该线上取一个随机的点 P_r ，使 P_r 到形心 O_i 的距离为 $0.1R_i \sim 0.3R_i$ ，依此作为多面体新的顶点。射线延拓法骨料顶点生长示意图3(a)。

3.2 骨料的延拓方式 构造凸形骨料 H 的第一步已经在基骨料的生成中完成，接下来逐一延凸满足延凸条件的面，生成新的顶点。在此过程中，动态地维护骨料的凸性。该算法反复循环，每循环一次，都要将点 P_r 加入到 $H(r-1)$ 的凸多面体中，即将 $H(r-1)$ 转化为 $H(r)$ 。骨料顶点的生长方式如图3所示，在新生成的顶点 P_r 处朝 $H(r-1)$ 看去，可以看见的面称之为可见面，反之为不可见面。可见、不可见面分界线为一封闭折线，称此折线为 P_r 在 $H(r-1)$ 上的地平线(如图3(b)所示)。

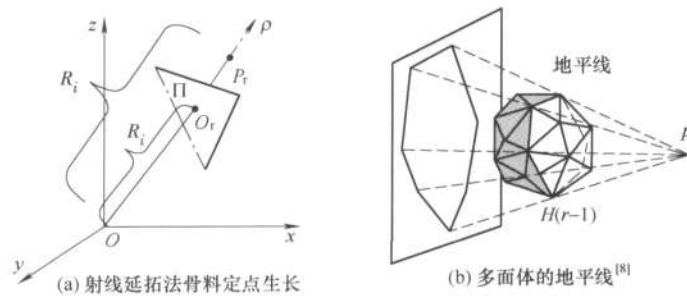


图3 骨料顶点生长方式

为将 $H(r-1)$ 转化到 $H(r)$ ，原来 $H(r-1)$ 表面有些面需要保留，而有些面又需要被替换掉。实际上，要保留的部分即为不可见面，需要替换的部分即为可见面。而 P_r 的地平线恰好对应于这两部分表面之间的边界。在 P_r 与其对应的地平线之间联结出若干新的小平面，替换所有可见的小平面。由此，骨料的一个新的顶点生成完成(如图4所示)。

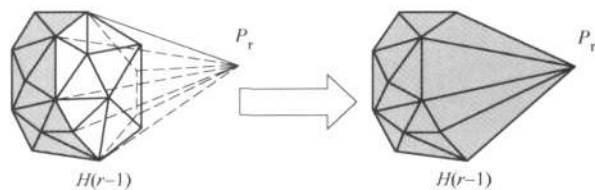


图4 将新顶点引入到凸多面^[8]

3.3 三维凸多面体的空间表示 由于凸多面体是由多个点、线、面构成的一个子域，而且，程序牵涉到多个随机凸多面体。因此，在其生成过程中，必须建立起一个表示该子域的某种适当方式。鉴于此，将每个面的顶点信息按逆时针存储(如图5所示)，并将每个顶点再按每个多面体的顶点个数进行编号。每个面的信息由这些顶点的编号构成，并建立了两个胞元 α 和 β ，前者包括凸多面体顶点的坐标，后者包括多面体每个三角侧面的顶点信息。由此构成每个多面体的存储和表示。

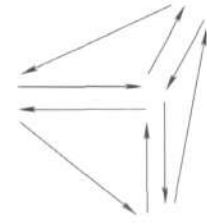


图5 凸多面体的空间表示

其具体存储格式如下：设有8个顶点构成的凸多面体顶点坐标如 α 所示，第一、二、三列分别为多面体的 X 、 Y 和 Z 坐标值，每一行定义一个顶点，由此构成的多面体的每个侧面的信息如 β 所示。 β 中每一行定义多面体的一个三角侧面，同时将每个多面体的顶点按其个数的多少进行编号，例如本例中有8个顶点，因此， β 中的最大顶点索引号为8。每一行中的每一个数表示在该多面体内部的某个顶点编号。其中：

$\alpha =$	0.3046	0.3784	0.8180	$\beta =$	6	1	7
	0.1897	0.8600	0.6602		1	6	8
	0.1934	0.8537	0.3420		1	5	7
	0.6822	0.5936	0.2897		4	1	8
	0.3028	0.4966	0.3412		4	5	1
	0.5417	0.8998	0.5341		2	6	7
	0.1509	0.8216	0.7271		6	3	8
	0.6979	0.6449	0.3093		3	4	8
					4	3	5
					2	3	6
					5	3	7
					3	2	7

3.4 三维凸多面体骨料相交判断新方法 由文献[5-6]可知，无论是体积和测试法还是边检查法，对于任一新生成的顶点，需对每个已投放骨料的每个面或边进行循环判断，由于牵涉到多重循环，并且随着投放量的增加，循环次数会逐渐增加，因此效率极其低下。为了提高程序的运行效率，本文引入有约束非线性最优化方法^[9]。使得程序由多重循环转化为一种循环。具体方法如下：定义两个骨料 $A\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ ， $B\{B_1, B_2, \dots, B_m\}$ ，其中 A_i 、 B_i 为骨料 A 、 B 的第 i 个顶点。设 a 、 b 分别为 A 、 B 内任意一点，且

$$\begin{aligned} a &= p_1 \times A_1 + p_2 \times A_2 + \dots + p_n \times A_n & 0 \leq p_i \leq 1, 1 \leq i \leq n \\ b &= q_1 \times B_1 + q_2 \times B_2 + \dots + q_m \times B_m & 0 \leq q_j \leq 1, 1 \leq j \leq m \end{aligned} \quad (1)$$

且： $p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1$ ， $q_1 + q_2 + \dots + q_m = 1$ 。

由于 p_i 、 q_j 的限制作用，使得 a 、 b 只能在 A 、 B 的可行域内部移动。由此，将多面体的相交问题转化为判断 a 、 b 两点的最近距离问题，进而可转化为有约束非线性最优化问题，其具体情形如下：

$$\begin{cases} f(r) = a - b; \min f(r) = \delta \\ p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1; q_1 + q_2 + \dots + q_m = 1 \\ 0 \leq p_i \leq 1 & i = 1, 2, \dots, n \\ 0 \leq q_j \leq 1 & j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (2)$$

3.5 骨料的投放效率研究 对于骨料含量较高的混凝土而言，骨料颗粒越多，未定位的骨料颗粒越易与前面已投放的骨料颗粒发生冲突，产生无效选择，使得投放很难实现。本文采用分割-填充法进行投放。具体方法是将骨料投放区域分为足够多的小立方体胞元，并且对这些小的立方体胞元进行系统编号。对已经被骨料颗粒进入的区域称为占领区域，还没有或较少骨料进入的区域称为自由区域。随着骨料颗粒的不断投放，同时删除被占领区域，这样可以大大提高投放选择的效率。在骨料的相交判断中，并不是对所有已投放骨料进行循环判断，而是只对距被选拟投放的小立方体胞元较

近的骨料进行判断(本文取所投骨料半径的1.5倍+2倍小立方体胞元边长)。由此,使得程序运行时不会随着投放量的增加,导致相交判断的循环量增加,进而降低运行效率。并且骨料投放过程中一旦发生相交现象,并不是舍弃该新生成的骨料,而是重新从自由区域中抽取胞元再次投放并进行判断。具体投放算法见图6。

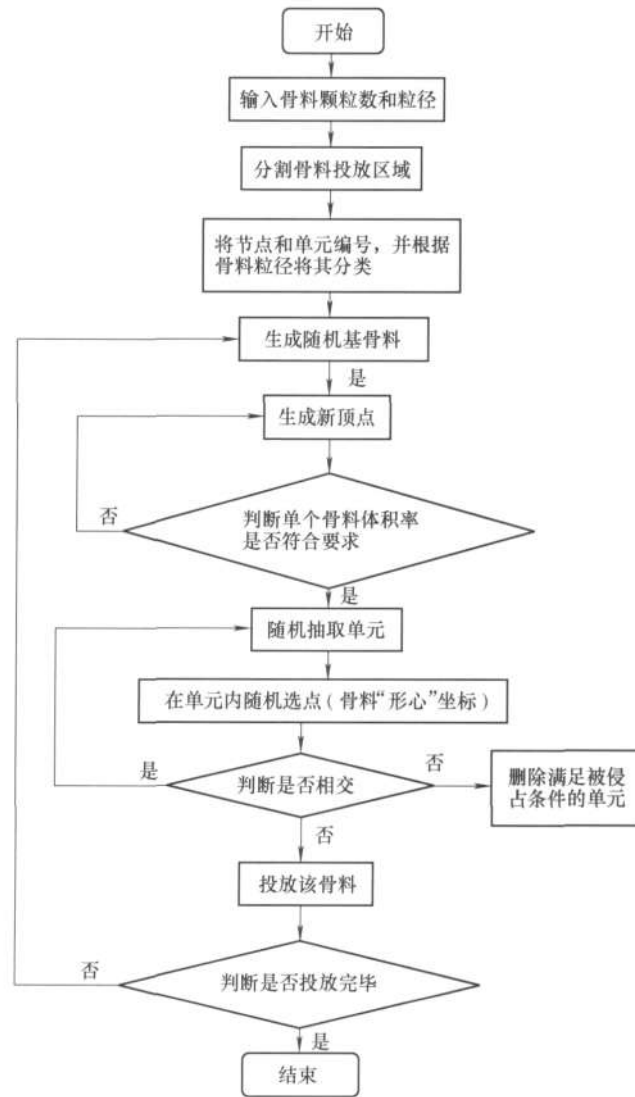


图6 混凝土随机骨料模型生成算法

4 生成实例

为了验证上述算法的有效性,本文根据文献[5]中骨料投放的相关参数进行了不同尺寸、不同级配和不同含量下三维随机骨料模型的随机生成。具体投放参数如表1所示。具体生成实例见图7。

5 结论

与其他算法相比,本文的碎石形随机骨料模型生成算法具有如下主要特点:(1)采用分割-填充法,将骨料投放区域分割成大量小的胞元,在骨料投放时,并非是在投放区域直接抽取随机点,而是首先随机抽取胞元,然后在胞元内随机选点;(2)首先在原点生成一个骨料,然后进行平移、定

表1 随机骨料模型的骨料投放参数

投放参数	二级配		三级配			四级配			
平均粒径 R/mm	15	7.5	30	15	7.5	75	40	20	10
骨料颗粒数	45	438	50	300	2 400	9	60	320	2 550
投放区域/ mm	150×150×150		300×300×300			450×450×450			
球形骨料体积投放率 $Vrate_1/\%$	41.78		52.36			58.59			
随机碎石骨料体积投放率 $Vrate_2/\%$	38.92		49.21			54.91			
体积偏差率 $(Vrate_1 - Vrate_2)/\%$	6.85		6.02			6.28			

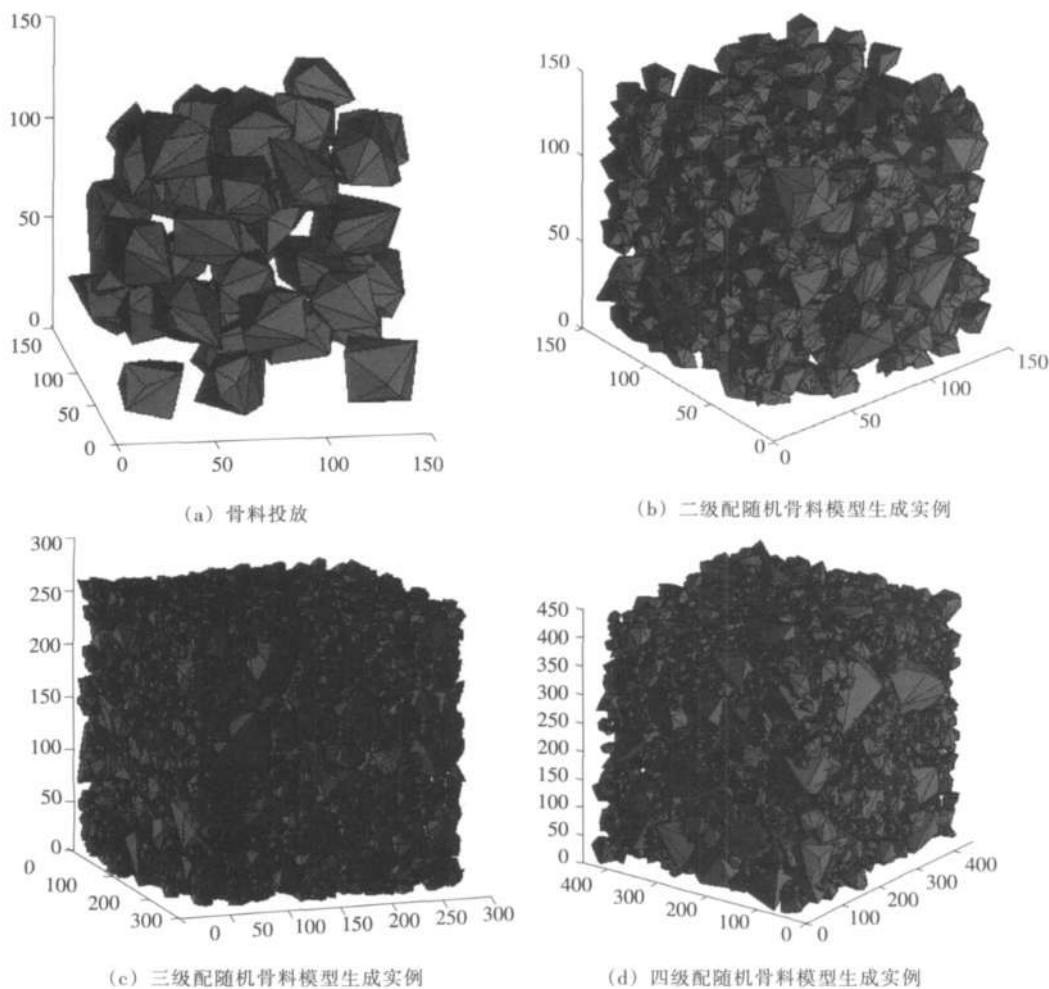


图7 随机骨料模型生成实例

位，进而判断是否与已经投放的骨料发生相交，判断时只取其周围少数颗粒，使得效率大为提高。如果相交发生，并非是舍弃刚生成的骨料，而是放弃刚刚抽取的胞元，然后重新抽取胞元，再次判断是否有相交现象发生；(3)提出了新的骨料生长方式，使得骨料生长更加有效；(4)提出了新的骨料相交判断方式——有约束非线性最优化方法，使得骨料相交判断，这个在所有算法中制约程序运行效率的瓶颈问题得到改善。

参 考 文 献：

[1] Wittmann F M, Roelfstra P E, Sadouki H . Simulation and analysis of composite structures[J] . Materials Science and Engineering, 1984, 68: 239-248 .

- [2] 钱觉时. “数值混凝土”-混凝土材料细观结构的模拟[J]. 重庆建筑工程学院学报, 1994, 16(2): 37-45.
- [3] Wang Z M, Kwan A K H, Chan H C. Mesoscopic study of concrete I: Generation of random aggregate structures and finite element mesh[J]. Computers and Structures, 1999, 58: 533-544.
- [4] 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(自然科学版), 2003, 43(8): 1120-1123.
- [5] 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.
- [6] 杜成斌, 孙立国. 任意形状混凝土骨料的数值模拟及其应用[J]. 水利学报, 2006, 37(6): 662-673.
- [7] De Berg M, Van Kreveld M, Overmars M, et al. 计算几何—算法与应用(第2版)[M]. 邓俊辉, 译, 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [8] 刘崇熙, 文梓芸, 汪在芹, 等. 混凝土骨料性能和制造工艺[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1999.
- [9] 曹卫华, 郭正. 最优化方法及MATLAB的实现[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

Study on 3-D random packing of convex polyhedron aggregates for concrete

CHENG Wei-feng

(Kunming Hydropower Investigation, Design & Research Institute, Kunming 650033, China)

Abstract: An accurate representation of meso-scale concrete is a basic requirement for simulating concrete microstructure. In this paper, the algorithm of 3-D numerical model for micro-scale concrete was studied. Various criteria in the algorithms of aggregate growth patterns and overlaps were analyzed respectively for improving a convex polyhedron aggregate to pack. Based on the criteria established by predecessors, an approach for aggregate growth patterns, namely extension with ray method and a mode for aggregate intersections, namely constrained nonlinear optimal method were introduced from other fields, which can avoid the multi-critical processes in calculation. The efficient of the algorithm is improved by using the Grid-fill method.

Key words: concrete; random convex polyhedral aggregate model; simulation; extension with ray method; constrained nonlinear optimal method

(责任编辑: 王冰伟)