

大体积混凝土随机骨料数值模拟

孙立国¹ 杜成斌¹ 戴春霞²

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098;2.江苏省鸿源招标代理有限公司,江苏 南京 210017)

摘要 :在细观力学基础上将混凝土考虑为粗骨料、砂浆及它们之间的黏结层组成的三相复合材料.针对大坝等大体积全级配或三级配混凝土,骨料含量比较高(60%~70%)的特点,提出了一种新的高效投放算法.通过一次性随机投放形成同种骨料的所有三角形基骨料,然后在此基础上随机延凸,生成任意形状的随机骨料.与通常的圆形骨料只有 2 个随机数相比,该生成算法中每个骨料一般需要 7 个以上随机数,同时该方法的生成效率和骨料含量明显高于其他多边形骨料的生成算法.采用大型通用有限元软件 MARC 对东江拱坝三级配混凝土试件的单向轴拉破坏过程进行了全过程数值模拟,数值模拟计算结果与试验结果接近.

关键词 :大体积混凝土;随机数;随机骨料模型;数值模拟

中图分类号 :TV431 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2005)03-0291-05

混凝土根据其内部结构可划分为不同层次,一般分为宏观(Macrolevel)、细观(Mesolevel)和微观(Microlevel)3 个层次^[1].通过一定的简化,可以模拟不同的特征层次.宏观模型很好地模拟了宏观材料的均质性,但它不能够捕捉局部破坏的随机性和材料的非均质性.随着大容量高速计算机的出现,基于细观层次上的数值模拟成为了可能,并已成为目前科学工作者感兴趣的研究方向之一.研究者在该领域进行了卓有成效的工作,提出了许多数学模型. Wittmann 等^[2]建立了角度和边数都随机选择的多棱角无规则的骨料模型,并用 Beddow 等^[3]的方法自动生成圆形.王宗敏^[4]提出了二维混凝土任意形状骨料随机投放算法.高政国等^[5]提出了以面积为参数的骨料侵入判别准则,按多边形随机生长方式建立随机骨料的投放算法. De Schutter 等^[6]使用了空间分割填充方法.本文基于细观层次上混凝土的数值模拟,针对大坝等大体积混凝土骨料含量较高(0.60~0.70)的特点,提出了一种高效投放算法,即通过一次性形成所有骨料的三角形基骨料,再对所有的三角形基骨料进行随机延凸,生成任意形状的随机骨料.这种算法避免了逐个投放带来的算法效率低、生成骨料含量低的缺点.

1 多边形的生成算法

1.1 生成随机三角形基骨料

在每个随机圆上,首先生成随机三角形基骨料.随机圆的作用是控制三角形基骨料的大小和位置,所以这里取随机圆的半径为骨料粒径.方法是在圆上随机生成 3 个点形成一个三角形,通过控制三角形余弦值大于 0,使生成的随机三角形为锐角三角形.任意多边形是由三角形基骨料变化而来的(图 1).三角形决定了骨料的粒径尺度和骨料的基本几何构型.

1.2 多边形延伸条件和延伸方式

多边形延伸条件是:多边形至少有一条边长大于限定边长 $L_{\max}$,在以该边为直径的半圆内生成的多边形新的顶点 p (图 2)的坐标为

$$x = 0.5(x_i + x_{i+1}) + 0.5a_i a_{i+1} m \cos(360^\circ n) \quad (1)$$

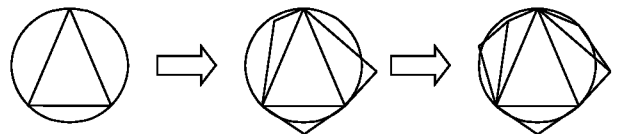


图 1 多边形随机骨料生成

Fig.1 Generation of polygon random aggregate

$$y = 0.5(y_i + y_{i+1}) + 0.5a_i a_{i+1} m \sin(360^\circ n) \tag{2}$$

式中： m, n —— $0 \sim 1$ 之间的随机数。如果要使 p 点落在多边形外部半圆内，只要使式(3)中 $S > 0$ ，如果要使延凸成的多边形形状更接近真实形状，可以让 S 大于三角形 $a_i a_{i+1} p'$ 的面积（可以事先设定），从而使 p 不落在三角形 $a_i a_{i+1} p'$ 内。

$$S = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x & y & 1 \\ x_i & y_i & 1 \\ x_{i+1} & y_{i+1} & 1 \end{vmatrix} \tag{3}$$

由于现实中混凝土骨料基本呈“凸型”。为了使算法易实现，本文的算法也对颗粒进行了“凸”的限制。如果对其进行“凸”的限制，则 p 点几乎不会延伸到两倍基骨料粒径外的区域。所以在进行骨料侵入判别时，只需要判别别的基骨料圆心和该圆圆心距离小于两者 2 倍半径和的颗粒就可以了，见图 3。

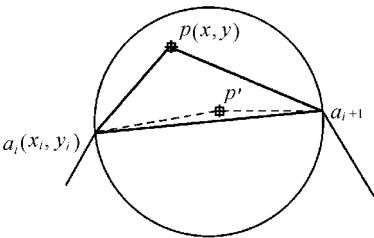


图2 新生成点 p
Fig.2 New point p

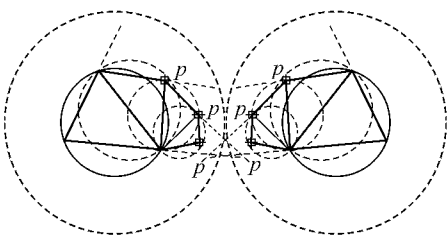


图3 p 点可能延伸的最远距离
Fig.3 Max. distance possibly extended from point p

1.3 多边形侵入判别准则

1.3.1 夹角之和测试法^[7]

如图 4 所示，依次将 p 点分别与 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 相连，用 θ_i 表示 $\angle a_i p a_{i+1}$ ($i = 1, 2, \dots, n-1$) 的角度， θ_n 表示 $\angle a_n p a_1$ 的角度。若 $\sum_{i=1}^n \theta_i = 0$ ，则 p 点不在多边形 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 之内（图 4(a)）；若 $\sum_{i=1}^n \theta_i = 360^\circ$ ，则 p 点不在多边形 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 之内（图 4(b)）。其中 θ_i 的大小可通过余弦定理求得，而 θ_i 的正负号可以这样定义，以 $\angle a_1 p a_2$ 为例，设

$$W = (x_1 - x_p)(y_2 - y_p) - (y_1 - y_p)(x_2 - x_p) \tag{4}$$

若 $W < 0$ ，则为顺时针方向，取 θ_i 为负；若 $W > 0$ ，则为逆时针方向，取 θ_i 为正。

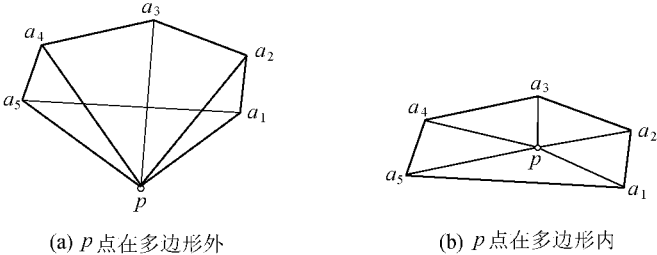


图4 p 点与多边形的相对位置

Fig.4 Location of point p relative to polygon

1.3.2 颗粒相交检查

为防止出现图 5 的特殊情况，还需进行边检查。在这里通过颗粒一延伸点 p 和 a_i, a_{i+1} 建立两直线方程，分别与 $a_1 a_2, a_2 a_3, a_3 a_4, a_4 a_5, a_5 a_1$ 所建立的直线方程联立，用克莱姆法则求出交点坐标，并判断其是否在颗粒边界上。

1.4 “凸性”限定条件

在形成随机多边形中，保证多边形为凸多边形是关键的控制条

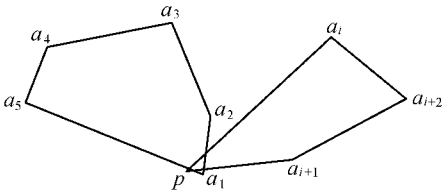


图5 颗粒相交的特殊情况
Fig.5 Special case for aggregate intersection

件^[3],因为它可以限制延伸点 p 不会无限制延伸,因此要求算法给出“凸性”限定条件,在此引入三角形面积公式.假设 (x_1,y_1) 、 (x_2,y_2) 和 (x_3,y_3) 是三角形的顶点坐标,并且这 3 个点按逆时针顺序排列,则该三角形的面积 S 为

$$S = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix}$$

(5)

如图 6 所示,点 p 为边下方插入点,形成新的多边形.保证为凸多边形的条件是:点 p 与 $a_{i-1}a_i$ 、 $a_{i+1}a_{i+2}$ 围成的三角形,按以上公式计算所得的面积 S 都大于 0.

2 黏结层的生成

不再像处理圆形骨料那样通过让两圆之间的距离大于某个定值来预留骨料的黏结层,本文采用通过投放比要求颗粒粒径稍大的颗粒,然后按比例缩小来完成黏结层的生成.假定黏结层等厚度包在骨料的外部,如图 7 所示.根据相似三角形,可以很容易地计算骨料各顶点的坐标(其中 $a_ia'_i/pa_i$ 的值根据骨料粒径而定).

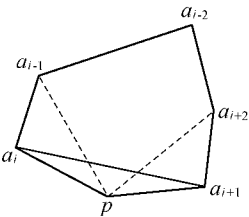


图 6 新顶点的生成

Fig.6 Generation of new vertex

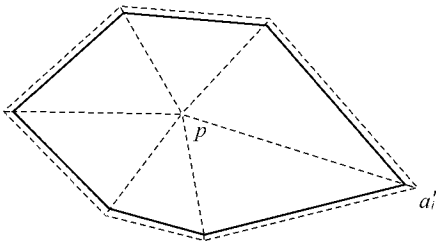


图 7 新生成的黏结层

Fig.7 New bond layer

3 随机骨料投放算法及其特点

3.1 随机骨料投放算法主要步骤

随机骨料投放算法主要步骤 (a)在投放区内生成所有三角形基骨料.(b)计算所有三角形总面积,如果大于投放量,跳出程序调整基骨料个数;如果小于投放量,就对基骨料随机延伸,同时对骨料侵入性进行判别.(c)再计算延伸后的总面积,达到投放量并储存,否则跳出调整基骨料个数.

3.2 本文算法的主要特点

本文中混凝土随机骨料投放算法的主要特点是 (a)生成随机骨料所需的随机数大大多于通常圆形颗粒的 2 个随机数.该算法中,每个骨料形状的确定至少需要 5 个随机数,从而使模拟的随机骨料更接近实际.一般延凸 1 次后,就需要 7 个随机数.(b)同已有的任意多边形投放算法相比,该算法简单且投放效率高.它通过快速地随机生成的圆形区,一次性地把所有要投放的颗粒进行了定位,从而在判别侵入性时,只需判别周围的少许颗粒,大大提高了效率.目前现有的随机骨料投放算法,每次循环只投入一个颗粒,当骨料含量达到 50% 后,由于大量空间被骨料占据,如果再想投入一个颗粒就很困难了.这样对于骨料含量为 60% ~ 70% 的大体积混凝土的骨料投放就很难实现.而采用本文的投放算法,当对骨料含量为 60% 的混凝土进行随机骨料投放时,只需把基骨料含量投到 50%,余下的 10% 靠这些基骨料的延伸就可以了.

4 计算实例

4.1 基于任意多边形的随机骨料模型

本文算法中,随机骨料模型生成的控制参数有 4 个:矩形投放区域的尺寸、各级配骨料的平均粒径、骨料面积与投放区域面积比、骨料的 最大控制边长.不同骨料含量投放的随机骨料模型见图 8.

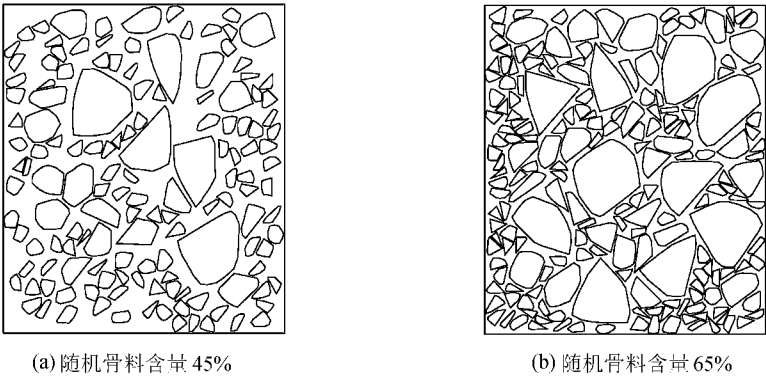


图 8 不同骨料含量投放的随机骨料模型

Fig.8 Specimens with different contents of random aggregate

4.2 东江拱坝三级配混凝土的单轴受拉非线性分析

选取东江拱坝三级配混凝土试件^[8,9]进行单轴拉伸数值模拟,大石(4.0~8.0 cm)、中石(2.0~4.0 cm)和小石(0.5~2.0 cm)骨料比例为 4:3:3。根据文献^[9]确定混凝土组成材料参数,见表 1。轴拉试件采用 45 cm×45 cm×3 600 cm 的等截面试件。这里取截面尺寸 40 cm×45 cm 的平面,按 Walraven 公式^[8]求得骨料含量为 40.7%,进行随机骨料模拟及有限元网格剖分,单元、节点总数分别为 40 792 个和 20 610 个。随机骨料试件和网格剖分分别见图 9 和图 10。

表 1 计算采用的力学参数

Table 1 Mechanical parameters adopted in calculation				
类型	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	软化模量 E_s/GPa	抗拉强度 σ_t/MPa
骨料	55.5	0.16	11.1	6.0
砂浆	26.0	0.22	5.2	2.5
界面	25.0	0.16	5.0	2.0

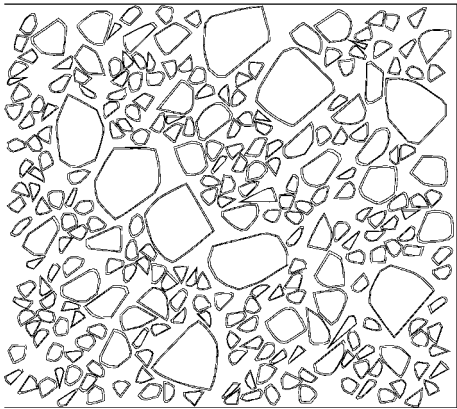


图 9 随机骨料试件生成

Fig.9 Generation of random aggregate specimen

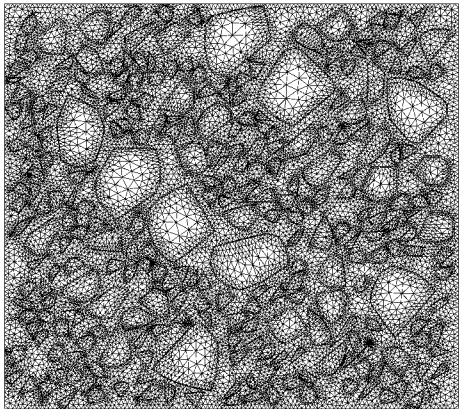


图 10 随机骨料试件有限元网格

Fig.10 FEM mesh of random aggregate specimen

采用 MARC 软件进行非线性分析,沿 Y 方向外加荷载大小为 1.7 MPa,共 50 个增量步,采用极限拉应力准则,并考虑材料的软化^[8],进行单轴受拉的非线性分析。由计算结果可知,在其荷载增量的第 44 个增量步时试件完全破坏,此时荷载为 1.50 MPa(也就是该试件的极限抗拉强度)。试验结果^[9]为 1.6 MPa,误差为 6.25%。根据文献^[10]的计算结果,当采用圆形随机骨料模型时,数值模拟结果为 1.45 MPa。显然,采用本文的任意多边形模型,其模拟结果与试验结果更为接近。

5 结 语

本文针对大坝等大体积混凝土骨料含量较高的特点,提出了一种新的高效投放算法。与通常的骨料生成算法相比,具有随机数多,算法简单且投放效率高等特点。通过对一次性形成的三角形基骨料的随机延凸,生成任意形状的随机骨料。对东江拱坝三级配混凝土试件单轴拉伸的数值模拟结果表明,采用任意多边形随机骨料模型进行混凝土的非线性模拟是可行的,而且结果更接近试验值。

致谢 :本文得到中国水利科学研究院陈厚群院士的关心和指导 ,在此谨表谢意 !

参考文献 :

[1] 宋玉普 .多种混凝土材料的本构关系和破坏准则[M].北京 :中国水利水电出版社 ,2002.133—144.
[2] WITTMANN F H ,ROELFDTRA P E ,SADOUKI H. Simulation and analysis of composite structures[J]. Mater Sci Engng ,1984 ,68 : 239—248.
[3] BEDDOW J K ,MELOY T. Testing and characterization of powders and fine particles[M]. London : Heyden ,1980.59—64.
[4] 王宗敏 .不均质材料(混凝土)裂隙扩展及宏观计算强度与变形[D].北京 :清华大学 ,1996.
[5] 高政国 ,刘光廷 .二维混凝土随机模型研究[J].清华大学学报(自然科学版) 2003 43(5) :710—714.
[6] De SCHUTTER G ,TAERWE L. Random particle model for concrete based on Delaunay triangulation[J]. Mater Struct ,1993 ,26 : 67—73.
[7] 陈和群 ,彭宣茂 .有限元法微机程序与图形处理[M].南京 :河海大学出版社 ,1992.116—122.
[8] 尚岩 .大体积混凝土材料、动力学性能数值模拟[D].南京 :河海大学 ,2004.
[9] 刘文彦 ,叶文瑛 ,葛辉 ,等 .东江拱坝全级配混凝土力学性能的试验研究[J].水力发电 ,1986 (5) 8—14.
[10] 任朝军 ,杜成斌 ,戴春霞 .三级配混凝土单轴破坏的细观数值模拟[J].河海大学学报(自然科学版) 2005 33(2) :177—181.

Numerical simulation of random aggregate model for mass concrete

SUN Li-guo¹ , DU Cheng-bin¹ , DAI Chun-xia²

(1. College of Civil Engineering , Hohai Univ . , Nanjing 210098 , China ;

2. Hongyuan IFB Surrogate Limited Company of Jiangsu Province , Nanjing 210017 , China)

Abstract :From the viewpoint of mesomechanics , concrete was taken as a three-phase inhomogeneous composite , which consisted of mortar , aggregate and their interface . In consideration of the high aggregate content(60% ~ 70%) in three-graded concrete and fully-graded concrete for large dams , an effective method to generate random aggregates was developed . According to the method , all of the triangular aggregate matrixes were generated randomly at one time , and random aggregates of various shapes were formed by their further extension . Compared with the usual circular aggregate with two random parameters , each kind of aggregates generated according to the present method need at least 7 random parameters , and the content of aggregate and efficiency of aggregate generation are higher than those of other methods . Finally , a complete numerical simulation of a uniaxial tension failure process of three-graded concrete specimens was performed for the Dongjiang arch dam with the large versatile nonlinear finite element software MARC , and the simulated results were in good agreement with those from experiments .

Key words :mass concrete ; random number ; random aggregate model ; numerical simulation