

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.05.014



一种快速生成三维混凝土骨料模型的混合实现方法

郭瑞奇, 肖映雄, 唐现琼

(湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 三维随机骨料混凝土模型是由骨料、砂浆基体以及界面层组成的三相复合材料, 基于 Fortran 和 ANSYS 软件提出了一种快速生成含高体分比球形骨料混凝土模型的混合实现方法, 并在此基础上生成三维椭球形骨料(卵石)模型、凸多面体骨料(碎石)模型以及混合模型。算例结果表明, 这种新方法可以快速生成三级配球形颗粒混凝土模型所需的骨料数据, 相应的骨料投放含量能达到 65% 左右。混合方法可将骨料颗粒和界面层分离开来, 在有限元网格剖分时避免了复杂的单元属性判别。通过对椭球形骨料模型和凸多面体骨料模型的有限元数值模拟, 进一步验证了该混合方法的有效性。

关键词: 骨料模型; 随机分布; 投放效率; 界面层; 数值模拟

中图分类号: TU 443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)05-0100-08

A fast hybrid realization method for three-dimensional concrete aggregate models

Guo Ruiqi, Xiao Yingxiong, Tang Xianqiong

(Civil Engineering and Mechanics College, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, P. R. China)

Abstract: The three-dimensional random aggregate concrete model is usually considered as a three-phase composite materials which are composed of aggregates, cement matrix and the interface layers. A hybrid realization method is proposed in order to rapidly obtain the concrete aggregate models with high volume fraction of spherical particles by combining Fortran and ANSYS software. The corresponding ellipsoid aggregate (pebble) model, the convex polyhedral aggregate (gravel) model and the mixed model with different shape aggregates are also generated. The results of several examples show that the relevant data of three-graded concrete model with spherical aggregate particles can be obtained rapidly and the corresponding aggregate content can reach about 65%. The hybrid realization method can easily separate the aggregate particles from the interface layers and thus the complex element attribute discrimination can be avoided in the finite element mesh. Finally, the validity of the proposed hybrid method is further verified

收稿日期: 2016-12-02

基金项目: 湖南省教育厅重点项目(15A183); 湖南省自然科学基金(14JJ2063)

作者简介: 郭瑞奇(1993-), 男, 主要从事混凝土建模仿真研究, (E-mail) 191522177@qq.com。

肖映雄(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) xyx610xyx@xtu.edu.cn。

Received: 2016-12-02

Foundation item: Scientific Research Fund of Hunan Provincial Education Department (No. 15A183); Hunan Provincial Natural Science Foundation (No. 14JJ2063)

Author brief: Guo Ruiqi(1993-), main research interest; modeling for concrete materials, (E-mail) 191522177@qq.com.

Xiao Yingxiong(corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail) xyx610xyx@xtu.edu.cn.

by finite element numerical simulation for the ellipsoidal aggregate model and the convex polyhedral aggregate model.

Keywords: aggregate model; random distribution; delivery efficiency; interface layer; numerical simulation

混凝土作为应用最为广泛的建筑材料,对其进行力学试验是了解其本构关系和力学性能最为直接的方法。但由于试验条件的客观限制和人为因素的影响,其结果往往具有局限性,不能反映试件的材料特性。由于混凝土材料中骨料形状的复杂性以及骨料分布的随机性,业界通常采用数值方法(如有限元方法)对其进行数值模拟,以期在一定条件下取代部分试验,进而研究混凝土材料的相关力学性能^[1]。为此,需要快捷、方便地建立骨料随机分布的几何模型。

十几年来,从 Wittmann 等^[2]提出的二维多边形骨料模型到 Wang 等^[3]、方秦等^[4]提出的三维凸多面体随机骨料模型,学者们对混凝土细观力学模型的研究和骨料投放算法的改进已取得诸多进展。宋来忠等^[5]、Eduardo 等^[6]建立了混凝土二维细观模型并对其进行加载破坏仿真试验,但是相对而言,三维混凝土模型更能逼近真实的试件结构;Sheng 等^[7]提出了一种高含量三维凸多面体骨料模型的建立方法,但是在进行仿真实验的时候没有考虑界面层(ITZ)的处理。现有文献中的三维混凝土模型大多以球形颗粒为基础,并逐步延拓生成椭球和凸多面体骨料颗粒,如糜凯华等^[8]研究的球形骨料模型和马怀发等^[9-11]、武亮等^[12]研究的凸多面体骨料模型,但是对所生成的混凝土模型进行网格剖分和材料性能的分配几乎都是利用较为复杂的自编程序完成,然后再将结果导入 ABAQUS 等有限元软件进行仿真试验,对研究人员的编程水平和计算机应用技术要求较高,难以进行推广。

利用 Fortran 编程语言在科学和工程计算方面的高效性,并结合大型通用有限元分析软件 ANSYS 的参数化设计语言(APDL)提出了一种快速生成含高体分比球形骨料混凝土模型的混合实现方法,其几何模型的建立、网格的剖分、单元属性的赋予以及后续的有限元模拟均在 ANSYS 中进行,避免了混凝土模型在软件之间相互转换,为混凝土数值模拟试验提供了方便。对于三维混凝土模型而言,在骨料颗粒个数较多、体分比较高的情况下,仅用 APDL 同时进行编程与建模,其效率十分低下,且当模型较为复杂时(如凸多面体骨料),使用 APDL 对其进行

延拓和体积的计算也是较困难的。因此,以 Fortran 为编程工具,快速生成相应的 ANSYS 命令流代码,利用该代码直接在 ANSYS 中建立高体分比(60%以上)的球形骨料混凝土模型。在球形骨料模型的基础上生成椭球形、凸多面体以及混合骨料模型,并根据 ANSYS 对生成体的编号规律使用布尔运算生成各种形状骨料颗粒的界面层,将骨料颗粒和界面层分离开来,避免了复杂的单元属性判别。最后,分别对椭球形骨料模型和凸多面体骨料模型进行网格剖分和有限元模拟,验证了基于混合方法的网格剖分和有限元分析的有效性。

1 三维随机球形骨料混凝土模型的生成

鉴于三级配混凝土在水利工程等领域的广泛使用,以边长为 300 mm 的三级配混凝土试件为例,使用球体简化骨料形状,并参照文献[13]按实际级配求出球形骨料粒径大小,即小石粒径为 5~20 mm,中石 20~40 mm,大石 40~80 mm,占比为 3:3:4。基于编写的 Fortran 程序,可快速生成含高体分比随机分布的骨料颗粒的粒径和球心坐标,并自动转化为相应的 ANSYS 命令流代码,为后续 ANSYS 建模及有限元分析提供便利。

1.1 骨料颗粒和球心坐标的随机数的产生

计算机生成的数之所以称为伪随机数,是因为它并不是真正的“随机”,其周期总是有限的,目前大多数编译器都采用线性同余算法(LCG)产生伪随机数。在 Fortran 程序中实现生成随机数时,首先在程序开头调用函数 random_seed(),从而根据系统的日期和时间随机地提供种子,来减少伪随机数的生成;然后再调用函数 random_number()来生成一个 0~1 之间的随机数。在确定骨料的颗粒半径范围及投放区域坐标界限(0, 300; 0, 300; 0, 300)以后,使用 Fortran 程序随机产生每颗骨料的大小和位置。

1.2 骨料库的生成

定义一个容量足够大的四维数组,分别储存骨料颗粒的半径大小及 3 个坐标分量。在确定了骨料颗粒的总体分比 V_T 以后,利用 random_number()

生成的位于(0,1)之间的随机数 rdm,即可生成相应级配范围内的颗粒半径。例如,在生成位于(R_{\min} , R_{\max})范围内的第 i 个颗粒半径 R_i 时,计算公式为

$$R_i = R_{\min} + (R_{\max} - R_{\min}) \times rdm \quad (1)$$

每生成一个骨料颗粒半径,将其计入当前已生成骨料的体分比 V'_T ,并判断是否超过该粒径范围所对应体分比 $0.3V_T, 0.6V_T, V_T$ 。当满足要求后再进入下一循环生成其它级配的骨料颗粒,否则返回继续生成本级配下一个骨料半径。待全部生成完毕后,为了提高投放效率,使用“冒泡法”将骨料半径从大到小依次排列,相应的流程图如图 1 所示。

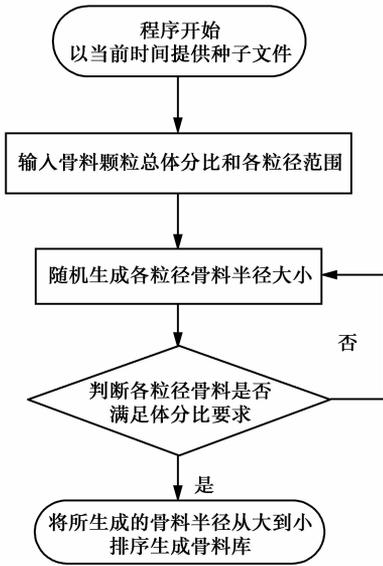


图 1 骨料库生成流程图

Fig. 1 Flow chart for the generation of aggregate bases

1.3 球形骨料颗粒的投放与模型的生成

先将粒径最大的第一个骨料投放到立方体区域中,之后利用循环程序,将已生成的骨料库中的球形颗粒从大到小依次进行投放,并对之前已投放的颗粒进行相交判断。为保证骨料颗粒不超过立方体区域,采用式(2)中定义的坐标生成随机骨料颗粒的球心坐标。

$$\begin{cases} x_i = X_L + R_i + (X_R - X_L - 2 \times R_i) \times rdm_1 \\ y_i = Y_B + R_i + (Y_T - Y_B - 2 \times R_i) \times rdm_2 \\ z_i = Z_B + R_i + (Z_T - Z_B - 2 \times R_i) \times rdm_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_i 为第 i 个骨料的半径; $X_L, X_R, Y_B, Y_T, Z_B, Z_T$ 为立方体区域的边界坐标值; rdm_1, rdm_2, rdm_3 分别为位于(0, 1)之间的 3 个独立随机数。

利用式(3)对第 i 个骨料与之前生成的 $i-1$ 个骨料进行相交判别,保证骨料之间不重叠不相交,即

两球球心之间的距离大于等于两球半径之和

$$\sqrt{(x_i - x_n)^2 + (y_i - y_n)^2 + (z_i - z_n)^2} \geq R_i + R_n \quad n = 1, 2, \dots, i - 1 \quad (3)$$

用这种简单的直接投放法得到骨料库中的所有球形颗粒的球心坐标,并以 ANSYS 参数化设计语言的形式写入 TXT 文件中。在 Intel(R)Core(TM) i3-3220 CPU 微型机(内存 3.41 GB, CPU 为 3.29 GHz)上进行高含量球形骨料颗粒投放试验,并用 CPU_TIME()函数来记录 Fortran 程序生成建模所需的 ANSYS 命令流的运行时间,结果如图 2 所示。

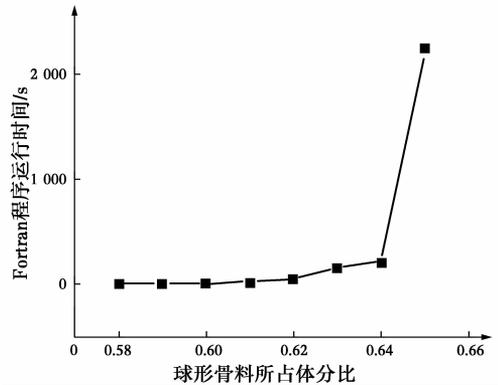


图 2 Fortran 程序生成不同体分比的球形骨料模型所需时间

Fig. 2 Running time of the Fortran program for the generation of the spherical aggregate model on different volume fraction

当体分比设定在 66% 时,发现程序投放到粒径在 6.9 mm 附近的颗粒时已经很难进行下去了,即对于边长为 300 mm 的三级配球形骨料混凝土模型而言,此时试件空间内已经没有位置来投放该颗粒,故 65% 为本程序所能达到的极限体分比。

结果表明,使用 Fortran 程序生成的骨料颗粒随机性良好,可以快速生成含量高达 65% 左右三级配球形颗粒混凝土模型,并可输入 ANSYS 软件直接建模,为后续的有限元分析提供方便。含量为 65.41% 的球形混凝土骨料模型如图 3 所示,从左到右依次是平面俯视图、斜视图、等距视图。

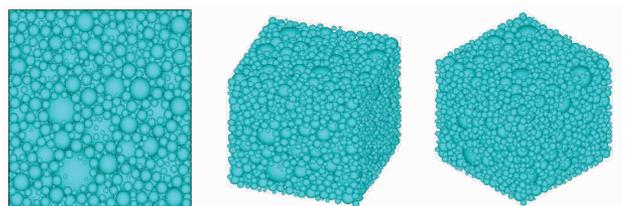


图 3 体分比为 65.41% 的三级配球形混凝土模型的 3 种视图
Fig. 3 Three different views for three-graded concrete model with spherical aggregates on 65.41% volume fraction

2 其他形状骨料的生成及界面层的处理

由于骨料表面存在边界效应,其表面会形成一种特殊的结构,称之为界面层。大量研究表明,由于微观结构上的差异,界面层的材料常数等物理性能与水泥基体和骨料颗粒相差较大^[14]。因此,在构建混凝土细观模型时,界面层的处理是不可忽视的。目前,对混凝土细观模型界面层的处理,从二维^[15]到三维^[11]大多是对单元所处的位置进行判别,然后赋予界面层相关的属性。然而这种方法编程较为复杂,且对骨料形状会有一些影响,因此,不适用于非球形骨料(如卵石形骨料)模型,具有一定的局限性。

在使用混合方法快速生成球形骨料混凝土模型的基础上,生成了椭球型(卵石)骨料混凝土模型和多面体(碎石)骨料混凝土模型。为了生成包裹在骨料周围的界面层,取其厚度为球体半径的0.1倍^[16],对骨料颗粒进行等比缩放,并利用ANSYS软件中的布尔运算生成相应的骨料界面层。为避免在骨料含量较高时界面层侵入骨料颗粒,将式(3)修正为

$$\sqrt{(x_i - x_n)^2 + (y_i - y_n)^2 + (z_i - z_n)^2} \geq 1.1(R_i + R_n) \quad n = 1, 2, \dots, i - 1 \quad (4)$$

将界面层与骨料颗粒分离开来,免去了对单元进行属性判别的复杂阶段,为后续的有限元网格剖分节省了计算工作量,提高了数值计算和分析效率。

2.1 椭球形骨料混凝土模型

为生成椭球形骨料颗粒,使用3个随机数对球形颗粒 x 、 y 、 z 轴进行缩放,且为了避免颗粒相交和针状颗粒的产生,规定3个随机数位于(0.5, 1)之间。生成椭球颗粒后,再使用3个随机数对其进行随机旋转。骨料投放完毕以后,对每个骨料进行等比缩放,并使用布尔运算生成相应的界面层,其投放流程如图4所示。

根据ANSYS对生成体的编号规律,将骨料颗粒和界面层分离开来,为后续网格剖分和有限元分析提供方便。以3种不同含量的椭球形骨料混凝土模型为例,生成了3种不同分布的几何模型及其界面层,具体如图5所示,其中上图为椭球骨料分布图,下图为相应的界面层透视图,这里给出的体分比是由Fortran程序计算出的真实体分比。

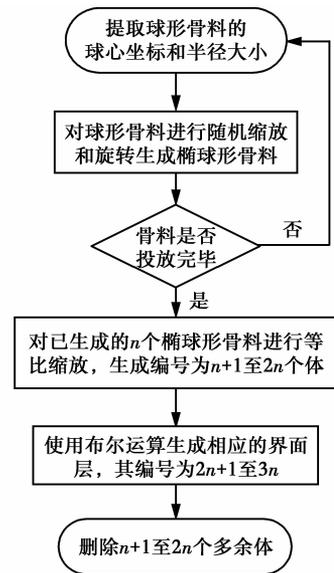


图4 椭球骨料及其界面层的生成流程图
Fig. 4 Flow chart for the generation of ellipsoidal aggregates and the corresponding interface layers

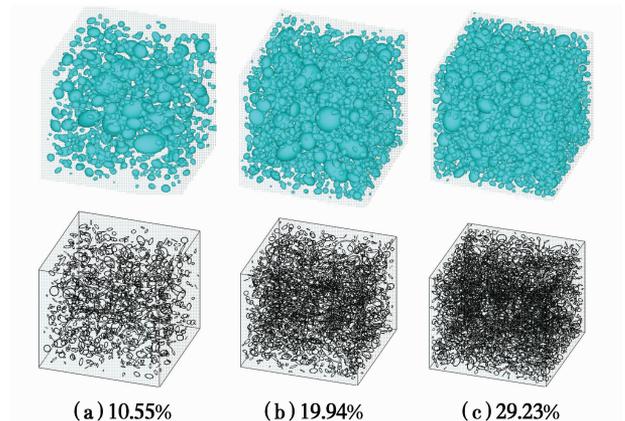


图5 不同体分比下椭球形骨料模型分布图及界面层透视图
Fig. 5 Distribution diagrams of the ellipsoidal aggregate model and the perspectives of the interface layers under the different volume fractions

2.2 凸多面体骨料混凝土模型

本文在球形颗粒的基础上,在球体内部进行随机延拓,生成简单的凸多面体骨料及相应的界面层。首先,在球体内部随机取3个点,并保证其构成的三角形面积足够大(取面积 $A \geq 0.3\pi r^2$,其中 r 为该球形颗粒半径),然后过该三角形和另一点构成一个过球心的四面体基骨料。计算并记录四面体体积后,对面积最大的面进行延拓,之后每延拓一次,生成3个新面并删除掉被延拓的面,记录经延拓后的四面体的体积。在对四面体进行延拓时采用“射线延拓法”,即过球心 (a, b, c) 和最大面三角形形心 (x', y', z') 作空间直线,即

$$\begin{cases} x = x' + (x' - a)t \\ y = y' + (y' - b)t \\ z = z' + (z' - c)t \end{cases} \quad (5)$$

代入球面方程 $(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2 = r^2$, 得

$$\begin{cases} t_1 = -1 + \frac{r}{\sqrt{(x' - a)^2 + (y' - b)^2 + (z' - c)^2}} \\ t_2 = -1 - \frac{r}{\sqrt{(x' - a)^2 + (y' - b)^2 + (z' - c)^2}} \end{cases} \quad (6)$$

取 $t > 0$, 即可保证所选取点位于最大面的上方, 从而保证多面体骨料的“凸性”。图 6 给出了单个骨料的一种延拓示意图, 其中左图为四面体基骨料, 后面两图分别为延拓一次、二次后的骨料形状示意图。

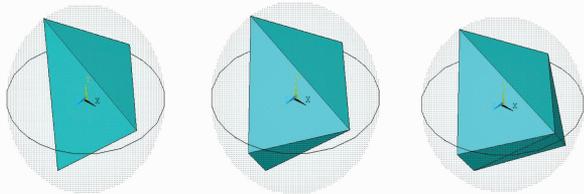


图 6 四面体基骨料(左)及其延拓一次(中)、二次(右)骨料形状示意图

Fig. 6 Sketch maps of aggregate shapes for tetrahedral base aggregate (Left) and its geometric extensions with one times(Middle) and twice (Right)

在骨料生成完毕后, 用同样的方法生成相应的界面层。3 种不同含量的凸多面体骨料模型及其对应的界面层如图 7 所示。

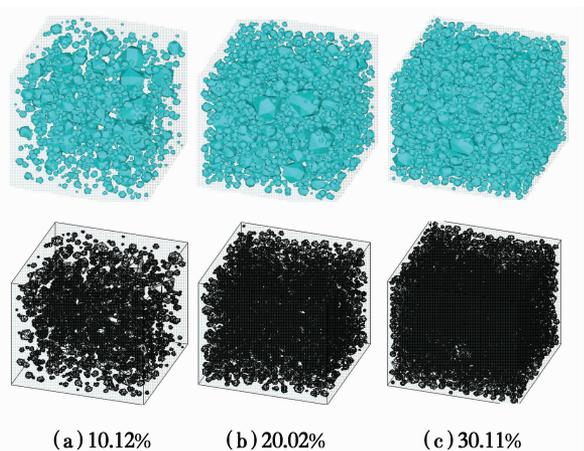


图 7 3 种不同含量的凸多面体骨料模型及其界面层透视图
Fig. 7 Distribution diagrams of the convex polyhedral aggregate model and the perspectives of the interface layers under the different volume fractions

2.3 任意形状骨料混凝土模型

为了真实模拟混凝土骨料形状的任意性, 生成了包含球形、椭球形、凸多面体 3 种不同形状的混合骨料几何模型。为保证所生成骨料形状的随机性, 在确定了球形骨料颗粒的半径和球心坐标以后, 使用一个位于(0, 1)之间的随机数 rdm 判断其骨料形状, 即

$$\begin{cases} 0 < rdm \leq 0.333, \text{凸多面体骨料} \\ 0.333 < rdm \leq 0.666, \text{椭球形骨料} \\ 0.666 < rdm, \text{球形骨料} \end{cases} \quad (7)$$

采用同样方法生成各界面层, 图 8 给出了 3 种不同含量的混合骨料几何模型及其对应的界面层。

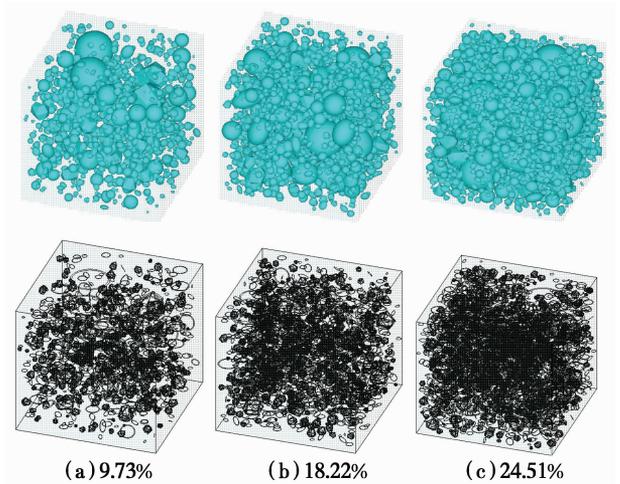


图 8 3 种不同含量的混合型骨料模型及其界面层透视图
Fig. 8 Distribution diagrams of mixed aggregate model and the perspectives of the interface layers under the different volume fractions

3 有限元数值模拟实例分析

利用设计的混合方法, 可以避免复杂的单元属性判别, 从而改善三维混凝土随机骨料模型的计算效率。以椭球形骨料模型和凸多面体骨料模型为例, 进一步验证其网格剖分和有限元分析的有效性。由于计算机条件的限制, 仅以边长为 150 mm 的二级配混凝土试件为例, 并将粒径在 20 mm 以下的小石颗粒融入砂浆基体中组合成一种新的复合材料^[17], 分别对椭球形骨料模型和凸多面体骨料模型进行网格剖分和有限元模拟。

对于二级配椭球形混凝土模型, 共生成 91 个骨料颗粒, 实际投放含量为 22.3%。按二级配小石与大石的体分比为 55:45, 将小颗粒融入基体中, 可模拟骨料含量为 50% 的混凝土模型, 其三相材料参数

如表 1 所示。采用四面体单元依次对界面层、骨料颗粒、砂浆基体进行网格剖分,相应的网格剖分结果如图 9 所示。由于在几何建模时,采用的混合方法已将各界面层进行分离,网格剖分时可单独进行,不会影响骨料颗粒的形状。另外,利用 ANSYS 进行网格剖分时,能自动在界面层附近进行网格加密,在各相材料之间能满足网格的协调性,图 10 分别给出了两种内部网格剖分示意图。

表 1 混凝土模型各相材料参数

Table 1 Material parameters of different phases in concrete model

材料	弹性模量/GPa	泊松比	重度/(t · m ⁻³)
骨料	55.50	0.26	2.7
砂浆	38.1	0.21	2.1
界面层	25.00	0.16	2.4

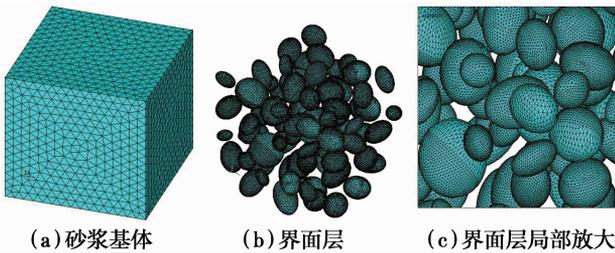


图 9 椭球形骨料模型中基体、界面层网格剖分图
 Fig. 9 FEM meshes of the matrix and the interface layers in ellipsoidal aggregate model

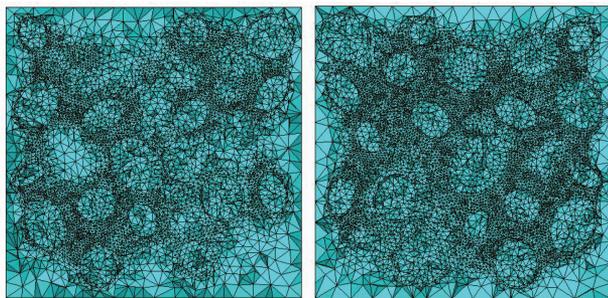


图 10 椭球形骨料模型中两个不同截面处网格剖分图
 Fig. 10 FEM meshes of two different section in ellipsoidal aggregate model

有限元计算时,在混凝土结构顶部施加 $q=10^3$ kN 的均布压力,在底部施加 0 位移约束,采用 10 节点二次单元。图 11 分别给出了相应的水泥基体 Mises 应力云图及内部某截面处的 Mises 应力云图。

完全类似地,对于二级配凸多面体混凝土模型,共生成 82 个骨料颗粒,实际投放含量为 23.7%,可模拟骨料含量为 53% 的混凝土模型。图 12 给出了

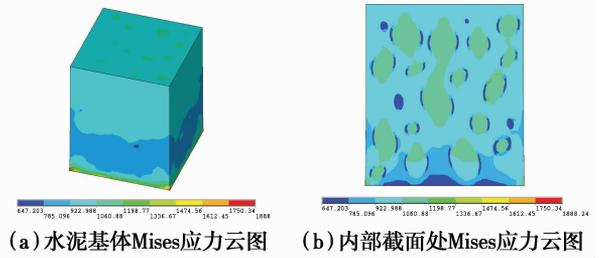


图 11 椭球形骨料混凝土有限元模型计算结果
 Fig. 11 FEM results of the ellipsoidal aggregate model

这种凸多面体骨料混凝土模型界面层及内部网格剖分图,水泥基体 Mises 应力云图及内部某截面处 Mises 应力云图如图 13 所示。

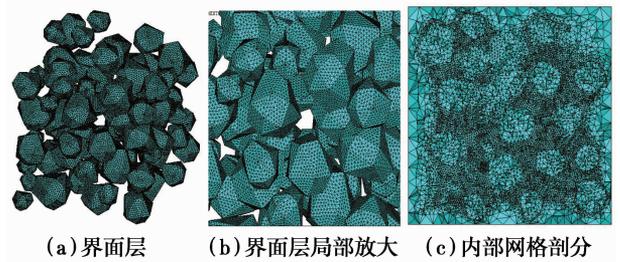


图 12 凸多面体骨料混凝土模型界面层及内部网格剖分图
 Fig. 12 FEM meshes of the interface layers and an internal section in convex polyhedral aggregate model

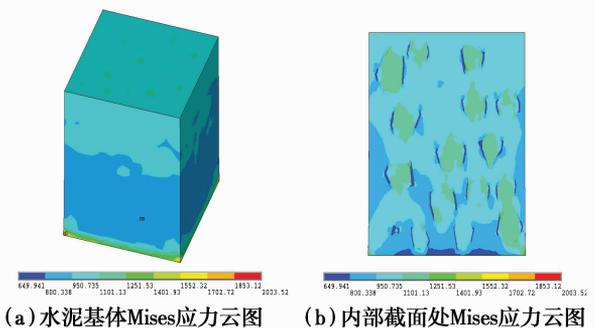


图 13 凸多面体骨料混凝土有限元模型计算结果
 Fig. 13 FEM results of the concrete model with convex polyhedral aggregate

由此可见,利用所编写的 Fortran 程序可快速生成高体分比混凝土骨料模型建模所需要的相关参数,基于 ANSYS 对生成体的编号规律将骨料和界面层分离开来,相应的模型建立、单元属性赋予、网格剖分以及有限元分析均可在 ANSYS 中进行,这种混合实现方法大大降低了混凝土数值模拟在编程方面的困难,从而提高了分析效率。另外,在有限元数值计算中,由于采用了二次单元,得到了精度较好的位移解和应力解。

4 结论

三维随机骨料模型的实现是对混凝土材料进行有限元数值模拟的一个重要问题之一。基于 Fortran 语言,为生成 ANSYS 参数化建模所需的命令流代码提供了一种快速实现方法,所设计的混合方法可快速有效地建立含高体分比球形骨料混凝土几何模型以及相应的界面层。使用的混合实现方法对界面层的处理方式适用于任意形状的骨料模型,为降低在混凝土数值模拟编程方面的困难创造了良好的实现条件。通过对椭球形骨料模型和凸多面体骨料模型的有限元数值模拟,进一步验证了本文提出的混合实现方法的有效性。

混合方法虽然可以快速生成椭球形和凸多面体骨料颗粒及其相应的界面层,但由于这些骨料是在球体内部生成并适当延拓的,真实的体分比可能较低,如何对混合实现方法进行改善,从而直接、快速地生成高含量的椭球或凸多面体骨料模型还有待作进一步的研究。另外,几何模型建立后,如何设计更高效的有限元方法,如 p 方法,以及为相应的离散化线性系统提供高效的求解方法,这些也将是今后进一步研究的问题。

参考文献:

[1] 马怀发,陈厚群,黎保琨. 混凝土细观力学研究进展及评述[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2004, 2(2): 124-130.
MA H F, CHEN H Q, LI B K. Review on micro-mechanics studies of concrete [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2004, 2(2): 124-130. (in Chinese)

[2] WITTMANN F H, ROELFSTRA P E, SADOUKI H. Simulation and analysis of composite structures [J]. Materials Science and Engineering, 1984, 68: 239-248.

[3] WANG X F, ZHANG M Z, REY P J. Computational technology for analysis of 3D meso-structure effects on damage and failure of concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 2016, 80: 310-333.

[4] 方秦,张锦华,还毅,等. 全级配混凝土三维细观模型的建模方法研究[J]. 工程力学,2013,30(1):14-21.
FANG Q, ZHANG J H, HUAN Y, et al. The investigation into three-dimensional mesoscale modelling of full-graded concrete [J]. Engineering Mechanics, 2013,30(1):14-21. (in Chinese)

[5] 宋来忠,沈涛,余波. 混凝土二维参数化骨料模型的创建方法[J]. 工程力学, 2013,30(10):5-13.

SONG L Z, SHEN T, YU B. The approach to establishing a two-dimensional parameterized aggregate model for concrete simulation [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(10): 5-13. (in Chinese)

[6] EDUARDO A, RODRIGUES, OSVALDO L, et al. 2D mesoscale model for concrete based on the use of interface element with a high aspect ratio [J]. International Journal of Solid and Structures, 2016, 94: 112-124.

[7] SHENG P Y, ZHANG J Z, ZHONG J. 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.

[8] 糜凯华,武量,吕晓波,等. 三维球形随机骨料混凝土细观数值模拟 [J]. 水电能源科学, 2014, 32 (11): 124-128.
MI K H, WU L, LYU X B, et al. Numerical simulation of mesostructure for concrete with 3D spherical random aggregate particles [J]. Water Resources and Power, 2014, 32 (11): 124-128. (in Chinese)

[9] 马怀发. 全级配大坝混凝土动态性能细观力学分析研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2005.
MA H F. Study on dynamic performance of full-graded dam concrete [D]. Beijing: China institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005. (in Chinese)

[10] 马怀发,陈厚群,吴建平,等. 大坝混凝土三维细观力学数值模型研究[J]. 计算力学学报, 2008, 25 (2): 241-247.
MA H F, CHEN H Q, WU J P, et al. Study on numerical algorithm of 3D meso-mechanics model of dam concrete [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2008, 25(2): 241-247. (in Chinese)

[11] MA H F, XU W X, LI Y C. Random aggregate model for mesoscopic structures and mechanical analysis of fully-graded concrete [J]. Computers and Structures, 2016, 177: 103-113.

[12] 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): 657-664.
WU L, WANG J, HE X W, et al. Generation of 3D mesoscale models for massive concrete with polyhedral aggregates [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(4): 657-664. (in Chinese)

[13] 华东水利学院水工设计手册(2):地质水文建筑材料 [M]. 北京:水利电力出版社,1984.

- East China Institute of Water Conservancy. Hydraulic design manual (2): the geological and hydrological building materials [M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1984. (in Chinese)
- [14] DIAMOND S, HUANG J. The interfacial transition zone reality or myth [C]// Proceedings of the International RILEM Conference, London E & Spon, 1998:3-39.
- [15] 刘光廷,王宗敏. 用随机骨料模型数值模拟混凝土材料模型的断裂[J]. 清华大学学报(自然科学版),1996, 36(1): 84-89.
- LIU G T, WANG Z M. Numerical simulation study of fracture of concrete materials using random aggregate model [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology),1996,36(1): 84-89. (in Chinese)
- [16] LI S G, LI Q B. Method of meshing ITZ structure in 3D meso-level finite element analysis for concrete[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2015, 93: 96-106.
- [17] 陈厚群. 全级配大坝混凝土动态性能研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院,2004.
- CHEN H Q. Study on dynamic performance of fully graded dam concrete [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2004. (in Chinese)

(编辑 胡玲)