

文章编号:1009-6825(2007)03-0014-03

# 蒙特卡罗法在混凝土数值模拟中的应用

高 燕 宓永宁 王作涛

**摘 要:**概述了混凝土结构层次观点,介绍了混凝土数值模拟方法及蒙特卡罗方法,重点讨论了蒙特卡罗法在混凝土细观层次上数值模拟的应用,分析了随机数产生的原理,详述了蒙特卡罗法建立随机骨料模型的过程,总结了蒙特卡罗法应用于模拟随机骨料结构的有效性。

**关键词:**蒙特卡罗法,混凝土,细观模拟,随机骨料

**中图分类号:**TU528.1

**文献标识码:**A

混凝土是由水、水泥和粗细骨料组成的复合材料,人们对其力学性能的研究很大程度上是依靠实验来确定,但实验的结果往往受实验室条件限制和混凝土试件自身的随机性影响,与实际情况产生较大偏差。随着计算机技术的快速发展,对混凝土工程进行数值模拟和仿真分析成为可能,也为混凝土力学性能的研究提供了新方法。

## 1 混凝土结构层次观点

由于研究侧重点的不同,可将混凝土内部结构分为不同层

次,一般可分为以下几种:1)宏观层次:指宏观的实体,如梁、板、柱等,混凝土材料假设为均质,用连续介质力学分析;2)细观层次:混凝土材料假设为非均质,被看作由粗细骨料、水泥水化物、孔隙、界面等细观结构组成的多项复合材料,可按损伤力学或随机骨料模型进行破坏机理分析;3)微观层次:指原子、分子量级,认为水泥浆体本身也是一种随机复合材料,水泥浆体的非均质性是由浆体中的孔隙产生的,孔隙的尺寸大致为微米量级。文中所论述的是蒙特卡罗法在混凝土细观层次上数值模拟的应用。

方和施工方法。以上化学原料和油漆有一定的微毒性和易燃性,施工时要做好防护措施。

## 2.5 两墙体相交阴角处裂缝加固

1)沿裂缝两相交墙体每边各按宽度 150 mm 清除面层和粉刷层,露出砖砌体,进行表面清理,吹去残渣。2)湿润两边墙体,对裂缝进行灌缝和封缝。3)用水泥钉在两边墙体上固定裂缝每边宽度为 130 mm 的钢丝角网,然后抹与原粉刷层厚度相同的 M10 水泥砂浆层。4)根据两边墙体,用同样面层材料和式样恢复。

## 2.6 两墙体相交阳角处裂缝加固

墙体阳角处裂缝也可采用钢丝角网加固,加固步骤和方法与阴角处裂缝加固相同。

## 2.7 砖拱顶裂缝加固

1)沿裂缝方向宽度 300 mm 范围内清除面层和粉刷层,露出砖砌体,进行表面清理,并吹去残渣。2)对砖砌体进行湿润,裂缝宽度大于 1.5 mm 时用膨胀水泥浆液灌缝,裂缝宽度为 0.3 mm~1.5 mm 的用环氧树脂浆灌缝,宽度小于 0.3 mm 的裂缝用环氧树脂浆封缝。3)用水泥钉沿拱面固定宽度为 240 mm 的钢丝网片在裂缝上,然后抹与原粉刷层厚度相同的 M10 水泥砂浆层。

## 2.8 整个砖拱顶的加固

由于砖拱部分钢拉杆弯曲不直,各拉杆受力不均,使砖拱顶

处于最不稳定状态,因此要用钢丝网对整个拱顶进行加强。

1)用水湿润砖拱顶后,用钢丝刷清理表面。2)刷一层加入水泥用量 20% 白乳胶的水泥白乳胶浆结合层。3)用水泥钉对整个拱面进行固定钢丝网片。4)对拱顶面湿润后,刷 12 mm 厚 M15 水泥砂浆,压光表面。

## 2.9 屋面补漏

对于屋面出现裂缝漏雨处,用沥青油膏补漏。屋面施工时,应注意拱两边对称施工,不要使屋面拱单边受力过重。施工时应严格按照以下工序进行施工:钢拉杆的调整及防腐→混凝土浇筑拱脚、加固边梁 XQL→加固所有墙体上的裂缝→加固砖拱顶裂缝→用钢丝网加固整个砖拱顶→屋面补漏。

同济大学朱伯龙教授曾经指出:21 世纪是修补的世纪,这绝非危言耸听。结构的维修和加固改造技术已成为现代土木工程领域中极其重要、最具活力的新兴技术分支。总体而言,做好结构的维护保养以延长结构的生命周期的工作,可以减少资源浪费,保护生态环境,是可持续发展战略必不可少的一个环节。降低人为的能源消耗、提高资源的利用率、创造良好的使用环境、应对自然因素影响的工程腐蚀现象、做好土木工程结构的健康监测工作、加强结构的维护保养、延长结构的生命周期,对于土木工程可持续发展战略来说,具有明显而深远的意义。

## Strengthening scheme of granary with brick-arch roof

YANG Jiu-jun HUANG Bin

**Abstract:** Combined with practical engineering, this paper illustrates the engineering methods and construction steps of strengthening cracks appeared in single and double sides of wall, Ying and Yang angles at the cross of two walls, brick-arch apex and roof, in order to prolong life circular of structure, which has profound meaning for sustainable development strategy of civil engineering.

**Key words:** brick-arch roof, strengthening scheme, crack, sustainable development

收稿日期:2006-06-22

作者简介:高 燕(1978-),女,沈阳农业大学水利学院硕士研究生,辽宁 沈阳 110161

宓永宁(1959-),男,博士,教授,沈阳农业大学水利学院,辽宁 沈阳 110161

王作涛(1966-),男,高工,沈阳市水利工程质量监督站,辽宁 沈阳 110032

## 2 混凝土细观结构数值模拟

随着近年来计算机技术和有限元方法的发展,计算机模拟在工程中的应用变得更为广泛,对于混凝土的数值模拟也有了更多的关注。对混凝土结构进行数值模拟的研究也越来越多。多数研究者对混凝土结构的数值模拟是基于细观层次的,将混凝土视为由骨料、水泥砂浆和过渡层组成的复合材料,提出细观力学模型,根据混凝土级配,随机生成复合结构,再剖分成界面元网格,并把给定的骨料和砂浆的力学特性分配给相应的单元,形成数值模拟混凝土试块,对其进行力学性能的数值试验和分析。

其中研究者建立的较为典型的混凝土细观力学模型有格构模型、随机粒子模型、随机骨料模型、随机力学特性模型,这些模型都是用细观层次上的简单本构关系来模拟复杂的宏观断裂过程。目前混凝土细观力学数值模拟主要研究方向:1)将连续介质力学、损伤力学和计算力学相结合去分析细观尺度的变形、损伤和破坏过程,以发展较精确的细观本构关系和模拟细观破坏的物理机制;2)基于对细观结构和细观本构关系的认识,将随机分析等理论方法与计算力学相结合去预测材料的宏观性质和本构关系,对混凝土试件的宏观响应进行计算仿真。

## 3 蒙特卡罗法

蒙特卡罗法又称为随机抽样法,概率模拟法或统计试验法。由于它以概率论和数理统计理论为基础,故被一些物理学家以位于法国和意大利接壤的闻名于世的赌城蒙特卡罗命名,以此来表示其随机性的特征。

在计算机上产生随机数的方法有物理方法和数学方法,数学方法中可以用递推法按照一定的数学步骤生成的序列,由于计算机的字长有限,或递推的级数有限,产生的序列具有一定的周期性,这样生成的数列并非是真正相互独立、均匀分布的随机变量序列样本,但通过选取适当的系数和参数,这种产生的序列也可以通过各种关于均匀分布和相互独立性的统计检验,也可以被接受为独立均匀随机序列使用,这样的随机数被称为伪随机数。

蒙特卡罗方法就是研究在计算机上产生具有各种概率分布的伪随机数的方法,并通过构造随机模型使得某一随机量的数学期望等于问题中要求的解,是通过产生随机数模拟一个概率过程的方法。在二十世纪六七十年代,由于电子技术的限制,蒙特卡罗法的应用仅限于自然科学的特殊领域。现在,由于计算机技术的飞速发展,蒙特卡罗法的应用已经广泛渗透到自然科学和社会科学的各个领域,在计算机上通过统计抽样实验模拟解决实际问题成为认知未知世界的重要手段。

## 4 蒙特卡罗法在数值模拟中的应用

在细观层次上,混凝土被视为由粗骨料、水泥砂浆及过渡界面的三相复合材料。在实际工程中,混凝土构件的制作有很大的随机性,因此在混凝土数值模拟过程中,为了得到与实际相符的骨料模型,可以将混凝土看作是粗骨料随机的分散到水泥砂浆基质中而形成的复合材料。可以利用蒙特卡罗法在计算机上产生出随机数列,以确定随机骨料的几何位置,然后将其投放到基质中。用蒙特卡罗方法模拟产生满足一定分布的离散颗粒体,首先要用某种特定的方法产生该种分布的随机数,这一过程称为随机抽样。随机变量分布有多种,不同分布对应的随机数列也不同,但就随机数产生而言,最基本的随机变量是在区间(0,1)上服从均匀分布的随机变量。若产生(0,1)的均匀分布随机变量 $X$ ,则经过变换 $X' = a + (b - a) \times X$ ,求得在区间 $(a, b)$ 上均匀分布的随机变量 $X'$ 。对于服从其他分布随机变量的随机数,都可由(0,

1)上均匀分布的随机变量的随机数变换得到。随机骨料的生成就是利用蒙特卡罗法模拟产生的骨料离散颗粒体,随机投放到水泥砂浆基质中,形成较为符合实际情况的混凝土数值构件。

1)给定边界范围及坐标系;

2)由混凝土级配曲线确定级配,确定各种粒径骨料的数量;

3)按照骨料粒径,生成随机骨料;

4)产生在(0,1)范围内服从均匀分布的伪随机数,用混合同余法推断计算,得出一系列随机数,由随机数得骨料颗粒的形心坐标: $x_n = b \times r_n, y_n = h \times r_n$ ;

5)按照从大到小的顺序,将骨料放入确定的范围内;

6)判断骨料是否进入其他骨料的影响区,判断骨料与边界的距离是否小于3 mm,是则舍去重新投放。尽管混凝土内大量骨料随机排列在一起,但真正相互接触的很少,所以规定每个骨料周围有个影响区,在此范围内其他颗粒不能进入,一般说来,相邻颗粒圆心之间的最小距离可定义为两相邻颗粒半径之和的1.1倍。考虑骨料与边界之间有砂浆层,骨料范围与边界距离不应小于3 mm;

7)在试件平面进行网格划分,将骨料模型投影到该网格上。位于骨料内部的单元赋予骨料材料特性;位于固化砂浆区域内部的单元赋予固化砂浆混凝土材料特性,否则赋予界面单元的材料特性。

## 5 结语

目前,数值混凝土已经成为研究混凝土材料特性的重要手段,通过对混凝土的细观数值模拟,研究者可以对混凝土性能更为客观的分析。蒙特卡罗法是进行混凝土随机骨料模拟的重要数学工具,已经被广泛的应用于混凝土细观数值模拟当中,利用蒙特卡罗法可以更好的解决骨料随机分布的问题,由蒙特卡罗法模拟产生的随机骨料模型更为接近原型结构,利用其产生随机序列具有速度快,占内存小的优点,使程序更容易实现,更具有实践性。

## 参考文献:

- [1]倪玉山.混凝土细观结构断裂的分形分析[J].大连理工大学学报,1997,37(sup1):72-76.
- [2]刘光廷,王宗敏.用随机骨料模型数值模拟混凝土材料的断裂[J].清华大学学报(自然科学版),1996,36(1):84-89.
- [3]彭一江,黎保琨,刘斌.碾压混凝土细观结构力学性能的数值模拟[J].水利学报,2001(6):19-22.
- [4]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(自然科学版),2003,43(5):710-714.
- [5]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.
- [6]De SCHUTTER G, TAERWE L. Random particle model for concrete based on Delaunay triangulation[J]. Mater Street, 1993 (26):67-73.
- [7]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(6):124-130.
- [8]尚武,杜成斌.基于细观损伤的混凝土力学性能数值模拟研究进展[J].水利与建筑工程学报,2004(3):23-28.
- [9]王立久,曹庆坚.基于网络模型的混凝土细观结构数值模拟[J].试验研究,2005(6):8-10.
- [10]孙立国,杜成斌,戴春霞.大体积混凝土随机骨料数值模拟[J].河海大学学报(自然科学版),2005(5):291-295.

(下转第54页)

题:a.大部分框架柱存在配筋不足,部分框架梁的配筋不足;b.部分框架柱轴压比不满足要求;c.部分框架梁和框架柱的箍筋加密不符合要求;d.房屋层间位移大于规范要求等。

### 3 加固方案

考虑到逐个构件采用外包钢筋混凝土套或外包钢进行加固,将会带来很大的施工量和较长的施工工期。基于此,采取了改变原有结构手连路径与提高原结构承载力相结合的方案。在不影响建筑功能的情况下,增设纵横向抗震墙以增加结构的整体刚度。根据结构平面特点,在纵向(X向)布置2段抗震墙、横向(Y向)布置4段抗震墙,墙厚200mm,抗震墙平面布置图见图3。这样结构的抗震体系得以改变,由原来的框架结构变成框架—抗震墙结构。因此,框架结构的抗震等级为三级,抗震墙的抗震等级为二级。这样,原框架柱的配筋不足得以缓解,只需对底层部分框架柱和新增的抗震墙进行加固,大大减少了加固补强的工作量。

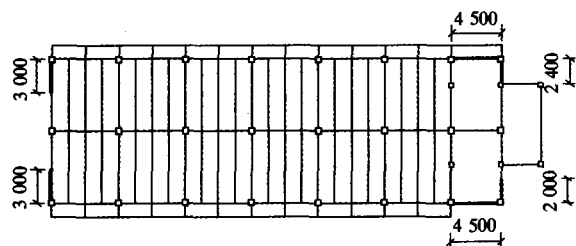


图3 抗震墙平面布置图(单位:mm)

采用PKPM通用设计系列软件中的PMCAD和SATWE-8(适合于8层以下)将加固后的结构进行时程分析。基本设计参数如下:修正后风荷载标准值:0.55 kN/m<sup>2</sup>;抗震参数:抗震设防烈度为7度,设计基本地震加速度值为0.10g,设计地震分组第一组,场地土类别为IV类;建筑物重要性类别分为丙类建筑;梁、柱抗震等级:三级。荷载按GB 50009-2001建筑结构荷载规范的要求取值。

计算结果表明:结构纵向(X向)第一振型对应的自振频率为1.26 Hz(相应的自振周期为0.792 9 s),结构横向(Y向)第一振型对应的自振频率为1.32 Hz(相应的自振周期为0.756 7 s),结构扭转第一振型对应的自振频率为1.80 Hz(相应的自振周期为0.554 7 s)。

在地震作用下,结构横纵向的层间位移反应见表1、表2。由

此可见,加固后结构的抗侧刚度增大了,自振周期变小了,从而避开了场地的卓越周期,极大地见习了结构的地震反应。从计算结果来看,结构在两个方向的最大层间位移反应分别为1/880(纵向)和1/951(横向),结构在地震作用下的位移反应和层间位移反应均能满足规范的要求。

表1 结构在X方向地震作用下的弹性变形

楼层	加固前		加固后	
	层间位移	层间位移角	层间位移	层间位移角
1	1.69	1/1 281	1.11	1/1 976
2	7.12	1/592	4.68	1/898
3	10.20	1/677	6.80	1/904
4	15.00	1/666	10.42	1/880
5	17.34	1/856	12.31	1/1 068
6	20.35	1/1 061	14.80	1/1 285
7	22.17	1/1 759	16.44	1/2 183

表2 结构在Y方向地震作用下的弹性变形

楼层	加固前		加固后	
	层间位移	层间位移角	层间位移	层间位移角
1	2.68	1/821	1.10	1/1 995
2	12.02	1/343	4.44	1/958
3	18.26	1/346	6.36	1/1 144
4	27.49	1/351	9.73	1/951
5	32.36	1/450	11.53	1/1 030
6	37.89	1/579	14.30	1/1 021
7	41.52	1/879	16.63	1/1 066

### 4 结语

根据现行的国家标准和规程,早期的钢筋混凝土框架加固改造结构大多数存在抗震能力不足的情况,面临抗震加固的问题。由于使用性能的改变,本工程结构改变较大,更难满足抗震规范的要求。基于此,采用增设抗震墙的方法,把原来的框架结构变成框架—抗震墙结构,这样原框架柱的配筋补足得以缓解,仅仅对部分框架柱采用外包钢加固,大大减少了加固补强的工作量。

#### 参考文献:

- [1]GB 50011-2001,建筑抗震设计规范[S].
- [2]DGJ 08-9-2003,建筑抗震设计规程[S].
- [3]DBJ 08-81-2000,现有建筑抗震鉴定与加固规程[S].
- [4]徐磊,袁勇.钢筋混凝土框架加固结构地震反应分析[J].工程抗震与加固改造,2005,27(2):46-49.

## Seismic strengthening on a reinforced concrete frame structure

ZHAO Xue-lian LIU Zu-hua

**Abstract:** In this paper, seismic analysis about a reinforced concrete frame structure with interlayer under transformation and reinforcement is introduced. Through changing the structure's seismic system, the structure after transformation and reinforcement could meet the earthquake resistance reinforcement standard. It can also be used as reference in the transformation and reinforcement for other buildings.

**Key words:** frame structure, structural system, anti-seismic detection

(上接第15页)

## Application of Monte-carlo method on concrete meso-structure numerical simulation

GAO Yan MI Yong-ning WANG Zuo-tao

**Abstract:** In the paper, the concrete inner structures and concrete numerical simulation methods was presented. Emphases were put on the application of Monte-carlo method about concrete meso-structure numerical simulation. The principle of random numbers' generation was also analyzed. Furthermore, it was particularized that the Monte-carlo method was used to generate the random aggregate model. Finally, the paper summarizes the validity of Monte-carlo method on the random aggregate simulation.

**Key words:** Monte-carlo method, concrete, meso-level simulation, the random aggregate