

水工钢筋混凝土数值模型与应用综述

强 晟, 张 扬

(河海大学 水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 描述分析了现有的钢筋混凝土数值计算模型, 以及各类模型在几种常见商业软件中的应用现状. 提出了钢筋混凝土数值模型在实际应用中存在的一些问题.

关 键 词: 水工结构; 钢筋混凝土; 数值模型; 商业软件; 综述

中图分类号: TU528.571

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2007)03-0077-04

Overview of reinforced concrete numerical models and application in hydraulic structure

QIANG Sheng, ZHANG Yang

(College of Water Conservancy and Hydroelectric Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The reinforced concrete numerical models and their application in some common commercial softwares are analyzed. Some problems are put forward about the engineering application of the reinforced concrete numerical models.

Key words: hydraulic structure; reinforced concrete; numerical model; commercial software; overview

目前我国正处于水利水电工程大规模建设的时期, 钢筋混凝土大量使用于水工结构中, 钢筋在水工结构的施工期和运行期起到的限裂作用是非常明显的. 在一般工业与民用建筑中, 混凝土的配筋计算方法已比较成熟. 除连续梁或框架结构外, 我国大部分结构是按线弹性理论计算得到的内力来进行配筋设计的. 理论分析与试验证明, 按线性内力配筋对大多数结构而言是合适的^[1].

水工结构一般体积庞大, 受力条件复杂, 运行年限长, 运行安全度要求高, 故对水工钢筋混凝土结构的设计提出了更高的要求. 目前, 钢筋混凝土有限元法是这类结构配筋设计或结构分析的一种有效方法^[2-5]. 本文综述了近年来出现的各类钢筋混凝土数值计算模型, 结合施工和运行的一些水工结构的实际情况, 提出了钢筋混凝土数值模型在应用中存在的一些问题以及今后研究的方向.

1 钢筋混凝土的数值模型

对于钢筋混凝土, 目前常用的数值计算方法是有限元法. 针对钢筋混凝土的有限元模型, 有的自行研制

收稿日期: 2007-01-15

作者简介: 强 晟(1977-), 男, 江苏宜兴人, 讲师, 博士, 主要从事水工结构数值模拟研究.

E-mail: Sqiang2118@163.com

了程序,有的使用商业软件,如 ANSYS、ABAQUS、MARC、SuperSAP 等. 总体而言,无论是采用自制程序还是商业软件,按照钢筋模拟方法的不同,钢筋混凝土有限元模型可以分为三类,即分离式、组合式和整体式.

分离式模型将钢筋和混凝土作为不同单元处理. 混凝土一般采用实体单元,钢筋采用杆单元,两者之间的黏结滑移可用黏结单元来模拟,也可以认为两者间黏结良好,不存在滑移^[6]. 这种模型概念简单,且能考虑钢筋与混凝土之间的黏结滑移,有较高的精度. 在非线性计算中,混凝土、钢筋、混凝土-钢筋接触面可以采用不同的本构模型^[7,8],考虑的因素比较全面. 但钢筋单元必须在混凝土单元边线上,混凝土单元的划分受到钢筋分布和方向的限制,在大型复杂结构的三维分析时单元划分有时会十分困难,而且会导致网格过密、计算量过大,使计算难以实现. 在计算参数的取值上,混凝土单元和钢筋单元可以直接采用有关物理力学参数,而黏结单元的计算参数取值,如法向刚度、切向刚度、粘聚力和摩擦系数等,还需进行专门的拉拔试验,并结合反演计算,参数获取的工作量相对较大.

组合式和整体式模型都假定钢筋与混凝土之间结合良好,不存在滑移. 组合式模型将混凝土和钢筋包含在一个单元之内,分别计算它们对单元刚度矩阵的贡献,再叠加得到单元的刚度矩阵. 整体式模型将钢筋弥散于混凝土单元之中,把钢筋混凝土材料作为等效均质材料,钢筋对结构的贡献通过调整单元的材料参数来体现. 这两种模型的优点在于网格剖分方便,计算量小,但不能考虑钢筋与混凝土之间的黏结滑移,其中整体式模型不能求出钢筋应力的分布,一般只用在大体混凝土结构的分析中. 与分离式模型相比,这两种模型未考虑混凝土与钢筋之间的黏结关系,计算参数取值时只有混凝土和钢筋的物理力学参数,二者的有关参数一般通过混凝土和钢筋分别在结构中所占体积的大小进行综合,并最终反映在单元的刚度矩阵中.

三维情况下常用的组合式模型是含钢筋膜的模型^[9]. 这种模型将单元中的钢筋折算成“等效薄膜”,并假定薄膜只能承担轴向拉力,不能承担横向切力与弯矩,因薄膜较薄,所以又忽略了垂直于薄膜中面的变形. 在该模型的基本公式中,等效钢筋薄膜在局部坐标下的坐标值必须有一个是常数,这就要求钢筋必须平行于混凝土单元的一个面. 因而,这种模型的单元网格划分就必须考虑钢筋的位置,并对单元的形状及其走向作出调整,这给网格划分带来了困难.

另一种组合式模型为埋置组合式模型,它将钢筋看成埋置在混凝土单元中的杆件. 1987 年提出的二维埋置组合式模型^[10]能在局部坐标下考虑与坐标轴成任意的角度,但只适用于单元网格是直线形及直钢筋的情况. 2000 年提出的三维埋置组合式有限元模型及相应的网格自动生成算法^[11],对于任意钢筋混凝土结构,可先划分混凝土单元,此时不必考虑钢筋的具体位置,然后给定钢筋直线段的起点与终点坐标,即可求得埋置在等参单元内各钢筋段的坐标信息. 该模型能考虑穿过混凝土单元任意方向的钢筋. 总体来说,这个方法形成网格需要输入的信息较少,对提高大型钢筋混凝土结构的有限元分析效率具有较大的实用意义.

最近也有研究者采用不连续介质力学问题的界面元法^[12],对钢筋混凝土结构进行了数值模拟,简单算例的计算结果与试验结果吻合良好^[13]. 但该方法的前、后处理比较麻烦,适于对混凝土结构中钢筋与混凝土界面的粘结性能进行细观力学分析,在大规模复杂结构的应用方面还有较大的距离.

2 商业软件应用现状

在商业软件 ANSYS 中,一般利用 Link8 型单元或 Pipe20 型单元建立分离式钢筋模型,在混凝土单元和钢筋单元之间利用弹簧模型来建立连接,钢筋单元与混凝土单元 Solid65 共用节点. 其优点是建模时可以任意布置钢筋并可直观获得钢筋的内力. 缺点是建整体式模型很复杂,需要考虑共用节点的位置,且容易出现应力集中拉坏混凝土的问题^[14]. 对于组合式模型和整体式模型,ANSYS 直接利用带筋的 Solid65 型单元提供的实参数建立这类钢筋混凝土模型,其优点是建模方便,分析效率高;缺点是不适用于钢筋分布较不均匀的区域,且难以得到钢筋内力^[15]. 另外,ANSYS 中的混凝土材料还存在着一些不足,如材料模型未包括统一强度理论^[16],计算效率还比较低,精度还不够理想等,需要不断地改进和完善.

在商业软件 ABAQUS 中,混凝土和钢筋的黏结滑动和暗销作用通过混凝土的拉伸软化来模拟,程序通过埋入方法将单独的钢筋单元嵌入混凝土单元,自动耦合自由度^[17]. 嵌入式钢筋模型依据钢筋和混凝土位移协调,分别求出混凝土和钢筋对单元刚度矩阵的贡献,然后组合形成综合单元刚度矩阵. 很显然,这是一种

组合式模型,不能精确模拟钢筋与混凝土的相互作用。

商业软件 MARC 提供了有关钢筋混凝土结构非线性分析的基本功能,采用嵌入混凝土基体材料的加强筋复合材料模拟加强筋与混凝土的相互作用,但没有提供模拟钢筋与混凝土粘结滑移的单元,需要进行二次开发才能模拟钢筋与混凝土的相互作用^[18]。

SuperSAP 中模拟钢筋混凝土一般采用分离式模型,钢筋往往采用三维杆单元,计算时假定混凝土与预应力钢筋之间的粘结很好,不会产生相对滑移,混凝土单元与钢筋单元之间的连接是结点的铰接,两者在公共结点是协调工作^[19]。SuperSAP 软件是较早引入国内的有限元计算软件,国内 20 世纪 80 年代和 90 年代应用比较广泛。现在其版本虽然不断更新,界面和功能不断改善,但与其它大型商业软件相比,在前、后处理和功能方面还稍差。

3 水利工程中的应用和存在的问题

一般来讲,钢筋混凝土水工结构中的应力包括荷载应力和附加应力。荷载应力是指钢筋混凝土结构在承受各种外荷载时所形成的应力。附加应力是指钢筋与混凝土的线胀系数不同、混凝土湿度和自身体积变化以及混凝土的徐变等因素的影响所形成的应力。其中由于钢筋与混凝土的线胀系数不同而形成的附加应力,称为线差温度应力。我国许多水利水电工程,如乌江渡、龚嘴、刘家峡、新安江、三门峡、泉水、映秀湾、太平驿等工程的观测资料表明,混凝土线胀系数均小于钢筋的线胀系数(即 $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$),这与《钢筋混凝土结构学》中的假定不一致^[20],线差温度附加应力会改变原设计的应力状态,使设计应力与实际应力不相符,在工程设计阶段应专门进行考虑施工期混凝土温度变化的配筋研究。

水电站蜗壳结构是易受拉的水工结构,也是钢衬与钢筋混凝土联合受力结构。它承受着水压力、温度荷载及其它上部荷载,同时又是大体积、低含筋结构,不能用一般的工业与民用建筑钢筋混凝土结构程序计算。需结合钢衬钢筋混凝土蜗壳结构特点,利用非线性计算程序,计算在内水压力、外荷载和温度荷载等作用下,蜗壳钢衬、钢筋和混凝土的应力、变形和极限承载力,以及预测蜗壳外围混凝土裂缝的发展过程等^[17]。目前常用的大体积钢筋混凝土计算程序一般都采用整体式模型,还不能很好地针对混凝土、钢筋、混凝土-钢筋接触面分别进行非线性计算。

在堆石坝面板的施工过程中,由于混凝土的干缩变形和温度变形,很容易出现一些表面裂缝。而在长期运行过程中,堆石坝的不均匀沉降又将导致面板产生结构应力,促使这些表面裂缝进一步扩展,从而使混凝土面板出现深度裂缝甚至贯穿裂缝,影响堆石坝的正常运行和面板的耐久性。为了减少裂缝对堆石坝面板的危害,抑制表面裂缝的进一步扩展,在面板设计中都要配置一定量的钢筋。配筋是为了限制裂缝的扩展,并将可能发生的条数较少而宽度较大的裂缝分散为条数较多而宽度较小的裂缝。然而,在配筋率不变的情况下,单层配筋或双层配筋哪种方式更有利于控制裂缝的扩展,人们的认识不统一。目前工程界比较普遍的做法是,在面板中部配置单层钢筋,认为这样可以减少面板刚度,增加面板柔性,同时限制裂缝的扩展。但这种做法的科学性和合理性令人质疑^[21],必须采用合理考虑混凝土与钢筋相互作用的温度场模型和应力场模型进行专门的计算分析。

此外,南水北调工程中的大量渡槽、水闸、倒虹吸、隧洞以及大坝加高时新老混凝土交界面等,都存在着如何进行合理配筋的问题。目前正在建设的部分项目中,有相当一部分钢筋混凝土结构在施工期就出现较多的裂缝,除了材料本身和施工技术及方法外,在设计阶段怎样考虑钢筋的作用,这也是当前一个急需解决的问题。

4 结 语

目前常用的钢筋混凝土的数值模型有三类,即分离式、组合式和整体式,建立在这 3 种模型基础上的计算程序和商业软件各有优缺点。

对于一般的工业和民用建筑,按线弹性理论计算得到的内力来进行配筋设计是合理可行的。但水工结构

往往规模较大,受力条件复杂,目前正在施工和运行的许多水工结构的现状表明,合理配筋在水工钢筋混凝土结构的设计中是一个值得研究的课题。

合理的配筋必须满足安全性和经济性要求,在计算方法尚不严密的情况下,只能尽量满足安全性要求。今后的研究应在目前的数值模型基础上取长补短,建立新的数值模型,既能够考虑钢筋、混凝土、钢筋-混凝土接触面黏结滑移等材料的非线性,又可以将整体模型的计算量限制在单机计算能力范围内;既能够模拟结构运行期的相对较稳定的状况,又能够方便地模拟施工期混凝土温度变化剧烈情况下钢筋与混凝土的相互作用,从而使得设计人员能够方便地进行配筋设计和结构分析。

参 考 文 献:

- [1] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 39-66.
- [2] 吕西林, 金国芳, 吴晓涵. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997: 72.
- [3] 江见鲸. 钢筋混凝土结构非线性有限元分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994: 91-117.
- [4] 赵国藩. 高等钢筋混凝土结构学[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 128-129.
- [5] 汪基伟, 张雄文. 水工钢筋混凝土结构有限元设计计算原则[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(5): 44-47.
- [6] 方自虎, 孙 璨. 钢筋混凝土结构的三维有限元非线性分析[J]. 计算力学学报, 2006, 23(3): 377-380.
- [7] Minho Kwon, Enrico Spacone. Three dimensional finite element analysis of reinforced concrete columns[J]. **Computer & Structures**, 2002, 80(2): 199-212.
- [8] Wang Taijun, Thomas T C H. Nonlinear finite element analysis of concrete structures using new constitutive models[J]. **Computer & Structures**, 2001, 79(32): 2781-2791.
- [9] 周 昕, 沈蒲生. 钢筋混凝土板三维非线性有限元分析[J]. 湖南大学学报, 2003, 30(3): 124-126.
- [10] Chang T Y, Tangguchi H, Chen W F. Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete panels[J]. **Journal of Structural Engineering**, 1987, 113(1): 122-140.
- [11] 巫昌海, 汪基伟. 混凝土三维钢筋埋置组合式有限单元模型及其网格自动生成[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(10): 761-764.
- [12] 卓家寿, 章 青. 不连续介质力学问题的界面元法[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 258-259.
- [13] 高向玲, 李 杰. 钢筋与混凝土粘结本构关系的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2005, 22(1): 73-77.
- [14] 邢静忠, 李 军. ANSYS 对钢筋混凝土梁的非线性分析[J]. 煤炭工程, 2006, 10: 27-29.
- [15] 周艳莉, 符文熹, 杨兴国, 等. 基于有限元法的水工钢筋混凝土结构配筋[J]. 四川水利, 2006(3): 21-23.
- [16] 俞茂宏. 混凝土强度理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 174-175.
- [17] 伍鹤皋, 蒋逵超, 申 艳, 等. 直埋式蜗壳三维非线性有限元静力计算[J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1323-1328.
- [18] 陈 琴, 林绍忠. MARC 软件在钢筋混凝土结构开裂分析中的应用与二次开发[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(5): 28-30.
- [19] 朱以文, 韦庆如, 顾伯达, 等. 微机有限元前后处理系统 ViziCAD 及应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1993: 116-117.
- [20] 龚朝蜀, 李光宗. 钢筋混凝土水工结构物中的线差温度应力[J]. 水电站设计, 2004, 20(3): 58-62.
- [21] 杨松林, 钟 平, 张建民. 配筋方式对堆石坝面板裂缝扩展的影响[J]. 水力发电学报, 2005, 24(5): 45-48.