

水工钢筋混凝土结构有限元设计计算原则

汪基伟, 张雄文

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:通过分析若干结构工程设计遇到的困难和钢筋混凝土有限单元法的优势, 指出钢筋混凝土有限单元法应用于水工结构设计与分析是十分必要的, 也是十分有效的。通过对本构关系、单元模型、裂缝模型、材料强度和荷载取值等关键问题的讨论, 提出了应用钢筋混凝土有限元法进行水工结构设计时应遵循的计算原则。

关键词:钢筋混凝土; 结构设计; 有限元法; 计算原则

中图分类号: TV314; TV332

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2005)05-0044-04

Calculation principle for finite element design of hydraulic reinforced concrete structures//WANG Ji-wei, ZHANG Xiong-wen (College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: From an analysis of some difficulties occurring in the design of several hydraulic structures and the advantages of the reinforced concrete finite element method (RCFEM), it is concluded that RCFEM is necessary, applicable, and effective for design and analysis of hydraulic structures. Based on a discussion of some key problems in structural design, such as the constitutive relationship, element model, crack model, material strength, and load determination, the calculation principle, which should be followed in hydraulic structure design with RCFEM, is presented.

Key words: reinforced concrete; structural design; FEM; calculation principle

1 钢筋混凝土有限元法应用于水工结构设计的必要性

在我国除连续梁或框架结构外, 大部分结构是按线弹性理论计算得到的内力(下简称线性内力)来进行配筋设计的。理论上, 该方法对静定结构是完全合理的。对超静定结构, 用线弹性理论计算内力, 用设计规范的截面极限状态法计算钢筋用量, 逻辑上是矛盾的。但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]。然而对某些结构, 混凝土开裂会使结构的实际内力与线性内力有显著差别, 此时按线性内力配筋就变得不合理。钢筋混凝土有限元法(以下简称 RCFEM)能够考虑钢筋、混凝土、钢筋与混凝土黏结滑移等材料的非线性, 模拟结构的破坏过程, 是这类结构配筋设计或结构分析的一种有效方法。本文从非杆系结构、有接触支撑结构配筋设计遇到的问题来阐述 RCFEM 应用于水工结构设计的必要性。

1.1 非杆系结构

所谓非杆系结构是指无法用结构力学计算内力

的结构, 以往这类结构只能采用应力图形法配筋^[2]。该方法在理论上是不合理的, 在实际应用上也有困难, 表现在: ①应力图形法的思想是用线性计算得到的截面主拉应力图形来计算钢筋面积, 而实际当钢筋起作用时混凝土早已开裂, 线性计算得到的应力图形已不存在, 此时用一个实际不存在的应力图形作为设计依据, 理论上不合理; ②该方法设计的钢筋用量一般认为能满足承载能力的要求, 但无法计算裂缝宽度, 而裂缝宽度对水工结构是极其重要的, 有时按应力图形配筋法确定的钢筋用量不足以控制裂缝宽度。例如: 三峡升船机上闸首设计水头 34.0 m, 当采用钢筋混凝土方案和按应力图形配筋法配筋时, 底板需配筋 $7 \times \Phi 36 @ 100$, 排距为 250 mm。但 RCFEM 计算结果表明, 如此配筋在设计水头时裂缝宽度最大值在底板表面为 0.37 mm、内部为 1.01 mm, 呈表面窄、内部宽的形态, 说明应力图形法得到的配筋虽能满足承载能力的要求, 但内部变形得不到有效约束, 不能满足最大允许裂缝宽度 0.20 mm 的要求^[3]。从这个实例可看出按应力图形法配筋的不安全性, 以及采用 RCFEM 的必要性。

基金项目: 江苏省水利科技项目(2001170); 河海大学院士基金项目(HHYS003)

作者简介: 汪基伟(1962—), 男, 浙江安吉人, 教授, 博士, 从事混凝土结构研究。

1.2 有接触支撑的结构

地基梁板、输水隧洞和调压井的衬砌,或与土基接触或与围岩接触,属高次超静定问题,这类结构目前通常按弹性体计算内力,按规范配筋.对此存在两个问题:①当钢筋起作用时,混凝土开裂,底板和衬砌的刚度发生变化,从而引起内力的变化.裂缝越深,刚度变化越大,实际内力与线性计算结果的差别越大.②规范^[2]中的裂缝宽度公式是根据表面无约束的梁柱式构件的试验结果得到的,是否适合于表面有约束的底板和衬砌还有待于验证.

文献[4]对 2.9 m × 1.2 m × 0.3 m (长 × 宽 × 高)的地基板进行线性计算和考虑混凝土开裂的计算.该地基梁采用 C25 混凝土,作用均布荷载,荷载设计值取 400 kPa,配筋为 $\Phi 12 @ 100$.当荷载达到设计值时,线性计算和考虑混凝土开裂计算得到的梁中最大弯矩值分别为 92.9 kN·m 和 52.2 kN·m,后者比前者降低了 43.8%.这说明按线性计算大大高估了地基板在设计荷载下的内力,而考虑混凝土开裂的 RCFEM 是正确计算此类结构内力的一种有效方法.

1.3 温度作用和温度配筋

对于水工结构,温度往往是最主要的作用之一.温度作用对结构的影响主要是因温度变形受到约束而导致温度应力,一旦结构出现裂缝后温度变形的约束就可以显著消除,温度应力就随之大部分释放,裂缝宽度越大释放的温度应力就越多.合理的温度钢筋应考虑混凝土开裂引起的温度应力释放,根据允许的裂缝宽度来配置钢筋,要实现这一点采用能计算裂缝宽度的 RCFEM 是最有效的.

文献[5]对三峡升船机塔柱底部实体混凝土结构尺寸为 120 m × 57.8 m × 15.0 m (长 × 宽 × 高)的温度配筋进行了研究,取温度作用为 3 d 温降 14.0℃,允许最大裂缝宽度为 0.40 mm,若考虑混凝土开裂引起温度应力的释放,温度钢筋需配 $\Phi 25 @ 140$ ($A_s = 3434 \text{ mm}^2/\text{m}$);如按线弹性计算得到的应力配筋, $A_s = 7535 \text{ mm}^2/\text{m}$,比前者大 119.4%.

综上所述,由于钢筋混凝土结构的特殊性和 RCFEM 的有效性,RCFEM 应用于水工混凝土结构设计是十分必要的.

2 RCFEM 用于结构设计时应注意的问题

2.1 RCFEM 的应用范围

目前应用 RCFEM 分析结构时,在临近破坏时计算常常发散,即要计算结构的极限荷载、破坏形态仍然比较困难.因此建议:对按线弹性体内力配筋承载力有保证的非杆系结构,承载能力极限状态钢筋用量的计算仍按线弹性体内力进行,RCFEM 只应用于

正常使用极限状态的验算,根据设计所要求的允许裂缝宽度及钢筋混凝土有限元的计算成果,调整钢筋用量与布置.

2.2 混凝土本构模型的选取

目前有多种混凝土本构模型,它们依据的力学概念和表达形式各不相同,繁简程度悬殊,计算结果也有不少差异,难以统一.其中常用的两种模型是非线性弹性模型和弹塑性模型.

a. 非线性弹性模型.该类模型的共同特点是概念简明、应用方便,在单调递增荷载作用下可以反映混凝土的主要特性,与实验结果符合良好.当应力接近最大压应力时,模型与实验结果有一定偏离,但不妨碍其应用,因为在接近极限荷载时,多数结构中也只有一小部分混凝土会承受很高的压应力.这类模型的主要局限性是不能正确反映混凝土在卸载和周期加载时的特性.在非线弹性模型中,应用较广的是文献[6]提出的等效单轴应变本构模型,该模型原只适用于平面应力问题,文献[7]和[8]分别将其推广到平面应变问题和空间问题.

b. 弹塑性模型.该类模型可以很好地模拟混凝土在卸载和周期加载时的变形特性,但难以模拟由混凝土内部微裂缝引起的混凝土软化、膨胀等特性,在模拟非比例加载情况下的混凝土特性时也会遇到很大困难.

目前,欧洲模式规范采用的是等效单轴应变本构模型(二维)和 Ottosen 提出的模型(三维)^[1],它们均属于非线性弹性模型.文献[9]原则上建议采用非线弹性的正交异性类本构模型^[9].本文建议:对二维问题,可采用等效单轴应变本构模型;对三维问题,可采用非线弹性的正交异性类本构模型或弹塑性本构模型.

不论哪种本构模型均需用到混凝土单轴应力-应变曲线.当 RCFEM 仅应用于正常使用极限状态时,受压混凝土一般都处于上升段.各种受压应力-应变曲线的上升段差别不大,可考虑采用文献[9]中的应力-应变关系或 Saenz 提出的公式^[10].

2.3 混凝土强度准则的选取

混凝土破坏准则的准确选用,对保证 RCFEM 分析精度有一定影响.由于所依据的方法不同,各种破坏准则在表现形式上有很大的差异.但如果将各准则的子午线统一地用 σ_0 和 τ_0 表示,则混凝土强度准则可归纳为 3 种基本形式:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_0 &= A + B\tau_0 + C\tau_0^2 \\ \tau_0 &= D + E\sigma_0 + F\sigma_0^2 \\ \tau_0 &= G[\phi(\sigma_0)]^H \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

这些模式的代表性准则,第一种模式有 Ottosen 准则^[10]和康清梁准则^[11],第二种模式有 W-W 五参数准则^[10]和彭放准则^[12],第三种模式有过镇海准则^[10]。

文献[13]曾利用大连理工大学的试验结果对上述 5 个准则进行了比较。在三轴受压状态下,过镇海、康清梁及 W-W 五参数准则和试验结果均符合较好,其中过镇海准则精度最高;在拉应力存在的状态下,上述 5 个准则和试验结果均有较大的误差。目前,欧洲模式规范采用的是 Ottosen 破坏准则,我国国家标准采用的是过镇海准则^[9]。

实际工程中许多结构可简化为二维问题进行分析,对平面应力问题不必动用复杂的准则,而直接采用二轴包络线(或称强度计算公式)。在二轴包络线中,最经典的公式是 1973 年 Kupfer 和 Gerstle 提出的公式^[10]。我国国家标准^[9]采用以折线表示的包络线,也有很好的精度。

笔者建议:二轴强度可采用国外的 Kupfer 公式或国标中的包络线,破坏准则可采用过镇海准则。

2.4 钢筋混凝土有限元模型的选择

钢筋混凝土有限元模型按钢筋模拟方法的不同,可分为分离式、组合式和整体式 3 种。

分离式模型将钢筋和混凝土作为不同单元处理,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。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,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。

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^[14,15]。整体式模型将钢筋弥散于混凝土单元之中,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。

在 RCFEM 中,钢筋与混凝土的黏结滑移作用有两种处理方法。一种是考虑钢筋与混凝土之间的滑移;另一种是不考虑两者之间的滑移,即认为钢筋与混凝土之间无相对滑移,变形协调。已有研究表明,对于裂缝宽度,采用前者取得的计算结果与试验值吻合较好,而后者和试验值相差较大;但对于极限承载力而言,两者得到的计算结果比较接近^[16]。

在 RCFEM 中,通常在钢筋和混凝土的相应结点之间设置双弹簧单元或节理单元来模拟黏结滑移。

与双弹簧单元相比,节理单元可建立更为协调的钢筋与混凝土之间的位移关系。但应注意,采用节理单元来模拟黏结滑移时,节理单元的长度应小于一定值。因而,若需要计算结构的裂缝宽度,应采用分离式单元模型,并考虑钢筋与混凝土之间的黏结滑移。否则,可采用组合式或整体式单元模型。

2.5 裂缝模型的选择

裂缝模型一般可分为分离裂缝模型、片状裂缝模型和基于断裂力学的裂缝模型。分离裂缝模型能提供比较真实的裂缝形象,给出裂缝宽度,但因网格需按裂缝的走向来重新划分,很可能出现形态很差的单元,影响计算精度,因而不便于实际应用。

片状裂缝模型不需重新划分网格,裂缝能自动形成并可在各个可能的方向上发生,为大多数研究者所采用。以往认为片状裂缝模型不可能得到裂缝开展宽度和具体位置,但若采用惟一单元开裂准则,就可较真实地模拟结构的开裂过程和裂缝分布,从而得到裂缝宽度。所谓“惟一单元开裂准则”,是指当每次迭代有若干单元拉应力超过混凝土抗拉强度时,只允许拉应力最大的单元开裂。裂缝宽度可近似取相邻两结点的位移差,由于未裂混凝土的拉应变很小,若单元尺寸取得较小时,得到裂缝宽度有较高的精度。

基于断裂力学的裂缝模型主要用于分析混凝土结构中已有的单条裂缝的扩展与失稳规律,目前还不能用断裂力学方法研究混凝土由完好到局部开裂的多条裂缝情况。因而,仅当需研究裂缝面特性时应采用分离裂缝模型外,一般可采用片状裂缝模型。若需要计算结构裂缝宽度,则应采用“惟一单元开裂准则”。

2.6 材料强度及其他特征值的选取

材料强度及其他特征值的采用要区分试验模拟和结构设计两种情况。①试验模拟。此时 RCFEM 是作为真实试验的模拟,材料强度及其他特征值都应采用实测值。②结构设计。前面已指出鉴于结构临近破坏时 RCFEM 计算常常发散,建议 RCFEM 只应用于正常使用极限状态的验算。此时,材料强度及荷载应采用标准值,混凝土初始弹模应采用与混凝土强度标准值相应的弹性模量值,这样和规范验算方法一致,无需再加以修正。

2.7 钢筋混凝土结构与土体共同受力时应注意的问题

文献[4]曾对两种土体模型的钢筋混凝土地基板进行过对比计算分析,模型一是采用邓肯-张模型;模型二是采用线弹性模型,弹性模量采用土体的初始弹模。由于土体受压后弹性模量的增加使得地基板的柔度系数增加,地基板的内力将减小,因而模型二得到的弯矩将大于模型一。所以,当钢筋混凝土

结构与土体共同受力时,宜考虑土体的非线性.土体的非线性参数应由试验确定,当无试验条件时可参照采用已有的试验资料.当无法获得土体的非线性参数时,土体可按线弹性体计算.

3 钢筋混凝土结构有限元设计的计算原则

a. 对按线弹性体内力配筋承载力有保证的非杆系结构,承载能力极限状态钢筋用量的计算仍可按线弹性体内力进行,而正常使用极限状态的验算应采用 RCFEM,根据设计所要求的允许裂缝宽度调整钢筋用量与布置.

b. 混凝土单轴应力-应变曲线应由试验确定.无试验资料时,受压应力-应变曲线可采用文献[9]附录 C 中的应力-应变关系或 Saenz 公式^[10].

c. 混凝土本构模型,二维问题可采用等效单轴应变本构模型^[6],三维问题可采用非线性弹性的正交异性类本构模型或弹塑性本构模型.

d. 钢筋本构关系应由试验确定.无试验资料时可采用理想弹塑性模型.

e. 混凝土二轴强度可采用 Kupfer 提出的公式^[10]或文献[9]中的包络线,破坏准则可采用过镇海准则,即文献[9]中的准则.

f. 裂缝模型可采用分离裂缝模型或片状裂缝模型.若要求计算裂缝宽度,则应考虑钢筋与混凝土之间的黏结滑移,并采用“惟一单元开裂准则”,即一次迭代只允许一个单元开裂.

g. 正常使用极限状态校核时,材料强度及荷载应采用标准值,混凝土初始弹模应采用与混凝土强度标准值相应的弹性模量值.

h. 混凝土结构与土体共同受力时,宜考虑土体的非线性.土体的非线性参数应由试验确定,当无试验条件时可参照采用已有的试验资料.当无法获得土体的非线性参数时,土体可按线弹性体计算.

i. 所采用的钢筋混凝土非线性有限元分析程序,必须经过试验的验证.对特别重要的结构,宜配合进行专门的模型试验,以与计算相互验证.

4 结 语

由于混凝土结构的复杂性和特殊性,以及 RCFEM 的有效性,将 RCFEM 应用于水工结构设计是十分必要的,也是可行的.当采用 RCFEM 进行结构设计时,宜遵循本文提出的计算原则.

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] DL/T5057-1996,水工混凝土结构设计规范[S].

[3] 汪基伟,巫昌海,钮新强.三峡升船机上闸首配筋方案研究[J].人民长江,2001,20(11):8—11.

[4] 刘体锋,汪基伟.混凝土开裂对地基板弯矩的影响[J].岩土力学,2004,25(9):118—121.

[5] 汪基伟,吴胜兴.三峡升船机塔柱底部实体混凝土结构温度配筋研究[J].水利水电技术,1998,29(8):15—17.

[6] Darwin D, Pecknold D A. Non-linear bi-axial stress-strain law for concrete. Journal of engineering mechanics division[J], ASCE, 1977, 103(2):229—240.

[7] 汪基伟,朱虹.平面应变状态混凝土等效单轴应变本构模型[J].河海大学学报(自然科学版),2002,30(1):6—10.

[8] 汪基伟,巫昌海,王红.混凝土三维等效单轴应变本构模型[J].河海大学学报(自然科学版),1999,27(4):20—23.

[9] GB50010-2002,混凝土结构设计规范[S].

[10] 过镇海.混凝土的强度和变形——试验基础和本构关系[M].北京:清华大学出版社,1997.162—166.

[11] 康清梁.一个五参数的混凝土破坏准则[J].河海大学学报,1993,21(3):19—21.

[12] 彭放.复杂应力状态下多种混凝土材料的破坏准则及本构模型研究[D].大连:大连理工大学,1990.

[13] 王红.平面应变状态下等效单轴应变本构模型的研究[D].南京:河海大学,2000.

[14] 巫昌海,汪基伟.混凝土三维钢筋埋置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.

[15] 冷飞.三维钢筋有限元组合单元模型研究[D].南京:河海大学,2002.

(收稿日期:2005-04-04 编辑:高建群)

欢迎订阅《水电自动化与大坝监测》

《水电自动化与大坝监测》(双月刊)是水电自动化与大坝监测领域国内外公开发行的专业性技术期刊,目前已入选《中国科技核心期刊》和“中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊”,同时被《中国学术期刊(光盘版)》、“中国期刊网”和“万方数据资源系统数字化期刊群”全文收录.

主要栏目为:水电厂监控系统;状态检修;调速励磁与辅机控制;自动化元件及仪器仪表;设备保护;水电优化调度;水资源管理与监控;大坝监测仪器及自动化;大坝安全监控技术;运行与管理自动化;泵站自动化;闸门控制;水电与电力市场等,以及相关的专家论坛、专题报告和综述.

读者对象为:水电自动化、水资源管理、大坝监测及相关专业从事科研、设计、运行、管理、试验、制造和营销的专业人员、产品用户和大专院校师生等.

本刊每双月 20 日出版,邮发代号:28-39,全国各地邮局(所)均可订阅.亦可向本刊直接订阅.2006 年每期定价 8 元,全年 6 期共计 48 元.通信地址:南京市南瑞路 8 号电力系统自动化杂志社(210003).电话:(025) 83092051(发行部),E-mail:hadm@nari-china.com.