

利科有限元分析软件开发

吴梦喜¹, 卿龙邦², 何蕃民¹

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘要: 针对现有的通用 CAE 分析软件不能满足水工结构和岩土工程领域数值分析的需求, 国内外还没有一款功能较完备的水工结构和岩土工程通用的 CAE 软件的问题, 开发出面向水工结构和岩土工程设计、咨询、科研与高等教育的专业有限元分析软件——利科有限元分析软件(LinkFEA)。计算模块的设置主要满足该领域中坝、闸、隧道和地下洞室、各类岩质土质边坡等中的渗流场、温度场、应力场(或位移场)及这3个场之间的耦合计算和结构安全性分析需求。前处理模块的功能有几何建模、有限元网格生成以及材料参数、载荷、初始条件和边界条件的设定等; 后处理模块包括强度分析、渗透稳定性分析、边坡稳定分析和洞室围岩稳定性分析等, 有限元计算结果和分析结果都能以等值线图或云图显示。LinkFEA 已经过国内多个工程的渗流和应力(变形)计算的检验。

关键词: 利科有限元分析软件; 水工结构工程; 岩土工程; 软件开发

中图分类号: TV314; TB115.7 **文献标志码:** A

Development of finite element analysis software LinkFEA

WU Mengxi¹, QING Longbang², HE Fanmin¹

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: General CAE software does not meet well the requirements of the design of hydraulic structure and geotechnical engineering, and there is not yet a featured common hydraulic structure and geotechnical engineering CAE software. As a professional software in finite element analysis, LinkFEA is developed for the design, consultation, research, and higher education of hydraulic structures and geotechnical engineering. The modules of numerical computation are mainly focused on the calculation of the fields of seepage, temperature, stress (or displacement), the coupling of these fields and structural safety design in the domain of hydraulic structures and geotechnical engineering, such as dam, lock, tunnel, underground cavern, and rock or soil slope. The functions of pre-process module are geometric modeling, finite element meshing, and settings of material parameters, load, and initial and boundary conditions. The functions of post-process module are the analysis of strength, seepage stability, slope stability and stability of surrounding rock of caverns. All the results of finite element computation and analysis can be outputted by isograms or nephograms. LinkFEA has been used in the seepage and stress (or deformation) analysis of several projects in China and achieves good performance.

Key words: finite element analysis software LinkFEA; hydraulic structure engineering; geotechnical engineering; software development

收稿日期: 2011-03-09 修回日期: 2011-04-02

作者简介: 吴梦喜(1967—), 男, 湖南涟源人, 高级工程师, 博士, 研究方向为岩土力学、水工结构工程, (E-mail) wumx@imech.ac.cn

0 引言

CAE 软件的应用对现代产业发展十分重要. 对于水利、岩土等工程, CAE 是必不可少的辅助设计工具. 在工程结构设计中使用 CAE 软件, 可提高设计质量、降低研究开发成本、缩短研究开发周期.^[1] 对于现有工程的监测和维护管理, 防止工程灾变等, 也需要 CAE 软件. 然而, 目前国内外还不具备一款功能较完备的、通用的水工结构和岩土工程 CAE 软件, 现有的通用 CAE 分析软件在实际工程应用方面还存在着诸多不足.^[2] 水利水电工程和岩土工程的渗流、应力变形、温度变化、强度和稳定性等情况特别复杂, 需用基于有限元法或有限差分法等 CAE 软件进行分析, 而我国的地质和工程情况也有自身的特点, 因此对开发自主 CAE 软件有着迫切的需求.

我国自主 CAE 软件的发展严重滞后于国外, 以致于国外进口的 CAE 软件占据国内市场的主要份额.^[3] 虽然国内也不乏优秀的 CAE 计算程序, 但大多没有友好的界面和前、后处理接口, 计算功能单一, 运行速度慢, 计算规模受到很大的限制, 而且缺乏持续的维护和验证, 导致其逐渐退出水工结构和岩土工程的数值分析领域.

利科有限元软件 LinkFEA 是由中国科学院力学研究所^[4] 环境力学实验室吴梦喜高级工程师主持开发的, 面向水工结构和岩土工程设计、咨询、科研和高等教育的专业有限元分析系统. 本文结合 LinkFEA 的开发, 对其构成、特点以及工程应用进行阐述.

1 LinkFEA 研发目标

1.1 软件介绍

LinkFEA 是定位于水工和岩土行业的通用有限元 CAE 分析软件, 主要针对水工结构工程和岩土工程, 包括坝、闸、溢洪道、地下厂房和地下洞室以及各类岩质土质边坡等. 数值计算模块主要包括渗流场、温度场和应力场(或位移场)以及这 3 个物理场之间的耦合计算和结构安全性分析. 对结构安全性的分析主要包括坝基和填筑土体的渗透稳定性分析、边坡稳定性分析、围岩稳定性分析和结构物强度分析等. 该软件还可应用于其他分析, 如心墙堆石坝的水力劈裂安全性、过水通道的抗冲蚀和抗空化分析等. 应力场的分析包括静力分析和动力分析 2 个部分.

软件设计可跨操作系统平台, 并分为单机版和

并行计算版本. 软件主要有前处理、计算分析和后处理等 3 个部分.

1.2 计算模块

LinkFEA 的计算模块主要包括:

(1) 渗流计算模块. 基于非饱和土的渗流有限元理论, 开发渗流计算程序模块, 使之能计算实际工程中稳定或非稳定、饱和或非饱和渗流场.

(2) 静力应力变形计算模块. 可进行岩土和结构工程的二维和三维应力变形计算, 在计算时也可选择是否与渗流计算耦合. 本构模型包含邓肯-张模型、解耦 $K-G$ 模型以及弹塑性模型等多种土静力本构模型和多种接触面本构模型.

(3) 渗流应力变形耦合(固结)模块. 可进行岩土工程的二维和三维应力变形与渗流耦合计算(固结).

(4) 稳定安全性计算模块. 依据应力变形计算结果, 对堤坝或边坡进行稳定安全性分析. 根据设定的相关参数自动搜索结构的可能滑动面, 并求解最小安全因数.

(5) 动力响应计算模块. 具有动力求解功能, 可进行模态分析、瞬态分析, 并具有多种混凝土、岩土动力本构模型.

(6) 温度场计算模块. 具有各类结构的稳态、瞬态温度场分析功能.

1.3 前、后处理模块

前处理包括几何建模、有限元网格生成、材料参数、载荷、初始条件和边界条件的设定等; 后处理分析分为对计算结果的进一步分析和可视化输出, 包括强度分析、渗透稳定性分析、边坡稳定分析和洞室围岩稳定性分析等. 有限元计算结果与分析结果都以可视化技术生成的等值线图或云图显示.

LinkFEA 的开发力求界面友好、易学易用且结果可靠. 充分运用计算机图形技术和 CAD 造型及网格划分技术, 将最新的计算机软件技术与数值计算技术相结合, 把软件改造成人机交互方便、界面友好、易学易用的软件. 采用可视化图形技术, 将以往有限元程序的实现模式变为“图形—有限元分析—图形”^[5], 从而实现有限元计算程序到有限元计算软件的转变, 既有利于软件的开发和维护, 又极大地方便用户.

2 LinkFEA 研发进展

自 20 世纪 90 年代初开始, 笔者对水工、岩土中的渗流、应力等相关问题进行研究, 并一直从事有限

元程序的研究开发和应用工作,一方面依据工程实际对计算分析的需要,发展和维护有限元程序;另一方面将最新的计算技术应用到工程实际,提高解决工程实际问题的能力.2009年开始,研究团队在已有的有限元程序基础上,开始 LinkFEA 的交互功能开发工作,增加前、后处理可视化功能及用户界面.

2.1 计算模块

现有的核心计算模块包括 2 个有限元计算模块和 1 个边坡稳定分析模块.有限元计算模块包括渗流分析、应力变形及其与渗流耦合分析等,包含有二维和三维模块,其单元的阶次分 1 阶单元和 2 阶单元.

(1) 渗流分析模块.其计算功能主要有稳定/非稳定、饱和/非饱和渗流的计算,且能考虑降雨入渗以及不同渗透性介质间孔压不连续等问题.^[6-9]经过大量试验和工程验证,目前该模块已基本成熟,可进行二维和三维地下水稳定、非稳定渗流分析.

(2) 应力变形及其与渗流耦合模块.本模块提供对渗流场、应力场(位移场)耦合计算功能,包括单向耦合和双向耦合计算.单向耦合仅考虑渗流对变形的影响,而不考虑变形对渗流的影响,变形按有效应力方法计算,非饱和土体变形则按照土体饱和时孔隙水压力为 0 的条件计算;双向耦合同时考虑土体发生体积变形对孔隙水压力的影响和孔隙水压力变化对应力变形的影响.该模块已在多个土石坝工程中得到应用.

(3) 边坡稳定分析模块.依据有限元计算得到的应力场,找出边坡最小的安全因数和相应的滑移面.该模块正在开发调试中.

LinkFEA 模块中提供多种类型的单元库,如一阶单元包括实体单元(八节点六面体单元、六节点三棱柱单元、四节点四面体单元)和接触面单元;二阶单元包括实体单元(二十节点六面体单元、十五节点三棱柱单元、十节点四面体单元),无厚度的曲面裂隙单元(八节点曲面四边形裂隙单元和六节点曲面三角形裂隙单元)以及接触面单元.

2.2 前、后处理模块

前处理模块的主要功能在于绘制几何模型和生成有限元网格.一般地,用户先通过对话框输入或屏幕拾取这 2 种方式在屏幕视图区域内交互式绘图,能准确、方便地建立实体模型.在设定材料、载荷和边界条件等信息后,通过前处理模块中的网格生成器生成有限元网格模型.

LinkFEA 前处理模块提供 2 种几何模型创建方式:一种是由用户根据计算对象的几何坐标等信息,创建点、线、面到体,“自下而上”生成几何模型;另一种是直接 CAD 平面设计图导入软件中,据此生成几何模型.在设定材料参数和边界及载荷等计算条件后,再对模型进行有限元网格划分,进而生成前处理数据文件.目前已基本实现二维前处理功能,三维前、后处理功能预计在 2012 年开发出来.

后处理模块的主要功能是将计算结果以图形的形式显示出来,一般采用等值线图和云图这 2 种方式.目前,该模块已经基本具备等值线图和云图的绘制等功能.

3 LinkFEA 的工程应用

LinkFEA 模块已经历国内多个工程渗流和应力变形计算的检验,在毛尔盖、扎雪、瀑布沟、双江口、长河坝、硬梁包和引子渡等堆石坝工程的厂坝区渗流及坝体应力变形分析中得到应用.

瀑布沟、长河坝和双江口等 3 个水电站均位于大渡河上,大坝为心墙堆石坝,坝高分别为 186 m、240 m 和 312 m,坝基存在 60~80 m 的覆盖层,厂房均位于地下岩石中.瀑布沟和长河坝采用 2 道混凝土防渗墙截断坝基覆盖层,双江口覆盖层在心墙底部采用开挖置换心墙黏土的处理方式.利用 LinkFEA 对这些工程的厂坝区进行渗流计算、大坝及坝基的应力变形计算、坝体的渗流与变形耦合计算,分析、评估这些工程的渗流场、渗透稳定性、渗控措施的合理性、混凝土防渗结构的应力及强度、土质心墙的水力劈裂安全性,为这些工程的设计方案选择和设计优化提供参考.

用 LinkFEA 进行计算的工程类型还包括面板堆石坝(引子渡、硬梁包)、水闸(硬梁包)和码头(上海洋山港)等,该软件也可用于新型硬填料坝的研究.随着 LinkFEA 计算模块的发展,该软件的应用将覆盖到绝大部分水工结构和岩土工程类型.

4 结束语

水工结构通用 CAE 软件的开发,需要行业协会、规划设计院、科研和高校的支持和合作.期望通过 3~5 年的努力,可以开发出一款具有自主知识产权的通用水工结构 CAE 软件,并在我国水工结构设计、安全分析方面得到较多的应用,促进我国水利水电工程设计技术的发展.

参考文献:

- [1] 崔俊芝. 计算机辅助工程(CAE)的现在和未来[J]. 计算机辅助设计与制造, 2000(6): 3-7.
CUI Junzhi. Status quo and future of computer aided engineering [J]. Comput Aided Des & Manufacture, 2000(6): 3-7.
- [2] 吴梦喜, 何蕃民, 杜斌. 水工结构自主CAE软件开发的思考与实践[C] // 中国水力发电工程学会水工及水电站专业委员会. 高拱坝建设中的重大工程技术问题研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 127-135.
- [3] 钟万勰. 发展自主CAE软件产业的战略探讨[J]. 计算机辅助工程, 2008, 17(4): 1-6.
ZHONG Wanxie. Strategic discussion on developing independent CAE software industry in China [J]. Comput Aided Eng, 2008, 17(4): 1-6.
- [4] 中国科学院力学研究所. 渗流有限元计算软件(SEEPAGE 1.0)基本理论[EB/OL]. (2010-11)[2011-03-01]. http://lwpy.imech.ac.cn/linke/install/linke%E6%9C%89%E9%99%90%E5%85%83%E8%BD%AF%E4%BB%B6_01_%E5%9F%BA%E6%9C%AC%E7%90%86%E8%AE%BA_V2_%E5%B8%A6%E5%B0%81%E7%9A%AE_201011.pdf.
- [5] 秦卫星, 陈胜宏. 面向对象自适应渗流有限元分析软件的研究和实现[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 463-466.
QIN Weixing, CHEN Shenghong. Investigation and realization of object-oriented adaptive FEM analysis software for seepage problems[J]. Rock & Soil Mech, 2003, 24(3): 463-466.
- [6] 吴梦喜, 高莲士. 饱和、非饱和和土体非稳定渗流数值分析[J]. 水利学报, 1999, 30(12): 38-42.
WU Mengxi, GAO Lianshi. Numerical simulation of saturated-unsaturated transient flow in soils [J]. J Hydraulic Eng, 1999, 30(12): 38-42.
- [7] 吴梦喜. 饱和、非饱和土中渗流 Richards 方程有限元算法[J]. 水利学报, 2009, 40(10): 1274-1279.
WU Mengxi. Finite element algorithm for Richards' equation for saturated-unsaturated seepage flow [J]. J Hydraulic Eng, 2009, 40(10): 1274-1279.
- [8] WU Mengxi. A finite-element algorithm for modeling variably saturated flows[J]. J Hydrology, 2010, 394(3-4): 315-323.
- [9] 吴梦喜, 丁留谦. 含孔压间断面的饱和、非饱和渗流数值模拟[C] // 中国水力发电工程学会水工及水电站专业委员会. 利用覆盖层建坝的实践与发展. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 319-325.