



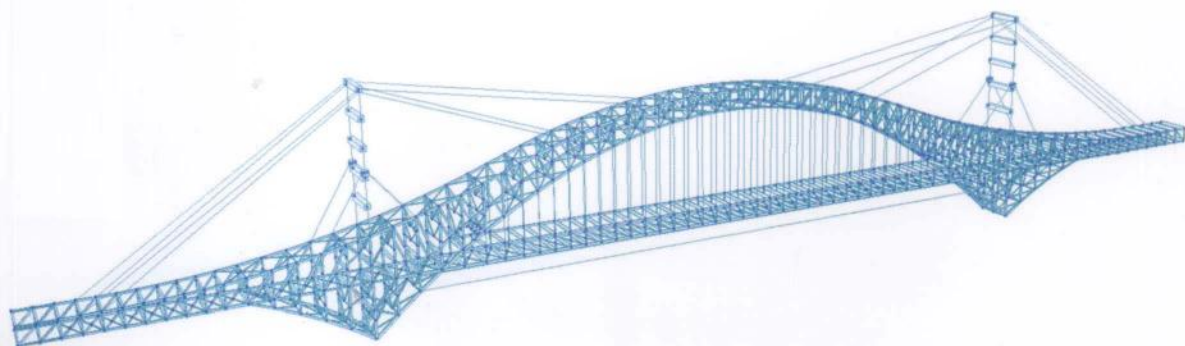
21世纪交通版高等学校教材

桥梁结构电算

——有限元分析方法及其在MIDAS/Civil中的应用

Computing for Bridge Structures

周水兴 王小松 田维锋 杜柏松 编 著



人民交通出版社
China Communications Press

21 世纪交通版高等学校教材

Computing for Bridge Structures

桥梁结构电算

——有限元分析方法及其在 MIDAS/Civil 中的应用

周水兴 王小松 编著
田维锋 杜柏松

人民交通出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了桥梁结构分析中有限元的建模和计算方法。鉴于 MIDAS/Civil 软件在国内的教学、科研和生产中使用较广,本书以 MIDAS/Civil 为例,较为系统地介绍了软件的基本操作及静、动力计算方法。为帮助未系统学习过有限单元法或结构矩阵分析的读者能更好地理解有限元基本原理,专门编写了杆系结构的矩阵位移法。

本书适合于高等理工院校土木工程专业(桥梁、道路等方向)、道路桥梁与渡河工程专业的本科、研究生及教师使用,也可供从事相关领域科学技术研究的工程技术人员学习参考。

欲了解最新路桥专业教材信息、课件及研讨活动,欢迎各位教师加入路桥专业教材服务 QQ 群:328662128。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁结构电算:有限元分析方法及其在
MIDAS/Civil 中的应用 / 周水兴等编著. — 北京:人民交通出版社, 2013. 8

ISBN 978-7-114-10649-1

I. ①桥… II. ①周… III. ①桥梁结构—结构分析—有限元分析 IV. ①U443

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 111031 号

21 世纪交通版高等学校教材

书 名:桥梁结构电算——有限元分析方法及其在 MIDAS/Civil 中的应用

著 者:周水兴 王小松 田维锋 杜柏松

责任编辑:曲 乐 卢俊丽

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:16.25

字 数:416 千

版 次:2013 年 8 月 第 1 版

印 次:2013 年 8 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-10649-1

定 价:35.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

近 20 多年来,桥梁结构分析软件已成为工程技术人员从事桥梁工程设计和科学研究的重要手段,对推动桥梁工程的发展起到了积极作用。然而,我们在多年的《桥梁结构电算》教学实践和软件使用过程中发现,部分软件使用者缺乏对有限元基本理论的了解,出现建模不合理和计算结果不正确等问题,且纠错能力不足。为提高技术人员采用结构分析软件解决桥梁工程问题的能力,我们编写了集有限元基本原理、建模方法和软件应用等内容于一体的教材。

本教材共分为 6 章。第 1 章简要介绍了国内外有限元软件的发展概况和桥梁结构分析的基本过程,重点介绍了如何开展有限元模型纠错、提高计算正确性的几种方法以及计算结果的整理与输出。考虑到有些高校因学时问题没有开设有限单元法或结构矩阵分析课程,不利于学生掌握桥梁结构电算方法,因此,在第 2 章中专门介绍了杆系结构的矩阵位移法,其基本概念同样适用于有限单元法。第 3 章是本教材的重点,详细介绍了桥梁结构的建模方法,包括桥梁实际结构的简化、单元类型的选择、不同单元间的连接处理、悬索桥和斜拉桥主梁常用的鱼骨刺模型以及桩—土共同作用的模拟等。第 4 章以某预应力混凝土简支箱梁桥支架现浇为示例,详细介绍了 MIDAS/Civil 软件的建模步骤以及结合规范求解桥梁内(应)力与变形的的方法。第 5 章针对桥梁结构的动力与稳定分析问题,介绍了基本原理及其在 MIDAS/Civil 中的具体应用。第 6 章介绍了如何运用 MIDAS/Civil 开展未知荷载系数法求解斜拉桥索力、联合截面法求解钢管混凝土组合结构和梁格法求解宽箱梁问题的方法。

由于本书将 MIDAS/Civil 的基本操作集中安排在第 4 章,为使学生能够更好地理解前 3 章内容,建议授课时将第 4 章内容分解到其他各章中,使学生较早接触到 MIDAS/Civil 软件并上机操作,加深对桥梁结构建模方法的理解。

本教材由重庆交通大学多位从事桥梁结构分析研究和承担《桥梁结构电算》教学的教师共同编写,其中第 1 章~第 3 章由周水兴编写,第 4 章由田维锋、周水兴编写,第 5 章由王小松编写,第 6 章由杜柏松编写。全书由周水兴教授统稿并完成最终的文字整理工作。

在教材编写过程中,各位作者查阅了不少文献资料,如在参考文献中未给予标注引用,在此表示歉意!

由于编者水平有限,加上时间紧,书中肯定存在不少错误,敬请各位学者批评指正。

编者
2013 年 5 月

目 录

| | |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 国内外桥梁结构分析软件发展概况 | 1 |
| 1.1.1 国外发展概况 | 1 |
| 1.1.2 国内发展概况 | 1 |
| 1.2 桥梁结构分析问题的分类 | 2 |
| 1.3 桥梁结构分析基本过程 | 4 |
| 1.3.1 模型建立 | 4 |
| 1.3.2 施加荷载和约束 | 5 |
| 1.3.3 求解 | 5 |
| 1.3.4 后处理 | 5 |
| 1.4 模型纠错 | 5 |
| 1.4.1 有限元分析中的常见错误 | 5 |
| 1.4.2 计算结果的正确性判断 | 7 |
| 1.4.3 提高计算正确性的几种方法 | 8 |
| 1.5 计算结果的输出与整理 | 9 |
| 1.5.1 截面位置的标识 | 9 |
| 1.5.2 表头和表号 | 10 |
| 1.5.3 有效位数 | 10 |
| 1.5.4 编写计算报告、必要的说明和附注 | 10 |
| 1.6 开设“桥梁结构电算”课程的必要性 | 11 |
| 1.6.1 复杂桥梁结构分析的需要 | 11 |
| 1.6.2 精细化分析的需要 | 11 |
| 1.6.3 桥梁创新的需要 | 11 |
| 1.6.4 编制施工方案的需要 | 11 |
| 1.6.5 工作技能的需要 | 11 |
| 思考题 | 11 |
| 第 2 章 杆系结构的矩阵位移法 | 13 |
| 2.1 概述 | 13 |
| 2.2 总体坐标系和单元坐标系 | 14 |
| 2.2.1 总体坐标系 | 14 |
| 2.2.2 单元坐标系 | 14 |
| 2.3 平面梁单元的单元刚度矩阵 | 15 |
| 2.3.1 杆端位移和杆端力 | 15 |
| 2.3.2 杆端力与杆端位移的关系 | 16 |
| 2.3.3 单元刚度矩阵具有的性质 | 18 |
| 2.3.4 考虑剪切变形的梁单元刚度矩阵 | 19 |

| | | |
|-----------------------------|---------------------------|----|
| 2.4 | 总体坐标系中的单元刚度矩阵 | 22 |
| 2.4.1 | 坐标转换 | 22 |
| 2.4.2 | 总体坐标系下的单元刚度矩阵 | 23 |
| 2.5 | 总体刚度矩阵的集成 | 24 |
| 2.5.1 | 总体刚度矩阵 | 24 |
| 2.5.2 | 单元刚度矩阵的投放 | 26 |
| 2.5.3 | 约束处理 | 27 |
| 2.6 | 荷载列阵的形成 | 29 |
| 2.6.1 | 等效节点荷载的概念 | 29 |
| 2.6.2 | 综合节点荷载的计算步骤 | 30 |
| 2.7 | 方程求解 | 31 |
| 2.8 | 杆件单元内力计算 | 33 |
| 2.8.1 | 节点位移产生的截面内力 | 33 |
| 2.8.2 | 节间荷载产生的内力 | 33 |
| 2.8.3 | 单元截面内力 | 34 |
| 2.9 | 支点反力计算及支承点沉陷产生的内力计算 | 34 |
| 2.9.1 | 计算原理 | 34 |
| 2.9.2 | 支承点沉陷产生的内力及反力计算 | 35 |
| 2.10 | 矩阵位移法计算步骤与算例 | 35 |
| 2.10.1 | 计算步骤 | 35 |
| 2.10.2 | 算例 | 35 |
| 2.11 | 空间梁单元 | 43 |
| 2.11.1 | 空间梁单元刚度矩阵 | 43 |
| 2.11.2 | 空间梁单元的坐标转换矩阵 | 46 |
| 思考题 | | 49 |
| 第3章 桥梁结构的有限元建模 | | 50 |
| 3.1 | 建模前的规划分析 | 50 |
| 3.1.1 | 单元类型 | 50 |
| 3.1.2 | 不同单元连接的处理 | 51 |
| 3.1.3 | 梁单元中带铰的处理 | 58 |
| 3.1.4 | 模型的对称性 | 60 |
| 3.1.5 | 网格划分密度 | 61 |
| 3.2 | 桥梁结构建模时的一些共性特点 | 61 |
| 3.2.1 | 计算单位 | 61 |
| 3.2.2 | 变截面 | 62 |
| 3.2.3 | 刚臂 | 62 |
| 3.2.4 | 刚性横梁 | 66 |
| 3.2.5 | 支座的处理 | 66 |
| 3.3 | 桥梁结构建模的一般步骤 | 68 |
| 3.3.1 | 明确计算目标 | 68 |

| | | |
|-----------------------------|-------------------|-----|
| 3.3.2 | 桥梁构造分析与单元类型选择 | 68 |
| 3.3.3 | 定义截面特性和材料特性 | 69 |
| 3.3.4 | 施工阶段分析 | 70 |
| 3.3.5 | 荷载分析 | 73 |
| 3.3.6 | 建立有限元模型 | 75 |
| 3.4 | 梁式桥有限元建模 | 75 |
| 3.4.1 | 简支梁桥 | 75 |
| 3.4.2 | 连续梁桥与连续刚构桥 | 76 |
| 3.4.3 | 预应力荷载的输入 | 76 |
| 3.5 | 拱桥有限元建模 | 77 |
| 3.5.1 | 普通拱桥的有限元模型 | 77 |
| 3.5.2 | 钢管混凝土拱桥 | 78 |
| 3.5.3 | 劲性骨架混凝土拱桥 | 80 |
| 3.6 | 斜拉桥和悬索桥建模要点 | 81 |
| 3.7 | 桩—土相互作用的计算 | 81 |
| 3.7.1 | 集中质量法概念 | 81 |
| 3.7.2 | 土弹簧刚度的计算方法 | 81 |
| 3.7.3 | 地基系数 C 的概念及确定方法 | 82 |
| 3.7.4 | 桩的计算宽度 | 82 |
| 3.7.5 | 土的地基比例系数 m 值确定 | 83 |
| 3.7.6 | 桩—土共同作用的有限元模拟 | 84 |
| 思考题 | | 85 |
| 第4章 MIDAS/Civil 基本操作 | | 86 |
| 4.1 | MIDAS/Civil 简介 | 86 |
| 4.1.1 | MIDAS /Civil 用户界面 | 86 |
| 4.1.2 | MIDAS/Civil 初始化设置 | 88 |
| 4.1.3 | MIDAS/Civil 界面操作 | 89 |
| 4.1.4 | 数据输入方式 | 95 |
| 4.2 | 建立项目 | 95 |
| 4.2.1 | 预应力简支箱梁桥支架现浇示例参数 | 95 |
| 4.2.2 | 建模要点 | 98 |
| 4.2.3 | 创建项目文件 | 98 |
| 4.2.4 | 设置结构类型 | 99 |
| 4.3 | 创建节点 | 100 |
| 4.3.1 | 建立节点 | 100 |
| 4.3.2 | 复制或移动节点 | 101 |
| 4.3.3 | 镜像节点 | 102 |
| 4.3.4 | 节点表格 | 102 |
| 4.4 | 单元创建 | 103 |
| 4.4.1 | 单元类型 | 103 |

| | | |
|-------|----------------------|-----|
| 4.4.2 | 建立单元 | 108 |
| 4.4.3 | 移动/复制单元 | 109 |
| 4.4.4 | 单元镜像 | 109 |
| 4.4.5 | 合并与分割单元 | 110 |
| 4.4.6 | 从 AutoCAD 导入模型 | 111 |
| 4.4.7 | 修改单元参数 | 112 |
| 4.4.8 | 单元表格 | 113 |
| 4.5 | 材料与截面特性定义 | 114 |
| 4.5.1 | 材料特性定义 | 114 |
| 4.5.2 | 时间依存性材料定义 | 116 |
| 4.5.3 | 材料表格 | 118 |
| 4.5.4 | 截面特性输入 | 118 |
| 4.5.5 | 截面特性计算器(SPC) | 120 |
| 4.5.6 | 截面特性调整系数 | 122 |
| 4.5.7 | 变截面、变截面组 | 124 |
| 4.5.8 | 截面表格 | 126 |
| 4.6 | 边界条件 | 127 |
| 4.6.1 | 一般支承 | 129 |
| 4.6.2 | 弹性支承单元 | 130 |
| 4.6.3 | 弹性连接单元 | 132 |
| 4.6.4 | 刚性连接 | 133 |
| 4.6.5 | 单元端部释放 | 136 |
| 4.6.6 | 梁端部刚性域偏移 | 137 |
| 4.6.7 | 节点局部坐标轴 | 139 |
| 4.6.8 | 边界条件表格 | 139 |
| 4.7 | 静力荷载 | 140 |
| 4.7.1 | 静力荷载工况 | 142 |
| 4.7.2 | 自重 | 143 |
| 4.7.3 | 节点荷载 | 144 |
| 4.7.4 | 梁单元荷载 | 144 |
| 4.7.5 | 温度梯度和梁截面温度 | 146 |
| 4.8 | 预应力荷载 | 148 |
| 4.8.1 | 钢束特性值 | 148 |
| 4.8.2 | 钢束布置的形状 | 151 |
| 4.8.3 | 钢束预应力荷载 | 154 |
| 4.9 | 移动荷载 | 155 |
| 4.9.1 | 移动荷载规范 | 156 |
| 4.9.2 | 车道与车道面 | 156 |
| 4.9.3 | 车辆 | 159 |
| 4.9.4 | 移动荷载工况 | 160 |

| | | |
|--------------------------------------|-----------------------|-----|
| 4.10 | 组的概念与应用 | 162 |
| 4.10.1 | 结构组 | 163 |
| 4.10.2 | 边界组 | 163 |
| 4.10.3 | 荷载组 | 165 |
| 4.10.4 | 钢束组 | 166 |
| 4.11 | 施工阶段 | 166 |
| 4.12 | 分析控制 | 169 |
| 4.12.1 | 主控数据 | 170 |
| 4.12.2 | 移动荷载分析控制 | 170 |
| 4.12.3 | 施工阶段分析控制 | 172 |
| 4.13 | 结果 | 174 |
| 4.13.1 | 荷载组合 | 175 |
| 4.13.2 | 反力 | 177 |
| 4.13.3 | 内力 | 179 |
| 4.13.4 | 位移 | 181 |
| 4.13.5 | 影响线 | 181 |
| 4.13.6 | 预应力效应 | 183 |
| 4.14 | 设计 | 186 |
| 4.14.1 | RC 设计 | 188 |
| 4.14.2 | PSC 设计 | 194 |
| 思考题 | | 199 |
| 第 5 章 MIDAS/Civil 桥梁结构动力与稳定计算 | | 200 |
| 5.1 | 桥梁模态分析 | 200 |
| 5.1.1 | 模态分析理论 | 200 |
| 5.1.2 | 子空间迭代法 | 201 |
| 5.1.3 | Lanczos 法 | 202 |
| 5.1.4 | 一般结构的模态分析 | 204 |
| 5.1.5 | 有预应力结构的模态分析 | 209 |
| 5.2 | 桥梁稳定(屈曲)分析 | 211 |
| 5.2.1 | 桥梁稳定分析理论 | 211 |
| 5.2.2 | 线弹性屈曲分析 | 212 |
| 5.3 | 桥梁地震响应分析(反应谱法) | 214 |
| 5.3.1 | 反应谱的概念 | 214 |
| 5.3.2 | 多模态反应谱分析理论 | 215 |
| 5.3.3 | 反应谱分析 | 218 |
| 思考题 | | 224 |
| 第 6 章 MIDAS/Civil 桥梁专题分析 | | 226 |
| 6.1 | 斜拉桥拉索最优索力确定 | 226 |
| 6.1.1 | 索力优化原理 | 226 |
| 6.1.2 | MIDAS/Civil 的未知荷载系数功能 | 227 |

| | |
|-----------------------|-----|
| 6.1.3 斜拉桥索力优化算例 | 228 |
| 6.2 钢管混凝土连续梁桥分析 | 233 |
| 6.2.1 联合结构 | 233 |
| 6.2.2 工程实例 | 233 |
| 6.3 梁格法 | 239 |
| 6.3.1 梁格法的基本原理 | 239 |
| 6.3.2 梁格划分 | 239 |
| 6.3.3 工程实例 | 241 |
| 思考题 | 249 |
| 参考文献 | 250 |

第1章 绪 论

1.1 国内外桥梁结构分析软件发展概况

1.1.1 国外发展概况

结构分析软件是伴随着计算机和算法语言的诞生而发展起来的,国外最早开发的结构分析软件基于结构力学的矩阵位移法,只适用于等截面杆件的结构。1956年美国波音公司的 Turner、Clough、Martin 和 Top 在分析飞机结构时系统研究了离散杆、梁、三角形的单元刚度表达式,并将刚架位移法推广应用于弹性力学平面问题,第一次给出了用三角形单元求平面应力问题的正确解答,有限单元法由此诞生。1963~1964年,Besseling、Melosh 和 Jones 等人研究了有限元方法的数学原理,证明了有限元法是基于变分原理的里兹(Ritz)法的另一种形式,从而使里兹法分析的所有理论基础都适用于有限元法,确认了有限元法是处理连续介质问题的一种普遍方法。用矩阵位移法编制的杆系程序实际上是有限元法中的一个特例。

经过几十年的连续研发,国外桥梁结构分析软件已经较为成熟,商业化程度高,知名的桥梁专用软件有 TDVRm2006、Larsa、Sofistik、Lusas、Strap、MIDAS/Civil 等。此外,一些通用商业软件,如 ANSYS、ABAQUS、ADINA、MSC/NASTRAN、MSC/MARC、SAP2000、ALGOR、PRO/MECHANICS、IDEAS 等的土木工程模块产品在桥梁结构分析中也有着广泛的应用。国外软件单元种类丰富,计算功能强大,分析类型多,局部应力分析和非线性分析功能明显优于国产软件。美国 IDC 公司开发的 SAP2000 程序,不仅通用性强,而且还含有桥梁分析模块。2000年起又与中国建筑科学研究院合作,加入了中国规范,推出了中文版 SAP2000。韩国 Midas 公司专门针对中国桥梁规范,开发了桥梁结构分析软件 MIDAS/Civil,其内核就是 SAP2000。

国外软件公司在积极开发桥梁结构分析专业软件的同时,十分注重市场营销和售后服务。但在对桥梁工程的理解和针对工程特点的计算方法上,以及对国内设计规范的把握和专业知识的积累方面不如国内自主研发的专业软件。

1.1.2 国内发展概况

我国桥梁结构分析软件的研发起步较晚。20世纪50年代至70年代末,不仅计算机稀少,而且算法语言单一,虽然开发了一些分析软件,但仅限于高等院校、科研院所中使用,尚未上升到专业计算程序的研制。20世纪80年代初,为适用预应力技术的发展和跨度桥梁的建设需要,在“六五”和“七五”期间,原交通部联合国内桥梁结构电算专家开展技术攻关,开发了公路桥梁综合程序 GQZJ,该程序采用平面杆系单元,不仅能计算混凝土徐变、收缩和预应力,而且运用动态规划法,编制了汽车、挂车等活载内力计算模块,成功应用于广东洛溪大桥、湖北沙洋大桥、包头黄河大桥等几座预应力混凝土连续梁桥和连续刚构桥的计算分析中。然而,受到当时计算机软、硬件条件的限制,源程序不能长期寄存在计算机内,要从穿孔纸带将

程序导入计算机并从穿孔纸带读取输入数据,计算结果只能整箱地打印到纸上,效率低。20世纪80年代后期,随着计算机技术和算法语言 Fortran 程序的出现,有些设计院将 GQZJ 移植到不同类型的计算机上运行,并用 Fortran 语言重新编写源程序,后被国内大多设计院所采用,对推动国内大跨度桥梁的设计起到了重要作用,但单元与节点编号、节点坐标、预应力钢筋编号和几何坐标仍需由人工处理和输入,计算结果数据也必须人工整理,可视化程度低,输入、输出数据不易检查。90年代出现的PC机和硬件性能的提高,GQZJ开始向PC机上移植,并将图形可视化功能引入到程序的前后处理中。这个时期是我国桥梁专业软件发展的高峰时期,众多专业人员从事桥梁专业软件开发,比较典型的有 GQJS、BRCAD、BSAS、桥梁博士(Dr. Bridge)等。

除平面杆系程序外,针对立交匝道弯桥、独柱支承结构、现浇弯箱梁桥等,开发了多个曲线桥梁设计计算专用软件,其计算核心是空间梁格系方法。较为典型的软件有:李方广华曲线桥梁计算程序、弯斜坡异性桥梁空间结构分析软件系统 3DBSA、广东省院的桥梁三维空间结构分析软件 3D-BSA 和慧加结构分析与设计软件 WISEPLUS 等。

目前,国内开发的桥梁结构分析软件已实现桥梁设计阶段的内力计算,充分考虑施工过程、非线性等因素,广泛用于桥梁设计、施工控制、试验检测和病害分析中,现正朝空间梁格、板壳、实体单元仿真建模和非线性动力特性分析等方面发展,并且加强计算数据和绘图软件的接口联系,形成分析、设计、绘图和文档的一体化。另外,桥梁结构分析软件还与虚拟现实技术相结合,用于桥梁的方案比选、虚拟设计、项目管理、事故反演等领域。

1.2 桥梁结构分析问题的分类

与其他结构分析问题相似,桥梁工程中的结构分析问题也有线弹性问题和非线性问题两大类。

1) 线弹性问题

线弹性问题基于小变形假定,分析模型建立在未变形的结构上,即所谓的一阶分析问题。线弹性问题中的材料应力与应变为线性关系,满足广义 Hooke 定律;应变与位移也是线性关系。线弹性问题归结为求解线性方程组问题,计算时间较短。如果采用高效的代数方程组求解方法,可进一步缩短分析时间。

桥梁工程中的静力计算和结构动力响应分析都属于线弹性问题,但悬索桥的静力计算属于二阶分析问题,或称几何非线性问题。这是由于悬索桥主缆刚度小,在荷载作用下会产生较大的变形,只有将分析模型建立在变形之后的结构上才能得到正确的结果。用生死单元法、激活/纯化方法分析施工过程的桥梁内力和变形时,因结构刚度矩阵发生变化,也属于几何非线性问题。

2) 非线性问题

非线性问题与线弹性问题有很大不同,主要表现在以下三个方面:①非线性问题的方程是非线性的,需要迭代求解;②线性问题中的叠加原理不适用;③非线性问题不总有一致解,甚至没有解。

以上三方面的因素使非线性问题的求解过程比线弹性问题更加复杂、更具有不可预知性。

桥梁工程中的非线性问题通常有以下三种形式。

(1) 材料非线性问题

材料的应力与应变为非线性关系,但当应变与位移很微小时,可以认为应变与位移呈线

性关系,这类问题属于材料非线性问题。桥梁工程中较为重要的材料非线性问题有:非线性(包括分段线弹性)、弹塑性、黏塑性及蠕变等。

分析材料非线性问题时,应给出材料的应力—应变本构方程。图 1-2-1 为钢材的几种常用本构模型。其中,理想弹塑性模型和线性强化弹塑性模型分别适用于塑性应变不太大时低碳钢和一般合金钢弹塑性变形问题的简化计算;刚塑性模型适用于估算结构最大承载能力,此时弹性应变相比于塑性应变小很多而予以忽略,认为应力达到屈服应力前材料不变形。

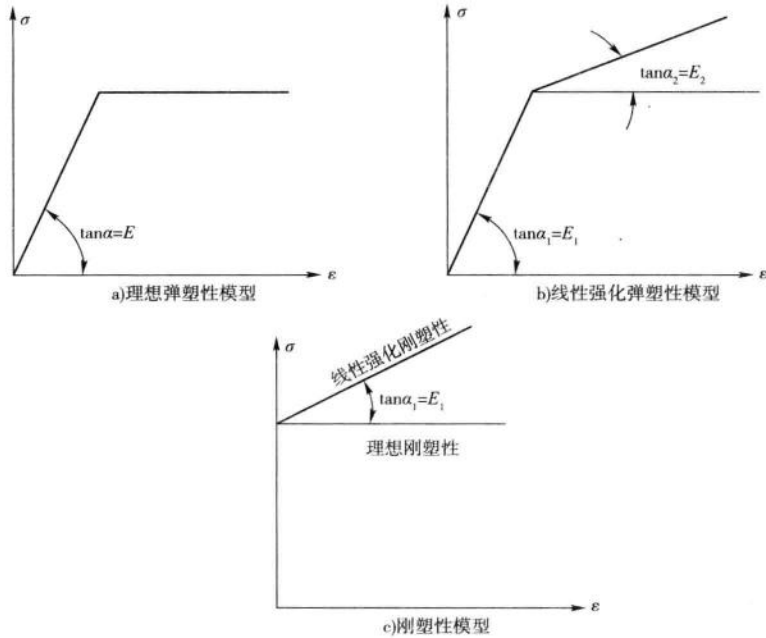


图 1-2-1 钢材本构模型

(2) 几何非线性问题

几何非线性是由位移之间存在非线性关系引起的,因此计算模型必须建立在变形后的结构之上(二阶分析问题)。当物体的位移较大时,应变与位移的关系是非线性关系,这意味着结构本身会产生大位移或大转动,而单元中的应变却可大可小。这类问题包括大位移大应变问题及大位移小应变问题,如结构的弹性屈曲问题属于大位移小应变问题。

研究这类问题时,一般都假定材料的应力与应变为线性关系。

(3) 其他非线性问题

① 状态非线性问题

如图 1-2-2 所示,直杆右端放置一长为 l 的杆件,拉伸杆与右边杆件端部之间有微小间隙 Δ ,在拉力 P 作用下的变形关系为:

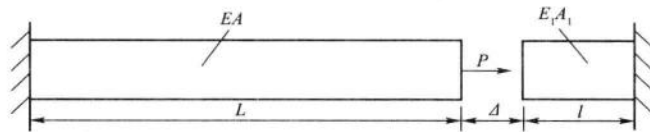


图 1-2-2 状态非线性问题

$$P(d) = \begin{cases} \frac{EA}{L}d & d \leq \Delta \\ \frac{EA}{L}d + \frac{E_1 A_1}{l}(d - \Delta) & d > \Delta \end{cases}$$

上式表明,应变与位移、应力与应变之间的关系都是线性的,节点力与节点位移之间的关系在分段加载过程中也是线性的,但在整个过程则表现为节点力与节点位移之间的非线性关系,即 $k(d)d=p$ 。

通常把这种与结构所处的状态相关的非线性问题称为状态非线性问题。接触问题是最为常见的状态非线性问题。在模拟船舶撞击、汽车撞击桥梁时,接触和摩擦的作用不可忽视,需按接触问题进行分析。

② 边界非线性问题

通常边界条件为刚性支承,即边界条件自身不会随荷载引起的结构变形而变化,但当采用与地基接触的只受压/只受拉的非线性边界条件时,边界条件就会随荷载引起的结构变形而变化,这时结构的荷载一位移的非线性关系就称为边界非线性问题。

实际工程中的非线性可能同时包括两种或三种非线性问题,如计算桥梁极限承载力时,必须同时考虑材料非线性和几何非线性。

1.3 桥梁结构分析基本过程

无论采用何种软件,在开展桥梁结构分析时,都需经历建立模型、施加荷载和约束、求解和后处理过程等四个步骤。

1.3.1 模型建立

1) 实际桥梁结构与荷载的简化

任何一座桥梁均是由上部结构、下部结构和基础三部分组成的复杂空间结构,但完全按照桥梁实际构造建立有限元模型,既不可行也无必要。因此,在开展桥梁结构分析前,有必要对实际桥梁做出符合实际状况的假定和简化,通常把简化后的计算图式称为计算模型或分析模型。桥梁工程中因结构跨度较其他两个尺度(截面宽度和高度)大很多,在分析模型中大多近似处理为杆系结构。大量计算和试验结果均表明,这种简化是可行的,能够满足工程设计精度的要求。当采用平面杆系结构程序计算桥梁结构或构件的内力和变形时,其空间效应可以通过横向分布系数、偏载增大系数来体现。当采用空间模型分析时,无需考虑横向分布系数和偏载增大系数,程序会自动计入空间效应。

桥梁结构简化必须遵循以下基本原则:①计算模型应尽量符合实际结构的构造特点和受力特点,以保证计算分析结果的真实性和准确性;②保证体系的几何不变性,特别是对复杂的体系转换过程更应注意;同时要避免施加与实际结构受力不符的多余约束;③在合理模拟的前提下,尽量减小节点数目,减少未知量数目,以减小计算规模,节省计算时间和计算机空间;④本构关系应真实反映材料的性质。

作用在桥梁结构的荷载,主要有结构自重、车辆荷载、人群荷载、风荷载、土压力、水浮力、地震力和基础沉降等,通常以均布力、集中力、梯度荷载、地震力和支承位移的方式施加。

2) 网格划分

桥梁结构的有限元模型可采用直接建模法或实体建模法来创建。直接建模法指直接生成有限元模型中的节点、单元、荷载和边界条件等;实体建模法是先建立实体模型,通过设置单元类型和材料属性,运用网格划分工具生成有限元模型。实体模型既可采用有限元软件自带的建模工具创建,也可采用第三方开发的计算机辅助系统创建,如 AutoCAD、Solidworks、UG 等辅助软件。采用计算机辅助系统建立的实体模型,一旦成功导入到有限元程序中,就

可按照实体建模法进行网格划分。需要说明的是,不同软件对由计算机辅助系统创建的实体模型支持度是不完全一致的,如 SAP2000、MIDAS/Civil 可以从 AutoCAD 中导入结构的杆件,而 ANSYS 只能导入面域或实体,不能导入结构的杆件。

桥梁结构的构件相对较少,单元类型以梁单元、杆(索)单元和板单元为主,可采用直接建模法建立有限元模型,但在分析诸如零号块水化热、大体积混凝土的复杂应力状态时需要采用实体单元,这时应优先选用实体建模法。

结构离散后的网格质量直接影响到求解时间及求解结果的正确性。复杂模型需要非常精确的网格才能得到有效的分析结果。另外,在许多工程问题求解过程中,模型的某个区域产生极大的应变,单元畸变严重,如果不重新划分网格,将会导致求解中止或结果不正确,对此应予以高度重视。

1.3.2 施加荷载和约束

施加荷载是把作用在结构上的荷载施加在有限元模型上。对于结构自重,由程序自动根据质量密度和单元体积计算得到,其他荷载,如预应力荷载、二期恒载、车辆荷载、支承位移、风荷载、地震荷载等需由人工施加。

为排除有限元模型的刚体位移,或为防止在缺少自由度的单元之间相互连接时出现刚度奇异,必须在模型上施加必要的约束。桥梁工程中常见的约束,有固结、铰接、链杆支承、弹性支承等。

1.3.3 求解

在施加了合适的边界条件、荷载后即可开始求解。有限元程序中的求解过程实际上是求解线性方程组或非线性方程组,以解出整个结构的位移、内力、频率、稳定系数等。

在线性平衡问题中,可以根据方程组的具体特点选择合适的计算方法。对于非线性问题,需要通过一系列的迭代步骤,并逐步修正刚度矩阵或荷载列阵,方能获得解答。

1.3.4 后处理

后处理是对程序运行结果的判断与整理。目前的有限元程序后处理功能都十分强大,可以输出内力图、变形图、模态图、应力迹线等。

1.4 模型纠错

1.4.1 有限元分析中的常见错误

由于建模问题、参数或边界条件设置不当等原因,会遇到约束自由度不够、计算结果错误等问题。下面列出桥梁结构分析中经常遇到的问题,供读者在检查模型时参考。

1) 约束自由度不够

有限元方法中是以节点位移作为基本未知量,称为节点自由度(Degree of freedom)。通过约束支承处的节点自由度来消除分析模型中的刚体位移。

任何一个分析模型,不论是主体结构还是附属结构,至少是一个静定结构,而复杂结构往往是多次超静定结构。两端采用橡胶支座的简支梁桥,究竟哪一端是铰支承,哪一端是竖向支承,应视具体情况而定:当只有一跨简支梁桥时,可以任选一端为铰支承,另一端为链杆支承;处在纵坡上的简支梁桥,一般以标高较低者为铰支承,标高较高者为链杆支承;

当有两跨或两跨以上的简支梁桥时,位于伸缩装置侧为链杆支承,另一侧为铰支承。若把两端均设置为链杆支承时,计算模型就成为一个可变体,运行程序时就会提示约束自由度不够而中止。

对于悬臂梁桥,无论是单悬臂梁还是双悬臂梁,除悬臂梁自身是一个静定结构外,挂梁也应是静定结构。如图 1-4-1a)中的双悬臂梁桥,两个边跨均有一个挂梁,简化为计算模型时,双悬臂梁应是静定体系,而两侧的挂梁也应是静定体系,如图 1-4-1b)所示。

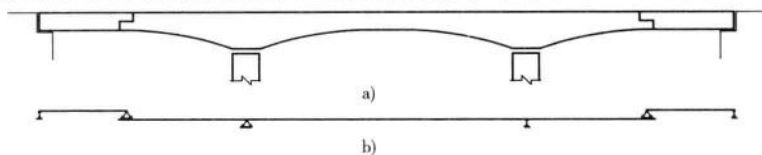


图 1-4-1 悬臂梁桥约束条件

此外,在 MIDAS/Civil 中,当计算由桁架单元、平面应力单元、板单元等构成的模型时,因这些单元缺乏转动自由度,如果不给这些单元的自由度施加约束,就会导致刚度奇异而无法求解。

2) 自由度约束不当

这种情况大多发生在由多种单元类型构成的复杂模型中。如,在由空间梁单元和空间杆单元组成的结构中,空间梁单元有 3 个线位移自由度和 3 个转动位移自由度,而空间杆单元只有 3 个线位移自由度,在定义两者约束关系时,只能在线位移自由度之间进行,如果把转动位移自由度也约束,就会出现自由度约束不当的问题。

自由度约束处理是桥梁结构建模的难点,需要通过反复实践和思考才能提高建模技能。本教材第 3 章将详细介绍不同单元间自由度约束的处理方法。

3) 计算结果不正确

这是桥梁结构分析中经常遇到的问题,复杂模型则更容易出现。造成计算结果不正确的原因为很多,概况起来有以下几个方面。

(1) 建模

前述,建立的桥梁计算模型应能真实反映其实际状态,当选用的单元类型,单元与单元间的空间关系或联结方式等与实际结构不符时,即使能够得到结果,往往也是错误的。

在开展空间结构分析时,还应注意单元方向。如,在有限元软件中,对空间梁单元都有一个默认参考点方向,但实际结构中的构件是千差万别的,往往会与软件默认方向不一致,如果建模时忽略单元截面方向的定义,程序就按默认方式定义,从而造成计算错误。由于这种错误的隐蔽性较强,不易检查出来,因此,用软件提供的透视功能检查模型是一个良好的习惯,常常可以起到事半功倍的效果。

荷载具有大小和方向。有限元软件中对荷载方向的定义不仅与单元类型有关,还与该单元所定义的局部坐标系有关。如空间梁单元,其局部坐标系由单元的左、右节点与不在同一直线上的参考点 K 唯一确定,当参考点 K 定义在单元的上方或下方时,单元坐标系的方向刚好相反,因此在输入荷载方向时,必须根据局部坐标系来确定。有关更详细的桥梁建模要点见第 3 章。

(2) 参数或选项设置不当

包括材料特性、截面特性输入和分析选项设置等。

材料特性包括材料的弹性模量、质量密度、线膨胀系数等。当开展材料非线性分析时,还必须给出非线性材料的本构关系,或与时间有关的曲线,如混凝土收缩、徐变随龄期变化的时间依存特性。

截面特性包括截面积、惯性矩、抗扭惯矩、截面高度等。对于复合截面,尚应定义与之对应的材料特性。

当材料或截面特性定义不当时,计算结果必然是错误的。大量实践表明,因材料和截面特性设置不当引起的错误几率较高,应引起重视。

选项是有限元程序中为实现不同求解需要而设置的一种选择,线性有限元分析中选项很少,但在开展稳定、动力和非线性分析时,选项往往不止一个,一旦选项不当,也会造成计算结果的错误。为此,在开展桥梁结构分析前,有必要准确了解选项的含义及使用方法。

(3) 边界条件

模型中施加的边界条件,即所谓的约束,应真实反映结构实际的边界条件,防止出现约束不够或多余约束。

1.4.2 计算结果的正确性判断

受到多种因素的影响,很难一次性就能获得正确的计算结果,即使是构造很简单的桥梁结构,也不能保证计算结果的正确性,而复杂结构的计算,更是要经历反复的模型检查→计算→结果→判断后,才能得到正确结果。

如何判断计算结果的正确性是有限元分析的难点,但又是必须要做的工作。下面介绍几种实用的判断方法。

1) 定性定量法

例如,某混凝土简支梁,计算跨径 $l=10\text{m}$,横截面尺寸 1m (宽) $\times 1.2\text{m}$ (高),如图 1-4-2a)所示。已知材料重力密度为 25kN/m^3 ,要求用有限元程序计算自重作用下该简支梁的跨中截面应力和支点剪力。

显然,该简支梁是一个对称结构,且荷载也为对称(均布荷载),可以断定,简支梁的弯矩为对称分布[图 1-4-2b)],而剪力为反对称分布[图 1-4-2c)],这就是所谓的定性判断。当输出的弯矩图和剪力图分别呈对称分布和反对称分布时,说明建立的模型有可能是正确的,否则模型有问题,需要检查模型,然后重新计算,直至达到上述性质为止。再由结构力学可知,该截面的跨中弯矩 $M=gl^2/8$,支点剪力 $Q=gl/2$,其中 g 为线重, $g=1\text{m}\times 1.2\text{m}\times 25\text{kN/m}^3=30\text{kN/m}$,由此得到 $M=375\text{kN}\cdot\text{m}$, $Q=150\text{kN}$,截面模量 $W=bh^2/6=0.24\text{m}^3$,弯曲应力 $\sigma=M/W=1562.5\text{kN/m}^2$,当计算结果与理论值一致时,说明建立的模型是正确的。如出现剪力正确而弯曲应力错误时,应重点检查梁单元的参考方向,因为此时有限元模型中的梁截面有可能呈 1.2m (宽) $\times 1.0\text{m}$ (高)的方向布置,导致弯曲应力结果错误。

2) 支反力检查法

计算完成后,检查所有支反力之和是否等于理论值。当对称结构承受对称荷载时,还应查看支反力值是否具有对称性。如上述简支梁,两端的支反力均为压力(定性分析),且支反力值均为 150kN (定量分析)。图 1-4-3 所示为 MIDAS/Civil 计算得到的支反力值,结果也为 150kN ,说明建立的模型是正确的。如果出现支反力相等,但结果不正确,可重点检查截面特性和材料重度输入是否正确。

由于建模时需要与实际结构进行简化,有些次要构件或连接件(如万能杆件的节点板)被忽略,也有些构件被人为地增长或缩短,这些简化都会导致计算值与理论值的不符。为弥补因模型简化造成的重量误差,应对分析模型中的材料重度进行修正,直至计算值与理论值一致或接近。