

- 随书附光盘，提供实例计算数据文件、模型与结果图片，SAP2000 试用版、看与学电影、中文版帮助文件。

SAP2000

桥梁结构分析 应用方法与实例

张洪俊 编著

李楚舒 主审



人民交通出版社

China Communications Press

SAP2000 桥梁结构分析 应用方法与实例

张洪俊 编著
李楚舒 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

SAP2000 是非常优秀的结构分析通用有限元软件,是结构工程师的必备工具之一,在桥梁、房屋、塔架、港航等土木工程领域中广泛应用。本书详细介绍了 SAP2000V9.0(中文版)桥梁模块的使用,并通过大量实例阐述了利用 SAP2000 分析常见的桥梁力学现象,介绍了使用 SAP2000 分析梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥的各种特性,以及双壁钢围堰、高桩码头结构的 SAP2000 分析方法。

随书光盘提供了书中实例的 SAP2000 计算数据文件(*.SDB)、计算模型图片(*.JPG)、计算结果图片(*.JPG),以及 SAP2000 试用版、SAP2000 看与学电影、中文版帮助文件等。

本书是一线桥梁设计师的呕心之作,披露了桥梁结构分析的核心机密,总结了作者十余年来的实战技术。本书可供桥梁及其他结构工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

SAP 2000 桥梁结构分析应用方法与实例/张洪俊编著.
北京:人民交通出版社,2005.8
ISBN 7-114-05721-0

I.S... II.张... III.桥梁结构-结构分析-应用
软件, SAP 2000 V9.0 IV.U443-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 095142 号

书 名: SAP2000 桥梁结构分析应用方法与实例

著 者: 张洪俊

责任编辑: 陈志敏

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)85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×960 1/16

印 张: 9.75

字 数: 156 千

版 次: 2005 年 8 月第 1 版

印 次: 2005 年 8 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-114-05721-0

印 数: 0001-4000 册

定 价: 22.00 元

(如有印刷、装订质量问题,由本社负责调换)

序



古人云：“公欲善其事，必先利其器”。对于结构工程师而言，SAP2000就是手中的宝剑，拥有它就可以驰骋职场，解开扑朔迷离的结构难题。本书作者结合多年的桥梁工程实践，系统地介绍了 SAP2000 V9.0(中文版)在桥梁结构分析中的使用。

书中以大量的实例、图片来介绍如何使用 SAP2000 分析实际桥梁结构，均有实战背景，强调实用性，而不着重于桥梁、有限元知识，因此要求读者具有适当的理论基础。

SAP2000 在世界工程界享用盛誉，在中国市场得到广泛应用。实践是检验真理的惟一标准，全书贯穿工程实例，极具说服力，因此是一本难得的具有可操作性的工程参考书。

北京金土木软件技术有限公司

李楚舒

2005 年 5 月 27 日

前 言

本书第1章简要介绍了有关结构分析手段的知识;第2章详细介绍了SAP2000桥梁模块的使用,举例介绍了阶段施工桥梁的结构分析;第3章使用SAP2000分析了多个简单结构,均是常见的桥梁力学现象;第4章使用SAP2000分析了桥梁荷载横向分布系数;第5章~第8章举例介绍了使用SAP2000分析梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥的各种特性,涉及箱梁扭转、吊杆非保向力、空间稳定性、弹塑性、抗风抗震、几何非线性等分析;第9章、第10章举例介绍了使用SAP2000分析双壁钢围堰、高桩码头结构。

随书光盘中提供了书中实例的SAP2000计算数据文件(*.SDB),供读者调试,以及实例计算的模型图片(*.JPG)、结果图片(*.JPG)等,在书籍因黑白印刷效果不清楚的情况下,供读者在电脑中查看;另外,光盘中还有北京金土木软件技术有限公司提供的SAP2000 V9.0试用版、SAP2000看与学电影、中文版帮助文件,供读者学习使用。

本书第2章SAP2000 V9桥梁模块的编写,得到李楚舒博士的指点,在此表示感谢!书中引用的效果图等资料,得到所属设计院领导的支持,在此表示感谢!

全书由张洪俊编写,李楚舒主审。

由于作者水平有限,书中难免存在缺点错误,恳请读者批评指正。联系电话:13951675464。

本书所引用的软件、工程、图纸、效果图等,均为所属单位、个人所有,本书引用绝无侵权之意,特此申明。

张洪俊

2005年5月27日

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 现代桥梁结构分析的起源	(1)
1.2 有限元分析手段简介	(2)
1.3 国内桥梁结构分析手段近十年来的演变	(4)
1.4 桥梁结构分析要点	(6)
1.5 SAP2000 软件简介	(7)
第 2 章 SAP2000V9 桥梁模块	(9)
2.1 桥梁向导和悬索桥建模助手	(9)
2.2 定义桥轴线	(11)
2.3 定义桥台	(13)
2.4 定义地基刚度	(15)
2.5 定义主梁截面	(15)
2.6 定义桥墩	(17)
2.7 定义铰	(18)
2.8 定义参数变化	(18)
2.9 定义桥对象	(19)
2.10 定义预应力	(21)
2.11 更新桥梁模型	(21)
2.12 定义车道	(22)
2.13 定义车辆及类别	(24)
2.14 定义桥梁反应和活载分析工况	(25)
2.15 定义索单元	(26)
2.16 定义混凝土收缩徐变	(26)
2.17 定义非线性阶段施工	(28)
2.18 求解影响线	(30)

2.19	实例一:钢筋混凝土简支梁分析	(31)
2.20	实例二:三跨预应力混凝土变截面连续刚构桥分析	(33)
第 3 章	使用 SAP2000V9 分析多个简单结构	(48)
3.1	简支梁内力求解(FRAME 单元模拟)	(48)
3.2	简支梁应力求解(SHELL 单元模拟)	(49)
3.3	简支梁应力求解(SOLID 单元模拟)	(50)
3.4	简支梁极限承载力求解(PUSHOVER 分析)	(52)
3.5	十字形梁内力求解(FRAME 单元模拟)	(53)
3.6	立柱自振频率、振型求解(FRAME 单元模拟)	(55)
3.7	立柱第一类稳定性求解(FRAME 单元模拟)	(57)
3.8	立柱第二类稳定性求解(PUSHOVER 分析)	(59)
3.9	深梁应力求解(SHELL 单元模拟)	(60)
3.10	钢构件设计(AISC-ASD89 规范)	(61)
3.11	拉索振动频率求解(P-Delta 力)	(63)
3.12	预应力混凝土简支梁分析(TENDON 单元模拟)	(65)
第 4 章	使用 SAP2000V9 分析桥梁荷载横向分布系数	(69)
4.1	5 片 20m 简支 T 梁桥荷载横向分布系数求解(FRAME 单元模拟)	(69)
4.2	5 片 20m 简支 T 梁桥荷载横向分布系数求解(SHELL 单元模拟)	(72)
4.3	肋拱桥荷载横向分布系数求解(FRAME 单元模拟)	(72)
第 5 章	使用 SAP2000V9 分析梁桥	(76)
5.1	简支斜交板桥受力分析	(76)
5.2	简支混凝土 T 梁受力分析	(77)
5.3	简支混凝土箱梁偏载受力分析	(79)
第 6 章	使用 SAP2000V9 分析拱桥	(81)
6.1	系杆拱桥吊杆非保向力作用分析	(81)
6.2	斜靠式提篮拱空间分析	(90)
6.3	窄系杆拱桥的风撑布置分析	(96)

第 7 章 使用 SAP2000V9 分析斜拉桥	(103)
7.1 独塔单索面斜拉桥主塔稳定性和抗震概念性分析	(103)
7.2 双索面斜拉桥主塔横向抗风抗震分析	(110)
7.3 斜拉桥主塔第二类稳定性分析	(118)
7.4 双主肋断面斜拉桥的横梁活载纵向分布效应分析	(120)
7.5 双主肋断面斜拉桥的桥面系抗风分析	(123)
第 8 章 使用 SAP2000V9 分析悬索桥	(125)
8.1 悬索桥计算理论简介	(125)
8.2 悬索桥结构几何非线性分析初探	(126)
8.3 主跨 700m 悬索桥结构分析	(129)
8.4 佛山中央公园步行悬索桥方案结构分析	(131)
第 9 章 使用 SAP2000V9 分析双壁钢围堰结构	(134)
9.1 情况简介	(134)
9.2 SAP2000 建模	(135)
9.3 分析结果	(135)
第 10 章 使用 SAP2000V9 分析高桩码头结构	(138)
10.1 情况简介	(138)
10.2 SAP2000 建模	(138)
10.3 分析结果	(139)
参考文献	(141)
后记	(142)

第 1 章 概 述

俗话说：“练拳不练功，到老一场空”。在桥梁设计领域，结构分析即是“功”。

1.1 现代桥梁结构分析的起源

在工程建设中，对工程结构进行科学的分析和计算，是相当晚才出现的。

在农业社会里，人们一般只需按照经验来处理结构上的一些问题，一些工程做法和构件尺寸等许多都以文字或数字的规定表现出来，即“法式制度”。这类法则近似地符合结构科学，但一般截面偏大，用料较多，安全系数大。古代许多令我们惊叹不已的建筑物能保存至今，原因之一就是其结构上有很大的安全储备。

“法式制度”对人们的约束是很大的，受现实利益制约，很少有人敢越轨。经济、需求、体制等制约了工程发展，这也体现在古代桥梁跨径、规模上。

在欧洲工业革命之后，社会经济的迅猛发展使工程结构作为一门科学而存在成为必然。工程建设由古代的小跨径、轻荷载转变为大跨径、重荷载，工程规模越来越大和越来越复杂。当时要在宽、深、险峻的河流、山谷上建造铁路桥梁是工程建设中最为困难的部分，为了加快施工速度、不影响通航和少修建造价昂贵的桥墩，就必须增加桥的跨度，这对结构科学的发展起到了突出的推动作用。

欧洲早期铁路桥梁建造史上，记载着一系列失败的记录。1820 年英国特维德河联合大桥建成半年后垮塌；1830 年英国梯河一悬索桥在通车几年后裂为碎块；1831 年英国布洛顿悬索桥在一队士兵通过时毁坏；1840 年法国洛克悬索桥建成不久，桥面被风吹掉；1878 年英国泰河铁路大桥通车一年半后，当火车在大风中通过时桥梁断裂坠入河中。

失败告诉人们：必须深入掌握结构的工作规律。但是，结构工作规律的掌握依赖数学和力学科学的发展。从伽利略时代算起，到 19 世纪末，在近

300 年的时间里,经过伽利略、虎克、牛顿、欧拉、伯诺里、拉格朗日和圣维南等几代人持续努力,在科学试验、理论求解和工程实践无数次往复循环中,人们终于从长达几千年之久的宏观经验阶段步入科学分析时代。从此之后,掌握结构科学知识的工程师从建筑师群体中分离出来,形成一个新的职业——结构工程师。

结构工程师能预先掌握结构在施工和使用时的工作状态,计算出结构各处的作用力和抗力,做出坚固耐用和经济合理的工程设计。不经济和不安全的结构在图纸阶段就被否定。

随着现代科学技术的发展,人们正在不断建造更大规模、更大跨度的桥梁。这一切都要求工程师在设计阶段就能精确地预测出工程的技术性能,需要对结构的静、动力特性等技术参数进行分析计算。例如分析大跨度桥梁在地震时所受到的影响,看看是否会发生破坏性事故;计算复杂的空间结构,查看各杆件受力是否超标。这些复杂问题都可归结为求解偏微分方程,采用以前的计算方法、手段往往是很难求出结果的。近年来在计算机技术和数值分析方法支持下发展起来的有限元分析(FEA, Finite Element Analysis)方法,为解决这些复杂的工程分析计算问题提供了有效的途径。

1.2 有限元分析手段简介

20 世纪 50 年代中期至 60 年代末,有限元法出现并迅猛发展。由于当时理论尚处于初级阶段,计算机的硬件及软件也无法满足需求,有限元法和有限元程序还无法在工程实践中普及。到 60 年代末 70 年代初出现了大型通用有限元程序,由于它功能强、用户使用方便、计算结果可靠和效率高而逐渐形成新的技术商品,成为结构工程强有力的分析工具。

广义的有限元分析,就是离散物体、构建方程、求解,其被广泛应用于各个行业的设计、分析中,包括机械、土木工程、航空航天、汽车工业、化工制品及工艺、消费产品、电子、娱乐行业、生物医学、军事/国防工业、电力/公用事业、休闲/运动行业、科学研究等领域中的设计、分析及仿真模拟等。

用有限元进行分析时,首先将被分析物体离散成为许多小单元,其次给定边界条件、荷载和材料特性,再求解线性或非线性方程组,得到位移、内力、应力、应变等结果。目前商用有限元程序不但分析功能几乎覆盖了所有的工程领域,其程序使用也非常方便。目前,我国市场主要以国外公司的商业有限元分析软件为主,如 SAP2000、MSC/Nastran、Ansys、Abqwas、Marc、Algor、Midas 等,国内公司生产的有 SAP84、PKPM 等。平面杆系分析软件是有

限元软件的雏形,其根据矩阵位移法的基本原理编程,国内桥梁界常用的软件如桥梁博士、PMGX、GQJS、QJX 等均属于此类。

有关有限元的详细资料现在市面上很多,读者可自行参阅。

桥梁结构分析中,一般有平面杆系分析软件和空间有限元软件两类。图 1-1 ~ 图 1-4 是采用平面杆系分析软件分析梁桥的示意图。

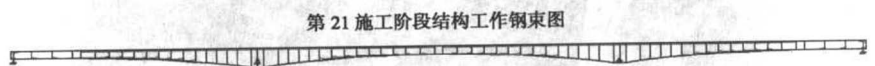


图 1-1 桥梁平面分析模型

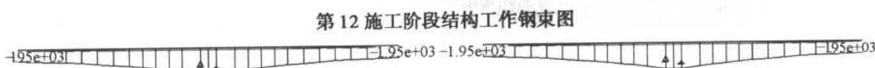


图 1-2 某施工阶段模拟(如挂篮荷载)

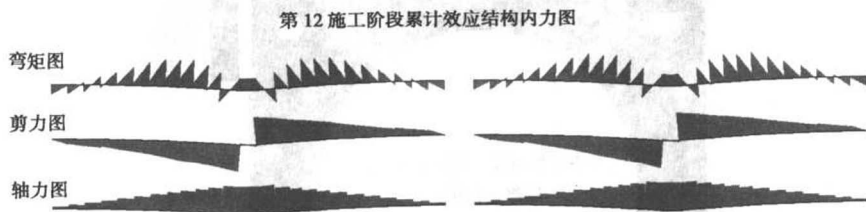


图 1-3 某施工阶段受力(混凝土自重、挂篮、预应力、收缩徐变等)

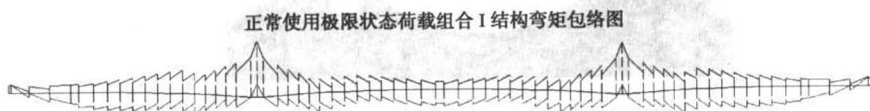


图 1-4 使用阶段弯矩包络图

图 1-5、图 1-6 是采用空间有限元分析软件分析预应力空心板端部开裂的示意图。

桥梁分析无论采用平面杆系分析软件还是空间有限元软件,均需输入几何条件(节点坐标、单元划分、支承情况等)、材料特性(EA 、 EI 、 GA 等)、荷载条件(单元自重、节点荷载、均布荷载等),即节点、单元、支承、荷载、材料、温度等数值。一般结构类软件基本的输出项目有内力、位移、应力、应变、动力特性等。

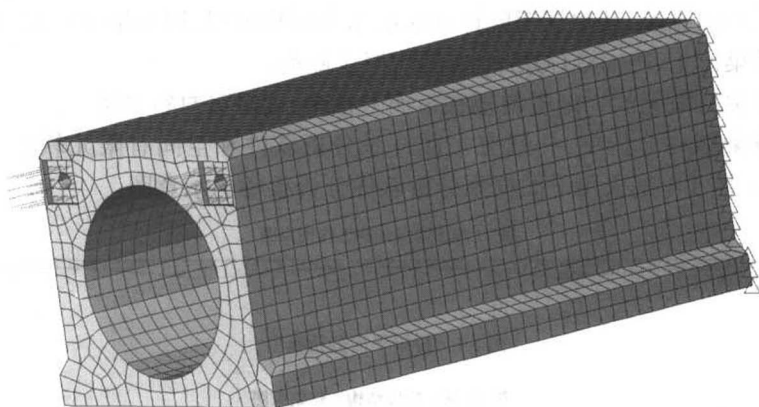


图 1-5 板梁实体模型

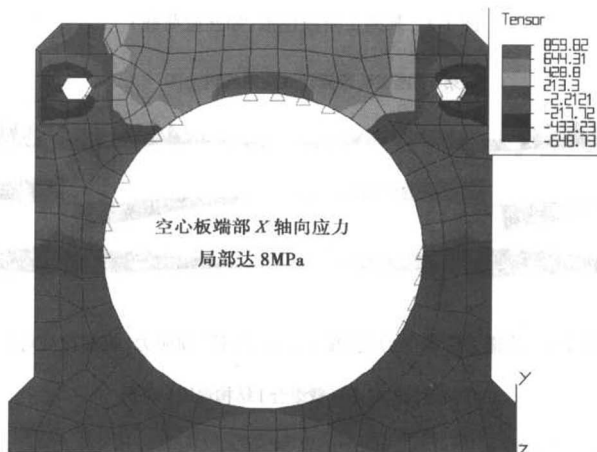


图 1-6 板梁端部应力图

1.3 国内桥梁结构分析手段近十年来的演变

下面以作者本人的经历为例介绍桥梁结构分析手段近十年来的演变情况。本人 1994 年大学毕业,单位当时设计通用桥梁时一般套用标准图,下部结构主要计算桩长,特殊结构采用“PMGX(平面杆系)”系列软件分析。PMGX 系列软件在 DOS 操作系统下运行,可以计算结构的恒载、活载等,但无法模拟预应力、收缩徐变、阶段施工等工况。许多时候要依赖手工辅助分析,费力费时,复杂工况根本无法考虑。

如果只依靠 PMGX 系列软件,许多较为复杂的桥梁就无法分析。1996 年单位引进“QJX”桥梁结构分析软件,也在 DOS 操作系统下运行,可以计算结构的恒载、活载、预应力、收缩徐变、阶段施工、温差、支座沉降等工况。该软件使桥梁设计状况有了较大改观,开始能够分析设计三跨悬浇变截面连续梁。

随着 Windows 操作系统的普及,1997 年单位开始使用“桥梁博士”桥梁结构分析软件。该软件功能与“QJX”相同,同时具有界面友好、人机交互输入、数据自动处理编辑、数据纠错检测等优点。

同期,“GQJS”公路桥梁结构设计系统、“BSAS”桥梁结构分析系统等软件也相继问世。国内部分高校、设计院自编了不同功能的空间分析软件,但因界面、市场等原因无法广泛普及使用。

可以说,当时平面类分析软件发展已经相当完善,解决了大量实际问题,但当遇到空间结构、局部应力、稳定性、动力特性、非线性等问题时,仍一筹莫展。随着桥梁建设的发展,该矛盾越来越突出。本人经历过许多这方面的问题,因此而困扰了很长时间。例如 1995 年,现场进行预应力板梁预制张拉时,近百片板梁端部开裂,经多次论证落实,仍无法根除该问题。我使用计算器,按照弹性力学差分法分析了近一个月,只得出一个应力区间,依然无法指导实践。后来在 2000 年掌握了 Algor 有限元分析手段,才明白了问题所在。

幸运的是,在 1996 年我接触了 SAP90 结构分析软件,1999 年开始使用 SAP2000V7.1。在 1999 年~2003 年期间,本人运用 SAP2000 试用版、教育版等版本,解决了工程中大量的疑难问题,例如箱梁、肋拱的偏载分析,拱、压弯杆稳定性分析,剪力滞效应分析,桩土共同作用分析,提篮拱空间效应分析,塔抗震分析,桥面系抗风分析等。对于这些问题的精确求解,采用手工计算和平面类软件几乎无法完成。

2002 年之后,市场上流行 Midas、Robot 等空间结构分析软件,对工程建设发展起了很大的作用。

事实上早在 20 世纪 80、90 年代,国外的 MSC/Nastran、Ansys、Abqvas、Marc、Algor 等大型通用有限元软件和国内的 SAP84,已被国内高校、部省级设计科研单位使用,用来分析桥梁等结构,但受软硬件设施限制,普通工程技术人员没有机会接触。

根据我学习 Ansys、Marc、Algor、SAP84、SAP2000、Robot 等软件的经历,从桥梁结构分析角度而言,SAP2000 是最优秀的软件之一。

1.4 桥梁结构分析要点

当代复杂桥梁设计必须借助有限元分析手段(常规桥梁可以不用有限元分析)。根据本人经验,运用有限元分析桥梁应注意以下几个方面:

(1)计算模型的确立。即如何将实际复杂结构简化为软件能分析计算的简图。

(2)计算方法的选用。即要知道结构有哪些特性,该分析哪些内容,哪些效应要考虑等。

(3)有限元分析结果处理。即如何将机器计算的数值运用到实际结构中。

这需要大量的工程实践经验,四年以上的工作经历应该是最低限度,同时结构分析理论功底是必备的。要明白,有限元分析是手段,数学、力学知识是核心,对与错、是与非、能与否不是软件决定的,而是由人判断的。另外,规范条文是结构计算、工程经验的总结,需要牢牢把握;工程结构的复杂性决定了细部构造是千变万化的,需要设计师用心构思。

只有运用合适的分析手段、积累丰富的工程经验,才可以摆脱技术对设计师的制约,实现“想到的,就可做到”,甚至“实现他人不敢想象的”,在结构领域随心所欲、为所欲为。比如西班牙的结构设计大师卡拉特拉瓦(Santiago Calatrava)设计的阿拉米罗桥(Alanmillo Bridge)、巴塞罗那菲利普 II 世桥(Bach De Roda Bridge)、梅里达市卢斯坦尼亚大桥(Lusitania Bridge)等,这些作品在结构和造型上均有重大突破,其依赖的就是对结构分析有充分的把握,甚至可以将雕塑、建筑、绘画等艺术手法运用在桥梁设计中。解决了桥梁结构分析的问题,桥梁艺术将只会取决于桥梁美学理论研究的进展,而材料科学、施工技术的革新将为更大跨径桥梁的建设提供现实支撑。

本人认为,对于复杂结构,即便通过结构分析、工程试验、实践验证的方法,也无法百分之百保证结构是绝对安全可靠的。例如 2003 年美国“哥伦比亚”号航天飞机 6 万米高空爆炸解体事件,在此之前,该航天飞机应该说是做了足够多的结构分析、工程试验、实践验证(27 次的安全飞行)。但依旧无法保证第 28 次飞行安全进行。这是世事的复杂性和人性的弱点导致的。唯有充分认识这一点,才能做到万无一失(失效概率为 $1/10000$,可靠性指标 β 值为 3.7)。

当前国内桥梁建设如火如荼,更需要注重结构安全。依靠设计加大安全系数和施工加大投入的方法是不合理的,中国的资源也无法长期支撑这

种做法,应该更多地从改革管理体制、建立注册工程师制度、普及先进分析手段等方面入手。盲目增加梁高、加大板厚、提高含筋率和预应力度等措施,是死胡同,也是能耗高的原因所在;唯有建立科学的行业运作机制、采用先进的生产技术等,才有出路。根据本人从业多年的经历,许多工程如果合理设计,至少可以减少 15% ~ 30% 的材料消耗,但现在的市场环境有时尚抵触这种节约行为,这是很不正常的。另外,目前设计师与施工实践相分离,造成复杂桥梁现场施工、监理、监控人员无从得知结构受力与机动处理的核心要点。这样怎能做到施工中结构万无一失? 众多个性各异的设计师在设计院的体制束缚下,怎能安下心来精心设计? 设计师不深入施工基层,而埋头绘制图纸多拿奖金,怎能提高技术水平? 如何加强工程师的作用和地位,是需要认真思考的。当某天,工程建设的机制能够真正合理利用我国的工程师资源时,“集约化”时代才能到来。

1.5 SAP2000 软件简介

SAP2000 是美国 CSI 公司(Computers & Structures, Inc.)的产品,属结构有限元通用分析软件,可在桥梁、大坝、体育场馆、工业结构、房屋建筑等土木工程中使用。SAP2000V9 中文版于 2004 年 11 月 10 日推向中国市场。

该软件的开发已有 30 多年的历史,研究开始于加利福尼亚 Berkeley 分校的 Edward L. Wilson 博士。1970 第一次发布了具有革命意义的 SAP 程序。此后, Wilson 博士被国际工程界认为是计算机辅助结构分析领域中的卓越的研究者。从 SAP 诞生以来,它已经成为最新分析方法的代名词。SAP2000 具有完善、直观和灵活的界面,为在交通运输、工业、公共事业、运动和其它领域工作的工程师提供了无出其右的分析引擎和设计工具。在 SAP2000 三维图形环境中提供了多种建模、分析和设计选项,且完全在一个集成的图形界面内实现。在今天的市场上, SAP2000 已经被证实是最具集成化、高效率和实用的通用结构软件。先进的分析技术提供了:逐步大变形分析、多重 P-Delta 效应、特征向量和 Ritz 向量分析、索分析、单拉和单压分析、Buckling 屈曲分析、爆炸分析,针对阻尼器、基础隔震和支承塑性的快速非线性分析,用能量方法进行侧移控制和分段施工分析等。

桥梁设计者可以用 SAP2000 的桥梁模板建立桥梁模型,自动进行桥梁活荷载的分析和设计,进行桥梁基础隔震和桥梁施工顺序分析,进行大变形悬索桥分析和 Pushover 推倒分析。

关于 SAP2000 背景资料的详细介绍请查询北京金土木软件技术有限公

司(<http://www.bjcks.com>)、CSI 公司(<http://www.csiberkeley.com>)的网站。

关于 SAP2000 入门操作可以参照 SAP2000 的帮助文档,如:“入门手册”(SapStart.pdf)、“基本分析参考手册”(SapBasic.pdf)、“CSI 分析参考手册”(SapRefer.pdf)、“使用教程”(SapTutor.pdf)等,以及 SAP2000V9“看与学电影”。以上资料均为中文版本,可在本书的随书光盘中查阅。

第2章 SAP2000V9 桥梁模块

SAP2000V9 版本的桥梁专用模块功能已经非常完善。下面将介绍该模块的使用,同时将与桥梁有关的活载分析工况、索单元、混凝土收缩徐变、非线性阶段施工、求解影响线等功能一并介绍,最后举两个使用 SAP2000 桥梁专用模块建模分析的例子。

2.1 桥梁向导和悬索桥建模助手

(1)使用桥梁向导可以有两种方式。第一种是使用菜单“文件”/“新模型…”,中间过程界面如图 2-1 所示。

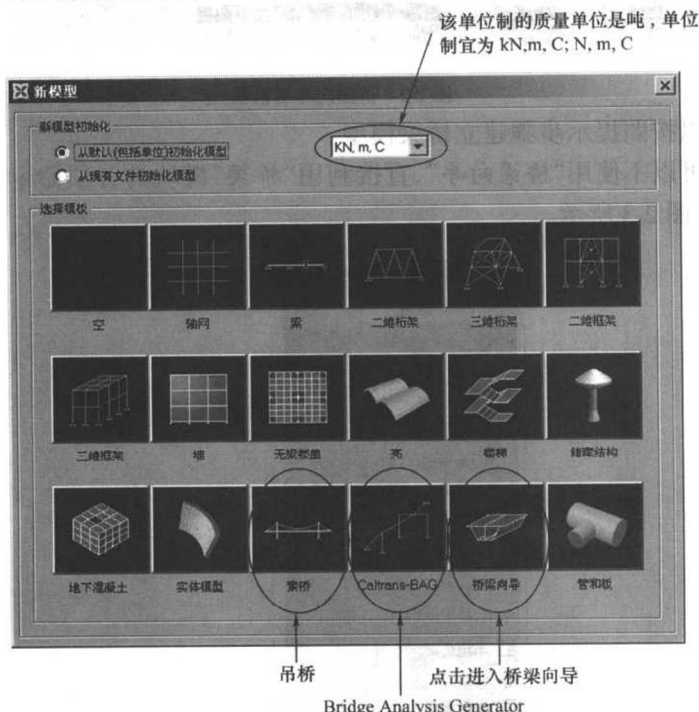


图 2-1 新模型对话框

*注:作者对本书大部分程序界面图进行了注释,用圈和箭头加以指士,请读者注意。