

第2章 桥梁结构数值分析

基本概念、内容和原则

- ◆ 2.1 概述 
- ◆ 2.2 数值分析方法（有限元法）概念和步骤 
- ◆ 2.3 桥梁结构数值分析方法的内容 
- ◆ 2.4 桥梁结构数值分析方法的基本原则 
- ◆ 2.5 本章小结 

2.1 概 述

在结构分析中有两种解法：

第一种解法：直接应用平衡条件、几何变形条件和物理条件来求解结构的内力和位移。这种解法称为物理-几何方法，在静力分析中也叫**静力法**。

在静力法中有两个基本方法：**位移法**（平衡法、刚度法）和**力法**（协调法、柔度法）

第二种解法：把平衡条件或几何条件用相应的功能原理来代替。这种解法称为**能量法**（能量法应用广泛：用虚功原理求内力和位移、机动法作影响线、推导有限单元的刚度矩阵、求解动力问题、求解稳定问题）。

与静力法相对应，在能量原理中也有两类基本原理：与**位移法**相关的是**势能原理**，与**力法**相关的是**余能原理**。

解析法



根据力学原理，建立微分方程，求解边值问题，得到问题的解析解。

半解析法



在数值分析方法中采用与引入部分解析解或解析函数，得到问题的近似解。

数值分析方法



桥梁结构分析的数值分析方法一般采用有限元法用程序进行求解。

解析法

弹性力学平面问题的求解：2个平衡方程、3个几何方程、3个物理方程在具体的边界条件（位移、荷载）下偏微分方程组的数学求解过程。

平衡微分方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + X &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + Y &= 0 \end{aligned} \right\}$$

几何方程

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \end{aligned} \right\}$$

平面应力问题物理方程

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} (\sigma_x - \mu \sigma_y) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} (\sigma_y - \mu \sigma_x) \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy} \end{aligned} \right\}$$

平面应变问题物理方程

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{(1-\mu^2)}{E} \left(\sigma_x - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_y \right) \\ \varepsilon_y &= \frac{(1-\mu^2)}{E} \left(\sigma_y - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_x \right) \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy} \end{aligned} \right\}$$



半解析法

将解析与数值方法相结合的方法称为半解析法 (semi-analytic method) 。它既克服了纯解析的理论分析在数学上的困难及应用的局限性，又大大降低了基于全离散原理的纯数值方法的计算工作量。

◆ 有限条法

有线条法

有线条法是由张佑启（Cheng.Y.K）始创（1969），并经Powell、Ogden和Scordelis等人的研究和发展，已成为等截面桥梁上部结构简单又经济的半解析方法。

有线条法是一种混合法，它具有正交各向异性板分析法和有限元法的优点。有线条单元结构的组合单元是沿结构纵向分布的“条”，条间纵向用接缝连接，由于正交异性板的纵向结构和这种“条”式单元基本一致，故采用此法分析十分有效。



2.2 数值分析方法（有限元法） 概念和步骤

有限元法的基本概念

有限元法的基本思路是将一个连续求解区域分割成有限个不重叠且按一定方式相互连接在一起的子域(单元), 利用在每一个单元内假设的近似函数来分片地表示全求解域上待求的未知场函数。单元内的场函数通常由未知场函数或其导数在单元各个节点的数值和其插值函数来近似表示。这样, 未知场函数或其导数在各个节点上的数值即成为未知量(自由度)。根据单元在边界处相互之间的连续性, 将各单元的关系式集成成方程组, 求出这些未知量, 并通过插值函数计算出各个单元内场函数的近似值, 从而得到全求解域上的近似解。

有限元将一个连续的无限自由度问题变成离散的有限自由度问题进行求解。如果将区域划分成很细的网格，也即单元的尺寸变得越来越小，或随着单元自由度的增加及插值函数精度的提高，解的近似程度将不断被改进。如果单元是满足收敛要求的，近似解最后可收敛于精确解。

有限元法分析的基本步骤

- (1) 单元划分：包括节点、单元编号和坐标系的设定；
- (2) 计算单元刚度矩阵 $[k]$ ；
- (3) 形成总体刚度矩阵 $[K]$ ；
- (4) 形成节点荷载列向量 $[P]$ ；
- (5) 引入位移边界条件，形成结构刚度方程；
- (6) 求解结构刚度方程，得到基本未知量 $[\delta]$ (节点位移)的解；
- (7) 由节点位移计算单元杆端力和支座反力等其他力学量。

2.3 桥梁结构数值分析流程和内容

2.3.1 桥梁结构分析流程

- ◆ 选择程序；
- ◆ 按程序要求对结构进行数值模拟；
- ◆ 运行程序，调整参数；
- ◆ 分析计算结果，并将其可视化。

2.3.2 桥梁结构分析主要内容

 前处理阶段



 结构分析阶段



 后处理阶段



(1) 建模前期准备

- ① 结构离散图；
- ② 数据准备：节点坐标、截面特性、材料容重计算等。

(2) 几何模型的建立

- ① 输入材料数据；
- ② 输入截面信息（特性值输入、图形导入）；
- ③ 输入节点信息，建立单元；
- ④ 输入边界条件；
- ⑤ 输入荷载：自重、施工阶段荷载、二期、移动荷载等的
数据计算，预应力荷载的输入（数据准备、参数设定）。

(3) 建立施工阶段

- ① 结构组、荷载组、边界组、钢束组设置；
- ② 施工流程分析及步骤划分；
- ③ 输入施工阶段信息（体系转换）。

(4) 查看输入结果

- ① 显示及显示选项；
- ② 查询节点、单元；
- ③ 节点详细表格、单元详细表格。



二、结构分析

(1) 静力分析

(2) 施工阶段分析

(3) 反应谱分析、时程分析、屈曲分析、几何非线性分析（包括P-delta分析、大位移分析）等。

三、后处理阶段

(1) 荷载组合、结构验算

(2) 后处理功能的使用步骤

(3) 查看分析结果：① 图形查看；② 表格查看；③ 施工阶段分析结果查看。



2.4 桥梁结构分析的基本原则

- 2.4.1 桥梁结构数值分析基本原则 
- 2.4.2 结构离散原则 
- 2.4.3 材料和截面特性模拟 
- 2.4.4 边界条件模拟 
- 2.4.5 荷载模拟 

- ◆ 分析时必须根据结构的特殊性采用不同的方法进行，不同的**桥型和结构体系**具有各自独有的结构特性。
- ◆ 进行桥梁结构分析，首先必须根据**分析对象和要求**，选择恰当的数值分析模型和相应的分析程序，并对结构进行相应的力学抽象、简化和离散，然后根据计算程序的要求，将离散后的结构用相应的数据文件描述出来。合理正确的结构建模和数值模拟是桥梁结构分析成功的关键。
- ◆ 进行桥梁结构分析还必须与其施工方法紧密联系起来。任何桥梁结构的形成都有一个特殊的**施工过程**。不能简单按一次落架进行结构分析。

- ◆ 简化模型的选择 
- ◆ 结构离散原则 
- ◆ 注意事项 
- ◆ 各类桥型的结构建模 

简化模型的选择

(1) 概念设计阶段:

❖ 主要研究结构的设计参数，以求获得理想的结构布置，因此对结构内力精度要求不高，可以采用平面杆系模式。

(2) 技术设计阶段:

❖ 仅计算恒、活载作用下总体结构内力，可选用平面杆系模式。

❖ 计算空间荷载(风载、地震荷载、局部温差等)作用下的静力响应，一般选用空间杆系模式。

❖ 计算全桥构件的应力分布特性，可选用空间板壳、块体和梁单元的组合模式。

❖ 研究结构中特殊部件的应力集中现象，可进行局部应力有限元分析。

❖ 选取力学模式要力求简单、合理，并能抓住主要矛盾。

结构离散原则

对于杆系结构，节点和单元的划分应遵循以下原则：

- (1) 结构的定位点应设置节点；
- (2) 按照施工过程，分阶段施工的结构自然分块点应该设置节点；
- (3) 截面突变处应设置节点；
- (4) 对较长的自然分块，应该适当细分；
- (5) 斜拉索、主缆、吊杆、预应力索端点截面一般应设置节点；
- (6) 控制截面内力、位移所在位置处应设置节点；
- (7) 永久支承和临时支承部位应设置节点。

各类桥型的结构离散

(1) 梁桥

(2) 拱桥

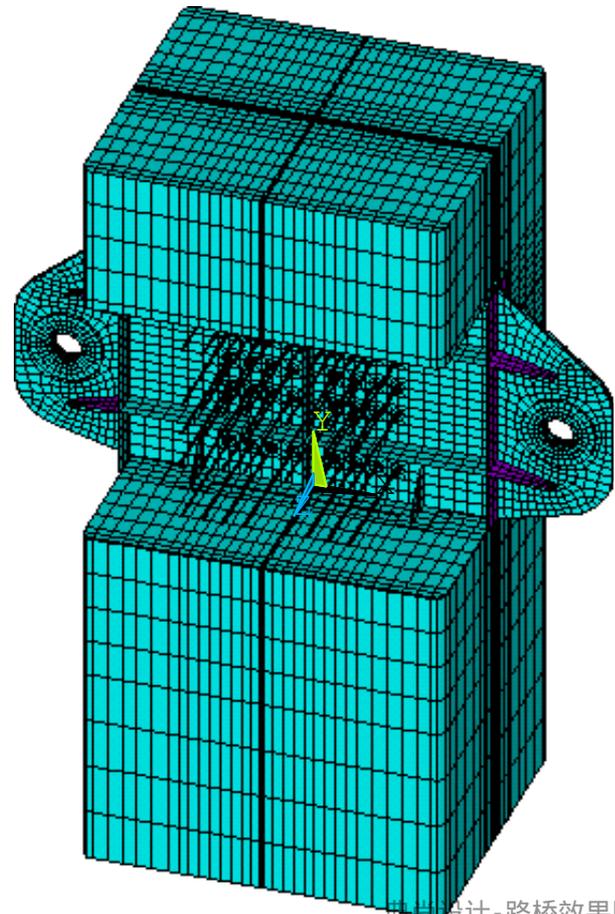
(3) 斜拉桥

(4) 悬索桥

(5) 其它桥型

注意事项

- (1) 处理好连续处的自然分割问题；
- (2) 注意几何形状的近似和过渡圆角的处理；
- (3) 注意单元形态的选择问题。



材料特性:

弹性模量、泊松比、材料容重、温度线膨胀系数、材料本构关系（非线性分析）。

截面特性:

- ◆ 梁单元: 面积、抗弯惯性矩、抗扭惯性矩、截面抵抗矩、剪切面积、截面形心、截面形心距上下缘（左右腹板）距离、剪切中心、扭转中心
- ◆ 板壳单元: 单元厚度
- ◆ 实体单元: 不需要定义

为正确获得结构行为，最重要的因素之一是确定结构构件的材料特性和截面特性。

- ◆ 对于三维实体单元，材料本构关系是唯一要求定义的信息。
- ◆ 对于杆单元、梁单元和板壳单元，需要同时定义材料特性和截面特性。
- ◆ 当以结构位移和变形为目标时截面特性的准确模拟非常关键。
- ◆ 非线性分析中如果使用实体单元，一般采用试验验证的材料本构关系。而对梁-柱单元，就必须首先通过试验或详尽的理论分析来得到构件性能，才能用简化的非弹性模型模拟预期的构件行为。

各类桥型材料特性和截面特性

(1) 梁桥

(2) 拱桥

(3) 斜拉桥

(4) 悬索桥

(5) 其它桥型 (组合截面)

结构分析成功的另一个关键步骤是正确描述结构系统的边界条件。边界条件分为**力的边界条件**和**位移边界条件**。

对于从整体结构中取出的局部模型，其力的边界条件是指截开断面处的内力或应力。而且要考虑结构其余部分的影响。

对于杆系单元模型，内力是以集中力的形式作用的，而对于采用块体或板壳单元的空间模型，应将内力转化为等效均布力作用在截面上。

各类桥型的边界条件

- (1) 梁桥（橡胶支座与桥墩）
- (2) 拱桥
- (3) 斜拉桥
- (4) 悬索桥
- (5) 局部分析

各种恒载、使用荷载，如汽车、风、温度、施工以及其它荷载可由一系列施加在结构模型上的静力荷载工况来模拟。

◆ 施工荷载主要有作用在已建结构上的临时堆放荷载和挂篮等，可用相当的集中力或分布荷载来模拟。

◆ 汽车荷载要先计算影响线，找出最不利加载位置，然后按规定的车距和轴距加适当的集中力或等效分布荷载。

◆ 静风荷载是一种与结构形状、桥位风速以及桥体结构的高度有关的荷载。一般计算时可根据桥梁抗风设计规范简化成等效静分布荷载施加于结构进行计算。

◆ 船撞和流冰荷载主要作用于桥墩或桥塔，按静力考虑时也是用相应的等代荷载来计算。

-  结构离散
-  材料和截面特性
-  边界条件
-  荷载

梁 桥

斜拉桥

悬索桥

拱 桥

局部分析

- (1) 局部分析模型的合理选取
 - 模型范围的选取；
 - 单元及单元形状的选取；
 - 连续处的自然分割问题以及几何处理；
- (2) 局部模型等效荷载
- (3) 边界条件

