

您现在的位置: 首页 >> 四川建筑杂志 - 精选文章

## 用桁架模型对斜拉桥桥面板断面进行面内非线性静态分析的简化方法

(所属杂志: 此文章来自原稿) 发布时间: 2010-09-01 已阅读: 1266

肖婧

(兰州交通大学土木工程学院, 甘肃兰州730070)

**摘要:** 梁的主要要素是用显示相同轴向和弯曲刚度的平面桁架来模拟的。用增量荷载法对梁结构的平面桁架模型采用非线性静态分析, 该分析的计算机程序已研发出来。几何非线性归因于大位移影响大的轴力, 对相关的变形桁架用平衡方程解决。拟用桁架模型和计算机程序显示简支梁的变形和反力, 可以把它们应用到典型的中型斜拉桥桥面板断面的分析中。使用多索模型的时候, 模型的每个索代表实际桥的一个索, 理想模型可以精确地预测使用细长梁板断面的桥面。拟用桁架模型和计算机程序被证明是可靠的, 可以用在斜拉桥的初步设计中。

**关键词:** 斜拉桥; 平面桁架模型; 非线性静态分析; 多索模型

**中图分类号:** TU311.1      **文献标识码:** A

斜拉桥的静态分析显示, 其主要有以下三个非线性关系: 1. 由梁的大位移引起的轴向力的几何非线性; 2. 由缆索的自重引起几何非线性;<sup>[1]</sup> 3. 在受压状态下由于缆索松弛产生的材料非线性。<sup>[2]</sup> 现有的斜拉桥结构分析的各种方法, 主要基于有限单元的离散化。<sup>[2-4]</sup> 可以分离和分析连续结构、任意形状的结构、任意约束和荷载状态。

### 1 拟用桁架模型



四川建筑杂志

四川建筑杂志

精选文章

杂志简介

广告刊例

编委会名单

投稿须知



站内搜索

请输入关键字

搜索

在平面结构分析中，平面坐标系中一个独立的简单局部刚度矩阵可表达为：

$$k_i = k_e + k_g = \frac{EA}{l_0} \bar{c}\bar{c}' + \frac{N}{l} I_2 = \frac{EA}{l_0} \begin{pmatrix} c_x^2 & c_x c_y \\ c_x c_y & c_y^2 \end{pmatrix} + \frac{N}{l} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

这里是  $k_e$  弹性刚度， $k_g$  是几何刚度， $E$  是弹性模量， $A$  是断面面积， $l_0$  为未变形的杆的长度， $\bar{c} = (c_x, c_y)$  是杆轴的方向余弦， $N$  为轴向压力（规定拉力为正）， $l$  是杆的长度。

桁架的整体刚度矩阵写作： $K_G = B \text{diag}(k_k) B^T \quad i = 1 \dots n_b$

这里  $B = (B_{ik}) \quad i = 1 \dots n_n, k = 1 \dots n_b$  表示桁架的布尔连合矩阵， $n_n, n_b$  分别表示节点和杆的号数。如果节点  $i$  是杆件  $k$  的起点，则矩阵  $B$  的任何元素  $B_{ik}$  等于-1，如果节点  $i$  是杆件  $k$  的终点，则  $B_{ik}$  等于+1，如果节点不在杆  $k$  上，则  $B_{ik}$  等于0。

用 Fortran 指令的计算机程序进行平面桁架模型增量荷载非线性静态分析里，桁架的杆可由恩斯特等价弹性模量  $E_{eq}$  提出，因为挠度由自重产生。在增量荷载中，用快速迭代法来确定每个索的等价弹性模量  $E_{eq}$ 。

## 2 模型杆件的测定

将模拟梁单元体图 1 (a) 为矩形平面桁架单元体图 1 (b)。在考虑纯弯曲情形下，梁单元体图 1 (c)， $\Delta\phi(\text{rad}) = M l / EJ$  其中  $J = bd^3/12$ ，桁架单元体图 1 (d)  $\Delta\phi(\text{rad}) = 2\Delta l / d$ ，斜杆和横杆的内力为零，这里  $\Delta l = s_1 l / E A_1, s_1 = M / d$ ，上述方程联立得  $A_1 = bd/6$ ，确保使桁架单元体和对应的梁单元体有相同的弯曲刚度，同时梁上出现了应力极值  $\sigma = \pm M / W, W = bd^2/6$ ，相当于出现在桁架单元体两个纵向杆的轴向应力  $\sigma = \pm S_1 / A_1 = \pm (M/d) \times (bd/6)$ 。

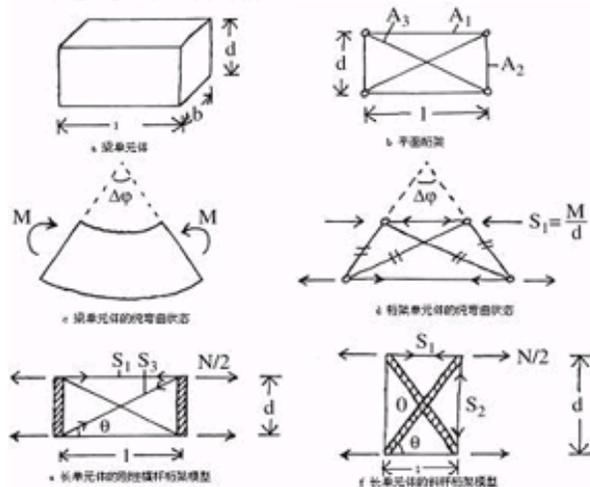


图 1 平面桁架模拟单元体

为提供具有梁轴向刚度的桁架模型，这里给出两个简单的替换技巧：第一个是基于桁架单元体的刚性横杆的假设，图 1 (e) 它适用于长单元体；第二个是基于斜杆的假设，图 1 (f) 适用于短单元体。

在刚性横杆的情况下图 1 (e)，从水平方向的平衡方程我们得到， $s_1 + s_3 \cos\theta = N/2$ ，由胡克定律  $s_1 = E A_1 \Delta l/l, A_1 = bd/6$ ， $N = Ebd\Delta l/l$   $s_3 = E A_3 \Delta l_3/l_3$  几何关系  $\Delta l_3 = \Delta l \cos\theta$ ， $l_3 = l/\cos\theta$ ，联解方程得到  $A_3 = bd /3 \cos^3 \theta$ 。

假定横杆的实际无限刚度  $E A_2/d$  比斜杆的大 100 倍，给定  $A_2 = 100 A_3 \sin\theta$ 。在刚性斜杆的情形下图 1 (f)，从对角线的旋转关系，我们得到： $\Delta\varphi = \frac{\Delta d}{l/2} = \frac{\Delta l}{d/2}$  (1)

在平衡时关于 O 点我们有  $(N/2 - s_1)d/2 = s_2 l/2$ ，由胡克定律得  $N = Ebd \Delta b/l$ ， $A_1 = bd/6, s_2 = E A_2 \Delta d/d$ ，其中  $\Delta d = \Delta l \times l/d$ ，从 (1) 式得到  $A_2 = \frac{bd}{3} \left(\frac{d}{l}\right)^3 = \frac{bd}{3} \text{tg}^3 \theta$ 。

假定斜杆的实际无限轴向刚度  $E A_3/l_3$  比横杆的大 100 倍，我们给定  $A_3 = 100 A_2 / \sin\theta$ 。在以上公式里，两个交替模型中，横断面  $A_1, A_2$  的确定，指出了刚性横杆模型为短单元体给出了较大的横截面面积，而刚性斜杆模型为长单元体给出较小的横截面。另一方面， $l/d > 1$  时，第二种模型有泊松比  $\mu = \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l} = \left(\frac{l}{d}\right)^2 > 1$  见 (1) 式不满足平面弹性问题。

由以上理由可推出，对于  $l/d > 1$  的长单元体，可以用具有刚性横杆的第一个模型，反之，对于  $l/d \leq 1$  的短单元体，可以用具有刚性斜杆的第二个模型。

### 3 试验数据

梁结构的拟用平面桁架模型和非线性静态分析的计算机程序将应用于中型尺寸的典型斜拉桥。有两个塔索，中间跨径大约 200m，而两侧跨径每侧大约 100m，采用薄板式梁板。其中对称桥的一半如图 2。

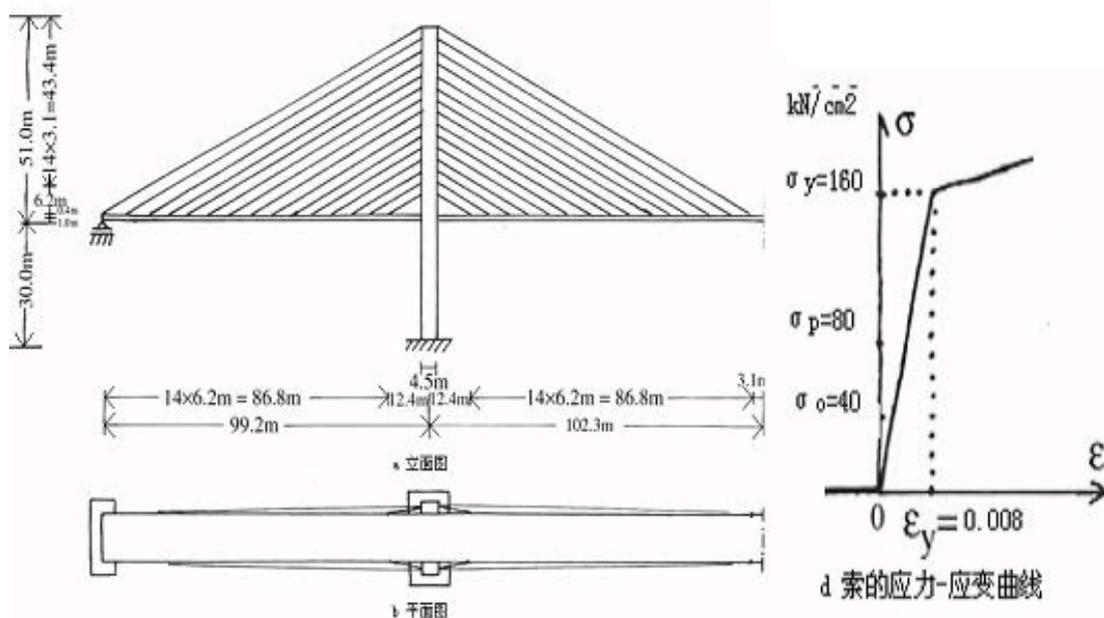


图 2 典型中型对称斜拉桥的试验数据

索塔的高度板下30m,板上大约51m。斜拉索平行成竖琴式布设,中间跨一有15个,每个边跨一侧有15个,均匀分布,索塔和梁板是由混凝土浇筑,其弹性模量 $E=2000\text{kN/cm}^2$ 和比重 $\rho=24\text{kN/m}^3$ ,而斜拉索是由高强钢绞线制成(屈服应力),弹性模量 $E=20000\text{kN/cm}^2$ ,比重 $\rho=78.5\text{kN/m}^3$ 。

3. 斜拉索的初始应力应变 曲线如图2 (d)。

每个索塔是由两个矩形断面 $3.0\text{m}\times 4.5\text{m}$ 的竖向支柱和两个相同面积的横梁构成。如图2 (c) 桥的侧面图所示,梁板的厚度仅为 $0.4\text{m}$ 宽度为 $13.0\text{m}$ ,梁板和索塔铰接在一起。

#### 4 离散化多索模型

在对称桥的一半中考虑使用详细多索模型图3,模型中的每个索代表实际中的索。下面的断面图显示了沿梁有很小的弯矩值和变形值,这就容许使用薄板断面的桥面板。

图3的桁架模型有精确的100个节点,这就意味着增加荷载100步,计算机必处理100次一个 $200\times 200$ 的代数平衡方程。对于桥面板长单元体图3 (c),还有斜索下面索塔的较低部分,以及刚性横杆的假设,都被用作杆的断面的确定。而对于拉索范围内索塔的上部部分的短单元体图3 (b) 则使用刚性斜杆的假设。图3 (d) 所示,用较大比例尺寸描述在桁架模型中塔梁是如何铰接的。

索塔的高度板下30m,板上大约51m。斜拉索平行成竖琴式布设,中间跨一边15个,每个边跨一侧有15个,均匀分布,索塔和梁板是由混凝土浇筑,其弹性模量 $E=2000\text{kN/cm}^2$ 和比重 $\rho=24\text{kN/m}^3$ ,而斜拉索是由高强钢绞线制成 $\sigma_y = 160\text{ kN/cm}^2$ (屈服应力),弹性模量 $E=20000\text{kN/cm}^2$ ,比重 $\rho=78.5\text{kN/m}^3$ 。斜拉索的初始应力应变 $\sigma-\varepsilon$ 曲线如图2 (d)。

每个索塔是由两个矩形断面 $3.0\text{m}\times 4.5\text{m}$ 的竖向支柱和两个相同面积的横梁构成。如图2 (c) 桥的侧面图所示,梁板的厚度仅为 $0.4\text{m}$ 宽度为 $13.0\text{m}$ ,梁板和索塔铰接在一起。

#### 4 离散化多索模型

在对称桥的一半中考虑使用详细多索模型图3,模型中的每个索代表实际中的索。下面的断面图显示了沿梁有很小的弯矩值和变形值,这就容许使用薄板断面的桥面板。

图3的桁架模型有精确的100个节点,这就意味着增加荷载100步,计算机必处理100次一个 $200\times 200$ 的代数平衡方程。对于桥面板长单元体图3 (c),还有斜索下面索塔的较低部分,以及刚性横杆的假设,都被用作杆的断面的确定。而对于拉索范围内索塔的上部部分的短单元体图3 (b) 则使用刚性斜杆的假设。图3 (d) 所示,较大比例尺寸描述在桁架模型中塔梁是如何铰接的。

图3 桥的离散化 (单位: m)

### 5 加载情况

桥梁动荷载主要由交通量产生, 根据节点沿桥面板轴线均匀分布的竖向荷载  $P = 44 \text{ kN/m}$ 。假设沿桥面板的四个单跨: 两个边跨和中间跨的两半。沿着这四个单跨, 布设或消除动荷载, 我们得到  $2^4 = 16$ 种可能的荷载组合, 如图4所示。

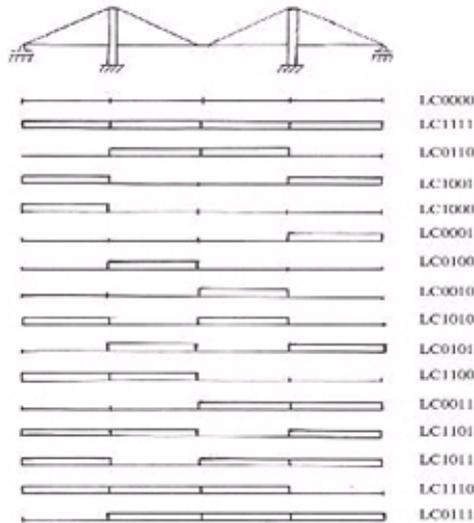


图4 加载情况 (16种可能的荷载组合)

图4中, 前四种荷载情况: LC0000(只有永久荷载), LC1111(沿整个桥面板长度布满活载), LC0110(活载仅在主跨上), 和LC1001(活载在边跨上), 这荷载关于桥面板主跨中心对称轴对称。因此, 对于这些荷载我们仅分析桥的一半。

剩余的12种非对称荷载, 我们只需分析6种。因为这些荷载中的每一种也给定了一种共轭荷载(关于桥的对称轴对称)。

由于非线性, 对称荷载的叠加和荷载的反对称部分是无效的, 所以以上六种非对称荷载必定涉及整座桥。

整个桥的混合索桁架模型有198个节点。因此, 逐渐加载100步, 我们必须处理100次巨大的代数平衡方程组  $396 \times 396$ 。

### 6 结束语

(1) 用矩形平面桁架模拟梁单元体, 推荐简单的公式来确定杆件的横截面面积, 以便使桁架单元体像梁单元体一样, 有相同的轴向和弯曲刚度。该桁架模型第一次用在简支梁的静态分析中, 关于梁的变形和反力的测定有了令人鼓舞的结果。

(2) 用简短的Fortran程序, 对附加荷载的一个梁结构的平面桁架模型做非线性静态分析。

(3) 把拟用桁架模型和计算机程序应用到有两个索塔的中型尺寸的典型斜拉的非线性静态分析里。

(4) 多索桁架模型用来模拟如上所述的斜拉桥, 模型中的每个索代表实际桥各自的索。

(5) 拟用多索桁架模型有许多节点, 目前使用的半桥有100个, 全桥198个节点, 非对称荷载的分析必须涉及整座桥, 因为非线性, 对称荷载和反对称荷载的叠加是无效的。

