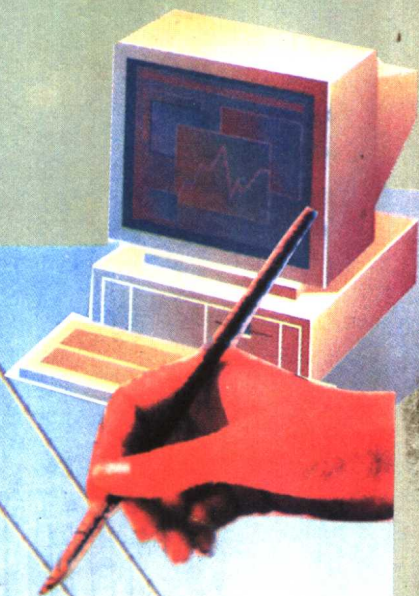


吊桥设计技术

沈华春



6700

人民交通出版社

吊桥设计技术

Diaoqiao Sheji Jishu

沈 华 春

人民交通出版社

内 容 提 要

本书从日本近期出版的有关吊桥设计与施工的规范手册中摘译或编译了其中吊桥设计理论、结构设计、抗风和抗震设计等内容,并附有设计详图可供桥梁设计、施工和相关院校师生参考。

吊桥设计技术

沈 华 春

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号)

各地新华书店经销

通县马头印刷厂印刷

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张: 3.75 插页: 2 字数: 84 千

1995 年 12 月 第 1 版

1995 年 12 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001—3650 册 定价: 6.00 元

ISBN 7-114-02230-1

U · 01536

前 言

近些年来,吊桥发展迅速,世界各国介绍吊桥的专著与论文颇为多见,而对我国工程师们感兴趣的吊桥设计中的问题及有关规定则资料不多。本书从日本《新体系土木工学第42卷》(日本土木协会编,1986年)中编译了吊桥设计理论、结构设计、抗风和抗震设计部分;从日本《桥梁设计、施工手册》(桥梁设计施工手册编纂委员会编)中摘译了吊桥设计及有关问题;从《道路桥规范和解说》(日本道路协会编,1990年)中摘译了钢桥篇中的缆索部分。书中附有大量详图,便于学习和理解,可供我国公路桥梁设计和施工人员参考。

本书在选材过程中得到殷湛华副研究员的大力帮助,在吊桥抗风和抗震设计部分的编译过程中,得到万国朝高级工程师的大力支持和帮助,在此深表感谢。

作 者

目 录

一、吊桥设计理论	1
二、吊桥结构设计.....	16
三、吊桥抗风设计.....	46
四、吊桥抗震设计.....	74
五、吊桥设计和有关问题.....	88
六、日本《道路桥规范和解说》对缆索的规定	101

一、吊桥设计理论

(一)吊桥的荷载和力学特性

作用于吊桥的荷载可分为面内荷载、面外荷载以及扭转荷载三种。

1. 面内荷载——是作用在包括桥轴的垂直面内的荷载，除了由于静荷载、活荷载等垂直荷载以及风荷载、地震等影响产生的桥轴方向的荷载外，还有温度变化影响、锚碇移动等产生的荷载。

2. 面外荷载——是由风荷载、地震影响产生的，作用于垂直于桥轴方向的荷载，也叫作横向荷载。

3. 扭转荷载——由以上两种荷载的偏载所产生的力，或是扭转力矩。设计中，动态要素比静态要素重要。

本来，由上述荷载产生的变形不是孤立的。在进行吊桥应力应变分析时，应考虑产生变形的复合效果，严格地说是应该进行立体分析的。然而，严密的分析只是使设计变得复杂。一般对每个荷载的效应分别进行分析是不成问题的，所以在实用上常用单独分析然后再叠加的设计理论。

吊桥理论分析的主要特色是分担静荷载和活荷载的构造体系不同。即，加劲梁闭合产生刚性前的静荷载全部加在缆索上，按加劲梁不产生应力来进行设计。其结果是缆索的形状只是在缆索架设时和吊桥完成时变化大，需要进行缆索的平衡

分析。另外,因为静荷载全部由缆索承担,竣工时缆索上作用有大的张力,这种张力在活荷载作用时具有重要作用。

(二) 静荷载作用时的理论

竣工时作用在缆索上的静荷载,除缆索自重外,还有缆索套箍、吊杆(索)、加劲梁、桥面板等,这些静荷载与缆索的自重相比大许多倍,同一跨径内可以看成是均匀分布的。这样把加在缆索上的自重 W 假定在同一跨径内水平方向不变,此时缆索的形状为抛物线,按下式求出:

$$y = \frac{W}{2H_w}x(l-x) + \frac{y_l - y_0}{l}x + y_0 \quad (1-1)$$

H_w 是体系完成时缆索张力的水平分力, y_0 和 y_l 为跨径两端的纵距,可以作为已知量。求 H_w 时,需要后一个条件,但要通过确定垂度 f 得到。垂度定义为连接缆索两端的直线和缆索抛物线的垂直距离 $\bar{y}$ 的最大值(图 1-1)。

$\bar{y}$ 可用式(1-2)求出,最大值 f 发生在跨中($x=l/2$),于是, H_w 可由式(1-3)求出。

$$\bar{y} = \frac{W}{2H_w}x(l-x) \quad (1-2)$$

$$H_w = \frac{Wl^2}{8f} \quad (1-3)$$

通常索塔在缆索拉力方向的刚性与竣工时缆索的抗拉伸刚性相比小到可以忽略,缆索张力 H_w 对各跨径可作为常数来设计,因此,不同的 2 个跨径 i 及 j 的垂度 f_i 及 f_j 之间存在着以下关系:

$$\frac{f_i}{W_i l_i^2} = \frac{f_j}{W_j l_j^2} \quad (1-4)$$

此处, W_i 、 l_i 表示跨径 i 的 W 和 l 。

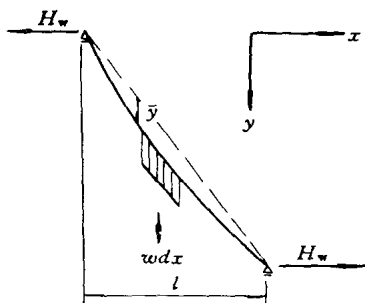


图 1-1

由此,如确定了一个跨径(通常为中央跨径)的垂度,那么其它跨径的垂度可由式(1-4)求出。

$n=f/l$ 称作垂跨比。如使用 f, n 等,式(1-1)及式(1-2)可写成以下形式:

$$\left. \begin{aligned} y &= \bar{y} + \tan\alpha x + y_0, \bar{y} = \frac{4f}{l^2} x(l-x) \\ \bar{y} &= \frac{4n}{l} x(l-x) \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

此处, $\tan\alpha = (y_1 - y_0)/l$ 是连接缆索两端的直线的斜率。缆索的倾斜角 $\varnothing$, 可对 y 微分由下式得出, 其最大值产生在两端 $x=0$ 或 $x=l$ 处。

$$\varnothing = \frac{4n}{l}(l-2x) + \tan\alpha \quad (1-6)$$

$$\varnothing_0 = 4n + \tan\alpha, \quad \varnothing_l = -4n + \tan\alpha$$

缆索的拉力 T 及其垂直分力 V , 分别由下式求出。

$$T = H_w \sqrt{1 + \varnothing^2} \quad (1-7)$$

$$V = H_w \varnothing \quad (1-8)$$

其最大值产生在 $\varnothing$ 最大的时候。

$L, \Delta L$ 及 L_0 由下式求出:

$$\begin{aligned}
 L &= \int_{\phi_0}^{\phi_1} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = \int_{\phi_0}^{\phi_1} \sqrt{1 + \phi^2} \left(\frac{dx}{d\phi}\right) d\phi \\
 &= \frac{l}{16} \left\{ \phi_0 \sqrt{1 + \phi_0^2} + \log(\phi_0 + \sqrt{\phi_0^2 + 1}) \right. \\
 &\quad \left. - \phi_1 \sqrt{1 + \phi_1^2} - \log(\phi_1 + \sqrt{\phi_1^2 + 1}) \right\} \quad (1-9)
 \end{aligned}$$

(三)垂直方向的理论

1. 弹性理论 该理论与用于超静定结构物分析的应力法相同。如果选择缆索拉力的水平分力的增量 H_p 作为超静定赘余力,那么为决定其超静定赘余力,要采用缆索水平拉伸的平衡条件。

目前,把悬吊材料看作是连续分布的,根据活荷载的荷载,假定缆索拉力的水平分力从 H_w 变成 $H_w + H_p$,那么新加在悬吊材料上的每单位长的垂直力 q_H 可根据缆索的形式由下式求出:

$$q_H = -\frac{d^2 y}{dx^2} H_p \quad (1-10)$$

缆索为抛物线时,变为下式:

$$q_H = \frac{8f}{l^2} H_p, \text{ 或 } q_H = \frac{1}{r} H_p \quad (1-11)$$

此处, $r = l^2/8f$ 是缆索的曲率半径。

这里把加劲梁看成是承受规定的荷载 $P(x)$ 和超静定力 H_p 引起的等分布荷载 q_H 的梁进行分析,因此,如果求出了 H_p ,那么根据简支梁的受力情况就可以求所需的截面诸量。

根据式(1-10)的积分或图 1-2 的平衡条件,加劲梁的弯矩由下式求出。

$$M = m_p - y H_p \quad (1-12)$$

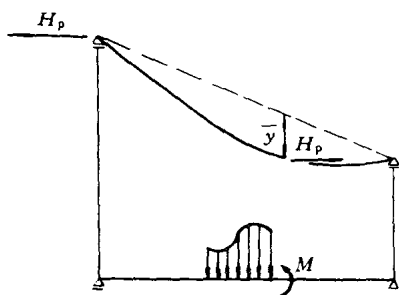


图 1-2

式中, m_p 为承受 $P(x)$ 荷载的简支梁的弯矩, $\bar{y}$ 由式(1-5)求出。

2. 挠度理论(薄膜理论) 该理论, 有关缆索垂直方向的平衡, 除了按变形后的形状求平衡外, 其他与弹性理论相同。即悬吊材料符合连续分布、不伸缩的假定。考虑变形后的平衡时, 由于变形新加在吊索上的每单位长度的拉力 q_H 可用下式代替弹性理论的式(1-10)求出。

$$q_H = -(H_w + H_p) \frac{d^2 \eta}{dx^2} - \frac{d^2 y}{dx^2} H_p \quad (1-13)$$

式中 q_H 与加劲梁的挠度 η 有关, 不是均布的。

由此, 承受所规定的荷载 $P(x)$ 和 q_H 的加劲梁的基础微分方程式 $H_w + H_p = H_t$ 可以用下式表示:

$$EI \frac{d^4 \eta}{dx^4} - H_t \frac{d^2 \eta}{dx^2} = P(x) - \frac{d^2 y}{dx^2} H_p \quad (1-14)$$

加劲梁的弯矩 M 用下式求出:

$$M = M_p - H \bar{y} - H_t \eta \quad (1-15)$$

在式(1-14)及式(1-15)中, 有 H_t 的项是弹性理论中不包含的项, 表现出了较大的差异。

把缆索的初始形状作为抛物线, 假定加劲梁的 EI 为常

数,对式(3-14)也进行积分,令 $P(x)=q$ 得到下列一般解:

$$\eta = C_1 \cosh \mu x + C_2 \sinh \mu x + \frac{1}{2H_1} \left(\frac{H}{r} - q \right) x^2 + C_3 x + C_4 \quad (1-16)$$

式中, C_1, C_2, C_3 , 及 C_4 为积分常数, r 是缆索的曲率半径。

$$\mu = \sqrt{\frac{H_1}{EI}} = \sqrt{\frac{H_w + H_p}{EI}} \quad (1-17)$$

式(1-16)中,如果给出 4 个 $x=0$ 及 $x=l$ 的边界条件,那么即可得出方程的解。式(1-17)中的 H_p 是未知的,式(1-15)及式(1-16)的形式,叠加的法则不成立。

在 H_1 中的 H_p 项看来较小,实用上不管荷载如何,在把 H_1 作为常数进行计算的方法中,有引人注目的线性挠度理论。此时,式(1-13)的 H_1 和 H_p 成为独立的,基本形式为线性的,可以应用影响线。各部分构件按危险状态进行设计。

在线性挠度理论中,把 H_p^* 值假定为常数的误差问题,按 Peery 等人对设计值的内插法进行的研究,现用以下方法确定。

首先,把假定值 H_p^* 确定为适当的 H_{p1} ,使用线性理论的

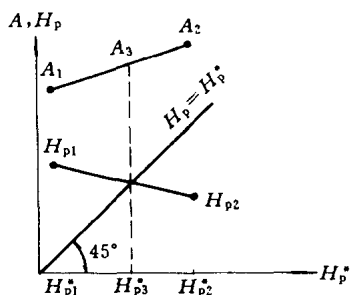


图 1-3

影响线,求任意着眼量 A 的最大值 A_1 ,同时求出最大值 A_1 的荷载状态下 H_p 的值 H_{p1} ,然后,把 H_p^* 假定为其他的 H_{p2} 值,同样地,求出相应于 H_{p2} 的 A_2 及 H_{p2} 。假定在图 1-3 中连接 H_{p1} 和 H_{p2} 的直线和直线 $H_p = H_p^*$ 的交点为 H_{p3} ,求的量 A 的设计最大值

在连接 A_1 和 A_2 的直线上, 对应于 $H_p^* = H_{p_3}^*$ 的 A_3 也可求出。

3. 代数的挠度理论 最近, 由于电子计算机的大型化、高速化, 以及数值计算方法的改良, 考虑以前因格点数多, 不能用于具有延伸性的悬吊材料的吊桥分析, 作为加劲梁的截面性能, 在使其截面构成均衡变化方面, 正在尝试把吊桥的基本式用代数表示的挠度理论和把吊桥变位作为未知数, 称作变形法的分析方法。

变形分析法与代数挠度理论相比, 联立方程式的元增加了数倍, 在计算时间和容量方面十分不利。但因以广泛的任意构造为对象, 对斜吊杆形式、塔架拉索形式等变化的吊桥, 具有可以适用的优点。

现在在吊桥设计计算中, 至少要均衡地考虑缆索垂直变形, 这一点已成为常识。把在不限于缆索垂直变形的任意方向, 考虑变形后的平衡条件理论称作有限变形理论。

(四) 垂直于桥轴方向的力分析

对于吊桥垂直于桥轴方向平衡的基本考虑方法, 是把缆索和加劲梁分开, 使吊索拉力的水平分力成为超静定力作用在其间。如图 1-4 所示, 在缆索上作用着荷载 q_c , 加劲梁上作用着荷载 q_t 时, 如把缆索和加劲梁分离考虑, 则表示为下式:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{作用于缆索的外力} & W_c = q_c + q_h \\ \text{作用于加劲梁上的外力} & W_t = q_t - q_h \end{array} \right\} \quad (1-18)$$

q_h 是吊索拉力的水平分力。假定加劲梁及缆索的挠度分别为 η 及 v , 吊索长为 h , 那么 q_h 由下式近似确定:

$$q_h = \frac{W}{h}(\eta - v) \quad (1-19)$$

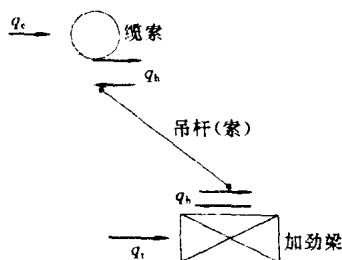


图 1-4

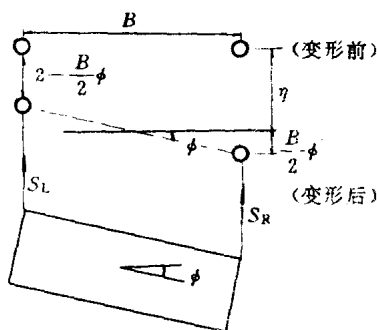


图 1-5

假定吊索为连续分布, q_c 、 q_t 等为连续量, 把式(1-18)和式(1-19)并入梁及轴力构件的基本公式, 得到下列联立微分方程:

$$\left. \begin{aligned} -H_t \frac{d^2 v}{dx^2} &= q_c + \frac{W}{h}(\eta - v) \\ EI \frac{d^4 \eta}{dx^4} &= q_t - \frac{W}{h}(\eta - v) \end{aligned} \right\} \quad (1-20)$$

式中, H_t 为缆索拉力的水平分力, EI 是加劲梁的抗弯刚度。因为 W/h 不是常数, 在解的时候, 过去是求出式(1-20)的解后, 再用验算式(1-19)进行验算 q_h 的反复算法, 最近, 一般是用电子计算机求解的方法。

(五) 扭转力分析

吊桥有偏心荷载作用时, 以全方向的变形表现其状态是复杂的, 其解不容易求出。因此, 为了把该问题简单化, 荷载限于扭转力矩, 作为加劲梁总体, 根据由于扭转刚性和左右两面缆索的吊索拉力差产生的扭矩考虑抵抗力。

另外, 为了便于计算, 假定加劲梁的剪切中心和形心一

致,那么可以忽略吊索的拉伸。最近正在介绍利用电子计算机的高度严密解法。在设计时,采用以前的理论就足够了。

1. 解析方法

假定扭转荷载使加劲梁产生如图 1-5 所示的扭转角 $\varnothing$, 由此在左右缆索上产生挠度 v_L 和 v_R , 假定梁截面保持不变, v_L 和 v_R 可由下式求出:

$$v_L = \eta - \frac{B}{2}\varnothing, \quad v_R = \eta + \frac{B}{2}\varnothing \quad (1-21)$$

式中, η 为加劲梁的垂直挠度; B 为缆索间隔。

缆索挠度 v 和吊索拉力增量的关系与垂直方向的情况相同, 对于左右缆索, 由下式给出:

右缆索为

$$S_R = -(H_w + H_v + H_R) \frac{d^2 v}{dx^2} - \frac{d^2 y}{dx^2} (H_v + H_w) \quad (1-22)$$

式中, H_w 为静荷载时缆索的水平拉力, H_v 及 H_R 分别为垂直变形和扭转变形引起的缆索水平拉力的增量。 H_w 及 H_v 为已知。

对于左缆索, S_L 、 H_R 、 v_R 可分别变为 H_L ($= -H_R$)、 v_L 。把式(1-21)中的 v_L 及 v_R 代入 S_R 及 S_L 式中, 如求 S_L 和 S_R 的差引起的扭矩, 则成为下式:

$$M_c = -\frac{R^2}{2} (H_w + H_v) \frac{d^2 \varnothing}{dx^2} - BH_R \frac{d^2}{dx^2} (y + \eta) \quad (1-23)$$

因为 η 比 y 小, 可以忽略。如把 M_c 代入简支梁的弯曲扭转基本公式, 则得出以下吊桥的扭转基本公式:

$$EC_w \frac{d^4 \varnothing}{dx^4} - \left(GK + \frac{H_w + H_v}{2} B^2 \right) \frac{d^2 \varnothing}{dx^2} = mt - \frac{B}{r} H_R \quad (1-24)$$

式中, EC_w 是弯扭刚性, GK 是扭转刚性, m_i 是扭矩荷载, r 是缆索的曲率半径。

缆索的方程式按左右缆索拟定, 得出以下公式:

对于右、左缆索, 可以把 H_p, v_R 分别变为 H_L, v_L , 由 $H_L = -H_R$ 得出下式:

$$(H_v + H_R) \sum \frac{L_s}{E_c A_c} - \sum \frac{1}{r} \int v_R dx = 0 \quad (1-25)$$

$$2H_R \sum \frac{L_s}{E_c A_c} - \sum \frac{B}{r} \int \varnothing dx = 0 \quad (1-26)$$

对于两铰加劲梁吊桥, 在支点处的边界条件是 $\varnothing = \varnothing'' = 0$ 。对于上述基本公式, 在垂直变形的薄膜理论中, 也可利用把 η 放在 $\varnothing$ 中的形式, 用同样的计算方法求出缆索方程式边界条件。

2. 代数方法 基本考虑方法与在垂直变形及横向变形中的一样。梁扭转的基本微分方程式如下:

$$EC_w \frac{d^4 \varnothing}{dx^4} - GK \frac{d^2 \varnothing}{dx^2} = m_i \quad (1-27)$$

把上列方程作为吊索之间不作用 m_i 的情况求解。在吊索之间只相距 λ 的相邻 3 点之间, 如用扭转角 $\varnothing$ 、弯曲扭矩 M_w 表示扭转率 $\varnothing'$ 的连续性, 得出如下公式:

$$\begin{aligned} a_i M_{w,i-1} + (b_i + b_{i+1}) M_{wi} + a_{i+1} M_{w,i+1} \\ = -(\varnothing_{i-1} - 2\varnothing_i + \varnothing_{i+1}) \end{aligned} \quad (1-28)$$

$$\text{式中 } a_i = \frac{2 \sinh \mu_i \lambda - \mu_i \lambda}{2 GK_i \sinh \mu_i \lambda}, \quad b_i = \frac{\mu_i \lambda \cosh \mu_i \lambda - \sinh \mu_i \lambda}{GK_i \sinh \mu_i \lambda}$$

$$\mu_i = \sqrt{\frac{GK_i}{EC_{wi}}} \quad (1-29)$$

作用在加劲桁架结点上的扭转荷载 M_i 和来自缆索的附加扭

矩 M_{ci} , 根据结点的平衡得出下式:

$$M_{ci} - M_i = \frac{GK_i}{\lambda} \varnothing_{i-1} - \frac{GK_i + GK_{i+1}}{\lambda} \varnothing_i + \frac{GK_{i+1}}{\lambda} \varnothing_{i+1} + \frac{1}{\lambda} (M_{w,i-1} - 2M_{wi} + M_{w,i+1}) \quad (1-30)$$

M_{ci} 与前面所述的吊索拉力差产生的扭矩一样由下式求出。

$$M_{ci} = - \frac{H_w + H_v}{2\lambda} B^2 (\varnothing_{i-1} - 2\varnothing_i + \varnothing_{i+1}) + \frac{B\lambda}{r} H_R \quad (1-31)$$

对于一定的区间, GK 可以消去 $\varnothing_i$ 。把式(1-30)及式(1-31)代入式(1-28), 即可得到以下吊桥的三联扭转力矩方程:

$$(a_i - c)M_{w,i-1} + (b_i + b_{i+1} + 2c)M_{wi} + (b_{i+1} - c)M_{w,i+1} = c\lambda M_i - \frac{c\lambda}{r} BH_R \quad (1-32)$$

式中
$$c = \frac{1}{GK + B^2(H_w + H_v)/2}$$

与式(1-26)一样, 可得到下列缆索方程:

$$2 \frac{L_s}{E_c A_c} H_R - \sum \left(\frac{B\lambda}{r} \sum \varnothing_i \right) = 0 \quad (1-33)$$

式中, () 内的总和取用跨径内全部结点的和, () 外的总和为各跨径的和。

(六) 塔的受力分析

现实的塔是立体结构物, 除特殊情况外, 设计中通常将塔分为桥轴方向和垂直于桥轴方向, 分别独立地进行分析。

关于桥轴方向, 因为塔是直立起来的梁, 有利用其形状的有效分析法。在垂直于桥轴方向, 有桁架形式、刚架形式等各种构造形式, 最好根据一般的结构分析方法, 选择最适当的

构造形式。

1. 桥轴方向的分析 对于桥轴方向,作为受轴向压缩的梁进行分析。塔柱截面不变时计算较简单。当吊桥的塔柱为变截面时,一般采用还原法由电子计算机进行计算。目前,如图 1-6 所示的那样,取长度为 λ 的等截面区间 i ,假定在该区间内作用着轴向压缩力 N_i 和均布荷载 q_i ,则对挠度 u 下列微分方程成立。

$$EI_i \frac{d^4 u}{dx^4} + N_i \frac{d^2 u}{dx^2} = q_i \quad (1-34)$$

解该方程,角变位 θ 、弯矩 M 、水平剪力 Q 按式(1-35)定义, C_1 、 C_2 、 C_3 及 C_4 为积分常数,从而得到下列式(1-36)。

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \frac{du}{dx}, M = -EI \frac{d^2 u}{dx^2} \\ Q &= -EI \frac{d^3 u}{dx^3} - N_i \frac{du}{dx} \end{aligned} \right\} \quad (1-35)$$

$$\left. \begin{aligned} u &= C_1 \cos kx + C_2 \sin kx + C_3 x + C_4 + \frac{q_i}{2N_i} x^2 \\ \theta &= -C_1 k \sin kx + C_2 k \cos kx + C_3 + \frac{q_i}{N_i} x \\ M &= C_1 N_i \cos kx + C_2 N_i \sin kx - \frac{q_i}{k^2} \\ Q &= -C_3 N_i - q_i x \end{aligned} \right\} \quad (1-36)$$

式中 $k^2 = \frac{N_i}{EI_i}$

用节点 $i-1$ ($x=0$) 和节点 i ($x=\lambda$) 的值消去 C_1 、 C_2 、 C_3 及 C_4 , 得出下列公式: