

拉索对斜拉桥体系面内弯曲频率的影响分析

蔺鹏臻, 刘凤奎

(兰州交通大学土木学院, 甘肃兰州 730070)

摘 要:在推导斜拉桥体系面内弯曲频率的基础上, 引入斜拉桥体系拉索影响系数, 反映斜拉桥体系的拉索对面内弯曲频率的影响, 通过斜拉索影响度的概念定量分析拉索对斜拉桥体系弯曲频率影响的相对量值。通过对四座斜拉桥体系的对比分析, 证明用斜拉索影响系数及斜拉索影响度的概念可以更直观反映矮塔斜拉桥与常规斜拉桥动力性能的差异。这个结论对认识矮塔斜拉桥与常规斜拉桥二者的受力特性有一定的参考意义。

关键词:斜拉桥; 矮塔; 动力特性; 弯曲频率; 自振

中图分类号:U448.27 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2005)02-0041-03

0 前言

斜拉桥体系的上部结构由梁、索、塔三类构件组成, 它是一种桥面系以加劲梁受压(密索)或受弯(稀索)为主, 支撑体系以斜索受拉及索塔受压为主的桥梁。随着计算技术及建造技术的发展, 斜拉桥的体系也逐步在发展, 其中两种趋势最为明显, 第一为大跨度斜拉桥, 这种体系以纤细、柔美的主梁, 配以高

塔、密索, 充分体现出与现代高速度、高节奏相适应的时代感, 因此成为现代最为流行的桥型之一。另一种趋势则是以塔矮、梁刚、索集中为外部特征的矮塔斜拉桥(亦称部分斜拉桥), 它以亦刚亦柔的独特受力特性, 填充了连续梁(刚构)和大跨度斜拉桥之间的空间。在某些情况下, 如设计预应力混凝土连续梁则梁体截面过大有些勉强, 如设计常规斜拉桥则不太经济, 此时可以考虑采用混凝土连续梁与预应力混凝土斜拉桥之间的过渡形式, 即混凝土矮塔斜拉桥。

斜拉桥体系的动力特性直接影响斜拉桥的抗

收稿日期: 2004-07-29

作者简介: 蔺鹏臻(1977-), 男, 甘肃甘谷人, 硕士, 助教, 主要从事大跨度桥梁的理论研究工作。

图 8 为导墙的一般形式。展览馆立交连续墙作为桥梁的基础部分外, 还兼桥台及道路挡土墙功能, 在施工中要求有更高的垂直精度, 在施工中如果超过设计规定的范围, 不仅会给主体结构的施工带来困难, 还会增大混凝土的浇灌量, 因此在施工中发现异常时应及时控制并修正, 随时的监控是必要的。

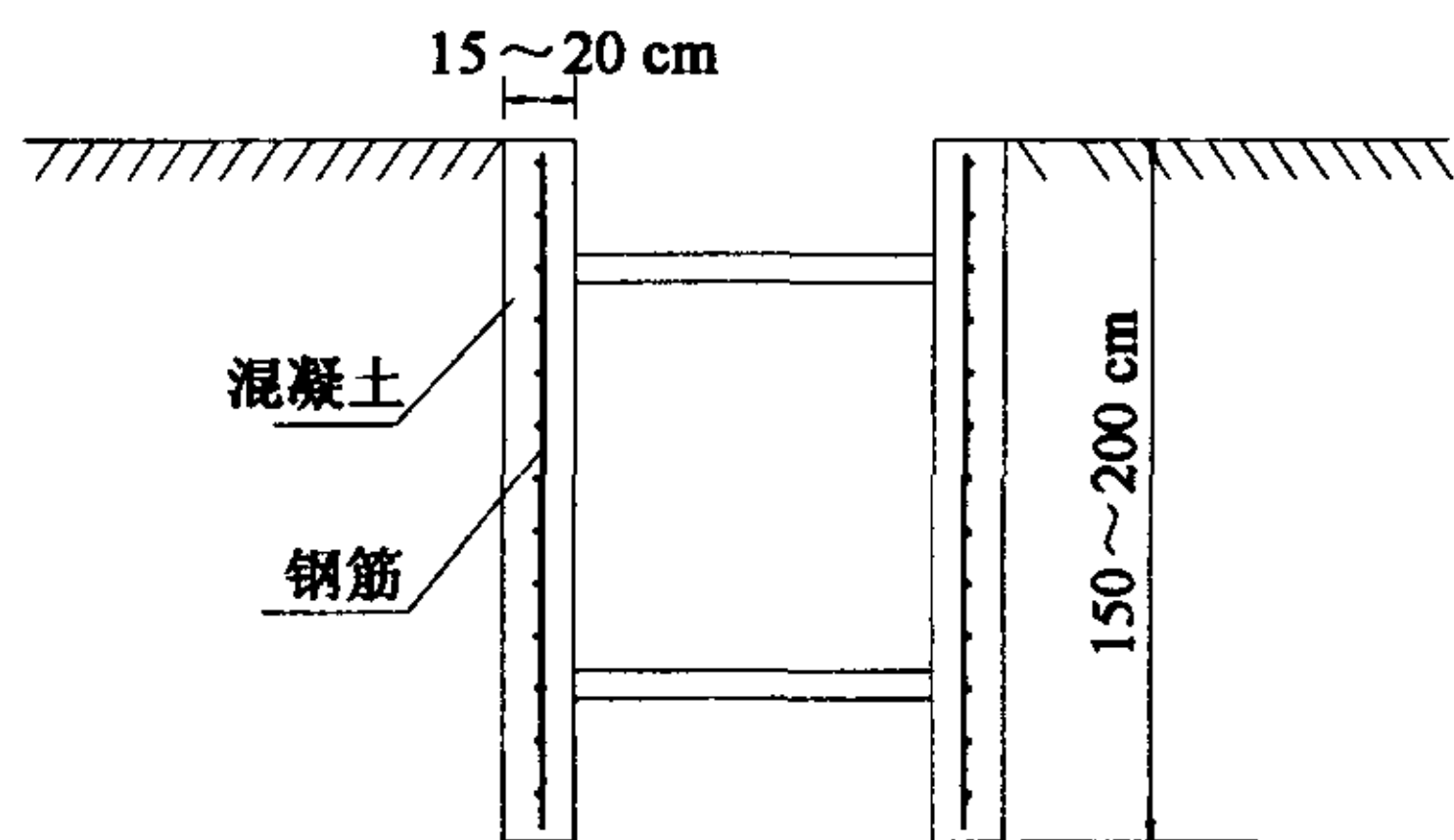


图 8 一般混凝土导墙示意图

5.2 成墙质量问题

由于连续墙的施工过程中质量较难控制, 地质情况也会有变化, 一般都在墙面开挖暴露后才发现问题, 主要有墙体几何尺寸偏差过大, 墙体内部窝泥

导致墙体不连续, 混凝土离析、骨料架空等; 当这些缺陷足以影响连续墙的安全运行时必须进行补强措施, 一般可采用局部凿除, 立模补浇处理或局部注浆处理; 展览馆连续墙在成槽开挖后局部也有槽孔坍塌、混凝土突出以及局部露筋现象, 采取了凿除多余部分混凝土及局部补修措施。

5 小结

通过以上分析并结合具体工程, 连续墙在桥梁工程中的应用与建筑基坑支护功能有些不同, 桥梁作为永久结构, 在设计应用连续墙时应具体分析其使用功能, 在应用《建规》相关规范进行计算时应结合《桥规》对其修正以满足桥梁工程的使用要求; 结合展览馆立交连续墙的设计施工, 应特别注意回填土的扰动, 地下水位的确定, 各参数的选用以及施工监控问题等。

随新材料、新技术的发展, 连续墙的发展很快, 应用越来越广泛, 计算手段也更丰富精确, 更精确的计算可采用有限元法。

震、抗风以及车辆作用下的振动。对斜拉桥体系的自振特性分析中,一阶反对称弯曲振型、一阶对称竖向弯曲振型通常在地震反应、风振及车辆振动反应来说有重要意义。

本文从推导斜拉桥的竖向面内弯曲频率为出发点,对比分析常规斜拉桥和矮塔斜拉桥的面内一阶反对称弯曲频率、对称弯曲频率,从而揭示出常规斜拉桥和矮塔斜拉桥动力反应的异同之处,为更好地认识两种斜拉桥体系提供参考。

1 斜拉桥体系的面内弯曲频率

考察图 1 所示的斜拉桥体系一阶铅垂平面内的弯曲振型,体系振动时的变形能系由桥面、塔的弯曲变形和索的伸缩变形组成。

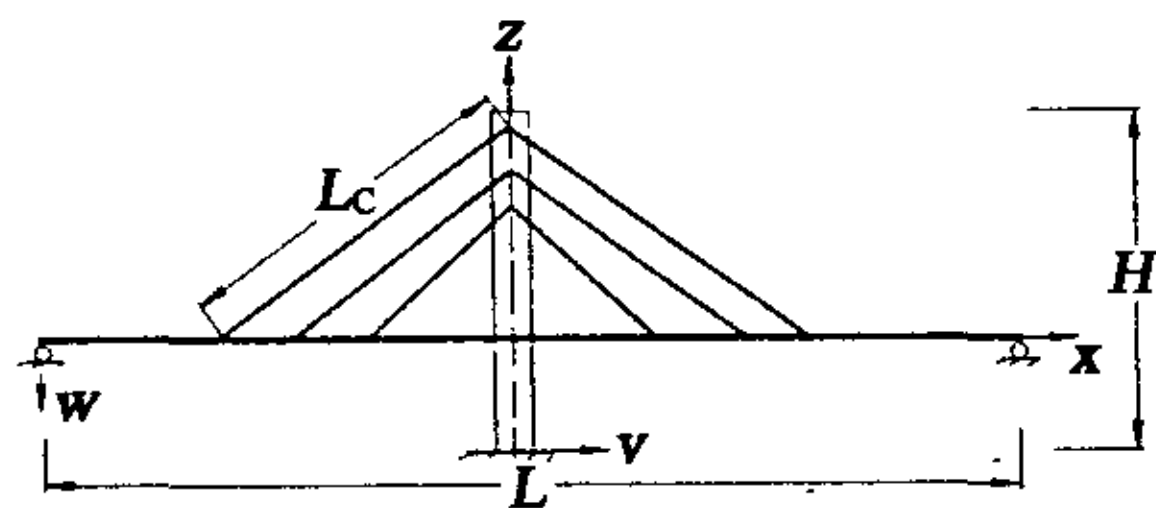


图 1 斜拉桥体系

(1) 桥面的弯曲变形能:

$$V_1 = \frac{1}{2} \int_0^L E_b I_b(x) [w(x)]^2 dx \quad (1)$$

式中: $E_b I_b(x)$ 为梁在弹性范围内的抗弯刚度, $w(x)$ 为梁的交通部向变位, L 为梁全长。

(2) 塔架的弯曲应变能:

$$V_2 = \frac{1}{2} \int_0^H E_p I_p(z) [u(z)]^2 dz \quad (2)$$

式中: $E_p I_p(z)$ 为塔的抗弯刚度, $u(z)$ 为塔的水平变位, H 为墩、塔的高度。

(3) 拉索的变形能:

考察图 2 所示的一根索,拉索的伸长可表示为:

$$\Delta L_c = \frac{\Delta S \cdot L_c}{E_c \cdot A_c} = z_c \cdot \sin \alpha_c \quad (3)$$

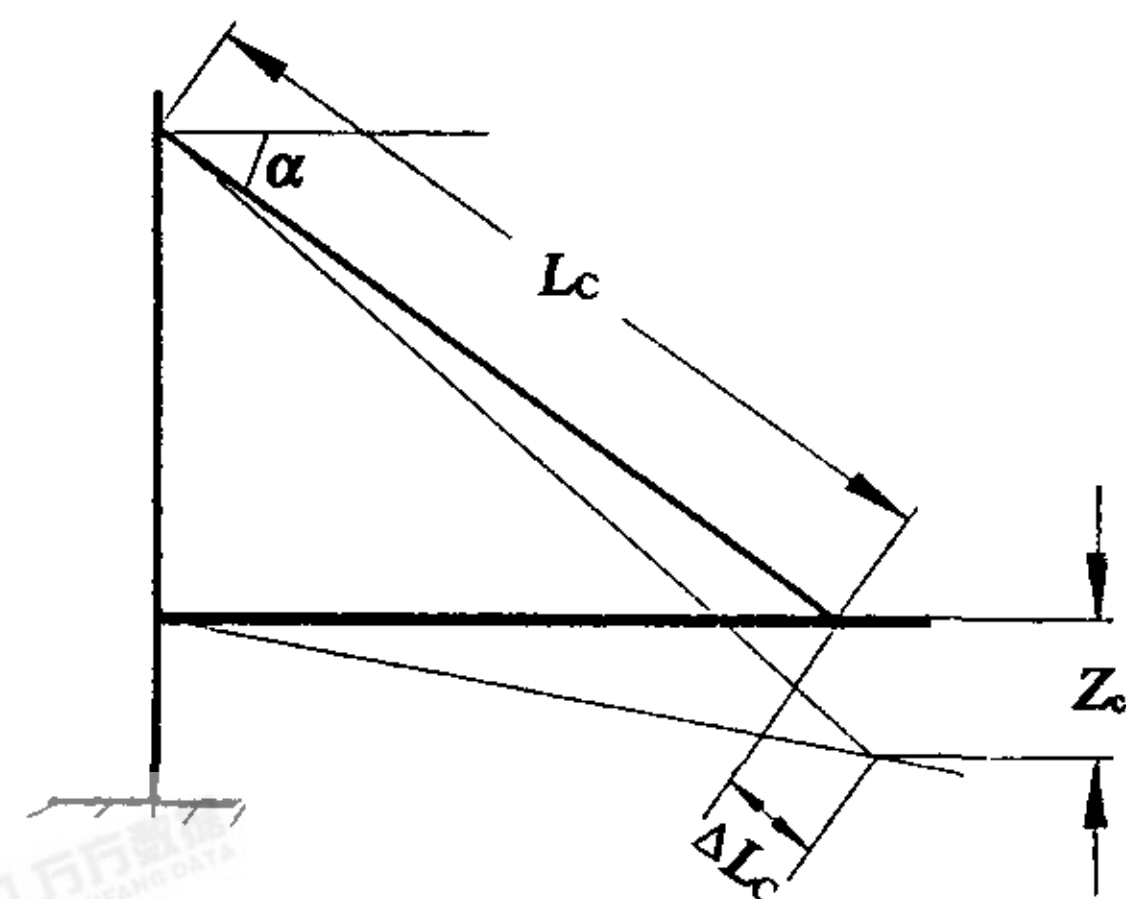


图 2 拉索变形图

式中: ΔS ——拉索索力的增量

$E_c A_c$ ——拉索的轴向刚度

L_c ——索长

α_c ——索的倾角

于是有:

$$\Delta S = z_c \frac{E_c A_c}{L_c} \sin \alpha_c \quad (4)$$

拉索的变形能分为两部分:

$$V_3 = \frac{1}{2} \sum_{c=1}^N \Delta S \cdot \Delta L_c = \frac{1}{2} \sum_{c=1}^N \frac{E_c A_c z_c^2}{L_c} \sin \alpha_c \quad (5)$$

由于体系的振动,使缆索的倾角发生变化,索力也相应地发生周期性的变形,索力的垂直分量的变化可表示为:

$$\begin{aligned} \Delta S_v &= \Delta S \cdot \sin(\alpha_c + d\alpha) - \Delta S \cdot \sin \alpha_c \\ &\approx \Delta S \cdot \cos \alpha_c \cdot d\alpha \end{aligned} \quad (6)$$

由几何关系

$$d\alpha = \frac{z_c \cos \alpha_c}{L_c} \quad (7)$$

于是:

$$\Delta S_v = \Delta S \frac{z_c \cos^2 \alpha_c}{L_c} \quad (8)$$

二次变形所做的功为:

$$\begin{aligned} V_4 &= \frac{1}{2} \sum_{c=1}^N \int_0^{z_c} \Delta S_v \cdot dz_c \\ &= \frac{1}{2} \sum_{c=1}^N \Delta S \frac{\cos^2 \alpha_c}{L_c} z_c^2 \end{aligned} \quad (9)$$

在结构动能计算中,若忽略塔的竖向弹性压缩变形,则斜拉桥体系竖向挠曲振动的频率计算公式可写成:

$$\begin{aligned} \omega_b^2 &= \int_0^L E_b I_b(x) [w(x)]^2 dx + \int_0^H E_p I_p(z) [u(z)]^2 dz \\ &\quad + \frac{\sum_{c=1}^N \frac{E_c A_c \sin^2 \alpha_c}{L_c} z_c^2 + \sum_{c=1}^N \Delta S \frac{\cos^2 \alpha_c}{L_c} z_c^2}{\int_0^L m_d(x) w^2(x) dx + \sum_{c=1}^N \int_0^{L_c} m_c(l_c) z^2 dl_c} \end{aligned} \quad (10)$$

在上式的各部分能量中,对斜拉桥体系,索的二次变形能相对较小,可以略去该部分能量^[1]。同时,在动能中,缆索的质量 m_c 相对于桥面 m_d 是一个微小量,可以合并到桥面中考虑,并近似作为 $m(x)$ 计。从而弯曲频率公式可简化为:

$$\begin{aligned} \omega_b^2 &= \int_0^L E_b I_b(x) [w(x)]^2 dx + \int_0^H E_p I_p(z) [u(z)]^2 dz \\ &\quad + \frac{\sum_{c=1}^N \frac{E_c A_c \sin^2 \alpha_c}{L_c} z_c^2}{\int_0^L m(x) w^2(x) dx} \end{aligned} \quad (11)$$

分子中的三项分别为梁的广义刚度、塔的广义刚度以及索的广义刚度,分母为体系的广义质量矩阵,表示为:

$$K_g^* = \int_0^L E_b I_b(x) [w(x)]^2 dx \quad (12)$$

$$K_T^* = \int_0^H E_p I_p(z) [u(z)]^2 dz \quad (13)$$

$$K_C^* = \sum_{c=1}^N \frac{E_c A_c \sin^2 \alpha_c}{L_c} z_c^2 \quad (14)$$

$$M^* = \int_0^L m(x) w^2(x) dx \quad (15)$$

$$\omega_b^2 = \frac{K_g^* + K_T^* + K_C^*}{M^*} \quad (16)$$

如定义略去索、塔影响的连续梁(刚构)的弯曲频率为 ω_g :

$$\omega_g^2 = \frac{K_g^*}{M^*} \quad (17)$$

式(16)可进一步写为:

$$\omega_b = \varphi \cdot \omega_g \quad (18)$$

其中:

$$\varphi = \sqrt{1 + \frac{K_T^* + K_C^*}{K_g^*}} \quad (19)$$

此时对于斜拉桥体系,其弯曲频率可表示为略去斜拉索影响的连续梁(刚构)的弯曲频率 ω_g 和一反映斜拉索影响的系数 φ 的乘积关系。

若定义 ρ 为索、塔刚度对弯曲频率的影响度,则:

$$\rho = \frac{\omega_b - \omega_g}{\omega_b} = \frac{\varphi - 1}{\varphi} \quad (20)$$

可以通过 ρ 较直观地反应斜拉桥体系中斜拉索对竖向弯曲频率影响的相对大小。

2 对比分析

以下对四座斜拉桥利用通用有限元方法 sap 90,对比分析面内一阶反对称弯曲频率、对称弯曲频率,以及相应的斜拉索影响系数 φ (表 1)。

表 1 斜拉桥体系的面内弯曲频率对比分析

算例	面内反对称弯曲频率				面内对称弯曲频率				特征
	$\frac{\omega_b}{2\pi}$	$\frac{\omega_g}{2\pi}$	φ	$\rho(\%)$	$\frac{\omega_b}{2\pi}$	$\frac{\omega_g}{2\pi}$	φ	$\rho(\%)$	
1	0.505	0.237	2.131	53.1	1.00	0.369	2.710	63.1	133 m+133 m 双索面常规
2	0.245	0.146	1.680	40.5	0.389	0.225	1.730	42.2	93 m+124 m 双索面常规
3	0.593	0.561	1.060	5.70	1.161	1.140	1.020	2.0	81.16 m+136 m +81.16 m 单索面矮塔
4	0.946	0.944	1.002	1.20	1.752	1.582	1.107	9.7	80 m+80 m 单索面矮塔

注:1为银滩桥;2为成都人南桥;3为小西湖桥;4为厦门银湖桥。

通过对比分析可以看出:

(1)对常规斜拉桥而言,忽略索、塔的影响对面内一阶反对称弯曲频率、对称弯曲频率的影响较大。从两座常规斜拉桥的频率看,斜拉索影响系数 φ 均大于 1.5,随着跨度的增大,影响系数也增大。

(2)对矮塔斜拉桥而言,忽略索、塔的影响对面内一阶反对称弯曲频率、对称弯曲频率的影响较小,从两座矮塔斜拉桥的情况看,影响系数 φ 均接近于 1.0。

(3)对常规斜拉桥,斜拉索对弯曲频率的影响度 ρ 接近于 50%,而矮塔斜拉桥保持在 10%以内。所以常规斜拉桥的面内竖向弯曲频率中,斜拉索的影响更大。

(4)矮塔斜拉桥的面内一阶反对称弯曲频率、对称弯曲频率均大于常规斜拉桥的相应频率,即固有周期小于常规斜拉桥的相应周期。两座常规斜拉桥的基本固有周期都基本在 2 s 以上,而两座矮塔斜拉桥的固有周期均小 2 s,其中小西湖桥为 1.69 s,银湖桥为 1.06 s。

3 结论

通过以上分析及计算,可得出以下结论:

(1)通过算例看出,引入斜拉索影响系数 φ 及影响度 ρ 的概念,可以更直观地体现斜拉索对斜拉桥体系自振特性的影响以及影响的相对量值。

(2)通过数值比较得出,斜拉索对常规斜拉桥面内弯曲频率的影响较大,而对矮塔斜拉桥的影响较小。所以在矮塔斜拉桥面内弯曲频率的简化计算中,可以略去其影响,将结构简化为不计索、塔的连接梁(刚构),对结果的影响保持在 10%以内。

(3)矮塔斜拉桥的面内一阶反对称弯曲、对称弯曲的固有周期小于常规斜拉桥的相应周期。常规斜拉桥的基本固有周期一般都在 2 s 以上^[2],而矮塔斜拉桥的固有周期均小于 2 s。所以矮塔斜拉桥的固有周期更接近于一般梁式桥(一般梁式桥的基本固有周期约为 1 s^[2])。所以矮塔斜拉桥较常规斜拉桥有更好的抵抗变形能力。

参考文献

- [1]李国豪.桥梁稳定与振动[M].北京:中国铁道出版社.1992.
- [2]严国敏,现代斜拉桥[M].成都:西南交通大学出版社.1996.

· 短讯 · 未来 5 年,我国将在长江三角洲、珠江三角洲和环渤海湾区域建设三大港口群。