

自锚式斜拉-悬索协作体系桥基于强度的极限跨径分析

张 哲*, 王会利, 邱文亮, 李斐然

(大连理工大学 桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 推导了自锚式斜拉-悬索协作体系桥的极限跨径, 分析了其极限跨径与结构几何参数、荷载和材料特性的关系. 从材料强度出发, 并结合目前桥梁常用的材料, 对混凝土主梁和钢主梁自锚式斜拉-悬索协作体系桥在竖向静荷载作用下的极限跨径进行了具体研究, 得到了相应的极限跨径上限和各因素对极限跨径的影响. 分析结果表明, 增大矢跨比、高跨比和斜拉段长度比例, 减小二期恒载, 均可以提高协作体系的跨径.

关键词: 斜拉-悬索; 自锚式; 极限跨径

中图分类号: U448.29 **文献标志码:** A

0 引言

随着设计理论的完善、施工方法的改进和新材料的应用, 桥梁跨径记录不断被刷新. 人们在提出新结构体系的同时, 也在研究各种桥型的极限跨径. 就目前的材料和技术而言, 悬索桥极限跨径可以达到 $5\ 100\ \text{m}^{[1]}$, 斜拉桥极限跨径可以达到 $4\ 000\ \text{m}^{[2,3]}$. 自锚式斜拉-悬索协作体系桥无需庞大的锚碇, 对大跨径桥梁而言经济实用^[4~7], 可是它的极限跨径未见报道, 本文将对此展开论述, 所得结论可为初期概念设计提供参考依据.

由于桥梁的极限跨径受到多种因素制约, 如材料强度、施工技术、抗风稳定性、经济合理性等, 本文仅从材料强度方面对自锚式斜拉-悬索协作体系桥在竖向静载作用下的极限跨径进行探讨^[2,3,8~11].

1 极限跨径推导

自锚式斜拉-悬索协作体系桥的斜拉索水平分力和主缆水平分力由主梁承担, 而斜拉索和主缆水平分力大小不仅取决于主梁、斜拉索、主缆、桥面系的重量以及活载大小, 还随跨径的增大而增大. 一方面, 对于一定材料强度的缆索, 当跨径达到一定极限时, 缆索会达到其容许应力而无法

承担自身的重量; 另一方面, 对于具有一定材料强度和横截面积的主梁, 所能承担的缆索产生的压力也是有限的. 因此, 自锚式斜拉-悬索协作体系桥极限跨径不仅受到缆索强度的限制, 而且还受到主梁强度的限制.

为简化问题, 引入如下假定:

- (1) 主缆、主梁与桥面系荷载为均布, 汽车等活载也等代为均布荷载, 则在全部荷载作用下, 主缆的线形近似为二次抛物线;
- (2) 全桥主梁水平;
- (3) 忽略活载产生的结构变形.

如图 1 所示, 一座自锚式斜拉-悬索协作体系桥, 规定结构的具体参数如下:

- (1) 主梁的横截面积为 A_b , 其材料的容重为 γ_b , 主要荷载组合下材料的容许应力为 $[\sigma_b]$;
- (2) 斜拉索面积为 A_{c1} , 主缆的横截面积为 A_{c2} , 其材料的容重为 γ_c , 主要荷载组合下材料的容许应力分别为 $[\sigma_{c1}]$ 、 $[\sigma_{c2}]$;
- (3) 一期恒载为 w_{d1} , 二期恒载为 w_{d2} , 活载总和为 w_q , 包括汽车、人群、非机动车等;
- (4) 中跨主缆跨径为 L , 主缆的矢高为 f , 矢跨比 $\lambda = f/L$;
- (5) 斜拉段跨径为 cL ($0 < c < 0.5$), 塔高 h , 高跨比 $\mu = h/cL$.

收稿日期: 2006-07-11; 修回日期: 2008-03-31.

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(200631882350).

作者简介: 张 哲* (1944-), 男, 教授, 博士生导师.

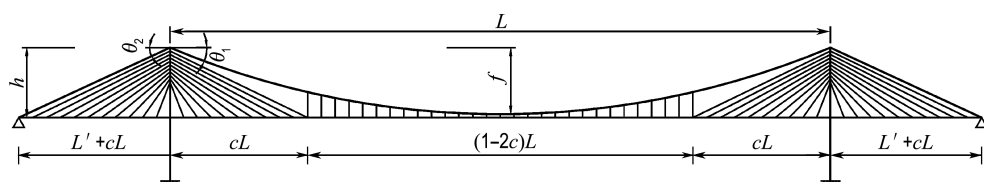


图1 自锚式斜拉-悬索协作体系桥

Fig. 1 Self-anchored cable-stayed suspension bridge

(6) 边跨主缆与边拉索之间的距离为 L' 。

1.1 斜拉索对主梁的压力

对于斜拉索,有3种布置方式:辐射形、竖琴形及扇形。在同等条件下辐射形斜拉索对主梁产生的压力最小,竖琴形斜拉索对主梁产生的压力最大^[2,3]。为了得到极限跨径,斜拉索布置形式采用辐射形,且关于桥塔对称。

采用“平均索法”^[2,3]分析,即将全部半跨斜拉索会聚成一根平均斜拉索,塔上锚于塔顶,梁上锚于 $\frac{1}{2}cL$ 点,半跨全部荷载集中作用于 $\frac{1}{2}cL$ 点(见图2)。

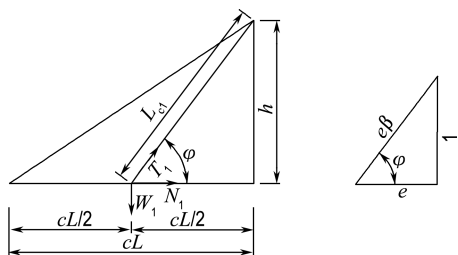


图2 平均索法分析简图

Fig. 2 Analysis diagram of mean cable

令 $h : \frac{1}{2}cL = 1 : e$, 则 $e = \frac{1}{2\mu}$; 令 $\beta = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{e}\right)^2} = \sqrt{1 + 4\mu^2}$, 可得 $\sin \varphi = \frac{1}{e\beta}$, $\cos \varphi = \frac{1}{\beta}$, $\tan \varphi = \frac{1}{e}$, $L_{c1} = \frac{1}{2}cL / \cos \varphi = \frac{cL}{2}\beta$, 另外

$$W_1 = W_d + W_q + \frac{1}{2}W_{c1} =$$

$$\left(w_d + w_m + w_q + \frac{\beta}{4} A_{c1} \gamma_c \right) cL \quad (1)$$

所以平均索索力

$$T_1 = \eta W_1 / \sin \varphi =$$

$$\eta \left(w_d + w_m + w_q + \frac{\beta}{4} A_{c1} \gamma_c \right) cL e \beta \quad (2)$$

其中 η 为考虑单根斜拉索计算数值与总体分析结果之间差异的增大系数,一般可取 1.10 ~ 1.15^[2]。

主梁压力

$$N_1 = W_1 / \tan \varphi =$$

$$\left(w_d + w_m + w_q + \frac{\beta}{4} A_{c1} \gamma_c \right) cL / 2\mu \quad (3)$$

平均索索力极限值 $T_1 = A_{c1} [\sigma_{c1}]$, 与式(2)、

(3) 联立可得斜拉索对主梁压力

$$N_1 = \frac{4c[\sigma_{c1}](w_d + w_m + w_q)}{8\mu[\sigma_{c1}] - \eta(1 + 4\mu^2)cL\gamma_c} L \quad (4)$$

1.2 主缆对主梁的压力

对于悬索部分,中跨主缆所受荷载如图3所示。

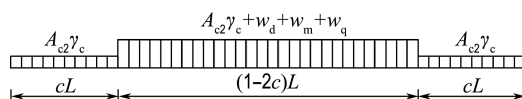


图3 中跨主缆荷载简图

Fig. 3 Loading diagram of main span cable

可得中跨主缆沿跨长 L 的等效均布荷载^[8,12]为 $w_2 = A_{c2} \gamma_c + (1 - 4c^2)(w_d + w_m + w_q)$, 那么主梁受主缆的压力为

$$N_2 = H = \frac{w_2 L^2}{8f} = \frac{w_2 L}{8\lambda} =$$

$$\frac{A_{c2} \gamma_c + (1 - 4c^2)(w_d + w_m + w_q)}{8\lambda} L \quad (5)$$

主缆最大索力^[8]

$$T_2 = \frac{H}{k} = \frac{A_{c2} \gamma_c + (1 - 4c^2)(w_d + w_m + w_q)}{8\lambda k} L \quad (6)$$

其中 $k = \cos \theta_{\max}$ 。另外,主缆索力极限值 $T_2 = A_{c2} [\sigma_{c2}]$, 与式(5)、(6) 联立可得主缆对主梁的压力

$$N_2 = \frac{(1 - 4c^2)(w_d + w_m + w_q)k[\sigma_{c2}]}{8\lambda k[\sigma_{c2}] - L\gamma_c} L \quad (7)$$

下面讨论参数 k :

由于中跨主缆承受非均布荷载,则中跨主缆曲线方程可以表达为^[1]

$$y = \begin{cases} 4f \frac{L[q_1 + (1 - 2c)q_2] - q_1 x}{L^2[q_1 + (1 - 4c^2)q_2]} x; & 0 \leq x \leq cL \\ 4f \frac{(L - x)x(q_1 + q_2) - c^2 L^2 q_2}{L^2[q_1 + (1 - 4c^2)q_2]} & cL \leq x \leq 0.5L \end{cases} \quad (8)$$

其中 $q_1 = A_{c2} \gamma_c$, $q_2 = w_d + w_m + w_q$. 坐标原点在缆索左侧起点, x 轴以向右为正, y 轴以向下为正,

$$\text{则有 } \tan \theta_1 = y' \big|_{x=0} = \frac{4f(q_1 + q_2 - 2cq_2)}{L(q_1 + q_2 - 4c^2q_2)}.$$

当跨径较大时, $q_1 + q_2 \gg q_2$, 则 $\tan \theta_1 \approx 4\lambda$,

$$\text{所以 } \cos \theta_1 = \frac{1}{\sqrt{1+16\lambda^2}}.$$

对于边跨主缆, 有 $\tan \theta_2 = \frac{h}{L' + cL}^{[13]}$, $L' \ll$

cL , 则 $\tan \theta_2 \approx \frac{h}{cL} = \mu$, 所以 $\cos \theta_2 = \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}}$. 综

上所述, 可以得到

$$k = \cos \theta_{\max} = \min(\cos \theta_1, \cos \theta_2) = \min\left(\frac{1}{\sqrt{1+16\lambda^2}}, \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}}\right) \quad (9)$$

1.3 极限跨径

主梁承受斜拉索产生的压力 N_1 和主缆产生的压力 N_2 , 主梁所能承受的最大压力为 $A_b[\sigma_b]$, 所以有 $N_1 + N_2 = A_b[\sigma_b]$, 即

$$\frac{4c[\sigma_{c1}](w_d + w_m + w_q)}{8\mu[\sigma_{c1}] - \eta(1+4\mu^2)cL_j\gamma_c} + \frac{k[\sigma_{c2}](1-4c^2)(w_d + w_m + w_q)}{8k\lambda[\sigma_{c2}] - L_j\gamma_c} = \frac{A_b[\sigma_b]}{L_j} \quad (10)$$

上式为极限跨径 L_j 的分式方程, 可以化简为 L_j 的一元二次方程, 求得 L_j 的合理解, 但是其表达式颇为烦琐, 本文将不列出, 而只讨论各参数对 L_j 的影响.

2 关于极限跨径上限的讨论

如果结构不承担荷载 $w_m + w_q$, 结构在自身重量作用下, 材料达到各自的容许应力, 此时跨径将达到极限跨径的上限 $L_{j,\max}$, 并将 $w_d = A_b\gamma_b$ 代入, 得到

$$\frac{4c[\sigma_{c1}]}{8\mu[\sigma_{c1}] - \eta(1+4\mu^2)c\gamma_c L_{j,\max}} + \frac{(1-4c^2)k[\sigma_{c2}]}{8k\lambda[\sigma_{c2}] - \gamma_c L_{j,\max}} = \frac{[\sigma_b]}{\gamma_b L_{j,\max}} \quad (11)$$

极限跨径的上限 $L_{j,\max}$ 与结构参数 λ 、 μ 和 c 及缆索和主梁的材料有关, 下面对于目前常用材料作进一步分析.

主缆和斜拉索采用常用的平行钢丝, 标准强度为 1 670 MPa, 容重 $\gamma_c = 78.5 \text{ kN/m}^3$. 如果斜拉索安全系数取为 2.5, 则容许应力 $[\sigma_{c1}] = 668 \times 10^3 \text{ kPa}$; 而主缆安全系数采用 3.0, 则容许应力 $[\sigma_{c2}] = 556.7 \times 10^3 \text{ kPa}$.

当主梁采用 C50 混凝土, 其主要组合容许应力 $[\sigma_b] = 17.5 \times 10^3 \text{ kPa}$. 由于主梁轴向受压, 体内配置钢筋较少, 钢筋混凝土的容重取为 25 kN/m^3 , 考虑到锚固构造及横隔板不承担纵向压力, 主梁的有效面积 A_b 不包括这部分混凝土, 因此容重暂近似采用当量容重 $\gamma_b = 25 \times 1.25 = 31.25 \text{ kN/m}^3$. 一般情况下高跨比 $\mu = 0.4 \sim 0.5^{[2]}$, 矢跨比 $\lambda = 0.1 \sim 0.2^{[14 \sim 16]}$, 取增大系数 $\eta = 1.15$. 图 4 给出极限跨径上限 $L_{j,\max}$ 随 λ 、 μ 和 c 的变化曲面.

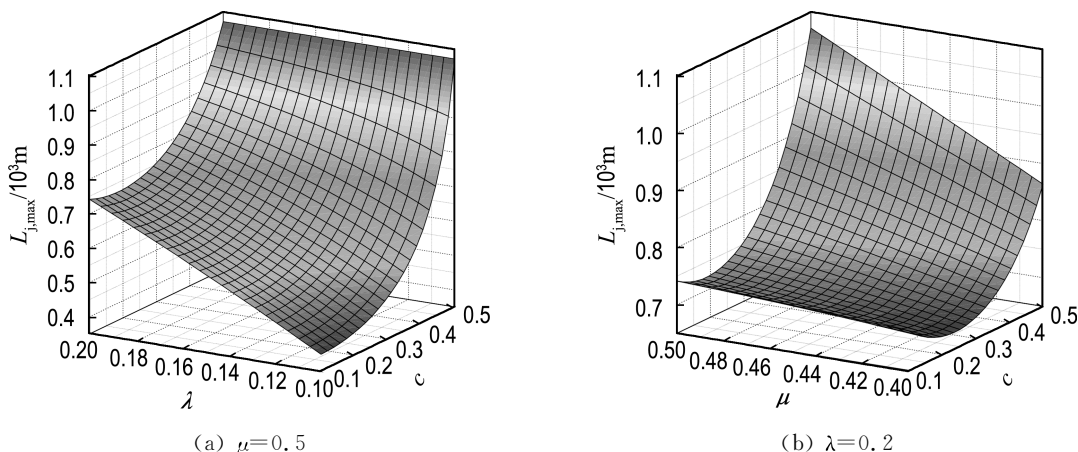
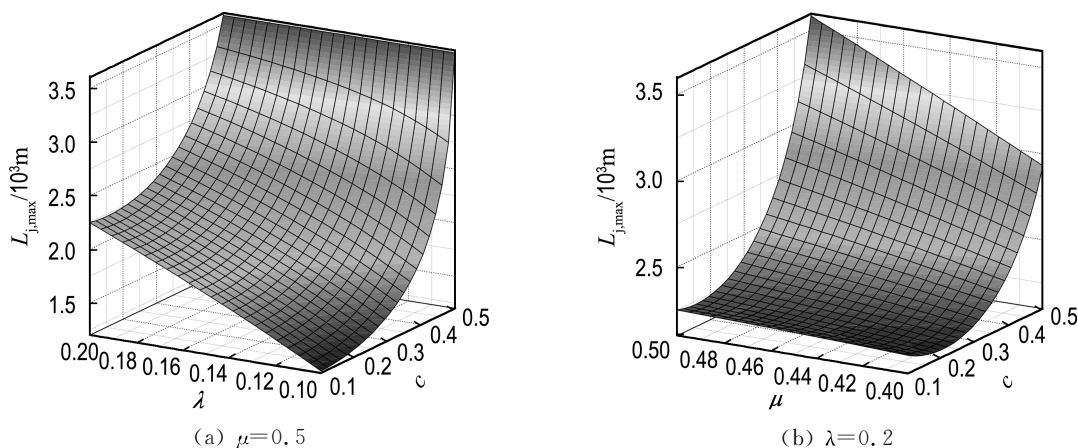


图 4 混凝土梁协作体系 $L_{j,\max}$ 与 λ 、 μ 、 c 关系

Fig. 4 Relation between $L_{j,\max}$, λ , μ and c for concrete girder cooperation system

当主梁采用 Q345 型号钢材时, 其容许轴向压应力 $[\sigma_b] = 200 \times 10^3 \text{ kPa}$, 同样考虑到锚固构造及横隔板不承担纵向力, 主梁的有效面积 A_b 不

包括这部分钢材, 因此容重近似取为 $\gamma_b = 78.5 \times 1.25 = 98.125 \text{ kN/m}^3$. 图 5 给出极限跨径上限 $L_{j,\max}$ 随 λ 、 μ 和 c 的变化曲面.

图5 钢梁协作体系 $L_{j,\max}$ 与 λ 、 μ 、 c 关系Fig. 5 Relation between $L_{j,\max}$, λ , μ and c for steel girder cooperation system

从图4可以看出在一般情况下,C50混凝土梁协作体系的极限跨径上限 $L_{j,\max}$ 可达1 000 m;从图5可以看出Q345钢梁协作体系的极限跨径上限 $L_{j,\max}$ 可达3 500 m. 而且有如下结论:

(1)协作体系的极限跨径上限 $L_{j,\max}$ 随矢跨比 λ 的增大而增大,基本呈线性变化,但是随着 c 的增大,悬索段主梁长度比例减小, λ 对 $L_{j,\max}$ 的影响也就减小;

(2)协作体系的极限跨径上限 $L_{j,\max}$ 随高跨比 μ 的增大而增大,也基本呈线性变化,而且随着 c 的增大,斜拉段主梁长度比例增大, μ 对 $L_{j,\max}$ 的影响也就增大;

(3)协作体系的极限跨径上限 $L_{j,\max}$ 随 c 呈抛物线变化.

3 考虑 $w_m + w_q$ 影响的极限跨径

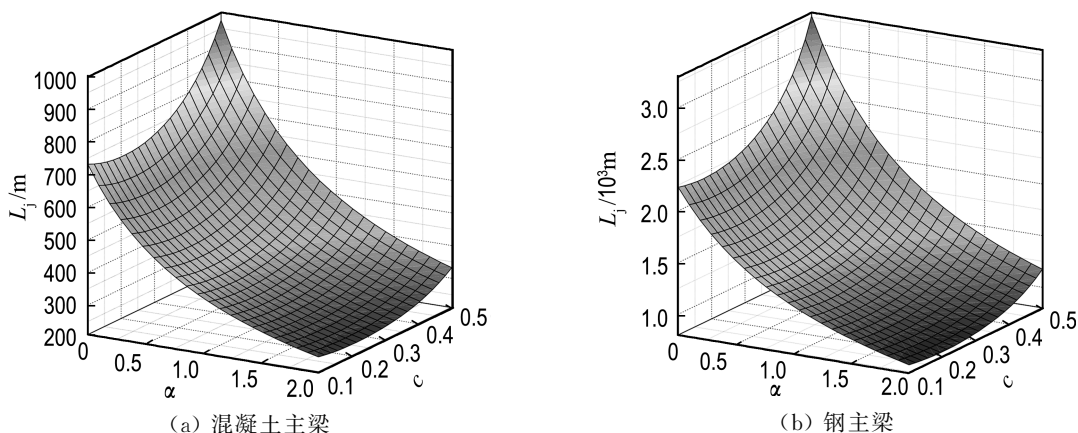
前面的研究忽略了二期恒载 w_m 和活载 w_q 的影响,给出了只承受结构自重情况下的极限跨径,

是极限跨径的上限,这在实际中并不实用,下面研究 $w_m + w_q$ 对极限跨径的影响. 令 $w_m + w_q = \alpha A_b \gamma_b$, α 表示单位长度二期恒载与活载之和与主梁自重的比值,由式(10)可得

$$\frac{4c[\sigma_{c1}]}{8\mu[\sigma_{c1}] - \eta(1 + 4\mu^2)c\gamma_c L_j} + \frac{(1 - 4c^2)k[\sigma_{c2}]}{8k\lambda[\sigma_{c2}] - \gamma_c L_j} = \frac{[\sigma_b]}{(1 + \alpha)\gamma_b L_j} \quad (12)$$

主缆采用平行钢丝,主梁分别采用混凝土和钢材两种材料,采用的容许应力、容重与前面的相同. 图6给出极限跨径与 α 和 c 的关系曲面.

可见,极限跨径随荷载比值 α 增大而迅速降低. 实际设计时,按照桥梁的设计技术要求,活载 w_q 是确定的,因此,为了使桥梁达到较大跨径,可以采取以下措施:降低二期恒载 w_m ,如采用材料轻、厚度小的桥面铺装,避免采用重量大的混凝土防撞墙,而采用轻型的钢护栏等;增大主梁的横截面积,从而减小荷载比值 α .

图6 协作体系 L_j 与 α 、 c 关系 ($\mu = 0.45$, $\lambda = 0.2$)Fig. 6 Relation between L_j , α and c for cooperation system ($\mu = 0.45$, $\lambda = 0.2$)

4 结 论

本文从材料强度出发,推导了自锚式斜拉-悬索协作体系桥在竖向静荷载作用下的极限跨径,研究了极限跨径与主缆矢跨比 λ 、高跨比 μ 、斜拉段长度比例 c 、二期恒载 w_m 和活载 w_q 等影响因素的关系,研究表明,在一般情况下,主梁采用C50混凝土材料,其极限跨径上限可达1 000 m;主梁采用Q345钢材料,其极限跨径上限可达3 500 m.另外,可以采取以下措施增大自锚式斜拉-悬索协作体系桥的极限跨径:增大主缆矢跨比,采用较大的高跨比,提高斜拉段长度比例,增大主梁的横截面积和降低二期恒载。

参考文献:

- [1] GIMSING N J. *Cable Supported Bridges* [M]. Chichester: John Wiley, 1997
- [2] 王伯惠. 斜拉桥的极限跨径(连载一)[J]. 公路, 2002(3):46-53
- [3] 王伯惠. 斜拉桥的极限跨径(连载二)[J]. 公路, 2002(4):38-48
- [4] 王伯惠. 斜拉-悬索协作体系桥[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2000, 2(3):1-6
- [5] 肖汝诚,项海帆. 斜拉-悬吊协作体系桥力学特性及其经济性能研究[J]. 中国公路学报, 1999, 12(3):43-48,116
- [6] 蔡国宏. 超长跨径桥梁的新构思[J]. 国外公路, 1996, 16(3):30-33
- [7] 蒙云,孙淑红. 吊拉组合桥结构体系研究与决策[C]//中国公路学会桥梁和结构工程学会一九九九年桥梁学术讨论会. 厦门:中国公路学会桥梁和结构工程学会, 2000: 691-697
- [8] CLEMENTE P, NICOLOSI G, RAITHEL A. Preliminary design of very long-span suspension bridges [J]. *Engineering Structures*, 2000, 22(12): 1699-1706
- [9] 邱文亮,张哲. 单塔两跨式自锚式悬索桥的极限跨度研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2005(6):858-861
- [10] 郭晓光. 拱桥极限跨度技术研究[J]. 东北公路, 1996(1):54-56
- [11] 夏旻,刘浩. 拱桥极限跨径研究[J]. 交通科技, 2005(6):39-42
- [12] 李国豪. 桥梁与结构理论研究[M]. 上海:上海科学技术文献出版社, 1983
- [13] 徐君兰. 桥梁计算示例丛书——悬索桥[M]. 北京:人民交通出版社, 2001
- [14] 李建本,贾军政. 自锚式悬索桥发展综述[J]. 城市道桥与防洪, 2005(5):50-52
- [15] 颜娟. 自锚式悬索桥[J]. 世界桥梁, 2002(1): 19-22
- [16] 张哲,窦鹏,石磊,等. 自锚式悬索桥的发展综述[J]. 世界桥梁, 2003(1):5-9

Study of limit span of self-anchored cable-stayed suspension cooperation system bridge based on strength

ZHANG Zhe*, WANG Hui-li, QIU Wen-liang, LI Fei-ran

(Bridge Engineering Research Institute, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The limit span of self-anchored cable-stayed suspension bridge is deduced. The relations among the geometrical parameters, the loads and the material characteristics are also analyzed. Based on the material strength and the commonly used materials, the limit spans of self-anchored cable-stayed suspension bridges with concrete girder or steel girder under vertical static load are discussed in detail. The corresponding upper limit spans and the influence of the factors on the span are given. The results indicate that increasing rise-span ratio, height-span ratio, cable-stayed segment length or reducing the second dead load can increase the cooperation system span.

Key words: cable-stayed suspension; self-anchored; limit span