

考虑施工可行性的斜拉桥极限跨径研究

石雪飞, 沈炯伟, 陈 辉

(同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要:以苏通大桥结构形式为基本模式,在现有制造和施工水平的假定条件下,研究斜拉桥的极限跨径。研究通过利用大型空间有限元软件 ANSYS 及简化模型的计算分析,结合对目前桥梁施工设备能力的调查分析,从斜拉桥的施工可行性,施工过程中关键技术可实现性和施工安全性出发,对斜拉桥可能达到的跨径进行了定量分析。研究中主要考虑了斜拉索的张拉能力,施工过程强度和线形控制,施工稳定性几个方面。研究结果显示,采用苏通大桥的桥型结构和施工技术,斜拉桥可以实现的跨径为 1 500 m。增大跨径的途径也在文中进行了探讨。

关键词:斜拉桥;极限跨径;施工可行性

中图分类号:U443.38 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-0300(2009)03-0005-05

1 引言

1955 年瑞典修建第一座现代斜拉桥——Strömsund 桥以来,斜拉桥在世界范围内得到了飞速发展。跨径作为斜拉桥发展的指标,已经从 Strömsund 桥的 182 m 发展到了苏通大桥的 1 088 m。斜拉桥的极限跨径也再次被人关注,已有学者从材料强度角度研究斜拉桥跨径可以达到 3 000 ~ 5 000 m^[1],但是施工也是影响斜拉桥发展的一个重要因素,施工技术和设备也会限制斜拉桥跨径的发展,因而有必要从施工角度研究斜拉桥的极限跨径。研究施工可行性对斜拉桥跨径的影响,以苏通大桥为原型,从斜拉索可施工性、施工过程强度、刚度、稳定性角度出发,探讨斜拉桥在现有施工条件下可实现的跨径。

2 千米级斜拉桥模型概述

千米级斜拉桥模型以苏通大桥为原型,并进行了 1 300 ~ 1 800 m 斜拉桥的概念设计^[2]。斜拉桥有限元模型见图 1 所示,其中主塔采用 Y 型塔钢筋混凝土塔,主梁采用封闭扁平流线型钢箱梁,斜拉索采用低松弛高强度平行镀锌钢丝束,结构具体参数见表 1 所示。

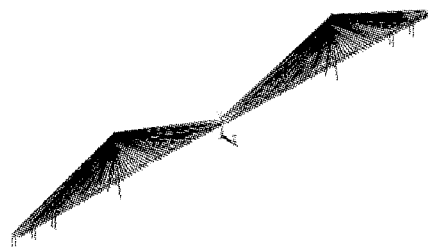


图 1 苏通大桥有限元模型

表 1 千米级斜拉桥模型概述

主跨/m	跨径布置/m	塔高/m	梁高/m	拉索布置
1 088	100 + 100 + 300 + 1 088/2	300.4	4.0	索距 12、16 m 34 × 4 = 136 对
1 300	120 + 120 + 360 + 1 300/2	330.0	4.5	索距 12、16 m 41 × 4 = 164 对
1 500	138 + 138 + 412 + 1 500/2	370.0	5.0	索距 12、16 m 47 × 4 = 188 对
1 800	150 + 150 + 150 + 400 + 1 800/2	430.0	5.5	索距 16、20 m 45 × 4 = 180 对

3 斜拉索施工可行性对斜拉桥极限跨径的影响

斜拉索张拉依照苏通大桥经验采用塔端张拉方法^[3],使用的千斤顶为大吨位、穿心式、单作用、YDC

收稿日期:2009-08-31

作者简介:石雪飞 男 1964 年出生 教授

基金项目:国家科技支撑计划项目(2006BAG04B00)

系列千斤顶,目前该系列千斤顶最大张力可以达到 12 000 kN^[4]。斜拉索张拉时边索受力情况如图 2 所示。设塔高为 h , 跨径 L , 拉索倾斜角 α 。每一个拉索在施工阶段承担一个索距节段梁的恒载 W_D 的一半和拉索自重 W_T , 即

$$T = (W_D/2 + W_T)/\sin \alpha \quad (1)$$

节段长度参考苏通大桥取 $\lambda = 16$ m, 跨高比分别取 4.0、4.5、5.0、5.5 m。斜拉桥张力-跨径关系见图 3 所示。

研究斜拉索张拉能力对斜拉桥极限跨径的影响,以目前设备的张拉能力 12 000 kN 张拉力作为斜拉索张拉力的指标,可以得到斜拉桥可实现的跨径在 2 000 m 左右。随着将来张拉设备的改进,张拉能力的提高,可实现的跨径将进一步提高。就目前的斜拉索张拉能力,完全可以实现建造 2 000 m 的斜拉桥。

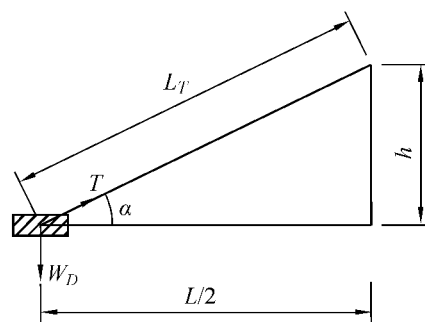


图 2 斜拉索受力简化图

4 施工过程中结构强度对斜拉桥极限跨径的影响

4.1 斜拉桥施工过程中满足结构强度要求的判别准则

参照苏通大桥使用材料,进行施工过程结构强度分析。主梁采用 Q345qD 钢材,设计容许应力 210 MPa;主塔采用 50 号混凝土,轴心抗压设计强度 28.5 MPa,抗拉设计强度 2.45 MPa;斜拉索采用平行钢丝拉索,抗拉强度 1 770 MPa。

4.2 斜拉桥施工过程中结构强度分析

采用 Ansys 软件计算 1 300 m 和 1 500 m 斜拉桥施工过程结构在各种工况下的强度,如表 2 所示。斜拉桥施工过程中,主塔应力最大部位发

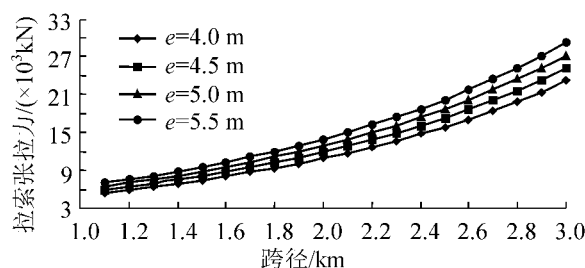


图 3 主梁节段 16 m 时斜拉索张力与跨径关系

生在中上塔柱交接处和横梁交接处,主梁应力最大部位发生在主梁根部,即靠近桥塔处,斜拉索最大应力发生在边索。按照强度判别准则 1 300 m、1 500 m 斜拉桥得到施工阶段斜拉桥强度满足要求。

表 2 1 300 m 和 1 500 m 斜拉桥施工强度计算

荷载描述	1 300 m 斜拉桥构件应力/MPa			1 500 m 斜拉桥构件应力/MPa		
	主塔	主梁	拉索	主塔	主梁	拉索
横桥向极限风荷载(35.4 m/s)	12.6	152	623	14.1	178	551
顺桥向极限风荷载(35.4 m/s)	11.5	107	619	12.3	115	560
横桥向风荷载(5.8 m/s) + 吊机	11.8	107	619	12.1	116	547
顺桥向风荷载(5.8 m/s) + 吊机	11.2	106	619	12.1	114	547

4.3 1 500 m 以上斜拉桥施工过程中结构强度分析

在比较了正常施工和极限风荷载作用下斜拉桥的强度,得到在极限风荷载作用下,结构内力最大。从有限元计算分析得到,1 300 m 和 1 500 m 斜拉桥中,横向风荷载产生的弯曲压应力分别占总压应力的 36.6% 和 40%。

1 500 m 以上斜拉桥简化计算时,采用平均索法^[5]。如图 4 所示:拉索在塔上锚固长度为 h_2 ,采用平均索,塔上锚固点距离塔顶 $h_2/2$,梁上锚固点在梁跨 $L/4$ 处。计算得到不同跨径下斜拉桥主梁应力,见图 5 所示。

研究施工阶段结构强度对斜拉桥极限跨径的影响,考虑结构在施工过程可以经受 30 a 一遇风荷载作用。由 1 300 m 和 1 500 m 有限元模型分析得到,在横向极限风荷载作用下,主梁自重应力占 60% ~ 63.4%,风荷载产生的应力占 36.6% ~ 40%,现在以自重应力占允许应力 60% (即 126 MPa) 为极限强度判别准则,得到斜拉桥最大跨径为 1 800 m。

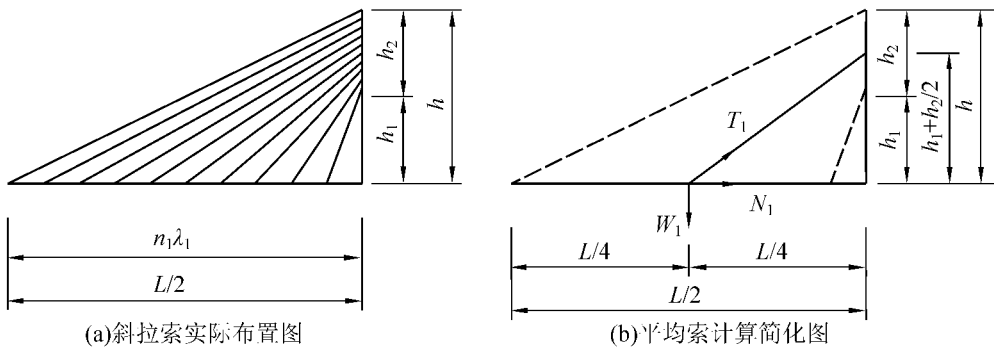


图4 斜拉桥主梁轴力计算简化图

5 施工过程中结构线形对斜拉桥极限跨径的影响

5.1 斜拉桥施工过程中结构满足线形要求的判别准则

参照苏通大桥设计说明^[3],15℃设计基准温度下,成桥状态施工控制达到的误差目标为:①主梁竖向线形误差: $\Delta g = \pm [25 + 0.5 \times (x - 25)]$ mm,且线形匀顺。②主梁横向线形误差: $\Delta h = \pm x/200$ m,且线形匀顺。③塔顶偏位误差: $\Delta t = \pm H/2\ 000$ mm。

5.2 斜拉桥施工过程中结构线形分析

采用 Ansys 软件计算 1 300 m 和 1 500 m 斜拉桥施工过程中结构在各种工况下的变形,见表 3 所示(其中,Z 方向为横桥向变形;X 方向为顺桥向变形;Y 方向为竖向变形)。按照判别准则 1 300 m、1 500 m 斜拉桥施工过程中满足线形要求。

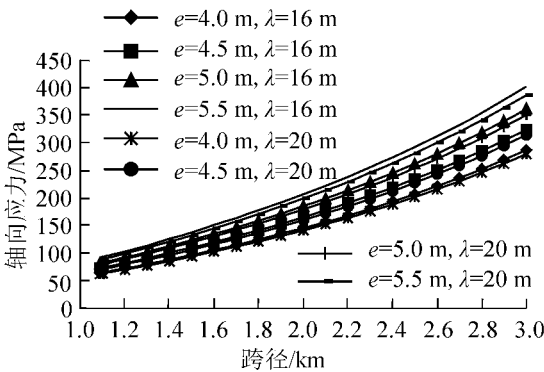


图5 斜拉桥主梁轴力计算简化图

表3 1 300 m 和 1 500 m 斜拉桥施工过程中线形分析

荷载描述	塔顶(1 300 m)		主梁悬臂端(1 300 m)		塔顶(1 500 m)		主梁悬臂端(1 500 m)	
	Z 方向	X 方向	Z 方向	Y 方向	Z 方向	X 方向	Z 方向	Y 方向
横桥向极限风荷载(35.4 m/s)	95	19	2 036	73	157	19	3 322	100
顺桥向极限风荷载(35.4 m/s)	0	53	0	115	0	62	0	137
横桥向风荷载(5.8 m/s) + 吊机	3	0	55	2	4	0	89	3
顺桥向风荷载(5.8 m/s) + 吊机	0	2	0	3	0	2	0	4

5.3 1 500 m 以上斜拉桥施工线形简化计算

从上述分析得到,斜拉桥在施工阶段 30 a 一遇极限风荷载作用下,容易产生较大的变形,尤其是横桥向风荷载作用下,主梁悬臂端有很大的横向位移。采用简化模型来分析跨径大于 1 500 m 时斜拉桥在极限风荷载作用下的线形。可以认为,最大单悬臂状态在横桥向风荷载全部由加劲梁抗弯承受,结构可以简化为悬臂梁在均布荷载作用下求解自由端的位移。其计算公式为

$$\delta = q l^4 / 8 E I \tag{2}$$

式中,q 为主梁承受横桥向风荷载, $q = q_{梁} + q_{索} / 2$ 。计算得到不同跨径斜拉桥主梁横桥向位移,见图 6

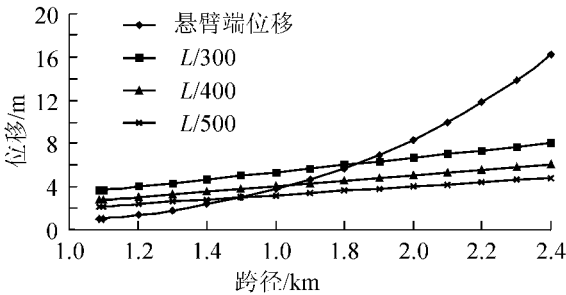


图6 斜拉桥横桥向位移-跨径关系图

所示。悬臂端位移以 $L/400$ 作为判别准则得到,斜拉桥极限跨径为 1 600 m。

6 施工稳定性对斜拉桥极限跨径的影响

6.1 斜拉桥非线性材料本构关系

第二类稳定分析时主要杆件(主梁、主塔、斜拉索、桥墩)采用非线性材料,次要杆件(附加刚臂)采用线性材料^[6]。参照苏通大桥的材料^[3],主梁采用 Q345qD 钢材,主塔采用 50 号混凝土,桥墩采用 40 号混凝土。钢材采用理想的弹塑性本构关系,钢材屈服强度按 345 MPa 计算。混凝土参照日本规范,受压区混凝土边缘纤维应力按 0.80 倍的抗压强度计算,即 $\sigma_h = 28$ MPa。斜拉索参照日本道路桥梁规范,取名义屈服应力为 0.7% 延伸率时的强度,即 $\sigma_y = 1\ 365$ MPa。不同材料本构关系见图 7 所示。

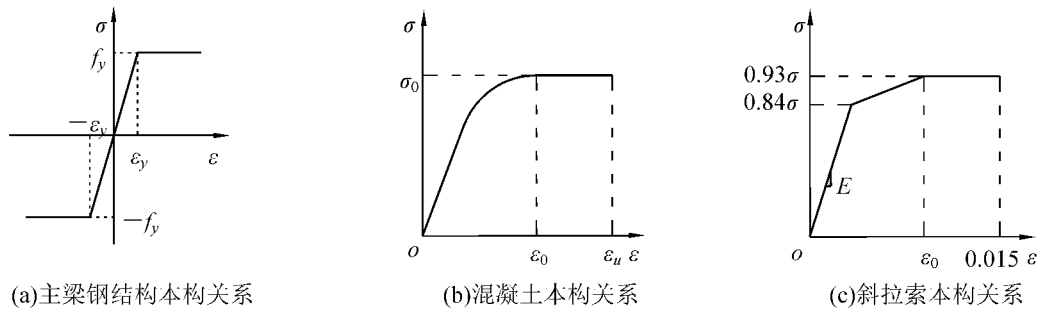


图 7 钢材、混凝土和斜拉索本构关系图

6.2 斜拉桥结构稳定安全性评价准则

对于二类稳定安全系数,根据失稳破坏不得先于强度破坏的原则,采用边缘屈服准则得到不考虑荷载分项系数的整体稳定安全系数应该大于容许应力安全系数^[7],即对于钢结构最小稳定安全系数应该大于 1.7;钢筋混凝土结构最小稳定安全系数应该大于 1.42。

6.3 斜拉桥结构稳定计算分析结果

采用有限元计算分析 1 088 ~ 1 800 m 斜拉桥在施工最大单悬臂状态下结构在自重、横桥向风荷载、顺桥向风荷载组合下第二类稳定系数,见表 4 所示。

表 4 斜拉桥施工阶段稳定性分析

跨径/m	荷载描述	稳定系数			
		主梁屈服	主塔屈服	拉索屈服	极限承载能力
1 088	恒载 + 横桥向风荷载	2.24	2.64	3.04	3.42
1 088	恒载 + 顺桥向风荷载	2.67	2.67	3.07	3.53
1 300	恒载 + 横桥向风荷载	1.88	2.23	2.53	2.93
1 300	恒载 + 顺桥向风荷载	1.90	2.28	2.55	2.96
1 500	恒载 + 横桥向风荷载	1.79	2.18	2.58	2.79
1 500	恒载 + 顺桥向风荷载	1.89	2.21	2.61	2.85
1 800	恒载 + 横桥向风荷载	1.44	1.81	—	2.15
1 800	恒载 + 顺桥向风荷载	1.84	2.09	—	2.68

经过分析不同跨径斜拉桥在施工阶段的稳定系数和破坏路径,得到以下结论:

(1) 斜拉桥施工阶段随着跨径的增大,悬臂长度也随之增大,结构刚度下降。稳定性随着跨径的增大而降低。

(2) 斜拉桥施工阶段第二类稳定破坏路径为主梁——主塔——斜拉索(1 800 未屈服)——极限破坏。结构第一屈服点均为塔根处主梁发生屈服。

(3) 随着悬臂长度的增大,横桥向风荷载对结构稳定性的影响越来越大。这主要是因为横桥向风荷载使塔根处主梁产生较大的横向弯曲应力,这种效应随着悬臂长度的增大越来越显著,从而使主梁过早进入屈服状态。

(4) 按照主梁钢结构最小稳定安全系数应该大于 1.7 的判别准则,得到斜拉桥施工阶段满足稳定性

要求的跨径在1 500~1 800 m之间,由于1 500 m左右斜拉桥二类稳定主梁稳定系数已经接近极限稳定系数1.7,保守判断斜拉桥满足施工稳定性的极限跨径为1 500 m。

7 结论

在苏通大桥施工技术的基础上,考虑现有材料生产能力,斜拉桥建造能力和施工技术水平,通过空间有限元研究分析,简化模型解析分析,对于考虑施工可行性和施工安全性的斜拉桥极限跨径进行详细深入的讨论,文章对于斜拉桥在现有制造和施工水平下的极限跨径得出以下几点结论:

(1)研究结果显示,采用苏通大桥的桥型结构和施工技术,从施工角度分析,斜拉桥可以实现的跨径为1 500 m。

(2)综合研究各种施工因素对斜拉桥极限跨径的影响,得到当前条件下制约斜拉桥跨径发展的因素依次是:①施工过程结构失稳性要求;②施工过程刚度要求;③施工过程结构强度要求;④斜拉索张拉能力要求。

(3)如果要进一步增大跨径,可以采用以下措施:①控制斜拉桥施工稳定性。通过设置临时墩,采用高强度钢材等技术提高稳定系数。②控制斜拉桥施工过程中在横桥向极限风荷载下横向变形。可以在中跨设置临时墩,从而减小施工时悬臂长度,减小横向变形。③控制斜拉桥施工过程中强度。施工阶段严格控制施工进度,强度达到设计要求后再进行下一工况的施工。

(4)分析表明,从施工角度限制斜拉桥跨径的主要因素是随着斜拉桥跨径的增大,悬臂长度也不断增大,从而对结构在施工阶段的强度、刚度、稳定性造成很大的影响,这种影响随着跨径的增大越来越显著。所以,对于大跨径斜拉桥,为保证施工阶段结构的安全性,建议在主跨增设临时墩,以减小悬臂长度。

参 考 文 献

- [1]王伯惠.斜拉桥结构发展和中国经验[M].北京:人民交通出版社,2003:443-455.
- [2]王政兵,龚志刚.跨径1400m钢斜拉桥的可行性[J].世界桥梁,2005(1):5-10.
- [3]彭德运,彭晔丹.苏通大桥主桥设计与施工[J].现代交通技术,2007,4(4):34-38.
- [4]陈明宪.斜拉桥建造技术[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [5]尼尔斯J吉姆辛.缆索承重桥梁构思与设计[M].姚玲森,林长川,译.北京:人民交通出版社,1992:263-266.
- [6]石雪飞.朝天门大桥施工过程仿真分析——稳定研究分册[R].上海:同济大学桥梁工程系,2006.
- [7]陈艾荣.苏通长江公路大桥斜拉桥静力稳定性分析研究[R].上海:同济大学桥梁工程系,2004.

Study on Ultimate Span of Cable-Stayed Bridge with Current Construction Technique

Shi Xuefei, Shen Jiongwei, Chen Hui

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: On the basis of the structure figure of Sutong Bridge, the ultimate span of cable-stayed bridge with current construction technique is discussed in this paper. From the viewpoint of manufacture capability, key construction technique feasibility and construction safety, the quantitative analysis of ultimate span of cable-stayed is carried out by way of calculating with FEM and simplified model method accompanied with investigation of capability of construction device. The tension capacity of the jack, the controllability of strength and figuration of structure during erection process, and stability of structure are considered in the study. The result shows that the ultimate span of cable-stayed bridge is 1 500 m with the construction technique used in the construction of Sutong Bridge. The ways to enhance ultimate span are also discussed.

Key words: cable-stayed bridge; ultimate span; construction feasibility