

苏通大桥主桥结构体系研究

张喜刚¹, 裴岷山¹, 袁洪¹, 徐利平², 朱斌¹

(1. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088; 2. 同济大学建筑设计研究院, 上海 200092)

[摘要] 苏通大桥主跨 1 088 m, 是目前世界上最大跨径的斜拉桥。大桥桥位处建设条件复杂, 抗震和抗风要求高, 选择合理的桥梁结构体系是保证结构安全和功能的关键。介绍了苏通大桥结构体系的比选过程, 比较了全飘浮、黏滞阻尼器、液压缓冲器和塔梁固接 4 种体系, 重点分析对比了不同参数下黏滞阻尼器和液压缓冲器的结构响应, 首次提出了用于桥梁的带有附加限位功能的特大型液体黏滞阻尼器, 对阻尼器的设计参数进行了分析研究, 并在苏通大桥上实现了这一新型装置。

[关键词] 苏通大桥斜拉桥; 结构体系; 阻尼器; 阻尼参数; 限位

[中图分类号] U445 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2009)03-0020-06

1 前言

几十年来, 现代斜拉桥的跨径飞速发展。从 1993 年我国上海杨浦大桥主跨 602 m, 到 1995 年法国诺曼底大桥主跨 856 m, 到 1998 年日本多多罗大桥主跨 890 m, 刚刚建成通车的主跨 1 088 m 的苏通大桥更是把斜拉桥推向了千米以上的超大跨径。斜拉桥跨径的不断突破正是建立在合理的结构体系基础上。斜拉桥一般分为 3 种不同的结构体系, 即飘浮体系、约束体系和固接体系^[1-3]。

飘浮体系指主梁除两端或塔墩处有竖向支承外, 其余均以拉索作为支承, 成为在纵向可稍作浮动的多点弹性支承主梁的体系。

约束体系是指在塔梁相交处设置一处或多处刚性或柔性约束装置, 可只约束纵向, 也可同时约束纵向和竖向。柔性约束又可分为弹性约束和阻尼约束。弹性约束在结构中对任何静力和动力的响应都发生作用。而阻尼约束对静力作用的温度变化、平均风作用和车辆等缓慢荷载作用不发生响应, 但对汽车制动、脉动风和地震等急速荷载起到阻尼约束作用, 这类约束目前常用的形式有黏滞阻尼器和液

压缓冲器等。

固接体系以塔梁刚接为特征, 一种是主梁与上塔柱固接, 支承于下塔柱(墩), 另一种是塔、梁、墩刚接, 这种体系的优点是结构刚度大, 变形小, 但固接体系动力性能差、温度内力大。

针对苏通大桥的建设特点, 分析比较全飘浮、黏滞阻尼、液压缓冲和塔梁固接 4 种体系, 提出适用于超大跨径斜拉桥的合理结构体系。

2 苏通大桥结构体系选择的目标

苏通大桥桥位处建设条件有 4 大特点——气象条件较差、水文条件复杂、基岩埋藏深和通航标准高。主航道桥是整个建设项目中的重点工程, 采用主跨 1 088 m 的双塔双索面斜拉桥, 边跨每侧共设置 3 个桥墩, 其跨径布置为 $(100 + 100 + 300) + 1\ 088 + (300 + 100 + 100) = 2\ 088$ m。主梁为扁平流线型钢箱梁, 含风嘴全宽 41.0 m, 梁高 4.0 m。倒 Y 型索塔高约 300 m。主塔基础变直径钻孔灌注桩各 131 根桩^[4]。

对于超大跨径的桥梁, 选择合理的桥梁结构体系是保证结构功能和安全的關鍵。随着跨径的增

[收稿日期] 2008-11-16

[基金项目] 国家科技支撑计划资助项目(2006BAC04B01)

[作者简介] 张喜刚(1962-), 男, 河南许昌市人, 教授级高级工程师, 中交公路规划设计院有限公司董事长兼总经理, 主要从事大跨径桥梁的设计与研究; E-mail: zhangxigang@hpdi.com.cn

大,桥梁构件向更高、更长、更柔的方向发展,结构也表现出自身刚度越来越小、自身阻尼越来越低的趋势。桥位处风速大、抗震要求高,苏通大桥的结构体系应能达到如下目标^[5,6]:a. 减小地震荷载的动力响应;b. 减小汽车制动和脉动风引起的主梁振动;c. 降低温度荷载的内力;d. 减小大风荷载引起的主梁端部位移,降低对伸缩缝伸缩量的要求;e. 减小大风荷载引起的索塔顶部位移和底部弯矩,确保索塔偏心受压的稳定性。

要解决上述难题需采取措施以提高桥梁的整体刚度和阻尼。提高桥梁的刚度,可以减小静、动力变位、改善结构内力;提高桥梁的阻尼,可以降低由地震、脉动风和汽车制动等动荷载引起的动力反应,起到耗散能量的作用。为此,设计者选择了全飘浮、阻尼约束、索塔与主梁固接的3种结构体系方案进行了比较,如表1所示。

表1 3种结构体系对苏通大桥的适应性对比

Table 1 Comparison of three structural systems for Sutong Bridge

项目	全飘浮	阻尼约束	索塔与主梁固接
优势	振动周期长,可减小地震响应,释放温度内力	对缓慢荷载无约束作用,但对快速荷载发挥约束功能	结构刚度大,利于索塔区主梁安装
劣势	梁端位移过大导致伸缩装置大型化,引起塔顶位移和塔底弯矩过大	静风荷载所引起的梁端位移和索塔底弯矩依然很大	温度荷载和地震荷载在索塔底部产生很大的弯矩
结论	不合适	需要进一步研究,确定采用何种参数下的阻尼装置	不合适

通过表1的定性比较可以看出,在超大跨度桥梁结构中采用全飘浮体系和固接体系可能带来较大的风险,是不合适的,而使用阻尼装置是控制地震、脉动风和汽车制动等动荷载反应的理想途径。常用的阻尼装置有黏滞阻尼器和液压缓冲器两种,通过提供附加阻尼,使动荷载输入能量得到耗散,降低结构动力响应。所不同的是黏滞阻尼器阻尼力与速度呈非线性指数关系 $F = Cv^\alpha$ (基本参数为阻尼系数 C , 速度指数 α), 使主梁的振动通过一定的时间和位移来衰减,通常的阻尼比在 20% ~ 60%; 而液压缓冲器阻尼力与速度呈线性关系 $F = Cv$, 当振动发生时能迅速衰减,通常的阻尼比都大于 100%。

通过黏滞阻尼器或液压缓冲器可以将动荷载反应抑制,而平均风荷载所引起的梁端位移和索塔底部弯矩依然很大。因此,设计者考虑在上述阻尼设备内加设限制位移的功能,以限制大风等荷载作用下的梁端位移和塔底弯矩。下文将有针对性地对限位装置的黏滞阻尼器和液压缓冲器进行比选。

3 设限位的黏滞阻尼器和液压缓冲器的比选

结构分析比选的模式采用苏通大桥的7跨连续全钢梁斜拉桥方案,采用桥梁有限元分析软件进行计算。选取对结构体系较为敏感的荷载,如活载、温度、纵向风、汽车制动力和地震等进行分析,考察结构的各种响应。

3.1 黏滞阻尼器的基本参数分析

纵桥向黏滞阻尼限位约束体系是动力黏滞阻尼和额定行程量的刚性限位两者的组合,以下分别进行阻尼约束参数分析和额定行程分析。

塔梁间设置阻尼器的目的是将主梁的纵向位移、梁塔间的相对位移和结构内力限制到设计要求的范围内,从这一目的出发选择阻尼器的参数阻尼系数 C , 速度指数 α 。根据外荷载作用下参数敏感性分析结果,综合考虑阻尼器位移及阻尼力、塔顶位移、塔底弯矩随阻尼器参数的变化情况。阻尼器的速度指数 α 取 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 1.0 共 5 个值, 阻尼系数 C 取 0, 1 000, 3 000, 5 000, 7 500, 10 000, 15 000, 20 000, 25 000 共 9 个值, 其中 $C = 0$ 相当于全飘浮体系, 总共 45 组参数。每组参数对应的地震反应结果都取 10 组地震动加速度时程所产生的地震反应的平均值, 总共计算了 450 个工况。地震输入考虑纵向和竖向两个方向。另外计算了 $\alpha = 0.15$ 且 $C = 10 000, 15 000$ 两种情况下的结构地震反应, 以考察小速度指数的阻尼器对地震反应的影响规律。

图1~图4分别绘出了阻尼器的位移、阻尼力、塔顶位移、塔底弯矩随阻尼器参数的变化曲线图,可以看出:a. 当阻尼器的速度指数 α 一定时,随着阻尼系数 C 的增大,阻尼器位移、塔顶位移和塔底弯矩基本单调减小,阻尼器的阻尼力单调增大。在很大范围内,塔底弯矩都明显小于飘浮体系的反应;b. 当阻尼系数 C 一定时,阻尼器位移和塔顶位移随着阻尼器的速度指数 α 的增加而增加,阻尼力则相反;当阻尼系数较小时,塔底弯矩随速度指数 α 的

增大而增大,而当阻尼系数较大时,则相反。

$\alpha = 0.15$ 而 $C = 10\ 000, 15\ 000$ 两种情况下的结构地震反应结果表明,小速度指数的阻尼参数对地震反应的影响规律同上所述。

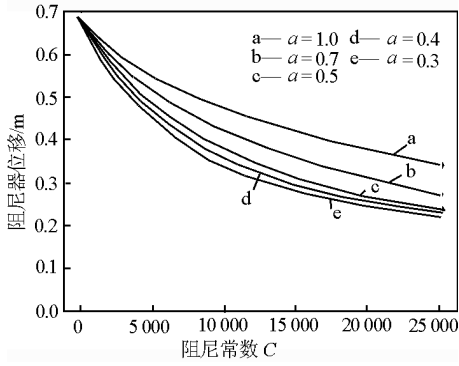


图1 阻尼器参数对阻尼器位移的影响
Fig. 1 Effects on damper's displacements of different parameters

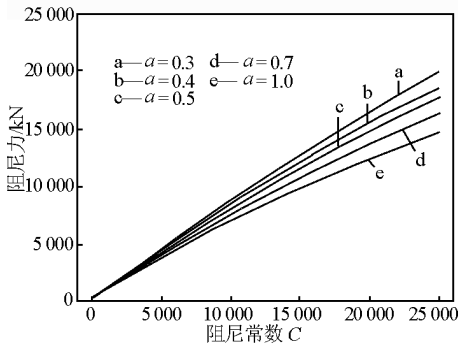


图2 阻尼器参数对阻尼力的影响
Fig. 2 Effects on damping force of different parameters

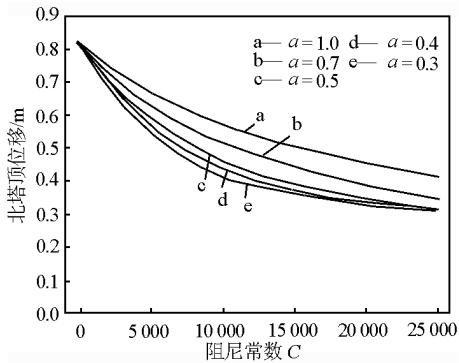


图3 阻尼器参数对塔顶位移的影响
Fig. 3 Effects on tower top displacement of different parameters

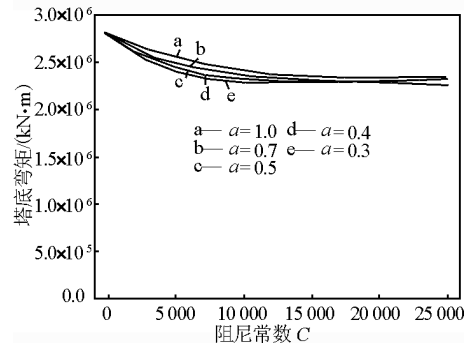


图4 阻尼器参数对塔底弯矩的影响
Fig. 4 Effects on tower bottom moment of different parameters

综合考虑阻尼器位移及阻尼力、塔顶位移和塔底弯矩随阻尼器参数的变化情况,最终确定选用结构响应较小的阻尼系数 C 为 $15\ 000$,指数 α 为 0.4 的阻尼器,阻尼器的最大变形速度为 $0.58\ \text{m/s}$ 。

限位装置的额定行程是控制荷载组合的重要参数,应满足 3 方面的要求:a. 保证在正常运营荷载(车辆、温度)作用下,阻尼器有足够的行程,确保不发生限制位移的情况;b. 保证在正常运营荷载情况下发生地震时,阻尼器有足够的行程能正常工作,不发生限制振幅的情况;c. 尽可能取得较小的阻尼器行程以有效地限制纵风作用下结构的反应,控制伸缩装置的位移量。

控制限位装置的额定行程量的荷载组合及计算见图 5 所示,图中分别取了 3 种可能出现较大梁端位移的荷载组合。组合 1 为活载与温度作用的组合,组合 2 为温度作用和地震作用的组合,组合 3 为地震作用、4 车道活载、整体升降温和日最大平均风的组合,3 种组合的梁端最大位移为 $\pm 745\ \text{mm}$ 。基于上述 3 条原则考虑,确定限位行程为 $\pm 750\ \text{mm}$ 。

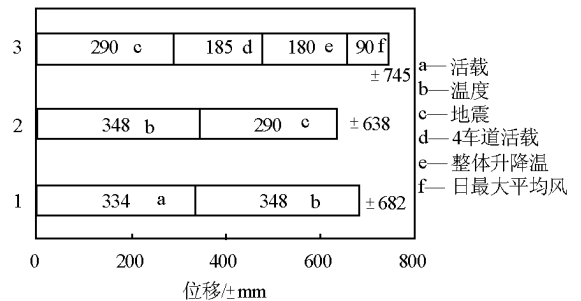


图5 阻尼装置的额定行程确定
Fig. 5 Determination of limit displacement of dampers

通过上述分析,可以确定动力阻尼、刚性限位组合约束的主要参数如下:

黏滞阻尼约束: $F = Cv^\alpha$,速度指数 $\alpha = 0.4$,一个塔梁连接处总阻尼系数 $C = 15\ 000\ \text{kN}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{0.4}$;一个塔梁连接处总阻尼力为 12.1 MN,最大反应速度为 0.58 m/s。

刚性限位:额定行程量为 $\pm 750\ \text{mm}$,限位力为 20.8 MN。

3.2 液压缓冲器的基本参数分析

纵桥向液压缓冲限位约束体系即动力锁定和额定行程量的刚性限位两者组合的结构体系。液压缓冲器的阻尼力与速度的关系为 $F = Cv$,要求在极短时间输出阻尼力使振动停止,阻尼系数 C 需要选取较大值。

地震分析时,可以近似采用塔梁之间刚性约束的结构体系来模拟液压缓冲装置的作用。针对考虑不利冲刷的情况,采用时程分析法对塔梁纵向刚性约束体系进行了地震反应分析;分析中考虑了边墩上滑动支座的摩擦耗能作用,采用 2 500 年重现期的 10 组地震加速度时程作为地震输入,地震输入方式为纵向和竖向同时作用,地震反应分析结果取 10 组反应的平均值。

表 2、表 3、表 4 分别为索塔底及基础的地震内力反应、各支座的抗震内力变形反应以及塔顶、梁端的地震位移反应。

表 2 索塔控制断面内力最大值

Table 2 Maximum of internal forces of towers

截面	纵桥向剪力/kN	横桥向弯矩/(kN·m)
北塔底	4.69E+04	3.16E+06
北塔承台底	3.32E+05	7.12E+06

表 3 各支座(装置)反应最大值

Table 3 Maximum of reactions of supports

支座位置	塔、梁纵向全限位	
	力/kN	位移/m
北塔	6.42E+04	0
北近塔辅助墩	1.38E+02	0.474
北远塔辅助墩	9.00E+01	0.385
北过渡墩	5.00E+01	0.328

表 4 关键节点纵向位移最大值

Table 4 Maximal longitudinal displacements of key points

位置	位移/m
北塔顶	0.237
北梁端	0.190

结果表明,液压缓冲约束可以有效地控制塔、梁的纵向位移。但是,塔、梁间纵向刚性约束体系对锁定装置的内力也提出了很高的要求,一个塔梁连接处总锁定力达 76.2 MN,如布置 4 个锁定装置,则每个装置的地震锁定力为 19 MN。

通过上述分析和类似的额定行程量刚性限位静力分析,可以确定动力锁定、刚性限位组合约束的主要参数如下:

动力锁定约束:一个塔梁连接处总锁定力为 76.2 MN。

刚性限位的额定行程量: $\pm 750\ \text{mm}$ 。

3.3 黏滞阻尼器和液压缓冲器地震反应分析

在地震荷载作用下,塔、梁间分别安装前述 3.1 和 3.2 中选取的特定参数的黏滞阻尼器和液压缓冲器,以及飘浮体系下桥梁的结构反应见图 6—图 8,所需要提供的阻尼力见图 9。

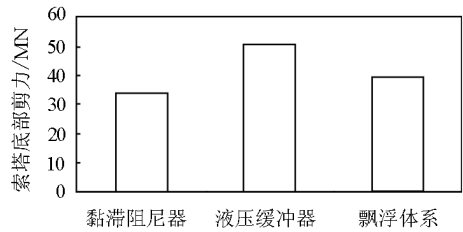


图 6 索塔底部剪力

Fig. 6 Shears at the bottom of the pylon

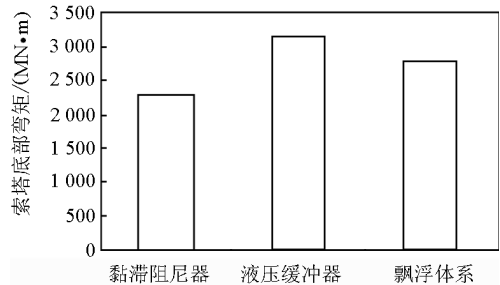


图 7 索塔底部弯矩

Fig. 7 Moments at the bottom of the pylon

比较上述结果,可以发现:a.黏滞阻尼体系的纵向地震位移反应略大于液压缓冲体系,远小于飘浮体系,是飘浮体系的 40%;b.黏滞阻尼体系的纵桥向塔底剪力和弯矩最小,锁定约束体系最大。

从上述分析结果可以看出,采用黏滞阻尼器后,桥梁内力、位移等地震响应均小于液压缓冲器方案,且所需要提供的阻尼力仅是液压缓冲器的 1/6。因此,苏通大桥塔梁间最终采用了带有限位功能(GAP

= ±750 mm, $F = 40$ MN) 的黏滞阻尼器 ($C = 15\ 000$ $\text{kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.4}$, $\alpha = 0.4$)。

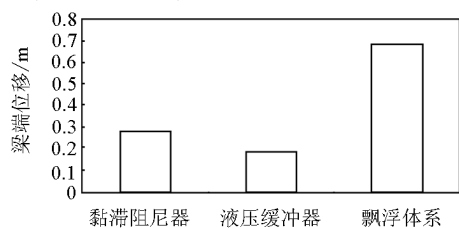


图8 梁端位移

Fig. 8 Displacements at one end of the girder

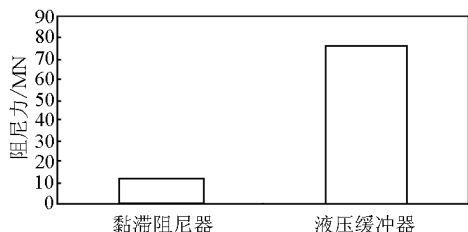


图9 需要提供的阻尼力

Fig. 9 Damping force required

4 推荐结构体系的参数

根据计算分析所得到的黏滞阻尼器设计参数,设计者决定在每个塔、梁连接处顺桥向设置4个黏滞阻尼器,全桥共8个,单个阻尼器详细设计参数见表5。横桥向设置抗风支座约束索塔处主梁的横向位移。主梁与桥墩之间设置纵向滑动支座,并限制横向相对运动。

表5 单个阻尼器设计参数

Table 5 Design parameter for single viscous damper

分类	名称	阻尼限位装置
动力	力与速度函数	$F = Cv^\alpha$
阻尼	速度指数 α	0.4
参数	阻尼系数 $C/(\text{kN} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-0.4})$	3 750
	最大反应速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.58
	阻尼力/kN	3 025
	地震反应位移/mm	±290
静力	最大间隙/mm	±750
限位	静力限位力/kN	9 870
参数	限位刚度/ $(\text{MN} \cdot \text{m}^{-1})$	100
	限位位移量/mm	100
	温度变形速度	10 h 232 mm
	温度变形最大阻力/kN	$< 3\ 025 \times 5\ \% = 151.25$
	阻尼器水平转动/ $(^\circ)$	2

5 特殊阻尼器试验要求

在先进的阻尼器技术和产品进入我国桥梁领域的七八年历史中,已有十几座桥梁已经或正在安装不同的阻尼器。然而,在我国现行桥梁规范中,还没有关于应用阻尼器的规定,也没有对于阻尼器测试验收的相应要求。

根据黏滞阻尼器在苏通大桥的使用要求和桥位处的场地条件,设计者在中国首次提出了阻尼器系统的使用测试要求,并将阻尼器系统和桥梁健康监测系统结合起来。测试内容包含出厂检验测试和原型测试两部分,前者包括外形测试、耐压测试、总行程测试、慢速位移最大阻力测试、静力限位测试、动力测试和极限性能测试;后者包括不同频率速度时动力性能测试、抗疲劳磨损性能测试和不同温度下的动力性能试验^[7]。

6 特殊阻尼器设计

根据设计者所提出的阻尼器设计参数和测试要求,业主采取国际招标的方式确定了美国 Taylor 公司承担阻尼器的研发、制造工作。如图10所示为苏通大桥安装了阻尼器的实景,这在世界上是首次将限位功能和阻尼功能组合于液体黏滞阻尼器一体,也是首次将桥梁用阻尼器与健康监测系统联系在一起。

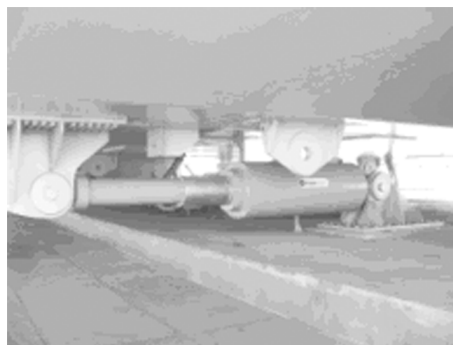


图10 苏通大桥阻尼器实景

Fig. 10 Site pictures of dampers in Sutong Bridge

7 结语

1)通过对苏通大桥结构体系的比选,设计者在世界上首次将限位、阻尼两种功能集于一体的黏滞阻尼器应用于苏通大桥,有效提高了桥梁刚度、改善了结构阻尼,解决了大跨度桥梁设计所遇到的关键技术难题。

2)带有附加限位功能的特大型液体黏滞阻尼器在桥梁中的应用,丰富了阻尼器的功能内涵,推动了阻尼器的研究和制造技术发展。

3)黏滞阻尼器和液压缓冲器有不同的阻尼性能,需根据桥梁的具体要求和参数优化结果确定阻尼设备的种类。

4)阻尼设备的测试内容可根据不同桥梁的场地条件特点确定。

参考文献

- [1] Virlogeux M. Recent evolution of cable-stayed bridges[J]. *Engineering structures*, 1999, (21):737-755
- [2] Honshu-Shikoku Bridge Authority. The Tatara Bridge: design

- and construction technology for the world's longest cable-stayed bridge [R]. Tokyo, 1999
- [3] 陈忆前. 超大跨经斜拉桥的结构体系[D]. 上海:同济大学, 2006
- [4] Zhang Xigang, Yuan Hong, Pei Minshan, et al. General design of Sutong Bridge[J]. *Engineering Science*, 2009, 7(1):6-11
- [5] 裴岷山,张喜刚,袁洪,等. 苏通大桥主桥结构体系研究和特殊阻尼器设计[A]. 中国公路学会桥梁和结构工程分会2006年全国桥梁学术会议论文集[C]. 北京:人民交通出版社, 2006.9-14
- [6] 张喜刚,裴岷山,袁洪,等. 苏通大桥主桥结构体系专题研究报告[R]. 北京:中交公路规划设计院,2004
- [7] 马良喆,陈永祁. 对液体黏滞阻尼器动力性能及测试要求的研究及探讨[J]. *建筑结构*, 2008, 38(5):65-69

Study on structural system of Sutong Bridge

Zhang Xigang¹, Pei Minshan¹, Yuan Hong¹, Xu Liping², Zhu Bin¹

(1. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China;

2. Architectural Design & Research Institute of Tongji University, Shanghai 200092, China)

[Abstract] Sutong Bridge, whose layout is (100+100+300)+1 088+(300+100+100) m, marks the largest span of cable-stayed bridges in the world. The complex natural condition at the bridge site and the strict requirements for resistance of wind and seismic action make it crucial to choose a favorable structural system to assure the function and safety of the bridge. The comparison among several optional structural systems for Sutong Bridge is illustrated, the optional structural systems contain floating, viscous damper, hydraulic buffer and fixed system. After detail analysis is carried out for viscous damper and hydraulic buffer, super liquid viscous damper with additional displacement limitation is designed for the first application in bridge engineering. The parameters for the damper is analyzed and studied and the dampers are installed successfully after required damper tests.

[Key words] Sutong cable-stayed bridge; structural system; damper; damper parameter; displacement restraint