

自锚式斜拉-悬吊协作体系桥动力分析

黄海新^{1,2}, 张哲^{*1}, 石磊¹

(1. 大连理工大学 桥梁研究所, 辽宁 大连 116024;
2. 河北工业大学 土木工程学院, 天津 300401)

摘要: 自锚式斜拉-悬吊协作体系桥是一种新近出现的国内外研究尚少的桥型. 以大连港航道桥设计方案为背景, 利用空间有限元模型通过与地锚式桥的动力特性对比分析, 得出大跨径自锚式斜拉-悬吊协作体系桥具有主梁竖向弯曲振型总是优先出现等新的动力特点; 针对主跨主缆易于振动的特征提出了采用斜向交叉拉索的抑振措施, 并给出其最优设置位置为0.2875跨度处; 利用反应谱方法对该桥型的动力性能初步匡算表明, 该新型体系桥的地震响应较大, 其抗震设计应引起足够的重视.

关键词: 自锚式斜拉-悬吊协作体系桥; 抑振措施; 反应谱
中图分类号: U448.25 **文献标识码:** A

0 引言

随着我国交通事业的进一步发展, 为跨越海峡、江河和联系岛屿, 需要建设多座大跨度桥梁, 这些大桥工程将面临深水基础、软土地基、强台风等自然条件的影响, 仅采用传统的单一斜拉桥或悬索桥已不能满足工程需要. 为此, 能够克服斜拉桥和悬索桥各自的不足而综合二者优点的斜拉-悬吊协作体系桥为这些工程的实施提供了一种较为合理的解决方案. 已有的研究及实践证明^[1-3], 该体系具有跨越能力大、地质条件适应性强、施工难度及风险小、造价低等卓越的力学特性和良好的经济性能. 在斜拉-悬吊协作体系桥的基础上, 最近, 建设中的大连庄河大桥, 以及规划中的大连湾跨海大桥设计方案中桥梁工程师们又创新性地采用了自锚体系, 该体系将主缆锚固在主梁端部, 只在施工时设置临时锚锭, 其不但具备了地锚式斜拉-悬吊协作体系桥的大部分优点, 同时又降低了工程造价, 更好地适应了深海软土地基的建设. 本文鉴于目前自锚式斜拉-悬吊协作体系桥的理论研究滞后于实际工程应用现状, 以大连港航道桥为工程实例, 主要针对该体系的动力特性及地震响应进行分析, 以期对该类桥

型的进一步设计和完善提供有价值的参考.

1 大连港航道桥设计方案简介及动力特性分析

1.1 设计方案简介

大连湾跨海大桥是跨越大连湾的一条公路通道, 主要功能是沟通大连湾两侧新老市区, 并将大连湾北部的高速公路和南部快速路相互衔接起来. 大连港航道桥即为跨海大桥工程中的主要通航孔桥之一. 考虑大连湾内船舶等级和航空安全的需要, 在大连港航道, 通航孔桥主跨为800 m, 桥下净空为53 m, 桥塔顶标高不超过174 m, 穿越锚地两侧安全带距离为700 m. 本项目大桥工程所处大连湾水域水深约10 m, 为降低在水中修建锚碇的难度和风险, 降低工程造价、缩短工期, 桥梁工程师们构思出了自锚式斜拉-悬吊协作体系桥, 其主跨由520 m的斜拉桥和280 m的悬索桥这两种设计和施工都比较成熟的体系综合而成, 见图1.

大连港航道桥跨径布设为280 m+800 m+280 m, 边跨各设置一个辅助墩. 同时, 为改善结构性能, 以减少主梁、缆索及锚块等的材料用量,

收稿日期: 2005-12-19; 修回日期: 2007-06-18.
基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(200631882350).
作者简介: 黄海新(1976-), 男, 博士; 张哲(1944-), 男, 教授, 博士生导师.

其中斜拉桥部分采用预应力混凝土梁,吊桥部分采用轻质钢箱梁,主塔采用 H 形双独柱索塔,扇形索面,塔墩固接体系,主梁在桥塔处设竖向支

撑. 在交接区设置了 4 对与斜拉索相交叉的竖直吊索,以加强该区域及改善边吊索的疲劳问题.

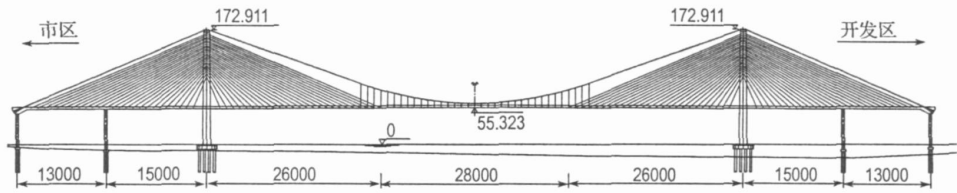


图 1 大连港航道自 锚式斜拉 - 悬吊 协作体系桥总 布置图 (单位: mm)

Fig. 1 General configuration of Dalian Harbor's sea-route self-anchored cable-stayed suspension bridge (unit mm)

1.2 模型建立及动力特性对比分析

本文采用应用最多的单脊梁模式建立三维空间有限元模型. 单脊梁模式建模方便,计算量小,其缺点在于对主梁的翘曲扭转刚度不能充分考虑,因而可能对结构各阶频率产生一定的影响,而模型的精确程度直接关系到动力响应分析的精度,为此本文又建立了更为精确的三主梁模式以验证单脊梁模式的精度. 模型中主梁、主塔、桥墩及横系梁等采用空间梁单元模拟,主缆、吊杆和斜拉索则采用空间杆单元模拟,并考虑了其初内力对结构刚度矩阵的贡献. 主梁在纵向可自由滑动,在与桥塔交叉处设竖向支撑,侧向被桥塔所约

束. 计算结果见表 1. 表中单脊梁模式和三主梁模式结果对比表明,由于本桥采用抗扭刚度较大的闭口箱形截面及双索面形式,主梁的翘曲扭转刚度对各阶振动频率影响很小,采用单脊梁模式进行动力特性及其响应分析完全可以满足精度要求. 同时,为便于与地锚式斜拉 - 悬吊协作体系桥的动力特性进行对比,仅将自锚式斜拉 - 悬吊协作体系桥主缆的锚固方式进行修改,即将主缆两端直接锚固于地面,其余条件均相同(这里暂不论其合理性,仅作参考之用). 采用 Lancons 法,取前 10 阶振型进行计算,所得频率和振型见表 1.

表 1 自 锚式斜拉 - 悬吊 协作体系桥与地锚式桥自 振频率对比

自锚式斜拉 - 悬吊协作体系桥			地锚式斜拉 - 悬吊协作体系桥		
序号	频率 /Hz	振型特性	频率 /Hz	振型特性	
1	0.113 60(0.109 82)	一阶反对称竖弯加纵飘	0.166 63(0.169 54)	一阶对称侧向振动	
2	0.163 97(0.166 99)	一阶对称侧向振动	0.190 78(0.183 96)	一阶反对称竖弯加纵飘	
3	0.228 61(0.223 33)	一阶对称竖弯	0.248 48(0.243 61)	一阶对称竖弯	
4	0.282 74(0.272 60)	二阶反对称竖弯	0.313 07(0.309 30)	主跨缆面反向侧向振动	
5	0.309 13(0.309 38)	主跨缆面反向侧向振动	0.314 11(0.313 26)	二阶反对称竖弯	
6	0.313 07(0.313 41)	主跨缆面同向对称侧向振动	0.317 06(0.317 34)	主跨缆面同向对称侧向振动	
7	0.317 68(0.318 01)	主跨缆面同向反对称侧向振动	0.320 85(0.321 16)	主跨缆面同向反对称侧向振动	
8	0.326 98(0.327 24)	主跨缆面反向侧向振动	0.331 44(0.331 64)	主跨缆面反向侧向振动	
9	0.335 15(0.327 86)	二阶对称竖弯	0.346 42(0.344 85)	一阶反对称侧向振动加主跨缆面振动	
10	0.343 77(0.344 34)	一阶反对称侧向振动加主跨缆面振动	0.351 25(0.346 93)	二阶对称竖弯	

注: 表中括号内数值为三主梁模型计算结果

从表中可以发现以下特点: (1) 自锚式斜拉 - 悬吊协作体系桥的频率低于相同振型的地锚式桥; (2) 自锚式斜拉 - 悬吊协作体系桥的第一阶振型为主梁竖向弯曲和纵向飘浮相互耦合的振型,

而地锚式桥第一阶振型为主梁侧向弯曲振动; (3) 对于相邻两阶的振型,与地锚式桥相比自锚式斜拉 - 悬吊协作体系桥的主梁竖向弯曲振型总是优先出现

不同的动力特性是由于二者不同的锚固方式,从而使主缆对主梁的刚度产生不同程度的影响. 自锚式斜拉-悬吊协作体系桥主缆直接锚固在梁端,主梁要承受主缆的较大水平分力,导致其抗弯刚度降低. 本文自锚式斜拉-悬吊协作体系桥与地锚式桥动力特性的差异又不同于文献 [4-5] 中一般的自锚式悬索桥和地锚式悬索桥动力特性的区别,文献 [4] 和 [5] 中对比研究仅发现自锚式悬索桥的频率低于地锚式悬索桥,并未发现具有上述 (3) 加劲梁竖向弯曲振型总是优先出现的特点,其原因在于文献 [4] 和 [5] 中悬索桥的跨径与本方案桥相比均较小 (前者跨径为 37 m+ 90 m+ 37 m, 后者 102.5 m+ 240 m+ 102.5 m), 不足以产生更大的对加劲梁的刚度产生重大影响从而 影响加劲梁振型出现先后次序的水平轴力.

1.3 主缆的振动控制

值得指出的是,从表 1 给出的自锚式斜拉-悬吊协作体系桥的自振特性可以发现,主跨缆面的振动出现较早,且在前十阶振型中占了将近一半,其原因在于钢梁不能为其提供足够的重力刚度,若改为混凝土主梁或加大悬索桥占主跨的比例,主缆重力刚度提高的同时势必需加大锚块重量、主缆的截面积及主梁的轴向刚度,这将增加工程造价,不经济. 但主跨缆面的过早振动对侧向风荷载下的振动响应及抗风稳定性是不利的,且主缆和加劲梁之间过大的相对位移势必对吊索尤其是跨中处短吊索内锚头处弯曲应力造成疲劳破坏,因此有必要采取简单经济高效的措施抑制主缆的振动. 已有的研究表明^[6-7],主缆和主梁之间设置斜向交叉拉索可以使主缆和主梁间的振动相互制约,加大结构的刚度,提高系统的气动稳定性且简单易行. Miyazaki 等^[6] 对普通悬索桥研究发现,斜向交叉拉索布置在主跨 1/4 跨度处效果最

好. 但自锚式斜拉-悬吊协作体系桥是一种虽与普通悬索桥有相似之处却又有不同之处的新的桥梁结构形式,斜拉桥和悬索桥两种不同刚度的交接区,使得各阶振型的最大振幅位置发生变化,主梁竖弯振幅最大值和主缆的最大幅值多位于该区域附近,斜向交叉拉索的设置位置应与这一动力特性相匹配. 计算结果表明,对本方案桥而言斜向交叉拉索设置在 0.262 5L ~ 0.425 0L (L 为主跨跨径) 处效果优于 0.25L 处,且 0.287 5L 处效果最优. 但由于该处位于斜拉桥与悬索桥的交接区,斜拉索、竖直吊索均汇于此,再加上斜向交叉拉索将使主梁的锚固构造过于复杂,同时也将增加施工的难度,本文决定直接将该处与斜拉索相交叉的竖直吊索改为斜向交叉拉索对主缆进行交叉锚固,这样既起到了加强过渡区的作用,又起到了抑制主缆振动的功效,同时又降低了对主梁锚固构造的设计和施工难度,可谓一举三得. 图 2 为主跨斜向交叉拉索设置示意图. 设置斜向交叉拉索后结构的振型与设置前结构的振型见图 3. 由于设置斜向交叉拉索的目的是抑制主缆的振动,而前四阶振型均非以主缆的振动为主,对其振型影响较小,仅频率略有增加,限于篇幅文中未予列出. 从图 3 可以看出设置斜向交叉拉索后第五阶振型变为主塔横向反对称振动加主梁侧向反对称振动,第六阶振型变为主梁竖向对称振动,第七阶振型变为主塔横向对称振动,第八阶振型变为主塔横向反对称振动,可见主梁和主缆间设置的斜向交叉拉索对跨中主缆的抑振效果显著.

对于边跨主缆及跨中无吊索区段主缆的局部振动问题,可以将用于斜拉索减振的数股抗风振钢索与主缆系结,并在端部加减振器,以减少振动对其产生的疲劳影响.

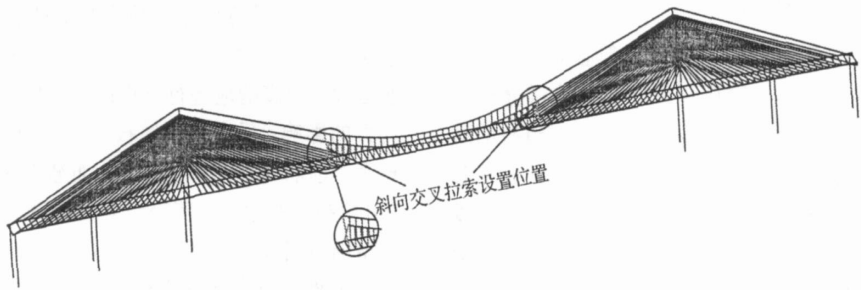


图 2 大连港航道自锚式斜拉-悬吊协作体系桥斜向交叉拉索设置示意图
Fig. 2 Illustration of Dalian Harbor's sea-route self-anchored cable-stayed suspension bridge with intersecting inclined cable

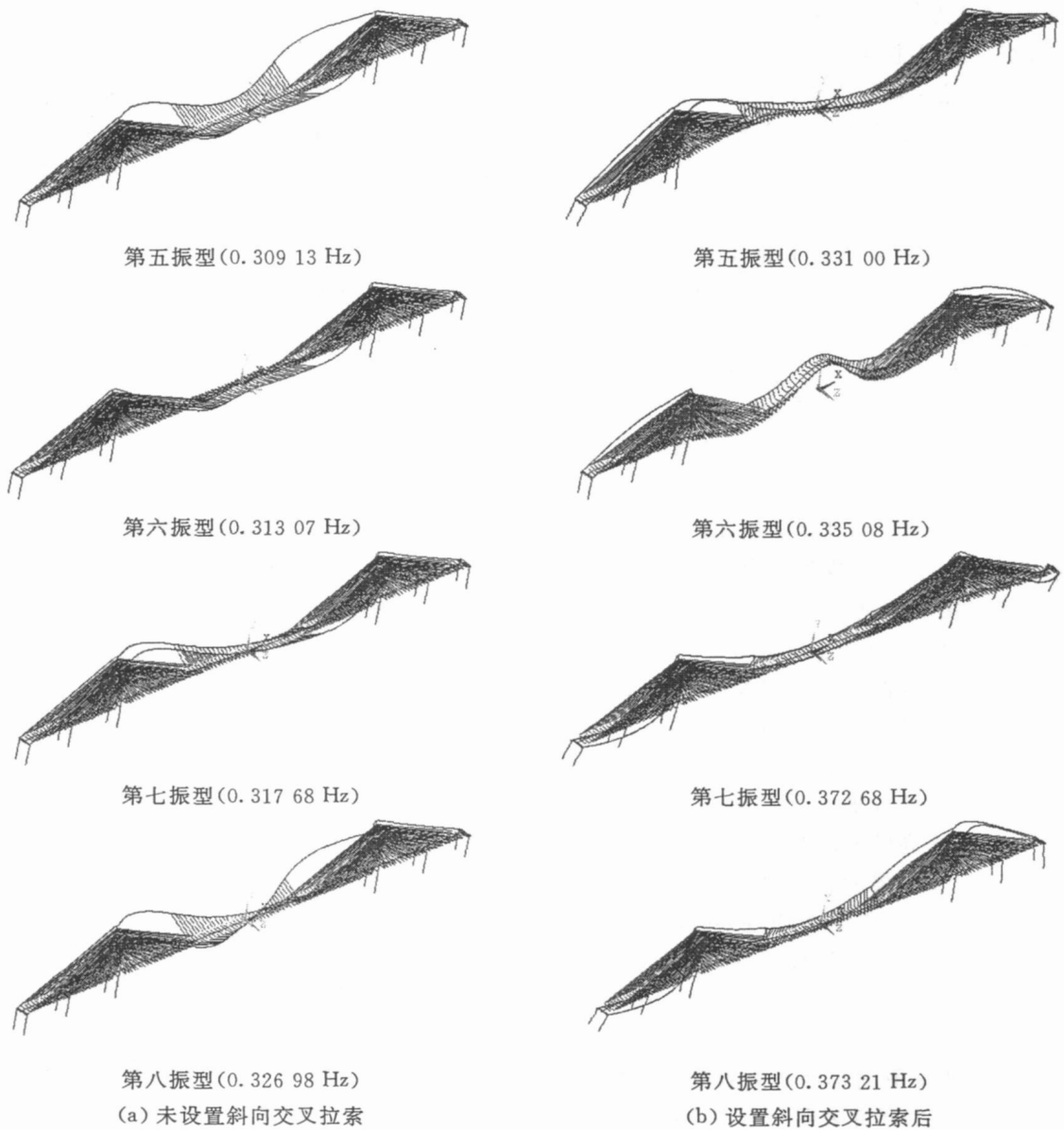


图 3 设置斜向交叉拉索前后自锚式斜拉-悬吊协作体系桥振型比较

Fig.3 Comparison of modes of Dalian Harbor's sea-route self-anchored cable-stayed suspension bridge with and without intersecting inclined cable

2 反应谱分析

在大跨度桥梁的初步设计阶段,反应谱方法^[8]是目前世界各国应用最广泛的抗震分析方法. 本文也采用反应谱方法对大连港航道桥的纵向地震反应进行初步分析,并与地锚式斜拉-悬吊协作体系桥进行比较. 大连地区地震基本烈度为七度,主体工程由官方初步给定的设防地震概率水准,相应按八度设防. 由于该工程目前尚未获得有关工程场址所处的地震地质环境、地震活动性特点等详细的资料,仅能根据现有的地质勘察报告将场地土初步划分为 III 类. 而反应谱的

形状与场地条件、地震环境的影响有关,一些震例表明^[9],场地效应对结构地震响应的影响是不容忽视的. 为此,本文又暂取 II 类场地土对大连港航道桥的地震响应进行分析以研究场地效应对其内力的影响. 反应谱曲线按《公路工程抗震设计规范》选取,由于本桥振型分布较为密集,取前 100 阶振型并用完全正交组合法 (CQC) 组合各阶振型响应,各阶振型阻尼比取 0.05.

虽然在纵向地震荷载作用下,二者的最大弯矩和剪力值均小于恒载和活载内力值,但从图 4 ~ 6 和表 2 可以看出,自锚式斜拉-悬吊协作体系桥的主塔弯矩、剪力和位移总体上均大于地锚式,

特别是在主塔根部,自锚式斜拉-悬吊协作体系桥的弯矩约是地锚式的 2.4 倍,剪力约是其 1.8 倍,塔顶位移约是其 3.4 倍.从表 2 可以看出自锚式斜拉-悬吊协作体系桥的主梁弯矩均大于地锚式桥,在弯矩最大的主跨 $\frac{1}{8}L$ 截面,自锚式斜拉-悬吊协作体系桥的主梁弯矩约是地锚式的 3.6 倍.二者主塔地震反应的差异在于主缆不同的锚固方式,从而造成主缆对塔顶的约束程度不同,地锚式直接锚固于地面,故对塔顶的约束程度较强,主塔的位移响应值较小,另外由于二者振型曲线的差异造成惯性力分布的不同也是造成二者地震反应不同的一个影响因素.对于主梁来说,由于自锚式斜拉-悬吊协作体系桥主缆直接锚固在梁端,主梁要承受主缆的较大水平分力,对主梁刚度产生的较大影响是其与地锚式地震反应不同的主要因素.因此,与地锚式相比,自锚式斜拉-悬吊协作体系桥的抗震设计更应引起足够的重视,必要时应采取适当的减震措施.当考虑场地效应时,由表 2 可以看出,位于土质相对较软的 III 类场地的主梁地震内力值均大于相应的土质相对较硬的 I 类场地响应值,最大相差 1.39 倍(主跨 $\frac{1}{4}L$ 处),这是由于深软场地土的长周期地震动比较丰富,谱曲线的衰减速率相对较慢,从而加大具有较长自振周期结构物的地震响应.

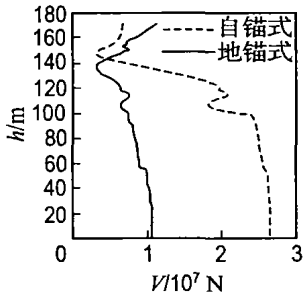


图 4 主塔剪力反应包络图
Fig. 4 Shear force of tower

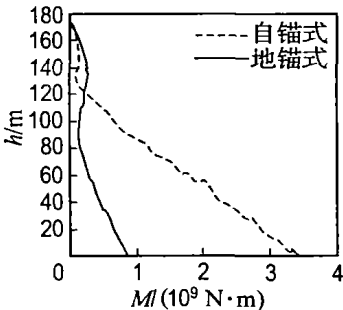


图 5 主塔弯矩反应包络图
Fig. 5 Bending moment of tower

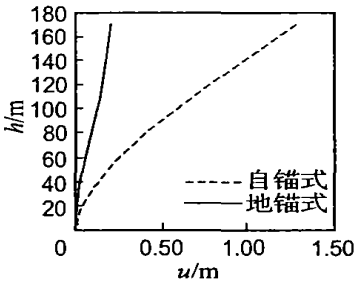


图 6 主塔纵向位移反应
Fig. 6 Longitudinal displacement of tower

表 2 主梁弯矩对比		
Tab. 2 Comparison of moment of girder		
断面位置	$M/(MN \cdot m)$	
	自锚式斜拉-悬吊协作体系桥	地锚式斜拉-悬吊协作体系桥
边跨跨中	97.29(94.46)	98.54(95.49)
塔支承处	48.07(47.21)	17.13(15.41)
主跨 $\frac{1}{8}L$	155.06(152.37)	42.71(35.57)
主跨 $\frac{1}{4}L$	44.60(32.07)	39.16(30.65)
主跨 $\frac{3}{8}L$	49.50(47.13)	37.80(34.25)
主跨 $\frac{1}{2}L$	2.41(1.78)	2.08(1.59)

注:表中括号内数值为 I 类场地土地震响应结果

3 结 论

- (1) 自锚式斜拉-悬吊协作体系桥的频率低于相同振型的地锚式斜拉-悬吊协作体系桥,且对于相邻两阶的振型,自锚式斜拉-悬吊协作体系桥的主梁竖向弯曲振型总是优先出现.
- (2) 针对本方案桥主跨主缆易于振动的特点,为加大结构的刚度,提高系统的气动稳定性,提出了采用斜向交叉拉索这种简单易行的抑振措施.同时,研究发现斜向交叉拉索的设置位置应与结构的动力特性相匹配,对本方案桥而言斜向交叉拉索设置在主跨 $0.2625L \sim 0.4250L$ 处效果优于普通悬索桥的最优设置位置 $0.25L$ 处,且 $0.2875L$ 处效果最优.考虑到过渡区主梁锚固构造的设计和施工难度,建议将 $0.2875L$ 处的竖直交叉吊索直接改为斜拉交叉拉索对主缆进行交叉锚固.设置斜向交叉拉索后的计算结果表明,斜向交叉拉索能使主缆与主梁间的振动相互制约,

有效地抑制了主跨主缆的振动并提高了结构的整体刚度.

(3) 利用初步设计阶段普遍采用的反应谱方法对自锚式斜拉-悬吊协作体系桥的纵向地震响应作了初步分析,与地锚式相比,自锚式斜拉-悬吊协作体系桥由于主缆锚固方式发生改变,其主塔和主梁的地震反应均较地锚式的反应呈不同程度的增加.故从防灾减灾的角度看,地锚式要比自锚式的受力优,对此设计人员应予以足够的重视,对自锚式桥型必要时应采取适当的减震措施.

(4) 对重大桥梁结构的地震响应,应考虑场地效应对结构的影响.建议充分研究本工程所处的地震环境和场地的具体条件,在研究场地效应的基础上确定场地对应不同抗震设防水准的设计反应谱,作为工程抗震设计的依据,以策工程的地震安全.

参考文献:

- [1] 肖汝城,贾丽君,薛二乐,等.斜拉-悬吊协作体系桥的设计探索[J].土木工程学报,2000,33(5): 46-51
- [2] 杨光华,蔡义前.乌江吊拉组合索桥——一种新的桥型及施工方法[J].公路,2001,3(3): 1-6

- [3] 肖汝城,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
- [4] 张启伟,冯敏祯.自锚式混凝土悬索桥的动力分析[J].同济大学学报,2004,12: 1562-1566
- [5] 刘春城,张哲,石磊.自锚式悬索桥的纵向地震反应研究[J].武汉理工大学学报,2002,26(5): 607-610
- [6] MIYAZAKI M, YAMADA H. Stay-cable systems of long span suspension bridges for coupled flutter [C] // **Proceedings of 2nd European and African Conference on Wind Engineering**. Genoa: Servizi Grafici Editoriali, 1997: 1529-1536
- [7] YONEDA M, OHNO K, NAKAZAKI S. Effects of asymmetrically added temporary mass on the windward side of the deck on the compound flutter speed of an ultra long span suspension bridge [J]. **J Struct Eng, JSCE**, 1996, **42A7**: 535-546
- [8] 范立础.桥梁抗震[M].上海:同济大学出版社,1997
- [9] 杨玉民,袁万城,范立础.上海地区地震动及场地效应对桥梁抗震的影响[J].同济大学学报,2000,28(3): 348-352

Dynamic analysis of self-anchored cable-stayed suspension bridge

HUANG Hai xin^{1,2}, ZHANG Zhe^{* 1}, SHI Lei¹

(1.Bridge Inst., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;

2.College of Civil Eng., Hebei Univ. of Technol., Tianjin 300401, China)

Abstract Self-anchored cable-stayed suspension bridge, as a new type of bridge, is rarely investigated. Based on spatial finite element model, dynamic characteristics of the Dalian Harbor's sea-route bridge belonging to long span self-anchored cable-stayed suspension bridge are obtained and some new dynamic traits such as preferential appearance of the vertical bending modes for girder are shown in comparison with those of earth-anchored cable-stayed suspension bridge. The vibration-restraining measure setting intersecting inclined cables is proposed because the main cables in the main span are subject to vibration and the most reasonable setting position, which is 0.287 5 position of the main span, is given. The dynamic property is preliminarily analyzed with response spectrum method and the results show that the seismic responses of the kind of bridge are greater so that the anti-seismic design should be paid more attention to.

Key words self-anchored cable-stayed suspension bridge; vibration-restraining measure; response spectrum