

文章编号: 1002-0268 (2005) 08-0044-05

桥梁板式橡胶支座与粘滞阻尼器 组合使用的减震性能研究

蒋建军, 李建中, 范立础

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 在分析几种减隔震装置的减震耗能机理的基础上, 提出了板式橡胶支座与粘滞阻尼器组合使用的减震措施, 并利用非线性时程地震反应分析方法, 对这种组合装置的减震性能进行了研究。为了研究阻尼系数、阻尼指数和周期对减隔震桥梁地震反应的影响, 作了大量的参数分析, 给出了参数的合理取值范围。研究结果表明, 组合使用板式橡胶支座和粘滞阻尼器, 既能减小结构地震力, 又能有效地控制梁体位移及墩、梁相对位移。

关键词: 桥梁; 板式橡胶支座; 粘滞阻尼器; 减震性能

中图分类号: U441⁺. 3

文献标识码: A

Study on Aseismic Performance of Combination of Laminated Rubber Bearing and Viscous Damper for Bridge

JIANG Jian-jun, LI Jian-zhong, FAN Li-chu

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The aseismic performance of the combination of laminated rubber bearing and viscous damper for bridge was studied with a nonlinear time-history analysis method. The composite device is on the basis of aseismic principles of base isolation, such as flexibility and energy dissipation. To investigate the effect of the parameters on the seismic response of structures, a large number of parameter analyses were carried out on the damping coefficient, damping exponent and period. Appropriate ranges of parameters for seismic design were suggested. The results show that the composite device is very effective for reducing seismic forces and for controlling the magnitude of displacements of deck or relative displacements between superstructure and piers.

Key words: Bridge; Laminated rubber bearing; Viscous damper; Aseismic performance

0 引言

近年来, 减隔震技术作为一种简便、经济、先进的工程抗震手段, 在建筑、桥梁结构上得到了广泛应用。减隔震的基本原理有 3 条^[1]: 一是利用减隔震装置的柔性来延长周期, 减小结构地震反应; 二是利用阻尼器或耗能装置, 来控制由于周期延长而导致的过大的墩、梁相对位移; 三是必须能够支撑整个结构, 保证结构在正常使用荷载作用下具有足够的刚度。目

前应用到桥梁上的减隔震装置主要有^[2]: 板式橡胶支座、滑动摩擦支座、铅芯橡胶支座、摩擦摇摆系统和各种阻尼器。大量试验表明^[3]: 板式橡胶支座的力一位移滞回曲线是狭长的, 可以近似作线性处理, 几乎没有耗能作用。如果在桥梁上单独使用板式橡胶支座, 虽然能够延长结构周期, 但是会带来很大的梁体位移及墩、梁相对位移。大量试验表明^[4]: 粘滞阻尼器的力一位移滞回曲线非常饱满, 耗能限位能力很强。在隔震桥梁上使用粘滞阻尼器, 能在不增加结构

收稿日期: 2004-05-20

作者简介: 蒋建军 (1978-), 男, 湖北天门人, 工学硕士, 主要研究方向为桥梁抗震. (jjj-999@sohu.com)

地震力的情况下, 有效地控制结构的位移反应, 是一种合理有效的减隔震技术。

粘滞阻尼器价格昂贵, 但由于其显著的耗能限位能力, 最近作为桥梁抗震保护装置的例子有很多^[5], 如: 美国加州南部的文森特—托马斯 (Vincent Thomas) 悬索桥, 加州旧金山—奥克兰海湾大桥, 加州圣地亚哥的克罗拉多 (Coronado) 大桥, 加州南部 91/5 公路立交桥, 希腊西部的雷恩—安提雷恩 (Rion-Antirion) 斜拉桥等。其中加州南部 91/5 公路立交桥在两桥台上组合使用了橡胶支座和流体粘滞阻尼器。

到目前为止, 虽然国外一些学者^[6,7]用反应谱方法和能力谱方法对带有非线性粘滞阻尼器的单自由度系统的地震反应进行了比较详细地分析和研究, 但都是从等效线性化角度来考虑的, 且引入了很多假设, 其中一些结论是否正确还需要用非线性时程地震反应分析来进一步验证; 另外, 由于粘滞阻尼器的使用使得结构的总阻尼矩阵在多数情况下不能对角化, 因此不能简单地对多自由度系统的运动方程进行解耦, 等效粘滞阻尼比难以计算, 也就不能使用经典的模态分析方法来求解^[8]。本文针对这些问题, 利用非线性时程地震反应分析方法, 对板式橡胶支座和粘滞阻尼器组合使用时的减震性能进行了深入地研究。

1 粘滞阻尼器

粘滞阻尼器提供的阻尼力取决于活塞相对于容器的运动速度 (或称连接点之间的相对速度), 而不是取决于活塞的位移。在温度、收缩和徐变作用下, 粘滞阻尼器的阻尼力很小; 在地震作用下, 阻尼力随活塞的运动速度增大而增大。粘滞阻尼器提供的阻尼力可以用下面的公式 (1) 描述

$$F_D = C_a | \dot{u} |^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{u}) \tag{1}$$

式中, C_a 是由试验确定的阻尼系数, 可以表征粘滞阻尼器的耗能能力 $\dot{u}$ 是粘滞阻尼器活塞的运动速度; α 是阻尼指数, 表征粘滞阻尼器的非线性, 见图 1; $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 是关于 $\dot{u}$ 的符号函数。当 $\alpha=1$ 时粘滞阻尼器为线性; 当 $\alpha \neq 1$ 时为非线性。从桥梁抗震角度看, α 的典型取值在 0.3~1.0 范围内^[6]。

在减隔震桥梁上使用粘滞阻尼器时, 粘滞阻尼器提供的阻尼力与橡胶支座提供的恢复力之间存在相位差。因此, 当阻尼系数在一定范围内时, 在地震作用下有: 当位移最大时, 速度最小, 恢复力最大, 阻尼力最小, 有利于结构复位; 当位移最小时, 速度最大, 恢复力最小, 阻尼力最大, 阻止结构偏离平衡位置。这与铅芯橡胶支座、摩擦摇摆支座和弹塑性阻尼

器的作用机理有本质上的差别。

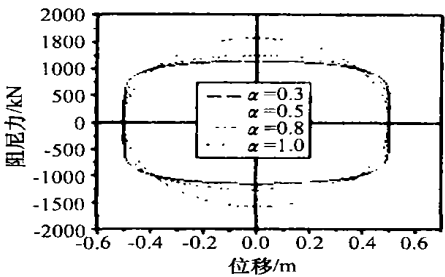


图 1 简谐激励下粘滞阻尼器的力-位移曲线

2 单墩模型计算分析

影响板式橡胶支座和粘滞阻尼器组合装置减震性能的关键参数有阻尼系数、

阻尼指数和周期, 另外, 地震动输入和墩高也有较大的影响。为了分析这些参数对结构地震反应的影响, 下面用两种单墩模型进行具体地研究, 分别为 5m 墩高模型和 10m 墩高模型。这两种墩高代表了实际工程中的多数情况, 单墩计算模型见图 2,

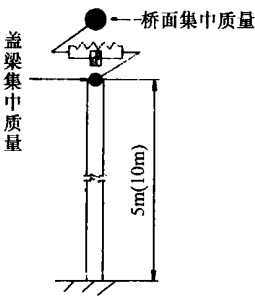


图 2 单墩计算型

墩身屈服弯矩分别为 7 428kN·m 和 7 483kN·m。单墩模型参数见表 1。

表 1 单墩模型参数

墩高 /m	墩身截面 /mm ²	上部结构 重量/kN	盖梁重量 /kN	桥墩重量 /kN	混凝土 标号	纵筋配筋 率/%
5	1400×1000	2240	470	178	C40	3.3
10	1400×1000	2240	470	357	C40	3.3

在墩顶组合使用板式橡胶支座和粘滞阻尼器时, 粘滞阻尼器的阻尼系数 C_a 的取值范围为 100~3200kN·(s/m)^α, 阻尼指数 α 取值范围为 0.3~1.0。周期 T 的取值范围为 1.2~5.0s。在对阻尼系数和阻尼指数进行参数分析时, 板式橡胶支座的水平弹性刚度为 4176kN/m, 相应地, 5m 墩高模型的周期为 1.50s, 10m 墩高模型的周期为 1.73s。在对周期进行参数分析时, 板式橡胶支座的水平弹性刚度根据周期作相应的变化。另外, 对阻尼指数进行参数分析时将粘滞阻尼器考虑为非线性, 对阻尼系数和周期进行参数分析时均考虑为线性。

在进行非线性时程地震反应分析时, 采用了 3 条不同场地的地震波, 分别为 1940 年 EL Centro 南北分量地震波、1985 年 Mexico N00E 分量地震波和 1984 年 Parkfield 地震波, 为了便于研究, 地面峰值加速度均

调整为 $0.341g$ 。图 3 给出了 3 条地震波时程。单墩模型在墩底与地面固结, 墩身保持弹性, 地震动只在水平方向单向输入。

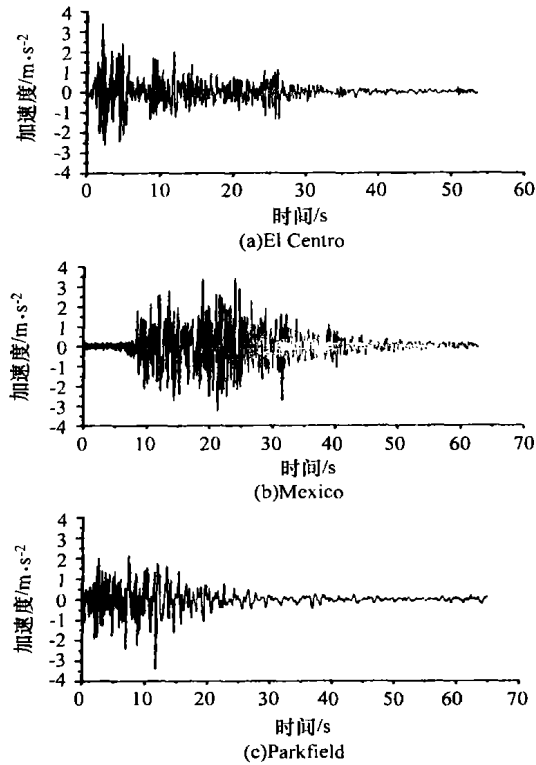


图 3 地震波时程

图 4 详细地给出了单墩模型在 3 条地震波输入下, 阻尼系数、阻尼指数和周期对结构地震反应的影响。图 4 (a) 表明: 单墩模型在 3 种地震动输入时,

墩底剪力先随阻尼系数的增大有先减小后增大的趋势; 当阻尼系数 $C_a=0$ 时, 模型中只采用板式橡胶支座, 此时墩底剪力较大; 当 C_a 大于 $800\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}$ 后, 墩底剪力随 C_a 的增大而增大; 表明当阻尼系数选取适当时可以减小墩底受力。图 4 (b) 表明: 墩、梁相对位移随阻尼系数的增大而减小, 当 C_a 大于约 $1\,200\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}$ 后减小得较慢, 并且从总体上看, 5m 墩高模型比 10m 墩高模型减小得快; 这说明增加阻尼系数对减小墩、梁相对位移是非常有效的, 且在矮墩上使用时效果更佳。在对阻尼指数和周期进行参数分析时, 为了充分利用粘滞阻尼器的耗能限位作用, 阻尼系数取 $1\,200\text{kN}\cdot(\text{s}/\text{m})^\alpha$ 。图 4 (c) 表明: 单墩模型的墩底剪力随阻尼指数的增大而减小; 这说明非线性越强 (阻尼指数 α 越小) 的粘滞阻尼器提供的阻尼力与板式橡胶支座提供的恢复力组合后产生的墩底剪力会越大。图 4 (d) 表明: 墩、梁相对位移随阻尼指数的增大而增大, 当阻尼指数大于 0.8 后, 5m 墩高模型明显比 10m 墩高模型增加得快; 另外, 10m 墩高模型的墩、梁相对位移较大, 这说明非线性粘滞阻尼器对减小矮墩的墩、梁相对位移效果较好。图 4 (e) 表明: 在周期 T 大于 1.5s 后, 除 10m 墩高模型的墩底剪力还有所降低外, 其余情况下的墩底剪力几乎在较低水平保持不变, 这为粘滞阻尼器的使用提供了较广阔的范围。图 4 (f) 表明: 墩、梁相对位移在周期小于 2s 时渐增, 当周期大于 2s 后几乎保持不变, 平均值在 55mm 左右。

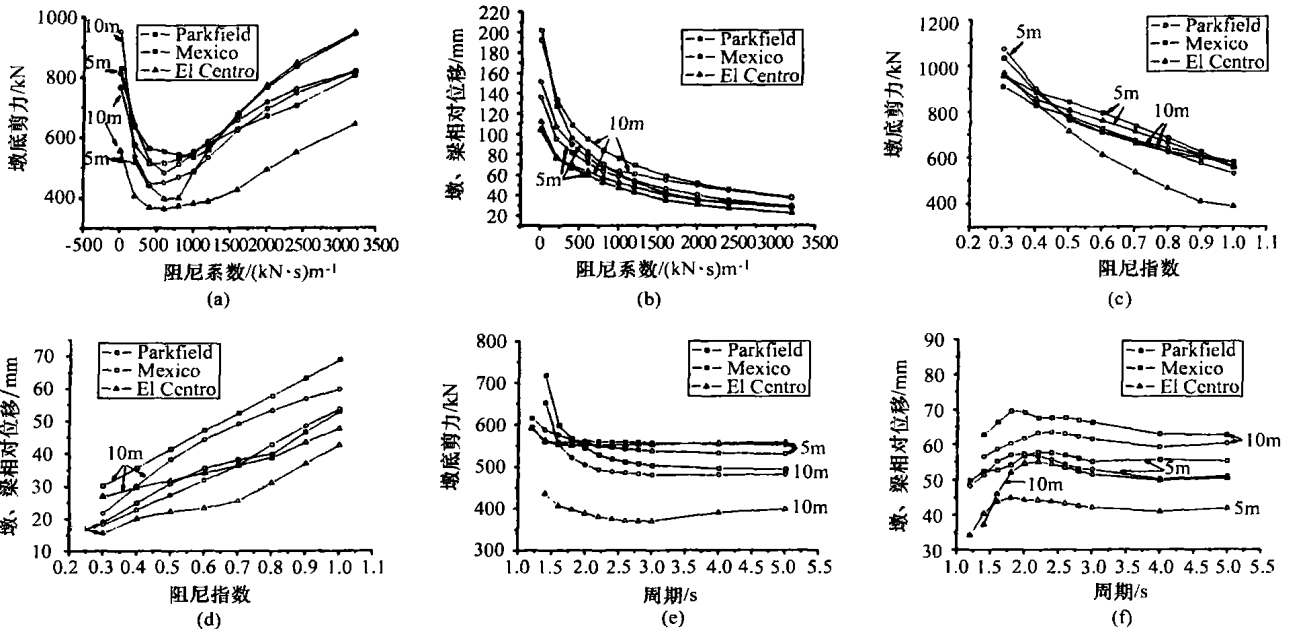


图 4 阻尼系数、阻尼指数和周期对结构地震反应的影响

从参数分析的结果可以看出, 增加阻尼系数或者减小阻尼指数可以明显地减小墩、梁相对位移, 但同时可能会增大墩底的受力, 在实际工程运用时可以根据不同的需要进行参数的选取。

3 算例

为了分析板式橡胶支座和粘滞阻尼器组合装置对桥梁的减震效果, 下面以一联三跨连续梁桥为例进行具体地分析。图 5 是三跨连续梁桥的计算模式, 其中 1 # 和 4 # 墩墩高 5m, 2 # 和 3 # 墩墩高 10m, 桥墩材料和截面特性与单墩模型相同, 梁重 6 720kN, 假设梁体呈刚性, 不考虑其侧向扭转, 桥墩与地面刚性连接, 墩身保持弹性, 只在纵桥向输入地震波, 地震波与单墩模型分析时相同。

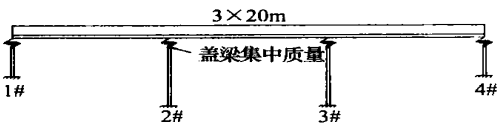


图 5 连续梁桥的计算模式

为了比较分析粘滞阻尼器的分布情况对减震效果的影响, 本文采用 3 条地震波, 分别分析了 5 方案: 方案①在 2 # 墩的墩顶与梁底铰接, 1 #、3 # 和 4 # 墩的墩顶在纵桥向设滑动支座; 方案②在各桥墩墩顶均设置板式橡胶支座, 1 # 和 4 # 墩各设置 4 个, 2 # 和 3 # 墩各设置 8 个, 单个板式橡胶支座的弹性刚度为 522kN/m; 方案③在 1 # 和 4 # 墩的墩顶各设置 4 个板式橡胶支座, 在 2 # 和 3 # 墩的墩顶各设置 8 个板式橡胶支座, 并在 2 # 和 3 # 墩的墩顶设置粘滞阻尼器, 单个支座弹性刚度同②, 粘滞阻尼器的阻尼系数

为 1 200kN·(s/m)^{0.8}, 阻尼指数为 0.8; 方案④在 1 # 和 4 # 墩的墩顶各设置 4 个板式橡胶支座, 在 2 # 和 3 # 墩的墩顶各布置 8 个板式橡胶支座, 并在 1 # 和 4 # 墩的墩顶设置粘滞阻尼器, 粘滞阻尼器的阻尼系数为 1 200kN·(s/m)^{0.8}, 阻尼指数为 0.8, 单个支座弹性刚度同②; 方案⑤在各墩墩顶均设置板式橡胶支座和粘滞阻尼器, 其中 1 # 和 4 # 墩上板式橡胶支座设置 4 个, 2 # 和 3 # 墩上设置 8 个, 1 #、4 # 墩上粘滞阻尼器的阻尼系数为 400kN·(s/m)^{0.8}, 2 # 和 3 # 墩上粘滞阻尼器的阻尼系数为 1 200kN·(s/m)^{0.8}, 阻尼指数为 0.8, 单个支座的弹性刚度同②。

表 2 给出了连续梁桥在 3 条地震波输入下, 5 种方案的结构峰值反应。分析结果表明: 采用 2 # 墩与梁底铰接的方式时, 2 # 墩墩底弯矩远远大于屈服弯矩, 并且梁体位移也很大; 采用板式橡胶支座后, 2 # 墩的受力有显著下降, 其余墩的受力有所增加, 同时增加了梁体位移; 在方案②的基础上, 在 2 # 和 3 # 墩上设置粘滞阻尼器后, 梁体位移平均减小 51.4%, 同时 2 # 墩受力平均减小 9.1%; 在方案②的基础上, 在 1 # 和 4 # 墩上设置粘滞阻尼器后, 梁体位移平均减小 69.4%, 在 El Centro 波、Mexico 波和 Parkfield 波输入下, 2 # 墩的受力较方案②分别减小 6%、20.2%和 55%; 在方案②的基础上, 在各墩上设置粘滞阻尼器后, 可以使各墩的墩底剪力分布均匀, 但是对梁体位移的控制作用不如方案④。通过对方案③、方案④和方案⑤的结构峰值反应比较可知: 在矮墩(或桥台)上使用板式橡胶支座和粘滞阻尼器组合装置的减震效果最佳, 不仅能够非常有效地控制梁体位移, 还能使各墩墩底弯矩分布较均匀。

表 2 3 条地震波输入结构的峰值反应

地震波	方案	1 #、4 # 墩 墩底剪力 /kN	1 #、4 # 墩 墩底弯矩 /kN·m	墩底剪力 /kN		墩底弯矩 /kN·m		梁体位移 /mm
				2 # 墩	3 # 墩	2 # 墩	3 # 墩	
El Centro	①	319.26	1524.877	1435.99	497.15	14297.33	4578.45	123.35
	②	450.77	2207.52	512.70	512.70	4979.55	4979.55	132.68
	③	683.38	3259.36	463.62	463.62	4658.67	4658.67	68.36
	④	708.34	3457.36	481.85	481.85	4502.27	4502.27	47.43
	⑤	371.84	1750.27	398.66	398.66	4011.73	4011.73	53.90
Mexico	①	521.21	2450.71	1875.06	507.44	18689.67	4609.59	161.29
	②	688.91	3355.48	669.50	669.50	6620.02	6620.02	182.95
	③	967.49	4688.52	661.14	661.14	6566.97	6566.97	99.99
	④	710.89	3513.65	534.16	534.16	5148.35	5148.35	60.55
	⑤	406.13	1985.43	546.55	546.55	5354.58	5354.58	74.99
Parkfield	①	351.83	1646.42	2871.54	565.34	28592.22	5247.66	246.49
	②	543.17	2712.85	843.35	843.35	8472.49	8472.49	269.94
	③	722.7	3530.07	704.12	704.12	7013.89	7013.89	106.74
	④	695.62	3393.82	379.41	379.41	3671.18	3671.18	62.09
	⑤	442.68	2162.92	557.34	557.34	5484.90	5484.90	79.34

表 3 给出了连续梁桥在 3 条地震波输入下, 方案①、方案②和方案④的墩、梁相对位移峰值反应。从表中可以看出: 方案②可以减小 3 号墩的墩、梁相对位移, 同时又使 1 号、4 号墩的墩、梁相对位移有所增加, 并且 1 号、4 号墩比 2 号、3 号墩的墩、梁相对位移大许多; 方案④可以有效的控制各墩的墩、梁相对位移, 特别显著地减小矮墩的墩、梁相对位移, 平均可以减小 69.5%。从分析结果来看, 将粘滞阻尼器设置在矮墩(或桥台)上是十分合理的。

表 3 墩、梁相对位移峰值反应 mm

地震波	方案	1 号、4 号墩	2 号墩	3 号墩
El Centro	①	122.86	0	116.81
	②	129.46	97.70	97.70
	④	46.20	56.72	56.72
Mexico	①	163.57	0	186.78
	②	180.19	135.74	135.74
	④	59.50	60.98	60.98
Parkfield	①	246.81	0	253.19
	②	264.11	196.81	196.81
	④	60.24	53.00	53.00

4 结 论

(1) 组合使用板式橡胶支座和粘滞阻尼器, 可以在减小墩底剪力和弯矩的同时, 显著地减小梁体位移及墩、梁相对位移。

(2) 增加阻尼系数或者减小阻尼指数可以明显地减小墩、梁相对位移, 但同时可能会增大墩底的受力, 在实际工程中运用时可以根据不同的需要进行参数的选取。

(3) 板式橡胶支座与粘滞阻尼器组合使用时, 其减震效果受周期的影响很小, 为粘滞阻尼器的使用提供了广阔的范围。

(4) 粘滞阻尼器使用在矮墩(或桥台)上时, 减震效果比在高墩上使用时好, 并且可以使各墩的墩底弯矩以及墩、梁相对位移较为均匀, 方便设计。

参考文献:

[1] 范立础, 王志强. 桥梁减隔震设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

[2] M. J. N. 普瑞斯特雷等. 桥梁抗震设计与加固 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.

[3] 范立础, 袁万城. 桥梁橡胶支座减、隔震性能研究 [J]. 同济大学学报, 1989, 17 (4): 447—455.

[4] 翁大根, 卢著辉, 徐斌, 等. 粘滞阻尼器力学性能试验研究 [J]. 世界地震工程, 2002, 18 (4): 30—34

[5] Makris N, Zhang J. Structural Characterization and Seis-mic Response Analysis of a Highway Over-crossing Equipped with Elastomeric Bearings and Fluid Dampers; A Case Study [R]. California U. S. A: UCB/PEER, 2002

[6] Lin W H, Chopra Anil K. Earthquake Response of Elastic SDF System with Non-linear Fluid Viscous Dampers [J]. Earth-quake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31: 1623—1642

[7] Pekcan G, Mander JB, Chen SS. Fundamental Considerations for the Design of Non-linear Viscous Dampers [J]. Earthquake Eng-ineering and Structural Dynamics, 1999, 28: 1405—1425

[8] Chopra Anil K. Dynamics of Structures; Theory and Applications to Earthquake Engineering [M]. Prentice-Hall; Englewood Cliffs, NJ, 1995

(上接第 39 页)

参考文献:

[1] 沈锐利. 悬索桥主缆系统设计及架设计算方法研究 [J]. 土木工程学报, 1996, 29 (2): 3—9.

[2] 肖汝诚, 项海帆. 大跨径悬索桥结构分析理论及其专用程序系统的研究 [J]. 中国公路学报, 1998, 11 (4): 42—50.

[3] 范立础, 潘永仁, 杜国华. 大跨度悬索桥结构架设参数精细算法研究 [J]. 土木工程学报, 1999, 32 (6): 20—25.

[4] 唐茂林, 强士中, 宁晓骏. 悬索桥索鞍理论位置的精确计算 [J]. 工程力学, 1999 (增刊): 339—344.

[5] 罗喜恒. 复杂悬索桥施工过程精细化分析研究 [D]. 上海: 同济大学桥梁工程系, 2004.

[6] Huddleston JV, Hee-Jung Ham. Poisson Effect in Extensible Cables with Both Ends Fixed [J]. J Engrg Mech, ASCE, 1994, 120 (7): 1590—1595.

[7] Irvine H M. Cable Structures [M]. London: The MIT Press, 1981.