

减隔震装置在飘浮体系斜拉桥纵桥向的应用

袁万城, 屈小伟

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 以某双塔飘浮体系斜拉桥为工程背景, 对比分析了拉索限位器和黏滞阻尼器两种减隔震装置在飘浮体系斜拉桥纵桥向的减震特点, 并进一步探讨了拉索限位器和黏滞阻尼器联合使用方式对飘浮体系斜拉桥纵桥向地震响应的影响。结果表明: 拉索限位器同黏滞阻尼器相比, 可以更有效地控制结构位移, 而黏滞阻尼器在内力控制上具有一定的优越性; 联合使用方式有助于发挥各自的优势, 达到拉索限位器控制梁端位移、黏滞阻尼器改善塔底受力的理想状况, 是一种更为经济有效的减震措施, 且在脉冲型地震动作用下同样具有良好的减震效果。

关键词: 飘浮体系斜拉桥; 拉索限位器; 黏滞阻尼器; 减震

中图分类号: U441⁺.3

文献标志码: A

Application Analysis of Seismic Isolation Devices on Longitudinal Seismic Response of Floating System Cable-stayed Bridge

YUAN Wancheng, QU Xiaowei

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

Abstract: On the background of a double pylon cable-stayed bridge of floating system, the aseismic characteristics of cable displacement restrainers and viscous dampers was compared. The effect of hybrid application of cable displacement restrainers and viscous dampers on the longitudinal seismic response of floating system cable-stayed bridge was discussed. The results show that the cable displacement restrainer is able to control the displacement response effectively compared with the viscous damper, but the viscous damper has certain advantages in the internal force control. The hybrid application can achieve the goal that cable displacement restrainers control the displacement at beam ends and viscous dampers improve the force situation at the tower bottom, which is a more cost-effective seismic measure and has an excellent earthquake mitigation effect under pulse ground motions.

Key words: floating system cable-stayed bridge; cable displacement restrainer; viscous damper; seismic response reduction

飘浮体系斜拉桥具有良好的动力性能, 地震作用下主塔的内力反应较小, 且温度及混凝土收缩、徐变产生的次内力极小, 但飘浮体系容易导致梁端位移过大, 往往需要在主梁与桥塔连接处设置减隔震装置。我国《公路桥梁抗震设计细则》^[1]和《城市桥梁抗震设计规范》^[2]中规定: 建在地震基本烈度 8 度、9 度地区的斜拉桥宜优先采用飘浮体系方案; 如飘浮体系导致梁端位移过大, 宜采用塔、梁弹性约束或阻尼约束体系。当弹性索刚度选取得当或阻尼器参数设置合理时, 往往能够兼顾桥梁的强度和变形能力^[3-7]。但弹性连接装置对主梁位移的控制能力十分有限^[7], 而黏滞阻尼器造价高, 制作及安装较麻烦。

本文以一座主跨 270 m 的双塔飘浮体系斜拉桥为背景, 对比分析了黏滞阻尼器和拉索限位器^[8-9]在飘浮体系斜拉桥纵桥向减震设计中的适用性, 并进一步探讨了拉索限位器和黏滞阻尼器联合使用方式对飘浮体系斜拉桥纵桥向地震响应的影响, 旨在寻求更加经济有效的减震方式, 更好地解决飘浮体系斜拉桥在强震下梁端位移过大的关键问题。

1 工程概况及分析模型

该大跨度斜拉桥为双塔双索面混凝土斜拉桥, 采用飘浮体系, 主跨跨径采用 110 m+270 m+110 m 的布置形式, 主塔为 H 型混凝土桥塔, 扇形索布置(见图 1)。建立全桥动力计算模型时, 考虑相邻引桥的耦联振动影响, 南、北引桥均为连续梁桥, 采用双幅桥形式。通过 SAP2000 程序建立全桥空间杆系有限元计算模型(见图 2), 其中主梁、桥塔和桥墩采

用梁单元模拟,主梁采用单梁式模型;斜拉索采用空间桁架单元模拟,考虑拉索垂度效应和恒载作用对结构刚度的影响($P-\Delta$ 效应),斜拉索与主梁及桥塔均采用主从连接;支座采用可以考虑摩擦耗能作用的非线性连接单元模拟;各群桩基础采用 6×6 耦合弹簧模拟。

对该飘体系斜拉桥进行动力特性分析,结构首阶振型为主梁纵飘,周期为 5.79 s,这一振型的特点是:桥面在纵向水平方向作稍有反对称弯曲的刚体运动,并带有主塔的弯曲振动,桥面的水平振型位移与塔顶的水平位移相近。在纵向水平地震作用下,这一振型的贡献占绝对优势,从而导致结构产生极大的梁端位移。

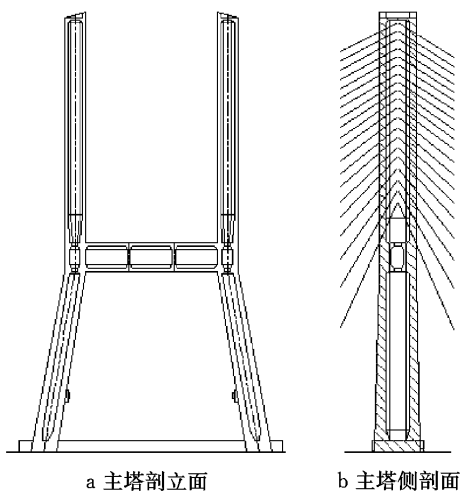


图1 桥塔构造

Fig.1 Configuration of pylon

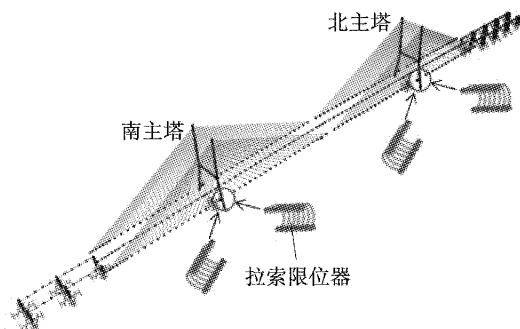


图2 全桥动力计算模型

Fig.2 Dynamical calculation model

2 分析工况及地震动输入

为了对比分析拉索限位器和黏滞阻尼器对飘浮体系斜拉桥在纵桥向地震作用下的减震效果,设置以下三种工况:工况 1,原飘浮体系;工况 2,在塔、梁间共设置 4 个黏滞阻尼器,以下称阻尼约束体系,由

于小速度指数不易实现且大体积阻尼器制造较为困难,根据以往工程经验并从经济性角度出发^[10],此处速度指数取 0.3,阻尼系数取 $3\,000 \text{ kN} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-0.3}$;工况 3,在塔、梁间设置拉索限位器,以下称拉索限位体系,图 2 中给出了拉索限位器单侧布置示意图,根据设计要求,拉索自由行程取 25 cm,通过试算,拉索水平刚度初步取 $2.0 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。拉索限位器的恢复力模型如图 3 所示,其中, K_1 为拉索水平刚度, u_0 为拉索自由行程, u 为拉索行程量, F 为拉索水平力。

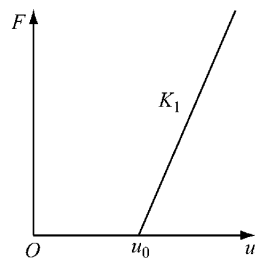


图3 拉索限位器恢复力模型

Fig.3 Restoring force model of cable displacement restrainer

该桥址处(Ⅲ类场地)抗震设防烈度为 7 度。由于未做场地地震安全性评价,根据相应场地的设计加速度反应谱拟合加速度时程进行抗震研究。共选取了与目标反应谱拟合较好的 7 条地震动加速度时程,峰值加速度为 $0.22g$ 。图 4 所示为其中 1 条加速度时程波,地震动输入方向为纵向+竖向,进行非线性时程反应分析,地震反应分析结果取 7 组反应最大值的平均值。

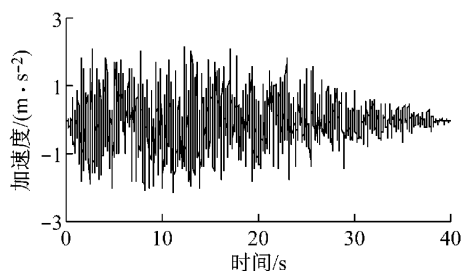


图4 人工加速度时程曲线

Fig.4 Artificial acceleration history curve

3 不同工况地震响应对比

3.1 关键部位位移对比

选取塔和梁之间相对位移、墩和梁之间相对位移、主梁梁端位移、主塔塔顶位移作为主要考察对象。各工况关键部位位移响应见图 5~8。

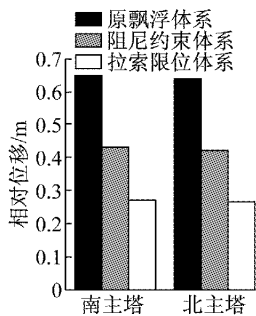


图5 塔和梁之间相对位移

Fig.5 Relative displacement between tower and beam

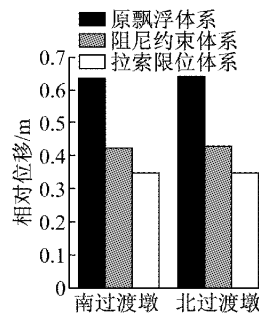


图6 墩和梁之间相对位移

Fig.6 Relative displacement between pier and beam

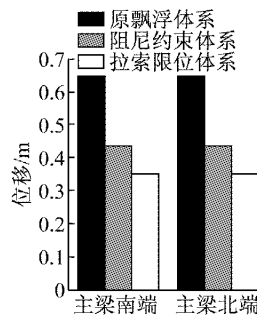


图7 主梁梁端位移

Fig.7 Displacement at the end of the beam

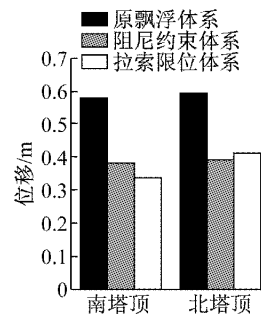


图8 主塔塔顶位移

Fig.8 Displacement at the top of the tower

由图5~8可知:

(1)地震作用下原飘浮体系斜拉桥的位移响应最大,主梁梁端位移达到0.65 m,容易导致梁体碰撞、伸缩缝损坏以及主梁脱空等灾害的发生,必须采取相关措施控制结构位移响应。

(2)对于阻尼约束体系,结构位移响应能够得到较好控制。以往工程实践表明,若要进一步减小结构位移,需减小速度指数或增大阻尼系数,经济性不佳。

(3)对于拉索限位体系,结构位移响应能够得到有效控制。当拉索限位器布置在塔、梁之间时,对塔、梁相对位移的控制效果最佳,对墩、梁相对位移和主梁梁端位移的控制效果次之,对主塔塔顶位移的控制效果稍差。

(4)阻尼约束体系和拉索限位体系都能够减小结构的位移响应,但拉索限位体系的位移控制效果要优于阻尼约束体系,且经济性要好。

3.2 关键部位内力对比

选取主塔塔底剪力、主塔塔底弯矩作为主要考察对象。各工况关键部位内力响应见图9~10。

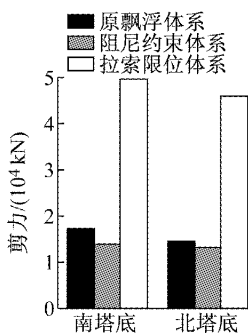


图9 主塔塔底剪力

Fig.9 Shear force at the tower bottom

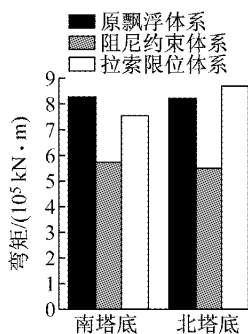


图10 主塔塔底弯矩

Fig.10 Bending moment at the tower bottom

由图9~10可知:

(1)地震作用下原飘浮体系斜拉桥的主塔塔底剪力较小,但水平地震力主要通过斜拉索传至主塔上部,对主塔塔底的力臂较大,因而在主塔塔底产生较大弯矩。主塔类似于悬臂结构,一般由弯矩需求控制截面设计。

(2)对于阻尼约束体系,在塔底剪力改变不大的情况下可以进一步减小塔底弯矩需求,结构内力响应能够得到有效控制。

(3)对于拉索限位体系,通过改变地震力的传递途径,不会引起主塔塔底弯矩的显著增加,但会增大主塔塔底剪力。

(4)阻尼约束体系通过引入阻尼耗散进入结构体系的能量,在内力控制上要优于拉索限位体系。

3.3 拉索限位器和黏滞阻尼器特点分析

拉索限位器能够有效限位,经济性好。当塔和梁之间相对位移超过拉索自由行程时,拉索发挥限位作用,此时结构的弹性力也较大,会在一定程度上增加主塔的受力。相比原飘浮体系斜拉桥,拉索限位体系主塔塔底剪力有所增加,但由于改变了地震力的传递途径,主塔塔底弯矩相差不大。

黏滞阻尼器能够耗散地震能量。当塔和梁之间相对位移达到最大时,结构相对变形速率最小,此时黏滞阻尼器的阻尼力最小,结构的弹性力最大;当塔和梁之间相对位移最小时,结构相对变形速率最大,此时黏滞阻尼器的阻尼力最大,而结构的弹性力最小,由于黏滞阻尼器的阻尼力和结构的弹性力之间有 90° 的相位差,因此黏滞阻尼器并不增加主塔的受力。但黏滞阻尼器位移控制效果有限,为满足结构对于变形的设计要求,有时需要设置很大的阻尼系数或采用很小的速度指数,经济性不佳。

4 联合使用对地震响应的影响

通过对拉索限位器和黏滞阻尼器进行受力特点分析,可以得到:当结构位移较大时由于相对变形速率较小,黏滞阻尼器对结构的影响反而减弱,此时拉

索限位器发挥限位作用,这为两者的协同工作提供了契机。

采用上述设置的参数,进行拉索限位器和黏滞阻尼器的联合使用分析,以下称组合体系。将各工况的地震响应进行汇总对比如表 1 所示,由于结构基本对称,其结果取自南半侧结构。

表 1 纵向地震响应比较

Tab.1 Comparison of longitudinal seismic response

体系	关键部位响应					
	塔和梁之间 相对位移/m	墩和梁之间 相对位移/m	主梁梁端 位移/m	主塔塔顶 位移/m	主塔塔底 剪力/kN	主塔塔底 弯矩/(kN·m)
飘浮体系	0.647	0.634	0.650	0.575	1.720×10^4	8.300×10^5
阻尼约束体系	0.431	0.422	0.435	0.379	1.390×10^4	5.750×10^5
拉索限位体系	0.273	0.346	0.350	0.335	4.980×10^4	7.590×10^5
组合体系	0.262	0.307	0.308	0.335	2.890×10^4	6.710×10^5

分析表明,相比阻尼约束体系,该组合体系能继承拉索限位体系的优点,充分发挥拉索限位器的限位优势,有效控制结构位移。此时黏滞阻尼器最大行程为 0.262 m,相对于此前阻尼约束体系中的最大行程 0.431 m 有了很大改善,可以降低对黏滞阻尼器的使用性能要求。相比拉索限位体系,该组合体系能充分发挥黏滞阻尼器的耗能优势,有效控制结构内力,不仅降低了主塔塔底弯矩,还大大减小了主塔塔底剪力。可以看出,采用联合使用方式能够减小原飘浮体系斜拉桥的塔底弯矩响应,有效控制结构位移,且不会引起主塔塔底剪力的显著增加。对于飘浮体系斜拉桥,控制结构在地震作用下过大的梁端位移是关键,相比阻尼约束体系,拉索限位器和黏滞阻尼器的联合使用方式是一种更为经济有效的减震措施。

为进一步详细对比该组合体系和阻尼约束体系在不同类型地震动作用下的减震效果,选取实际强震记录下的 El Centro Array #5 地震波(脉冲波)和 Borrego Springs Fire Sta 地震波(非脉冲波)作为地震动输入,峰值加速度统一调整为 $0.40g$,在纵桥向进行非线性时程响应分析。设置如下三种工况:工况 a,原飘浮体系;工况 b,在塔、梁间共设置 8 个黏滞阻尼器,速度指数取 0.3,阻尼系数取 $3000 \text{ kN} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-0.3}$;工况 c,在塔、梁间设置拉索限位器和 4 个黏滞阻尼器,黏滞阻尼器参数同工况 b,拉索自由行程取 35 cm,拉索水平刚度取 $5.0 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。不同工况下的塔和梁之间相对位移时程曲线和主塔塔底弯矩时程曲线如图 11~16 所示。

根据图 11 和 14 可以看出,在脉冲型地震波作用下,阻尼约束体系不能有效控制结构的位移响应。在首个响应峰值处,黏滞阻尼器还未能通过较长时

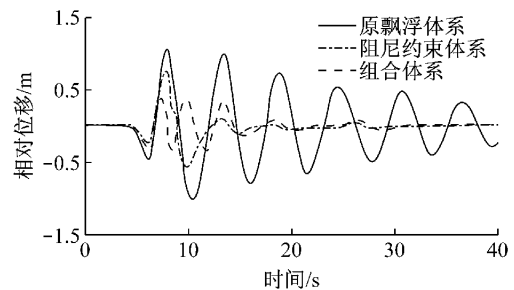


图 11 脉冲波下塔和梁之间相对位移时程曲线

Fig. 11 Time history curve of relative displacement between tower and beam under pulse wave excitation

间的往复运动有效耗散进入结构体系的能量,不能发挥良好的减震效果,而组合体系能够有效控制结构的位移响应,同时还可以保证黏滞阻尼器的位移行程在可控范围之内。在非脉冲型地震波作用下,由于结构的最大位移响应一般较晚才出现,黏滞阻尼器可以通过较长时间的往复运动有效耗散进入结构体系的能量,此时阻尼约束体系和组合体系均能够有效控制结构的位移响应。根据图 12~13 和图 15~16 可以看出,在脉冲型和非脉冲型两种地震波作用

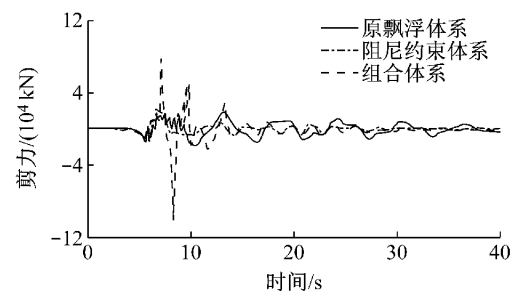


图 12 脉冲波下主塔塔底剪力时程曲线

Fig. 12 Time history curve of shear force at the tower bottom under pulse wave excitation

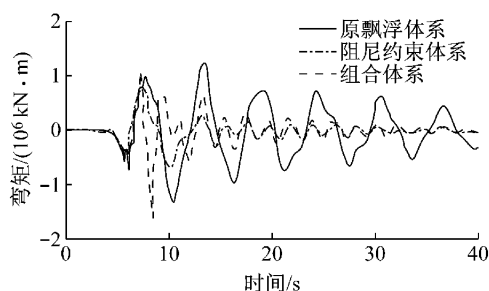


图13 脉冲波下主塔塔底弯矩时程曲线

Fig. 13 Time history curve of bending moment at the tower bottom under pulse wave excitation

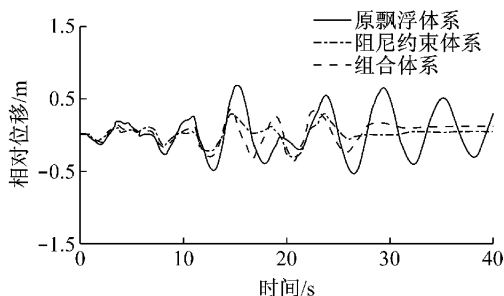


图14 非脉冲波下塔和梁之间相对位移时程曲线

Fig. 14 Time history curve of relative displacement between tower and beam under non-pulse wave excitation

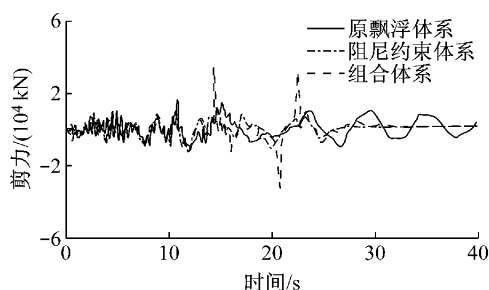


图15 非脉冲波下主塔塔底剪力时程曲线

Fig. 15 Time history curve of shear force at the tower bottom under non-pulse wave excitation

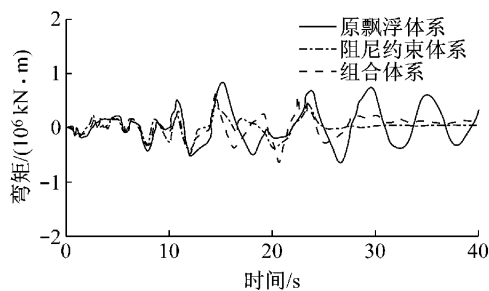


图16 非脉冲波下主塔塔底弯矩时程曲线

Fig. 16 Time history curve of bending moment at the tower bottom under non-pulse wave excitation

下,组合体系的主塔塔底弯矩和阻尼约束体系的主塔塔底弯矩相差不大,组合体系的主塔塔底剪力要

大于阻尼约束体系的主塔塔底剪力,因此需要适当提高主塔塔底截面的抗剪能力.但由于主塔类似于悬臂结构,一般由弯矩需求控制截面设计,结构的内力响应仍能够得到较好控制.

综上所述,对于可能遭遇脉冲型地震动作用的飘浮体系斜拉桥,采用以往的减隔震措施在塔、梁之间仅设置黏滞阻尼器,不能发挥良好的减震效果,此时建议采用拉索限位器和黏滞阻尼器联合使用方式进行抗震设计,确保结构的位移和内力响应均能够得到有效控制.

5 结论

(1)塔、梁之间设置拉索限位器装置,能够有效控制结构位移响应,经济性好.通过改变地震力的传递途径,不会引起主塔塔底弯矩的增加,但会增大主塔塔底剪力,这是需要引起注意的地方.

(2)塔、梁之间设置黏滞阻尼器装置,能够有效控制结构内力,但其位移控制效果有限.为满足结构对于变形的设计要求,有时需要设置很大的阻尼系数或采用很小的速度指数,经济性不佳.

(3)采用拉索限位器和黏滞阻尼器联合使用方式,能够达到拉索限位器控制梁端位移、黏滞阻尼器改善塔底受力的理想状况,对飘浮体系斜拉桥而言是一种更为经济有效的减震措施.

(4)对于飘浮体系斜拉桥,拉索限位器和黏滞阻尼器联合使用方式在脉冲型地震动作用下同样具有良好的减震效果.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T B02-01—2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京:人民交通出版社,2008.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG/T B02-01—2008 Guidelines for seismic design of highway bridges[S]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ 166—2011 城市桥梁抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. CJJ 166—2011 Code for seismic design of urban bridges[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011.
- [3] 叶爱君,胡世德,范立础. 斜拉桥抗震结构体系研究[J]. 桥梁建设,2002(4):1.
YE Aijun, HU Shide, FAN Lichu. Research on aseismatic structural system of cable-stayed bridge [J]. Bridge Construction, 2002(4): 1.
- [4] 叶爱君,范立础. 附加阻尼器对超大跨度斜拉桥的减震效果

- [J]. 同济大学学报:自然科学版, 2006, 34(7): 859.
- YE Aijun, FAN Lichu. Seismic response reduction of a super-long-span cable-stayed bridge by adding dampers[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(7): 859.
- [5] 李建中, 袁万城. 斜拉桥减震、耗能体系非线性纵向地震反应分析[J]. 中国公路学报, 1998, 11(1): 71.
- LI Jianzhong, YUAN Wancheng. Nonlinear longitudinal seismic response analysis of cable-stayed bridge systems with energy dissipation [J]. China Journal of Highway and Transport, 1998, 11(1): 71.
- [6] 胡庆安, 崔刚, 刘健新. 黏滞阻尼器在斜拉桥减震设计中的应用[J]. 公路, 2006(8): 77.
- HU Qing'an, CUI Gang, LIU Jianxin. Application of viscous damper to aseismatic design of cable-stayed bridge [J]. Highway, 2006(8): 77.
- [7] 焦驰宇, 李建中, 彭天波. 塔梁连接方式对大跨度斜拉桥地震反应的影响[J]. 振动与冲击, 2009, 28(10): 179.
- JIAO Chiyu, LI Jianzhong, PENG Tianbo. Effects of different connecting styles between towers and deck on seismic responses of a long-span cable-stayed bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(10): 179.
- [8] YUAN Wancheng, CAO Xinjian, RONG Zhaojun. Development and experimental study on cable-sliding friction aseismic bearing[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(12): 1593.
- [9] 钟剑, 荣肇骏, 袁万城, 等. 桥梁拉索减震限位器: 中国, ZL201120534749. 6[P]. 2012-11-07.
- ZHONG Jian, RONG Zhaojun, YUAN Wancheng, et al. Bridge cable aseismic displacement restrainer: China, ZL201120534749. 6 [P]. 2012-11-07.
- [10] 蔡茂江. 考虑近断层脉冲特性的斜拉桥黏滞阻尼器参数优化设计[D]. 上海: 同济大学, 2013.
- CAI Maojiang. Viscous damper parameters optimization analysis of cable stayed bridges subjected to pulse type near fault ground motions[D]. Shanghai: Tongji University, 2013.

(上接第 192 页)

例而言, 计算结果如图 4 所示, 这种误解导致最不利风向的风速极值被高估了 11%。

4 结论

(1) Cook 方法在处理风向相关性问题上常被误认为是按照独立性处理, 且每个风向上的超越概率均分全风向的超越概率, 这样会导致极值风速的高估。

(2) 与 Cook 方法相比, 改进方法从概率的角度来说更精确, 并且不拘泥于极值风速概率分布函数的形式, 不需要较多的假设, 具有更好的适用性。

参考文献:

- [1] Davenport A G. The relationship of reliability to wind loading [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 13(1/3): 3.

- [2] Cook N J. Note on directional and seasonal assessment of extreme winds for design[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 12(3): 365.
- [3] Haraguchi K, Kanda J. Probability model for annual maximum wind speeds in multi-direction[C]// Wind Engineering into the 21st Century. The Netherlands: Balkema A A, 1999: 205-212.
- [4] Itoi T, Kanda J. Comparison of correlated Gumbel probability models for directional maximum wind speeds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(12/15): 1631.
- [5] Kasperski M. Design wind loads for a low-rise building taking into account directional effects[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(9/11): 1125.
- [6] Harris R I. XIMIS, a penultimate extreme value method suitable for all types of wind climate [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97(5/6): 271.