

结构性能的混凝土拱桥减震方法研究

范 亮^{1,2}, 周志祥²

(1. 西南交通大学 土木学院, 四川成都 610031; 2. 重庆交通大学 土木学院, 重庆 400074)

摘 要:基于位移的抗震设计理论应用于混凝土拱桥时,由于混凝土拱桥刚性巨大的特殊性,该理论无法有效的对拱桥进行减震。针对混凝土拱桥,提出了一种基于性能的减震设计思路的新的减震方法——“一种混凝土拱桥变刚度智能减震控制系统”。该方法在地震作用下将改变主拱体系、适当降低拱桥刚度、提高主拱结构变形能力,对拱桥的位移和主拱的受力进行双控。分析表明,该方法在不显著增加位移的情况下可以降低混凝土拱桥在地震作用下的结构内力。

关键词:桥;拱桥;混凝土拱桥;减震;基于结构性能

中图分类号:U442.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2009)01-0055-05

A Performance Based Seismic Method to R. C. Arched Bridge

FAN Liang^{1,2}, ZHOU Zhi-xiang²

(1. College of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

Abstract: In civil engineering, the aseismic theory based on displacement generally is used in vibration damping design. This theory cannot be applied to reinforced concrete (RC) arched bridges, however, due to the tremendous rigidity of these bridges. To address this situation, a new vibration damping method called an “intelligent aseismic control system with changed rigidity of RC arched bridges” is suggested. With this method, the system of the main arch will be changed, the rigidity lowered, the deformed capability increased, and the displacement and stress can be under double control. When an earthquake occurs, the RC arched bridge stress can be lowered while the displacement is not obviously increased with this method.

Key words: bridge; arched bridge; reinforced concrete arched bridge; seismic mitigation; performance based

混凝土拱桥因经济、美观、耐久而在我国广泛采用,但由于其结构刚度大,主拱圈截面轴压比大,延性差,拱桥被公认为是抗震性能相对较差的一种桥型。90 年代初的不完全统计数据表明,在我国公路桥梁中拱桥可达 70%。不良的抗震性能给位于地震多发地区的大量已建、在建和将建的混凝土拱桥留下极大的安全隐患。如唐山地震后,有 30 多座拱桥遭到不同程度的破坏,有 6 座拱桥甚至完全倒塌,

造成了巨大的损失和严重的社会影响。

该文分析发现,普遍用于结构工程中的基于位移的抗震设计理论在混凝土拱桥抗震设计中效果不明显,不能控制拱桥在地震发生时的结构性能。因此,在分析比较后本文采用综合考虑拱桥内力响应和变形响应的基于性能的抗震设计理论进行混凝土拱桥的减震设计,并提出一种新的减震方法并将其应用于典型混凝土拱桥的减震设计中。

收稿日期:2008-10-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50578168);重庆市教委科技项目(KJ070415)

作者简介:范亮(1979-),女,西南交通大学,博士生,主要从事桥梁结构研究,(E-mail)fanliang2001@gmail.com。

周志祥(联系人),男,重庆交通大学教授,博士生导师,(E-mail)zhixiangzhou@cquc.edu.cn。

1 基于位移的抗震设计理论

基于结构性能的抗震设计理论是在基于结构位移的设计理论基础上来发展而来的。20世纪90年代初期,美国加州大学 Berkley 分校的 J. P. Moehle 提出了基于位移的抗震设计理论^[1],主张改进目前基于承载力的设计方法,这一全新概念的结构抗震设计方法最早应用于桥梁设计。此后,这一理论的构思影响了美国、日本及欧洲土木工程界^[2-5]。这种用量化的位移设计指标来控制建筑物的抗震性能的方法,比以往抗震设计方法中强调力的概念前进了一步。

在大跨径桥梁及高耸结构抗震研究中,普遍使用结构位移的设计理论进行减震设计^[6-11]。然而,笔者研究发现,混凝土拱桥有其特有的地震响应。

以典型大混凝土箱板拱桥攀枝花雅安大桥(主桥为一跨 176 m 上承式钢筋混凝土箱形板拱桥)为例。利用 MIDAS Civil6.7.1 进行地震反应分析,模型如图 1,主拱采用梁格法用梁单元模拟,桥面系采用板单元模拟。地震波选择 El Centro; 1940, El Centro Site, 270 Deg, 1940, El Centro Site, 180 Deg 及 1940, El Centro Site, vertical 三向地震波,顶点为 0.356 9 g,持续时间为 53.72 s(罕遇地震)进行三维一致地震波分析时,该桥的地震反应特性分析表明,在此地震波的激励下,该桥三向的最不利位移分别为:纵向位移 6.54 cm(L/4 处);横向位移 19.6 cm(拱顶处);竖向位移:20.3 cm(拱顶处);按现行《公桥规》,拱桥在正常使用的短期荷载作用下其竖向允许变形限值为 $L/1\ 000=17.6$ cm,若取拱桥在罕遇地震下的竖向变形允许值为正常使用条件下的 2 倍,即 35.2 cm;主拱结构横向允许位移参照《建筑抗震设计规范》,按拱桥矢高(29 m)相近的 8 层钢筋混凝土框架楼房的位移限值 $2\ 400/50=48$ cm 取用。

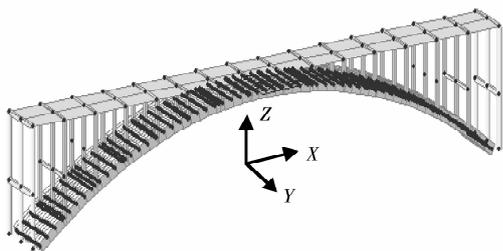


图 1 典型混凝土拱桥——攀枝花大桥

拱桥在罕遇地震作用下,即使不采取减震措施,最大位移响应仍可以满足其允许限制。但与此同时结构的内力却显著增大,如正常使用下主拱结构的

最大弯矩为 4 500 kN·m,在上述地震荷载作用下,主拱结构的最大弯矩增加到 34 000 kN·m,即地震荷载作用下使主拱结构的最大弯矩增加了 6.5 倍,致使混凝土的名义应力已经达到 41 MPa,足以造成结构的强度破坏。地震作用下混凝土拱桥的这种不大位移响应和很大的内力响应是由混凝土拱桥的结构特点决定的。混凝土拱桥主拱结构一般为各向刚度均很大的无铰拱,正常使用情况下的结构变形小,有利于桥梁运营的安全舒适;但地震发生时,结构刚度大则导致在不大的变形发生时结构内力显著增大,因此出现主拱的脆性破坏。

在这样的地震反应下,如按常用于土木工程中的基于位移的减震设计思路对混凝土拱桥进行位移减震,事倍功半。目前多以在结构中加入粘滞耗能支撑来实现结构减震,但欲对主拱结构加粘滞耗能支撑几乎是不可能的,于是只能在拱上建筑中加粘滞耗能支撑^[12-13],可想而知其减震效果非常有限,文献 13 中,在拱上建筑中设置阻尼支撑,对三向最大位移的减小在 0.7~2.4 cm 范围内(其中最大位移响应为 16.2 cm)。而另一种常用于土木工程减震的附加质量块减震方案应用于拱桥减震时发现,由于混凝土拱桥的质量和刚度巨大,该附加质量相应的要求较大,且为追求较好的减震效果,附加质量要求集中布置于位移最为显著的拱顶及 4/L 处,这将导致拱桥产生非常不利于静载作用时的结构受力,甚至影响拱桥在使用荷载下的结构安全。尽管如此,在施加了结构难以承受的附加质量块后,减震效果仍然不如人意。如:课题组对上述雅安大桥进行 TMD(调谐质量阻尼器)减震时,经过减震设计和优化,最终的减震方案为在拱顶处和主拱 L/4 处各加入 400 kN 的 TMD 质量块,这不仅影响了拱桥的正常使用,而且减震效果仍不明显:采用 TMD 减震后,全时程结构横向反应的控制效率最大可以达到 20% 左右;全时程结构竖向位移反应的控制效率最大为 27%,而竖向反应内力控制效率在 20% 左右;全时程纵向反应控制效率在 10% 左右。而结构内力的减震效率,横向和纵向在 10% 以内,竖向约为 20%。

2 基于性能的抗震设计理论

基于以上研究工作,笔者对混凝土拱桥的减震方案进行了重新的思索。现行减震元件大多适用于地震激励下位移反应较大的结构,其减震作用与元件安装位置变形的位移或速度或加速度成正比,这适用于高耸结构或刚度较小型桥减震设计,但不适

用于刚度大,地震激励下变形反应小、内力反应大的混凝土拱桥。因此,对拱桥而言,如何更有效的控制内力而不是变形成为了拱桥减震效果的控制因素。

地震发生时,地震是以能量输入的方式对结构产生影响,根据功能原理,结构在地震能量输入时通过变形做功将该能量转化成弹性势能从而消耗。因此,结构如果在弹性范围内增加弹性变形量,从理论上可以有效的消耗地震输入的能量,从而起到减震的作用。

综上,混凝土拱桥在地震发生时,起控制作用的不再是最大位移而是结构内力。针对这一特点,笔者提出在混凝土拱桥减震设计中宜采用基于性能的抗震设计思想,并针对性的提出一种新的减震方法。

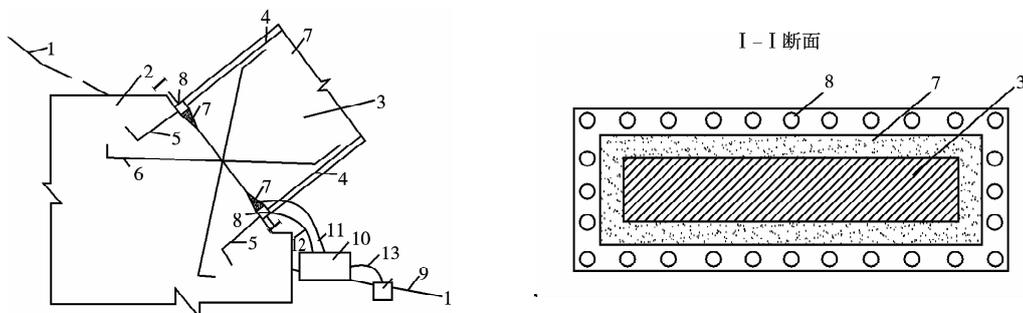
3 基于性能的混凝土拱桥减震方法

基于性能的抗震设计思想是20世纪90年代初由美国学者提出,它是使设计出的结构在未来的地震灾害下能够维持所要求的性能水平。在基于性能的设计中,规定了建筑的性能要求,而且可以用不同

的方法和手段去实现这些性能要求^[14-16]。

笔者根据基于性能的抗震思想,提出在地震发生时,适当改变拱桥结构体系,减小拱桥刚度,适量增加拱桥的变形能力,使其在地震作用下可以更好的分配地震波能量,在不显著增加拱桥变形的情况下将主拱的最不利内力降低,从而达到减震的目的。这种减震思路不再是单纯的以控制最大位移为目标,而是考虑拱桥的结构特点,以保持其使用性能为目标。

在上述理论的指导下,笔者提出“一种混凝土拱桥变刚度智能减震控制系统”(图2),其原理是:通过在主拱结构拱脚周边安装可变刚度元件,根据需要适时改变地基对主拱结构的约束方式,通常情况下可变刚度元件的刚度为不低于原结构刚度的常值,主拱结构的力学行为为无铰拱;两铰拱。选择 El Centro;1940, El Centro Site, 270 Deg, El Centro; 1940, El Centro Site, 180 Deg 及 1940, El Centro Site, vertical 对该桥进行三维一致地震响应分析,对减震方法进行验证。减震效果见表1。



1—地面线;2—地基基础;3—主拱结构;4—主拱主筋;5—预埋在主拱基础内的主筋;6—拱脚部位铰连交叉钢筋;7—特种填充材料;8—可变刚度元件条;9—地震信息拾震器;10—信息分析处理及减震控制器;11—特种填充材料与控制器相连的信号传输线;12—可变刚度元件条与控制器相连的信号传输线;13—拾震器与控制器相连的信号传输线。

图2 一种混凝土拱桥变刚度智能减震控制系统

表1 三维激励作用下结构主拱圈减震效率

地震内(应)力 增量	$M_{\max}/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	$N_{\max}/$ kN	$\sigma_{\max}/\sigma_{\min}/$ MPa	纵向最大位移/ cm	横向最大位移/ cm	竖向最大位移/ cm
减震前	34 556	25 012	68.9/-64.9	6.54	19.6	20.3
减震后	19 002	22 023	38.1/-40	13.6	18	31
比较	45%	12%	45%/38%	-108%	8%	-53%

注:表中应力正为拉应力;负为压应力;下同。

当超限地震发生时,设于拱脚周边的矩形可变刚度元件框可根据反馈信息需要适时调节其各元件的轴向刚度,以改变主拱结构在此部位的抗弯刚度,使之在结构容许变形范围条件下明显降低地震荷载引起的内力响应;通过智能调节主拱结构与地基基础的约束条件,将混凝土拱桥在地震荷载作用下的变形响应和内力响应进行合理匹配,使二者均控制

在可接受的范围内。本系统在不附加质量块和阻尼支撑(即不影响结构的正常使用和桥梁外观)的条件下,为大跨度混凝土拱桥的减震控制提供了一条可行的途径。其最终目标是实现半主动智能地震反应控制。目前,关于地震发生时变刚度元件的控制目标及控制算法正在研究中。下面计算时取其极端情况,将其值设为零,按被动减震方式进行减震控制。

笔者以攀枝花新雅江大桥为例,仍以上述有限元模型进行计算,变化拱脚刚度,对原结构和安装有变刚度智能减震控制系统的大跨径混凝土拱桥进行了比较分析。以两种极端情况为例:原结构为无铰拱,减震后结构通过变化拱脚的刚度使其成为计算结果表明:1)该方法可以有效地降低拱桥结构的最大内力/应力地震响应;2)该方法降低了拱桥结构的最大内力/应力响应,同时增加了拱桥的最大位移响应。因此,该方法在应用于拱桥结构减震时,需要进行最大内力/应力响应和最大位移响应的双控。对混凝土拱桥比较有利的一点是:混凝土拱桥本身由于刚度大,在地震作用下最大位移响应较小,因此,由该部分产生的 $P-\Delta$ 效应并不明显。此外,桥梁结构与建筑结构一个不同点在于结构中的附属非结

构物较少,结构本身的受力状况是衡量结构物能否安全使用的唯一因素。

为了研究该减震方法对地震激励中各向激励减震的敏感程度,对该桥进行了上述地震波的三向激励响应分析,各向激励下减震前后最大内力及应力效应比较见表 2-4。

该减震方案通过在面内改变结构体系,显著的降低了竖向激励下拱桥受力,最大应力减震效果达 51%。该减震方案对竖向激励减震效果显著。在纵向激励的作用下,内力最大值明显减少,最大应力减震效果达 42%。该减震方案对纵向激励的减震效果明显。该减震方案主要是在面内改变结构体系,对面外的横向激励有一定的减震效果,最大应力减震效果达 27.3%。该减震方案对横向激励减震效果较显著。

表 2 竖向激励作用下结构主拱圈减震效率

地震内(应)力 增量	$M_{\max}/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	$N_{\max}/$ kN	$\sigma_{\max}/\sigma_{\min}/$ MPa	纵向最大位移/ cm	横向最大位移/ cm	竖向最大位移/ cm
减震前	11 011	8 343	20.1/5.08	1.6	5.3	4.6
减震后	7 665	1 323	9.8/4.2	1.4	0.5	3.8
比较	30%	84%	51%/17%	13%	91%	17%

表 3 纵向激励作用下结构主拱圈减震效率

地震内(应)力 增量	$M_{\max}/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	$N_{\max}/$ kN	$\sigma_{\max}/\sigma_{\min}/$ MPa	纵向最大位移/ cm	横向最大位移/ cm	竖向最大位移/ cm
减震前	26 022	3 500	31.9/2.61	5.2	0.2	12.5
减震后	18 691	2 708	18.4/0	13.1	0.2	25.2
比较	28%	23%	42%/100%	-152%	0%	-102%

表 4 横向激励作用下结构主拱圈减震效率

地震内(应)力 增量	$M_{\max}/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	$N_{\max}/$ kN	$\sigma_{\max}/\sigma_{\min}/$ MPa	纵向最大位移/ cm	横向最大位移/ cm	竖向最大位移/ cm
减震前	7 133	22 012	41/3.3	0.9	19.5	8.1
减震后	3 724	21 001	29.8/0.5	1.2	17	7.8
比较	48%	5%	27%/85%	-33%	13%	4%

通过上述减震效果表明,该减震措施对地震激励下混凝土拱桥的内(应)力有显著的降低作用。同时关注该措施对拱桥地震激励下最大位移的影响,横向和纵向的位移增加约 7 cm,而竖向几乎没有增加。由此可知,该减震措施对拱桥的地震激励下位移的影响并不大,其增加的幅度与内力减小的幅度相比是可以接受的。

本减震方案在释放拱脚刚度时,考虑了混凝土拱桥的结构特点,只释放了面内的刚度。因此,此减震方案对结构体系刚度的影响更多的表现在面内,

与理论相符。计算表明,主要引起结构面内地震响应的纵向激励与竖向激励的最大应力减震效果(分别为 42%和 51%)明显优于主要引起结构面外地震响应的横向激励的最大应力减震效果(27.3%)。

4 结 论

1)由于混凝土拱桥的刚度大,地震作用下结构位移反应小,基于位移的抗震设计理论不适用于混凝土拱桥减震设计;

2)根据基于性能的抗震设计理论,混凝土拱桥

的减震控制目标应为结构内力控制。

3)该文提出一种新的减震方法,使其可以在地震发生时,适当改变拱桥结构体系,降低结构刚度,提高结构变形能力,从而有效减震。通过计算发现,该减震方法十分有效,并对拱桥的地震控制有非常强的针对性。

参考文献:

- [1] MOEHLE J P. Displacement-based design of RC structures[M]. IOWCEE, Mexico, 1992: 1576-1574.
- [2] PRIESTLY MJ. Displacement-based Design. Report No. SSRP-94/16, Systems Research, 1994.
- [3] WHITTAKER H. Displacement estimates for performance based seismic design [J]. Journal of Structural Engineering. ASCE, 1998, 124(8): 905-912.
- [4] 小谷俊介(叶列平译). 日本基于性能结构抗震设计方法的发展[M]. 建筑结构, 2000, 30(6): 3-9.
Shunsuk Otani. Japanese Development of Performance-based Design Technology [M]. Building Structure. 2000, 30(6): 3-9.
- [5] Calvi G M, Kingsley G R. Displacement-based seismic design of multi-degree-of-freedom bridge structures[J]. Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1995, 24: 1247-1266.
- [6] 李钢, 李宏男. 位移型耗能减震结构优化设计[J], 振动与冲击, 2007(4): 65-68.
LI GANG, LI HONG-NAN. Optimal Design of Displacement-Based Energy Dissipative Devices [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007(4): 65-68.
- [7] 李钢, 李宏男. 基于位移的消能减震结构抗震设计方法[J], 工程力学, 2007(9): 88-93.
LI GANG, LI HONG-NAN. Direct Displacement-Based Design for Buildings with Passive Energy Dissipation Devices [J], Engineering Mechanics, 2007(9): 88-93.
- [8] 梁兴文, 黄雅捷, 杨其伟. 钢筋混凝土框架结构基于位移的抗震设计方法研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(9): 53-60.
LIANG XING-WEN, HUANG YA-JIE, YANG QI-WEI. Displacement-based seismic design method of RC frames [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(9): 53-60.
- [9] 刘有军, 周建民. 基于位移的 RC 框架结构抗震设计研究[J]. 结构工程师, 2003(3): 1-6.
LIU YOU-JUN, ZHOU JIAN-MIN. Study of displacement-based seismic design for RC frame structures [J]. Structure Engineers, 2003(3): 1-6.
- [10] 罗文斌, 钱稼茹. 钢筋混凝土框架基于位移的抗震设计[J]. 土木工程学报, 2003(5): 22-29.
LUO WEN-BIN, QIAN JIA-RU. Displacement-Based Seismic Design for Rc Frames [J]. China Civil Engineering Journal, 2003(5): 22-29.
- [11] 雷磊, 韩小雷, 郑宜. 直接基于位移的抗震设计方法的研究[J], 华南地震, 2007(2): 26-32.
LEI LEI, HAN XIAO-LEI, ZHENG YI. A Study on Displacement-based Aseismic Design Method [J]. South China Journal of Seismology, 2007(2): 26-32.
- [12] 李正英, 李正良, 汪之松, 周志祥. 粘滞阻尼器拱桥结构减震控制研究[J], 振动与冲击, 2007(1): 56-60.
LI ZHENG-YING, LI ZHENG-LIANG, WANG ZHI-SONG, ZHOU ZHI-XIANG. Study on Seismic Response Control of an Arch Bridge with Viscous Dampers [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007(1): 56-60.
- [13] 孙毅, 李正良, 陈朝晖, 上承式拱桥阻尼支撑加固抗震性能分析[J], 重庆大学学报, 2006(8): 21-24.
SUN YI, LI ZHENG-LIANG, CHEN ZHAO-HUI. Research on Seismic Behavior of Top-bear Arch Bridge with Viscoelastic Damping Braces [J]. Journal of Chongqing University. 2006(8): 21-24.
- [14] M A Rahman, S Sritharan, M ASCE, Performance-Based Seismic Evaluation of Two Five-Story Precast Concrete Hybrid Frame Buildings [J]. Journal of Structural Engineering, 2007(11): 1489-1500.
- [15] 李应斌. 钢筋混凝土结构基于性能的抗震设计理论与应用研究[D], 西安建筑科技大学, 2004.
- [16] 韩建平, 吕西林, 李慧. 基于性能的地震工程研究的新进展及对结构非线性分析的要求[J]. 地震工程与工程振动, 2007(4): 15-23.
HAN JIANG-PING, LU XI-LIN, LI HUI. State-of-the-art of Performance-based Earthquake engineering and Need for Structural Nonlinear Analysis [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007(4): 15-23.

(编辑 胡玲)