

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.04.012

高地震烈度区含矮墩桥梁抗震设计

李晓莉, 孙治国, 王东升

(大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026)

摘要: 针对高烈度区矮墩在地震中易发生脆性剪切破坏问题, 结合《公路桥梁抗震设计细则 (JTG/T B20-01-2008)》, 提出了含矮墩桥梁抗震设计对策。以高烈度区某两跨简支预应力混凝土 T 梁桥为例, 分别提出了减隔震技术、多柱墩设计、采用复合短柱 (FRP 或钢套管) 或高强度抗剪箍筋等具体方案和建议。利用专业 MIDAS 有限元软件建立减隔震、多柱墩设计方案数值分析模型, 比较了在 E2 地震作用下各个设计方案中桥墩及桩基础纵、横向最大受力情况。结果表明, 采用减隔震设计或多柱墩设计方案可有效降低矮墩及基础的地震需求, 改善矮墩及基础在强震作用下的受力性能, 适用于高烈度区矮墩桥梁的抗震设计。上述方案主要供设计人员在抗震概念设计阶段选用, 以切实提高含矮墩桥梁抗震能力。

关键词: 桥梁工程; 矮墩; MIDAS 有限元; 抗震设计; 减隔震技术; 多柱墩

中图分类号: U442.5+5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2012) 04-0067-05

Seismic Design for Bridges with Short Piers in High Earthquake Intensity Zones

LI Xiaoli, SUN Zhiguo, WANG Dongsheng

(Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: Aimed at the short bridge piers that are vulnerable to brittle shear failure in high earthquake intensity zones, the seismic design countermeasures for bridges with short piers was put forward combined with *Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges* (JTG/T B02-01-2008). Based on a designed simple two-span prestressed concrete T-beam bridge located in a high earthquake intensity zone, the specific schemes and suggestions, including seismic isolation technology, multi-column pier design, composite short column (FRP or steel tube) or high strength transverse reinforcement, were proposed respectively. By using the numerical analysis model for seismic isolation and multi-column pier design scheme established by special finite element software MIDAS, the maximum longitudinal and lateral loads of the bridge piers and pile foundations of different designs under E2 earthquake excitation were compared. It is found that the seismic demand of short piers and foundations could be decreased significantly for the bridges by using seismic isolation design or multi-column pier design suitable for seismic design of bridge with short piers in high earthquake intensity zones, and the mechanical behaviors of short piers and foundations under strong earthquake could be improved. The proposed design schemes could be selected by designers in the seismic concept design stage to improve the seismic performance of the bridges with short piers.

Key words: bridges engineering; short pier; MIDAS finite element; seismic design; seismic isolation design; multi-column pier

收稿日期: 2011-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51008041); 中央高校基本科研业务费项目 (2011QN046)

作者简介: 李晓莉 (1977-), 女, 辽宁大连人, 讲师, 博士. (janet_hs2008@yahoo.cn)

0 引言

在山区高等级公路、城市立交等桥梁设计中，受地形或周围建筑环境的制约，剪跨比小于 2.5 的矮桥墩较常出现（含排架墩考虑横桥向地震作用时）。矮墩在地震中易发生脆性剪切破坏，如 1994 年美国 Northridge 地震中倒塌的 7 座桥梁中 6 座是由矮墩剪切破坏引发^[1]；2008 年我国汶川地震中绵竹市回澜立交桥刚构矮墩发生严重的弯剪破坏^[2-3]。汶川地震后相关部门颁布了《公路桥梁抗震设计细则（JTG/T B20-01-2008）》（以下简称《08 细则》），引入了延性抗震设计方法和能力保护设计原则，取得了长足进步^[4]。《08 细则》规定矮墩在 E2 地震作用下按强度设计，对于 8 度地震烈度区，考虑重要性系数影响后对 A 类、B 类桥梁则要求矮墩在 0.3g~0.5g 地面加速度峰值下保持弹性，抗震设计面临极大困难。本研究以某 8 度地震烈度区含矮墩的简支梁桥为例，结合现有成熟技术提出了相应抗震设计对策。

1 矮墩桥梁抗震设计实例及问题

某简支梁桥位于 8 度地震烈度区（地震动峰值加速度 0.2g），II 类场地，无液化现象。上部结构为两跨 40 m+40 m 简支预应力混凝土 T 梁，桥面连续，全长 86 m。下部结构桥墩采用双柱式墩，钻孔桩基础；桥台采用桩柱式桥台，钻孔桩基础，钻孔桩均为摩擦桩，图 1 为该桥设计简图。

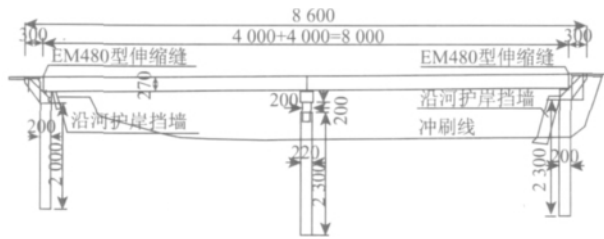


图 1 简支梁桥设计简图（单位：cm）

Fig. 1 Design diagram of simply supported girder bridge (unit: cm)

该桥初始设计桥墩为圆形截面双柱式墩，基础系梁位于河床以上，桥墩截面直径 2 m，高 2 m。假定排架横桥向反弯点位于桥墩中部，则剪跨比近似为 $\lambda = 0.5$ ，属于极矮墩。依据《08 细则》对该桥方案进行了 E2 地震作用下的弹性反应谱分析。

利用 MIDAS 有限元软件对主梁、桥墩和盖梁进行空间梁单元离散。桥台处滑板支座假定纵桥向滑动、横桥向和竖向铰支；桥墩顶部板式橡胶支座纵

桥向设为弹性连接、横桥向和竖向铰支；连接构件在分析时保持弹性状态，保证其不发生破坏而影响分析结果；考虑桥台和墩柱横桥向有抗震挡块的约束，主梁与下部结构横桥向的连接方式处理为铰接。以 m 法考虑桩土-结构相互作用，结构有限元离散模型如 2 图所示。



图 2 简支梁桥原设计方案分析模型

Fig. 2 Finite element model of the original designed simply supported girder bridge

E2 地震下反应谱分析分别考虑纵桥向和横桥向的作用，强度验算时荷载效应组合考虑：（1）恒载+纵向地震荷载；（2）恒载-纵向地震荷载；（3）恒载+横向地震荷载；（4）恒载-横向地震荷载。表 1 和表 2 分别给出了桥墩和桩基最大受力情况。总体上看，该墩抗震设计由横桥向控制，由于地震力很大，抗剪配筋设计面临困难。目前《08 细则》及其他桥涵相关设计规范并未给出矮墩抗剪强度计

表 1 纵桥向输入桥墩控制截面内力值

Tab. 1 Internal forces in control section of bridge piers under longitudinal seismic excitation

位置	恒载+纵向地震输入			恒载-纵向地震输入		
	轴力/ kN	剪力/ kN	弯矩/ (kN·m)	轴力/ kN	剪力/ kN	弯矩/ (kN·m)
墩顶	-5 556.0	1 265.8	0	-5 556.0	-1 265.8	0
墩底	-5 796.3	1 297.6	3 828.2	-5 796.3	-1 297.6	-3 828.2
桩顶	-6 107.4	1 343.3	4 994.8	-6 107.4	-1 343.3	-4 994.8
桩最大受力	-8 055.2	2 257.2	12 335.1	-8 055.2	-2 257.2	-12 335.1

表 2 横桥向输入桥墩控制截面内力值

Tab. 2 Internal forces in control section of bridge piers under transverse seismic excitation

位置	恒载+横向地震输入			恒载-横向地震输入		
	轴力/ kN	剪力/ kN	弯矩/ (kN·m)	轴力/ kN	剪力/ kN	弯矩/ (kN·m)
墩顶	-2 757.1	3 506.6	10 329.7	-8 354.9	-3 506.6	-10 329.7
墩底	-2 988.1	3 616.7	353.4	-8 604.4	-3 616.7	-353.4
桩顶	1 956.7	3 802.3	12 544.7	-14 171.5	-3 802.3	-12 544.7
桩最大受力	1 383.3	3 914.4	10 973.9	-14 780.3	-3 914.4	-10 973.9

算公式。《08 细则》中的桥墩抗剪强度公式是在假定桥墩已形成弯曲塑性铰下成立,而矮墩设计要求其保持为弹性,并不适合,这在事实上形成了矮墩抗震设计无规范可依的局面。

2 矮墩桥梁抗震设计对策

结合上述桥梁实例,提出了若干矮墩桥梁抗震设计对策的方案和建议。为更好地与原方案比较,仍考虑 E2 地震作用。

2.1 采用减隔震方案

减隔震是通过合适装置来延长结构周期及消耗地震能量,从而有效降低桥梁地震反应的一种技术手段。该技术被越来越广泛地应用于包括中国在内的强震区桥梁设计与加固工作^[5-7]。我国《08 细则》第10章对桥梁减隔震设计提出了专门指导。

实例桥梁场地条件良好,采用板式橡胶支座的弹性减震方案。板式橡胶支座在横桥向设计为可发生弹性变形,同时主梁与横桥向挡块间预留足够空间允许变形发生。抗震设计除按验算矮墩强度外,还要验算主梁与挡块的相对位移。抗剪强度验算可参考文献^[8]中位移延性系数取1的情况,或采用 Caltrans 规范^[9]。位移验算参考土耳其 Bolu 高架隔震桥梁震害的研究,建议 E2 地震下预留空间大于1.5倍的主梁和盖梁间的相对位移反应^[9]。

我国桥梁设计通常横桥向挡块和主梁间预留的空间很小,横桥向更接近于墩梁铰支方案。在矮墩桥梁采用减隔震方案时,必须重视相对位移的验算及预留变形空间的构造设计。

表3和表4给出了采用减震方案设计时,E2地震下反应谱分析的桥墩受力情况,与原设计方案相比桥墩最大弯矩(或剪力)降低66%。计算表明横桥向主梁相对挡块位移约9.6 cm,设计时预留间隙取14.5 cm。此外纵桥向桥台伸缩缝处相对位移约12 cm,建议采用大位移伸缩缝以防止碰撞发生。若采用耗能的双向隔震的铅芯橡胶支座方案,上述位移可进一步得到控制,但需采用时程分析。

在一些大跨连续或刚构桥梁中也可能存在矮墩,文献^[10-11]分别给出了利用双曲面球形减隔震支座和钢阻尼器完成的抗震设计实例,可供参考。

2.2 采用多柱墩方案

多柱墩方案通过增加桥墩数量来保持承载力,而减小桥墩截面来提高长细比,在消除矮墩的同时还增加了结构的(延性)变形能力。一般可增加结构周期,对抗震亦有利。

表3 减隔震后纵桥向输入下桥墩控制截面内力值

Tab.3 Internal forces in control section of bridge piers under longitudinal excitation for seismic isolated bridge

位置	恒载+纵向地震输入			恒载-纵向地震输入		
	轴力/ kN	剪力/ kN	弯矩/ (kN·m)	轴力/ kN	剪力/ kN	弯矩/ (kN·m)
墩顶	-5 556.0	1 265.8	0	-5 556.0	-1 265.8	0
墩底	-5 796.3	1 297.6	3 828.2	-5 796.3	-1 297.6	-3 828.2
桩顶	-6 107.4	1 343.3	4 994.8	-6 107.4	-1 343.3	-4 994.8
桩最大受力	-8 055.2	2 257.2	12 335.1	-8 055.2	-2 257.5	-12 335.1

表4 减隔震后横桥向输入下桥墩控制截面内力值

Tab.4 Internal forces in control section of bridge piers under transverse excitation for seismic isolated bridge

位置	恒载+纵向地震输入			恒载-纵向地震输入		
	轴力/ kN	剪力/ kN	弯矩/ (kN·m)	轴力/ kN	剪力/ kN	弯矩/ (kN·m)
墩顶	-4 575.4	1 207.5	3 462.9	-6 536.6	-1 207.5	-3 462.9
墩底	-4 811.2	1 231.7	301.0	-6 781.3	-1 231.7	-301.0
桩顶	-3 407.0	1 267.1	4 208.8	-8 807.8	-1 267.1	-4 208.8
桩最大受力	-5 338.6	1 307.5	3 642.1	-10 771.9	-1 307.5	-3 642.1

对实例桥梁,将墩直径设计成1.4 m,保持总横截面面积不变的同时,根数变为4根,系梁下移至顶面与冲刷线平齐(抗震分析常假定墩底固结于冲刷线处),桥墩高7 m,则桥墩剪跨比为2.5,桥墩将发生弯曲破坏或具有较好延性的弯剪破坏^[12]。桩基础直径设计1.6 m,相应由2根设计成4根,桩长16 m。其余同原设计方案。

利用反应谱法对多柱墩方案进行了抗震分析,不同方案的比较仍采用 E2 地震作用。事实上此时已是规则桥梁,应按 E1 地震进行强度设计和 E2 地震下变形验算。

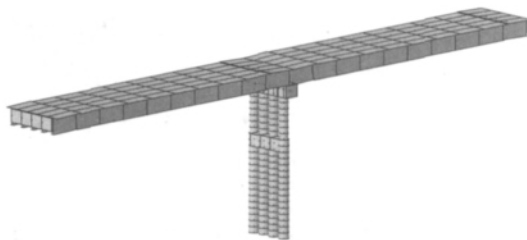


图3 多柱墩方案分析模型

Fig. 3 Finite element model for multi-column pier scheme

表5和表6给出了采用多柱墩方案设计时反应谱分析的桥墩受力情况。桥墩最大弯矩(或剪力)与原设计方案相比降低32%。

表 5 采用多柱墩时纵桥向输入桥墩控制截面内力值
Tab. 5 Internal forces in control section of bridge with multi-column piers under longitudinal seismic excitation

位置	恒载 + 纵向地震输入			恒载 - 纵向地震输入		
	轴力/ kN	剪力/ kN	弯矩/ (kN · m)	轴力/ kN	剪力/ kN	弯矩/ (kN · m)
墩顶	-3 006.4	597.4	0	-3 006.4	-597.4	0
墩底	-3 281.1	615.5	4 820.0	-3 281.1	-615.5	-4 820.0
桩顶	-3 359.4	849.4	5 308.4	-3 359.4	-849.4	-5 308.4
桩最大受力	-4 077.0	1 255.4	5 308.4	-4 077.0	-1 255.4	-5 308.4

表 6 采用多柱墩时横桥向输入桥墩控制截面内力值
Tab. 6 Internal forces in control section of bridge with multi-column piers under transverse seismic excitation

位置	恒载 + 纵向地震输入			恒载 - 纵向地震输入		
	轴力/ kN	剪力/ kN	弯矩/ kN · m	轴力/ kN	剪力/ kN	弯矩/ kN · m
墩顶	-1 361.7	1 810.8	6 059.6	-6 213.5	-1 810.8	-6 059.6
墩底	-1 631.5	1 904.2	6 990.0	-6 504.4	-1 904.2	-6 990.0
桩顶	4 667.8	724.8	1 748.3	-11 386.0	-724.8	-1 748.3
桩最大受力	4 670.3	724.8	2 141.6	-12 122.4	-724.8	-2 141.6

2.3 组合短柱方案建议

在矮墩必须存在且因场地条件（如软弱土、液化）制约无法采用减隔震方案时，可考虑从提高矮墩延性的新型结构入手，如采用钢套管钢筋混凝土柱或 FRP 管钢筋混凝土柱。试验已经证明，这类组合短柱构件具有很好的延性抗震性能^[13-14]。另外，由于短柱抗剪承载力与箍筋强度密切相关，国内外学者提出了采用高强度箍筋提高短柱抗剪能力设想，并进行了相关试验验证^[17-19]。

对实例桥梁，在不改变初始设计方案的前提下，可对桥墩采用钢套管，提高延性，对桩基础采用钢管混凝土桩保证抗震能力，为提高其水下防腐性能可外包 FRP 材料，形成 FRP 钢管混凝土复合构件。

鉴于目前组合短柱类构件尚未列入桥梁设计规范，采用时需做专门研究。

2.4 不同方案的比较

桥梁抗震总体可采用两种策略：一是延性抗震设计，即在强烈地震下允许下部结构（桥墩）发生弯曲塑性屈服、损坏来消耗地震能量，但要保持稳定的竖向承载力，从而实现大震不倒的设防目标。多柱墩方案属延性抗震范畴，采用新型复合短柱构件可认为是延性抗震概念延伸。二是减隔震设计，即通过提高支座柔性或附加阻尼装置，提高桥梁的

自振周期和耗能能力，以降低强烈地震下桥梁结构的地震反应，甚至于使下部结构（桥墩）处于弹性状态。一般矮墩刚度较大，采用减隔震方案较优，但要受满足良好场地条件制约。

另外，还可以综合采用上述方案，如回澜立交桥抗震修复方案^[20]。该方案对严重弯剪破坏矮墩整修后外加钢套管，同时将刚构变为墩顶设置滑板橡胶支座，辅以横向挡块限制墩梁相对径向位移。此外为增加其他刚构墩的延性，全部外加了钢套管。

3 结语

矮墩抗震问题在《公路桥梁抗震设计细则（JTG/T B02-01—2008）》中受到重视。本研究以某高烈度区简支梁桥为实例，详细给出了矮墩抗震设计对策及注意事项，包括减隔震方案、多柱墩方案和组合短柱构件方案建议等，供桥梁设计人员在抗震概念设计阶段选用，以达到切实提高含矮墩桥梁抗震能力的目的。

参考文献：

References:

- [1] HOUSNER G W, THIEL C C. The Continuing Challenge: Report on the Performance of State Bridges in the Northridge Earthquake [J]. Earthquake Spectra, 1995, 11 (4): 607-636.
- [2] 孙治国, 王东升, 郭迅, 等. 汶川大地震绵竹市回澜立交桥震害调查 [J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29 (4): 132-138.
SUN Zhiguo, WANG Dongsheng, GUO Xun, et al. Damage Investigation of Huilan Interchange in Mianzhu after Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29 (4): 132-138.
- [3] 王东升, 孙治国, 李晓莉, 等. 汶川大地震曲线梁桥震害及破坏机理分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30 (5): 572-579.
WANG Dongsheng, SUN Zhiguo, LI Xiaoli, et al. Seismic Damage Investigation and Failure Mechanism Analysis of Curved Bridges in Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30 (5): 572-579.
- [4] JTG/T B02-01—2008, 公路桥梁抗震设计细则 [S]. JTG/T B02-01—2008, Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges [S].
- [5] 范立础, 王志强. 桥梁减隔振设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

- FAN Lichu, WANG Zhiqiang. Seismic Isolation Design of Bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [6] ROBERTS J E. Caltrans Structural Control for Bridges in High-seismic Zones [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2005, 34 (4-5): 449-470.
- [7] 王东升, 司炳君, 孙治国, 等. 地震作用下钢筋混凝土桥墩塑性铰区抗剪强度试验 [J]. 中国公路学报, 2011, 24 (2): 34-41.
- WANG Dongsheng, SI Bingjun, SUN Zhiguo, et al. Experiment on Shear Strength of Reinforced Concrete Bridge Column in Plastic Hinge Zone Under Seismic Effect [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24 (2): 34-41.
- [8] CALTRANS-2001, Seismic Design Criteria [S].
- [9] 陈永祁, 王静, 刘林. 国外减隔震桥梁的失效分析 [J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30 (5): 41-47.
- CHEN Yongqi, WANG Jing, LIU Lin. Failure Analysis of Overseas Seismic Isolated Bridges [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008, 30 (5): 41-47.
- [10] 王淑涛, 刘兆光, 胡盛. 减隔震技术在大跨度预应力混凝土连续梁桥设计中的应用 [J]. 公路, 2011 (7): 152-155.
- WANG Shutao, LIU Zhaoguang, HU Sheng. Application of Seismic Isolation Techniques in Design of Long Span Prestressed Concrete Continuous Girder Bridge [J]. Highway, 2011 (7): 152-155.
- [11] 马军伟. 新京航运河大桥抗震性能分析 [J]. 中国市政工程, 2011 (2): 24-27.
- MA Junwei. Aseismic Performance Analysis of Great Bridge of Jinghang Canal [J]. China Municipal Engineering, 2011 (2): 24-27.
- [12] 司炳君, 孙治国, 王东升, 等. 钢筋混凝土桥墩地震弯剪破坏机理与震后快速修复技术研究 [J]. 土木工程学报, 2011, 44 (7): 90-99.
- SI Bingjun, SUN Zhiguo, WANG Dongsheng, et al. Study on the Seismic Flexural-shear Damage Mechanisms and Rapid Repair Techniques for Earthquake Damaged Bridge Piers [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44 (7): 90-99.
- [13] ABDULLAH J A, ZHANG Sumei, LIU Jiepeng. Shear Strength and Behavior of Tubed Reinforced and Steel Reinforced Concrete (TRC and TSRC) Short Columns [J]. Thin-Walled Structures, 2010, 48 (3): 191-199.
- [14] 蔡新江, 田石柱, 王大鹏, 等. FRP加固桥梁RC短柱拟静力及网络拟动力试验 [J]. 建筑结构学报, 2009, 30 (12): 125-135.
- CAI Xinjiang, TIAN Shizhu, WANG Dapeng, et al. Quasi-Static Testing and Networked Pseudo-Dynamic Testing on Fiber Reinforced Plastic Retrofitted Reinforcement Concrete Short Columns of Bridge [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30 (12): 125-135.
- [15] 肖岩. 套管钢筋混凝土结构的发展与展望 [J]. 土木工程学报, 2004, 37 (4): 8-12.
- XIAO Yan. Development and Prospects of Tubular Reinforced Concrete Column Structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37 (4): 8-12.
- [16] 孙治国, 司炳君, 王东升, 等. 钢筋混凝土桥墩震后修复技术研究综述 [J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29 (5): 128-132.
- SUN Zhiguo, SI Bingjun, WANG Dongsheng, et al. Review on the Repair Techniques for Earthquake Damaged RC Bridge Piers [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29 (5): 128-132.
- [17] 孙治国, 司炳君, 王东升, 等. 高强箍筋高强混凝土柱抗震性能研究 [J]. 工程力学, 2010, 27 (5): 128-136.
- SUN Zhiguo, SI Bingjun, WANG Dongsheng, et al. Research on the Seismic Performance of High-Strength Concrete Columns with High-Strength Stirrups [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27 (5): 128-136.
- [18] 司炳君, 孙治国, 王东升, 等. 高强箍筋约束高强混凝土柱抗震性能研究综述 [J]. 土木工程学报, 2009, 42 (4): 1-9.
- SI Bingjun, SUN Zhiguo, WANG Dongsheng, et al. Review of Studies on the Seismic Behavior of High Strength Concrete Columns with High Strength Transverse Reinforcement [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42 (4): 1-9.
- [19] BUDEK A M, PRIESTLEY M J N, LEE C O. Seismic Design of Columns with High-Strength Wire and Strand as Spiral Reinforcement [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99 (5): 660-670.
- [20] 王旭阳. 绵竹市回澜匝道桥抗震分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- WANG Xuyang. Seismic Response Analysis of Huilan Ramp Bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.