

汶川地震桥梁震害分析及抗震设计启示¹

赵国辉 刘建新

(长安大学公路学院, 西安 710064)

摘要 汶川地震中公路桥梁破坏严重, 且破坏形式在破裂面南、北两端出现显著的差异。本文从震源机制、断层运动方式和桥梁本身特点等角度, 分析了产生这一差异的原因。分析结果表明, 断层南端由于释放能量巨大, 断层逆冲作用显著, 结构在竖向和水平向地震力作用下出现强度破坏; 而断层北端右旋走滑作用显著, 结构在剧烈的地面错动中出现位移型破坏。在此基础上, 本文对强震区的桥梁抗震设计提出了相应的改进措施。

关键词: 汶川地震 桥梁震害 震源机制 抗震设计

引言

2008年5月12日14时28分, 在四川东部龙门山构造带汶川附近发生了8.0级强烈地震。此次地震不仅在震中区附近造成灾难性的破坏, 而且在四川省和邻近的甘肃和陕西省大范围内也造成了破坏, 其影响更是波及到全国绝大部分地区乃至境外, 是新中国成立以来我国大陆发生的破坏性最为严重的地震。在汶川地震中公路桥梁破坏严重, 且破坏形式在破裂面南、北两端出现了显著的差异。本文从震源机制、断层运动方式和桥梁本身特点等角度, 分析了产生这一差异的原因, 并在此基础上对强震区的桥梁抗震设计提出了相应的改进措施。

1 震源机制及破裂过程

汶川地震发生在四川龙门山逆冲推覆构造带上。该构造带是青藏高原内部巴颜喀喇地块和中国东部华南地块的边界构造带, 经历了长期的地质演化历史, 具有十分复杂的结构和构造。晚新生代的构造变形主要集中在灌县-江油断裂(前山断裂)、映秀-北川断裂(中央断裂)和汶川-茂县断裂(后山断裂)及其相关褶皱之上(图1), 这次强震发生在映秀-北川断裂之上, 宏观震中位于映秀镇西南的牛圈沟蔡家杠村附近(高孟潭等, 2008)。

根据陈运泰等²的研究, 此次地震破裂大致由3个主要的子事件组成: 第一个子事件位于0—15s, 在这个时间内释放了16%的地震矩; 第二个子事件位于17—46s, 为本次地震过程中最大也是最主要的一次事件, 释放了63%的地震矩; 最后一次事件位于48—60s, 同样

1 基金项目 交通部规范编制项目 200402 “公路桥梁抗震连梁装置研究” 资助

2 陈运泰, 许力生, 张勇等, 2008. 2008年5月12日汶川特大地震震源特性分析报告.

[收稿日期] 2008-11-5

[作者简介] 赵国辉, 男, 生于1978年。讲师, 在读博士。主要研究领域: 桥梁结构抗震。E-mail: zgh@gl.chd.edu.cn

释放了 16% 的地震矩。地震破裂面南段以逆冲为主、兼具右旋走滑分量；北段以右旋走滑为主、兼具逆冲分量。但这次地震的震源机制比较复杂，在震源过程中震源机制随着时间和空间在发生变化。如果将整个地震过程分成 7 个阶段，则在地震的开始阶段表现为逆冲为主，但后来逐渐转变为以走滑为主。7 个阶段对应的地震震级分别为： $M_w7.1$ 、 $M_w7.1$ 、 $M_w7.6$ 、 $M_w7.4$ 、 $M_w7.4$ 、 $M_w7.4$ 和 $M_w7.2$ （图 2）（吴健等，2008）。

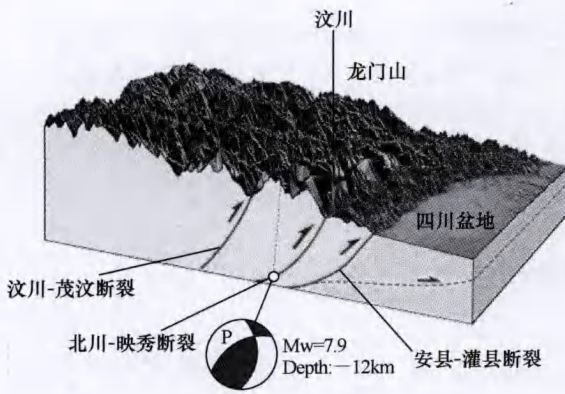


图 1 龙门山构造带

Fig.1 Tectonic map of Longmen Mountain belt

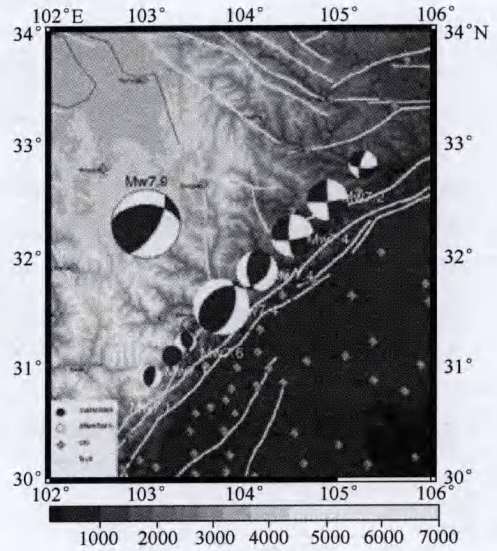


图 2 震源过程（吴健等，2008）

Fig.2 Source process of Wenchuan $M_s8.0$ earthquake
(from Wu Jian et al., 2008)

2 典型的桥梁震害分析

2.1 破裂面南端典型桥梁震害

破裂面南端从映秀至汉旺，主要以逆冲为主、兼具右旋走滑分量，其控制子事件主要为第 1、第 2 子事件，时间从 0—46s，释放的地震矩约占总地震矩的 80%。破裂面南端控制区域内的桥梁破坏相当严重，此次地震中发生垮塌的桥梁绝大多数都集中在这一区域及其周边。其中几座典型的桥梁均处在断层的上盘，结构同时受到巨大的竖向和水平向地震力作用，出现了以构件强度失效破坏引起的结构垮塌。

(1) 百花大桥

百花大桥位于岷江右岸，桥长 495.55m，最大墩高 30.87m。跨径组合为 $4 \times 25m + 5 \times 25m + 50m + 3 \times 25m + 5 \times 20m + 2 \times 20m$ ，平面位于 $R=150m$ 的左偏圆曲线、192.601m 直线以及 $R=66m$ 的右偏圆曲线上。大桥距离本次地震宏观震中仅 1.5km，桥位地处断层上盘，强大的逆冲作用使结构承受巨大的超重作用，导致桥墩轴压比成倍扩大，其内的纵向钢筋和混凝土的压应力陡增，极大地限制了结构延性性能的发挥，基本以脆性的弯剪破坏为主，甚至出现了压溃型破坏，见照片 1—4。此外，在结构设计方面也存在着许多不利于结构延性等抗震性能发挥的因素。

①强梁弱柱效应：桥墩之间的中横梁过于强大，导致强梁弱柱效应的出现，使结构的第一塑性铰出现在桥墩上，致使结构失效。



照片 1 百花大桥
Photo 1 Baihua bridge



照片 2 墩底压溃
Photo 2 Axial failure of the piers



照片 3 梁柱效应
Photo 3 Beam-column effect



照片 4 墩底弯剪破坏
Photo 4 Moment-shear failure of the pier



照片 5 映秀镇顺河桥
Photo 5 Collapse of Shunhe bridge in Yingxiu town



照片 6 墩底剪切破坏
Photo 6 Shear failure of the pier

②桥墩配箍率：笔者在现场测量发现，桥墩所配螺旋箍筋为 HRB235 级 $\phi 8$ 钢筋，间距为 20cm，配箍率为 0.06%，远低于《公路工程抗震设计规范（JTG 004-89）》（交通部公路规划设计院，1990）和新颁布的《公路桥梁抗震设计细则（JTG/T B02-01-2008）》（重庆交通科研设计院，2008）中对箍筋配置的相关规定，导致核心混凝土几乎没有约束，其极限应力和

应变大大降低, 桥墩几乎没有延性性能。

③河卵石骨料: 笔者在四川灾区考察发现, 所见混凝土结构的骨料均采用光圆的河卵石, 此类骨料与水泥的胶结面过于整齐而降低了胶结强度, 在往复荷载作用下, 混凝土极易出现粉碎性崩溃。

④支承方式: 该桥曲线段上第 5 联 (5×20m) 采用一个固定支座搭配多个活动支座的组合方式, 导致全联上部结构的水平地震力几乎完全由固定支座下的桥墩承担, 该桥墩在强大的地震作用下迅速破坏, 进而在全联出现“多米诺”效应式坍塌。

(2) 映秀镇顺河桥

该桥位于映秀镇以北约 500m 处, 桥轴线与破裂面夹角小于 30°。由于桥墩与桩基础的施工接缝过于整齐, 在强大的竖向和水平向地震力作用下桥墩底面产生剪切破坏而倒塌, 见照片 5 和照片 6。

(3) 小鱼洞大桥

小鱼洞大桥位于彭州市龙门山镇与小鱼洞镇交界处。全桥总长 187m, 其中主桥为 4×40m 刚架拱, 桥宽 12m, 横桥向由 5 片拱肋组成。桥轴线近东西方向, 断层从大桥东侧 300m 处穿过, 基本与桥轴线正交, 大桥处在断层上盘。剧烈的逆冲和向东挤压使薄弱的拱片在承受近两倍自重压力的同时, 还承受着巨大的顺桥向水平惯性力, 最终在斜撑的顶部 (见照片 7) 和拱脚 (见照片 8) 产生了斜下方向的剪切破坏, 导致 4 跨主桥全部坍塌。从小鱼洞大桥的破坏可以看出, 刚架拱桥虽然具有结构轻巧、施工简单、经济美观等诸多优点, 但过于纤细薄弱的拱肋和斜撑应避免采用。

2.2 破裂面北端典型桥梁震害

破裂面北端从北川开始跳跃至青川, 直至陕西的宁强, 主要以右旋走滑为主、兼具逆冲分量, 其控制子事件为第 3 子事件和后续子事件, 时间从第 48s 开始, 释放的地震矩约占总地震矩的 18%。尽管破裂面北端释放的能量并不大, 但控制区域内的桥梁破坏也较为严重, 而且垮塌的桥梁轴线基本上与断层走向成锐角, 甚至平行于断层的走向; 主要由于地面剧烈的近南北向水平错动, 导致桥梁出现了位移破坏型的结构垮塌。

(1) 南坝镇涪江新桥

该桥位于九环线平武县南坝镇上场口, 跨涪江, 是九寨沟环线 S205 和省道 S105 共用路段上的一座大型桥梁。该桥全长 207.04m, 跨径为 10×20m 预应力混凝土空心板桥, 桥轴线与破裂面走向大致平行。桥位地处断层上盘, 由于沿桥轴向剧烈错动和横桥向挤压, 造成下游侧上部结构均从南侧支座上滑落, 而上游侧边梁在撞毁档块后横向抛落 (见照片 9、10)。由于断层逆冲作用显著减弱以及上部结构的迅速滑落, 致使桥墩受到的竖向和水平向地震力较小, 桥墩本身没有发生破坏。

(2) 南坝明月渡涪江大桥

明月渡涪江大桥全长 141.32m, 主桥为 2×60m 等截面悬链线双曲拱, 该桥已有 33 年桥龄, 构造性缺陷和病害较多, 原设计荷载等级较低, 桥梁健康状况较差已属危桥。桥位地处断层上盘, 地层剧烈的错动导致了这座整体性较差的危桥垮塌。

(3) 井田坝大桥

井田坝大桥位于青川县白龙湖水库, 主跨为 2×75m 钢筋混凝土截面悬链线双曲拱, 桥位地处断层的下盘。由于拱肋的起拱线较高, 在河道中央设有一个高桥墩。从结构坍塌

后的残骸可以推测，由于地震时强烈的南北向地面错动，导致大桥的南跨（照片 12 中左侧一跨）倒塌。桥墩在只承受北跨水平推力下被剪断并向南倾倒，进而导致了北跨拱桥丧失支承而垮塌。



照片 7 小鱼洞大桥垮塌
Photo 7 Collapse of Xiaoyudong bridge



照片 8 拱肋剪切破坏
Photo 8 Shear failure of the arch rib



照片 9 南坝镇新桥落梁（上游侧）
Photo 9 Collapse of new Nanba bridge (up stream)



照片 10 南坝镇新桥落梁（下游侧）
Photo 10 Collapse of new Nanba bridge (down stream)



照片 11 南坝明月渡大桥垮塌
Photo 11 Collapse of old Nanba bridge



照片 12 井田坝大桥垮塌
Photo 12 Collapse of Jingtianba bridge

从明月渡涪江大桥(照片 11)和井田坝大桥(照片 12)的垮塌可以发现,双曲拱桥结构本身整体性较差,修建年代久远而承载能力较低,加之地处破裂面北端,地层水平错动剧烈,导致拱脚间出现背向型位移,从而导致结构垮塌。于此形成鲜明对比的是,在破裂面南端,许多石料砌筑的拱桥都几乎完好的保存下来,其原因可能是由于区域内断层抬升作用显著、但走滑较弱,地面水平错动量小,断层抬升对结构的超重作用由拱式结构本身强大的超载能力化解。

3 桥梁抗震设计启示(范立础, 1997; 谢旭, 2006)

汶川地震破裂面南段以逆冲为主、兼具右旋走滑分量,释放能量巨大,控制区域内桥梁的破坏主要是受到强大的竖向和水平向地震力造成的强度破坏;而破裂面北段以右旋走滑为主、兼具逆冲分量,释放的能量较小,控制区域内桥梁的倒塌主要是由于地面剧烈的水平错动导致的位移型破坏。针对破裂面两端不同桥型的破坏特征和原因,对于强震区的桥梁抗震设计应当着重考虑以下几个方面。

3.1 梁式结构

(1)应当充分考虑桥墩的延性设计,尽量采用直径 12mm 以上的二级螺纹钢筋作为箍筋,并加密箍筋的间距以保证足够的配箍率,实现对核心混凝土的约束作用。

(2)排架墩间横梁的设置应防止出现强梁弱柱效应,保证第一塑性铰产生在横梁而不是桥墩上。

(3)桩柱式结构应尽量避免在墩底出现整齐的施工接缝,导致抗剪薄弱面的出现。

(4)支承应选用板式橡胶支座,使上部结构的惯性力均匀地分配到各桥墩。

(5)应当增加主梁的支承长度,尽量避免上部结构在地震中落梁。

3.2 拱式结构

(1)我国早期修建的双曲拱桥应尽快改造成整体性高、抗震性能较好的板拱和箱拱。

(2)应加强连拱结构的桥墩断面,防止出现连续垮塌的灾害。

(3)在强震区应避免采用构件纤细的刚架拱桥,而应尽量采用整体性好、断面强大的板拱和箱拱。

参考文献

重庆交通科研设计院, 2008. 公路桥梁抗震设计细则(JTG/T B02-01-2008). 北京: 人民交通出版社.

范立础, 1997. 桥梁抗震. 上海: 同济大学出版社.

高孟潭, 周本刚, 潘华, 2008. “5.12”汶川特大地震灾害特点及其防灾启示. 震灾防御技术, 3(3): 209—214.

交通部公路规划设计院, 1990. 公路工程抗震设计规范(JTG 004-89). 北京: 人民交通出版社.

吴健, 吕红山, 刘爱文, 2008. 汶川地震烈度分布与震源过程相关性的初步研究. 震灾防御技术, 3(3): 224—229.

谢旭, 2006. 桥梁结构地震响应分析与抗震设计. 北京: 人民交通出版社.

Bridge Damage Analysis and Enlightenment in Seismic Design of Wenchuan Earthquake

Zhao Guohui and Liu Jianxin

(Highway College, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract Highway bridges were severely damaged in Wenchuan earthquake. There was significant difference in damage style from south to north of the fault. From the point view of earthquake source process, movement style of the fault and characteristic of the bridges, we analyzed the possible reasons for such behavior. Our results show that due to the huge energy and faults thrust in south end, the damage style is strength failure. While in the north end, because of the huge right lateral strike slip, the damage style is displacement failure. Finally, improvement measures in seismic design are proposed on the basis of above analysis.

Key words: Wenchuan earthquake; Bridge damage; Earthquake source; Seismic design