

文章编号: 1000-1301(2009)04-0132-07

汶川大地震绵竹市回澜立交桥震害调查

孙治国¹, 王东升¹, 郭 迅², 孟庆利², 于德海¹, 李晓莉¹

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026; 2 中国地震局 工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 绵竹市回澜立交桥跨越绵竹货运火车站, 包括主桥及 4 个平面为圆形的曲线匝道桥, 匝道桥为连续箱梁结构。5 12 汶川大地震中, 回澜立交桥遭到严重破坏, 通过对震害的现场调查及分析发现, 圆形匝道桥破坏严重, 每个匝道桥破坏集中于 1—2 个抗弯刚度较大的低矮桥墩并引起上部箱梁横向断裂, 其余桥墩发生轻度或中度破坏, 主要为桥墩混凝土保护层脱落、混凝土开裂及墩顶橡胶支座的滑移, 且总体来看, 匝道桥破坏沿切向更为明显。主桥破坏相对较轻, 主要包括桥墩顶部的支座滑移及主桥与匝道桥间的碰撞破坏。

关键词: 汶川地震; 回澜立交桥; 曲线桥; 震害调查

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

Damage investigation of Huilan Interchange
in Mianzhu after Wenchuan earthquake

SUN Zhiguo, WANG Dongsheng, GUO Xun, MENG Qingli, YU Dehai, LIXiaoLi

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: Huilan Interchange across Mianzhu Freight Station consists of main bridge and 4 circular ramp bridges with continuous box girders. The bridge was severely damaged during the Wenchuan earthquake on May 12th, 2008. According to the field observation and analysis, it is concluded that the damage to ramp bridge was especially severe. 1 or 2 short piers with large flexural stiffness suffered severe damage and the box girders ruptured as a result of the damage to the piers. The other piers of the ramp bridges suffered minor to moderate damage, which included concrete cover spalling, concrete cracking and sliding of the rubber bearing at top of the piers. Also, it is founded that the damage in tangential direction was obvious for ramp bridges. However, the main bridge suffered only slight damage, which contained damage to rubber bearing at top of the piers and the pounding damage between main bridge and ramp bridges.

Key words: Wenchuan earthquake; Huilan Interchange; curved bridge; Post-earthquake observation

引言

绵竹市回澜立交桥跨越绵竹货运火车站, 包括主桥及 4 个平面为圆形的曲线匝道桥 (本文中暂命名为

收稿日期: 2008-10-09 修订日期: 2008-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50878033, 50808163); 地震行业科技专项项目 (200808021); 中央级公益性研究所基本科研业务费专项 (2006B06); 中国地震局工程力学研究所开放试验室基金 (2007A06)

作者简介: 孙治国 (1980-), 男, 博士研究生, 主要从事桥梁及结构工程抗震研究。E-mail: szg_1999_1999@163.com

A B C D号匝道桥, 主桥长 316 m, 桥面总宽 38 m。回澜立交桥工程主体于 2004年 9月完工, 2005年春节正式通车, 工程总造价约 3000万元。5. 12汶川地震中, 回澜立交桥遭受严重破坏, 其中 4个曲线匝道桥破坏尤为严重, 下部桥墩遭受重创并引起上部连续箱梁横向折断。主桥破坏较轻, 主要为支座滑移及与匝道桥间碰撞破坏。

回澜立交桥是我国乃至世界范围内尚不多见的曲线形立交桥震害实例^[1-5]。汶川地震发生后, 作者对回澜立交桥震害进行了较为详细的考察, 图 1为回澜立交桥的整体效果图, 图 2为 4个匝道桥及桥墩布置示意图, 图中标明了严重破坏桥墩的编号和大致位置, 图 3为 A匝道桥和 D匝道桥的现场照片。

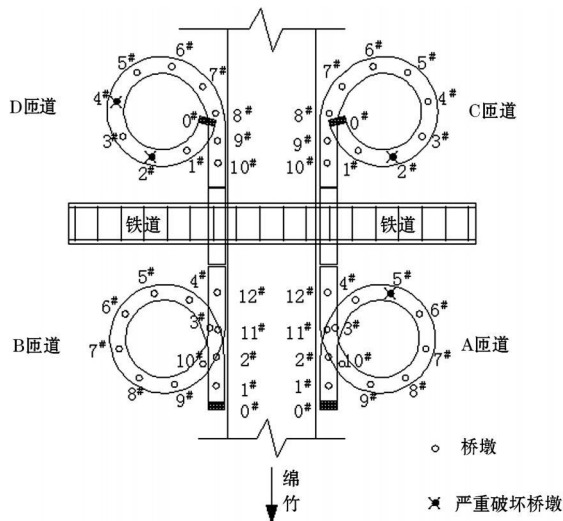


图 2 匝道桥及桥墩布置示意

Fig 2 Schematic of ramp bridges and bridge piers

图 1 回澜立交桥整体效果图 (网络图片)

Fig 1 The overall picture of Hui Lan Interchange



A匝道桥



D匝道桥

图 3 匝道桥整体情况图

Fig 3 The overall picture of ramp bridges

1 匝道桥破坏情况

1.1 现场调查总体说明

回澜立交桥桥址场地平整, 未发现沉陷、液化等现象, 地震烈度为 8 度。且从震害现场调查发现, 附近建筑物破坏并不严重, 周围砖混住宅楼外观基本完好。匝道桥上为连续箱梁, 平面为圆形, 匝道桥曲率半径约 20 m, 箱型梁顶宽约 4 m, 梁底宽约 2.2 m, 梁高 1.4 m。沿圆周均匀布置 8 个圆形截面桥墩, 各墩高度约为 2.0~7.0 m。从 1 号墩开始 (桥台为 0 号), 沿匝道桥走向墩高逐渐增大。墩顶与箱梁连接分固结及安放橡胶支座两种方式, 交替采用。实测桥墩直径为 800 mm, 沿桥墩圆周均匀布置 20 根 $\Phi 25$ 纵筋, 计算配筋率为 1.95%; 箍筋为 I 级螺纹钢筋, 直径为 12 mm, 箍筋间距不等, 在 100~210 mm 之间, 但塑性铰区未发现明

显箍筋加密区域, 计算体积配箍率在 0.27%~0.56%之间, 即部分区域箍筋配置不满足《公路工程抗震设计规范》(JTJ004-89)要求(加密区内体积配箍率不低于 0.3%且间距不大于 100 mm)^[6]。箍筋接头处搭接长度为 250 mm~370 mm, 焊接长度为 150 mm~250 mm, 混凝土保护层厚度为 50 mm~65 mm。此外, 沿桥墩圆周均匀分布有 4 根预应力波纹管, 其直径约 50 mm, 每根管中有 2 束钢绞线, 钢绞线束为 7 ϕ ¹⁵。调查发现混凝土材料中卵石作为粗骨料被大量应用。匝道桥桥台处为矩形板式橡胶滑动支座, 无抗拉螺栓, 支座平面尺寸为 250 mm \times 300 mm, 支座厚度为 60 mm, 桥墩处为 KJ GPZ 系列盆式橡胶支座, 竖向承载力为 1500 kN。

1.2 曲线匝道桥破坏的几个特征

表 1~表 4 列出了现场调查的桥墩、墩顶橡胶支座详细破坏情况, 同时还列出了墩顶的连接方式、桥墩剪跨比等影响因素, 以及桥墩及支座的主要破坏(受力)方向。

表 1 A 匝道桥破坏情况
Table 1 Damage to ramp bridge A

桥墩编号	墩顶固定方式	桥墩剪跨比	破坏情况描述	破坏(受力)方向
0号台	—	—	基本完好	—
1号墩	铰接	—	桥墩基本完好, 支座上垫板螺栓剪断, 支座损坏	—
2号墩	铰接	3.0	桥墩基本完好, 支座垫板螺栓剪断	—
3号墩	固结	1.5	桥墩基本完好, 底部填土隆起,	—
4号墩	铰接	3.4	桥墩基本完好	—
5号墩	固结	2.1	桥墩发生严重破坏, 箱梁底部开裂	切向
6号墩	铰接	4.8	桥墩基本完好, 支座移位	—
7号墩	固结	2.8	墩顶保护层脱落	与切向 45°角
8号墩	铰接	6.3	桥墩基本完好	—
9号墩	固结	3.5	墩顶保护层脱落	切向
10号墩	铰接	—	桥墩下部出现弯曲裂缝, 高度可达墩高一半	切向
11号墩	固结	4.0	桥墩基本完好	—

表 2 B 匝道桥破坏情况
Table 2 Damage to ramp bridge B

桥墩编号	墩顶固定方式	桥墩剪跨比	破坏情况描述	破坏(受力)方向
0号台	—	—	基本完好	—
1号墩	铰接	—	基本完好	—
2号墩	铰接	—	支座略有移位	法向
3号墩	固结	—	桥墩剪切裂缝密集, 顶部混凝土轻微脱落,	—
4号墩	铰接	—	底部填土隆起	—
5号墩	固结	—	桥墩剪切斜裂缝明显, 宽度可达 0.5 mm	切向
6号墩	铰接	—	顶部混凝土脱落	—
7号墩	固结	2.8	墩顶及墩底 200 mm 范围内保护层脱落	法向
8号墩	铰接	—	基本完好	—
9号墩	固结	—	墩顶混凝土轻微脱落	切向
10号墩	铰接	—	基本完好	—
11号墩	固结	—	基本完好	—

表 3 C 匝道桥破坏情况
Table 3 Damage to ramp bridge C

桥墩编号	墩顶固定方式	桥墩剪跨比	破坏情况描述	破坏(受力)方向
0号台	—	—	桥台破坏严重, 箱梁翘起, 支座分离	—
1号墩	铰接	2.5	桥墩基本完好, 支座滑移	切向
2号墩	固结	1.5	桥墩发生严重弯剪破坏, 箱梁底部开裂	切向
3号墩	铰接	3.9	桥墩基本完好, 支座滑移	法向
4号墩	固结	2.5	墩顶保护层脱落	法向
5号墩	铰接	5.0	桥墩基本完好, 支座滑移	法向
6号墩	固结	2.8	墩顶混凝土轻微脱落	切向
7号墩	铰接	6.3	基本完好	—
8号墩	固结	—	桥墩基本完好, 地面隆起	—
9号墩	铰接	—	桥墩基本完好, 支座滑移严重	与切向 30°角
10号墩	铰接	—	桥墩基本完好, 支座滑移严重	与切向 30°角

表 4 D 匝道桥破坏情况
Table 4 Damage to ramp bridge D

桥墩编号	墩顶固定方式	桥墩剪跨比	破坏情况描述	破坏(受力)方向
0号台	—	—	基本完好	—
1号墩	铰接	—	基本完好	—
2号墩	固结	1.4	桥墩严重破坏	切向
3号墩	铰接	3.5	桥墩基本完好, 支座滑移	切向
4号墩	固结	2.0	桥墩严重破坏	与切向 30°角
5号墩	铰接	4.7	墩底有弯曲裂缝, 开裂高度达墩高一半 墩顶支座滑移	与切向 30°角
6号墩	固结	2.7	墩底部 250 mm 范围内混凝土压碎脱落, 墩顶混凝土轻微脱落	切向
7号墩	铰接	6.0	墩底一侧混凝土压碎脱落, 高约 500 mm 另一 侧弯曲裂缝高度达墩高一半, 墩顶支座滑移	底部破坏沿切向, 支座法向滑移
8号墩	固结	—	墩顶混凝土轻微脱落	与切向 30°角
9号墩	铰接	—	桥墩基本完好, 墩顶支座滑移	法向
10号墩	铰接	—	桥墩基本完好, 墩顶支座滑移	法向

每个匝道桥的破坏集中于某 1~2 个桥墩, 是本次曲线桥震害的显著特征。共有 4 个桥墩遭受严重破坏, 即 A 匝道桥 5 号墩, C 匝道桥 2 号墩, D 匝道桥的 2 号、4 号墩, 具体位置如图 2 所示, 其余桥墩破坏相对轻得多。进一步调查可发现, 各匝道桥严重破坏的桥墩所在位置相近, 且与上部梁体均为固结, 基本都是抗弯刚度较大的低矮桥墩。B 匝道桥中虽未有严重破坏桥墩, 但处于相同位置的 3 号及 5 号墩也出现了明显的剪切裂缝, 最大宽度可达 0.5 mm, 墩顶混凝土保护层脱落。可以推断, 地震力集中于这些严重破坏的桥墩上, 抗弯刚度不规则, 低矮桥墩刚度偏大是造成其严重破坏的重要原因。遭受严重破坏的桥墩, 剪跨比处于 1.4~2.1 之间, 为短柱, 本身易于发生剪切破坏。

桥墩破坏方向沿切向较为明显, 是本次震害的又一个特征。由表 1~表 4 可以看出, 遭受严重破坏的 4 个桥墩基本均沿切向, 其余桥墩的破坏及墩顶支座的滑移也呈现出切向明显的特征。此外, 由于曲线桥梁自身体型不规则, 重力偏心及空间地震力等各种因素, 使得与箱梁固接桥墩处于压、弯、剪、扭的复杂应力状态, 也造成了桥墩破坏模式的复杂性^[7], 是本次震害的第 3 个特征。另外, 与箱梁铰接桥墩因支座滑移而减轻了承受的地震力, 其本身破坏并不严重。

1.3 严重破坏桥墩介绍

(1) A 匝道桥 5 号墩

桥墩上部发生了严重的弯剪破坏(图 4), 核心混凝土压溃, 纵筋及预应力筋波纹管屈曲, 箍筋拉断, 但未在焊接接头处拉开, 桥墩底部混凝土保护层轻微脱落, 现场调查桥墩受力(即剪切破坏面)主要沿曲线桥切向。同时, 由于桥墩破坏引起上部箱梁横向断裂, 如图 5 所示。



图 4 A 匝道桥 5 号墩破坏

Fig 4 Failure patterns for pier 5 of ramp bridge A



图 5 A 匝道桥 5 号墩上部箱梁横向断裂

Fig 5 Transverse rupture of box girder

(2) C匝道桥 2号墩破坏情况

桥墩上部发生严重弯剪破坏(图 6), 核心混凝土压溃, 纵筋及预应力筋波纹管屈曲, 箍筋拉断, 桥墩剪切破坏仍沿曲线桥切向。上部箱梁横向断裂(图 7)。



图 6 C匝道桥 2号墩破坏

Fig 6 Failure patterns for Pier₂ of ramp bridge C

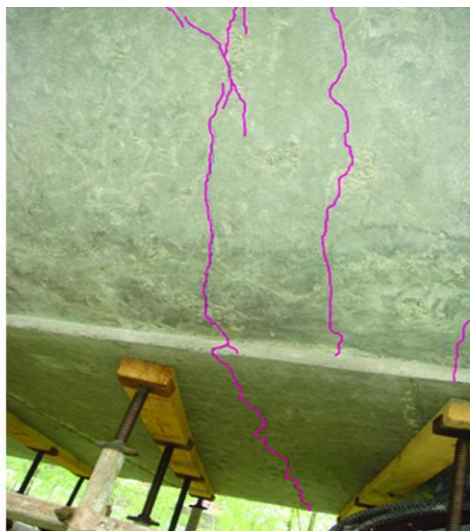


图 7 C匝道桥 2号墩上部梁的横向裂缝

Fig 7 Transverse rupture of box girder

(3) D匝道桥 2号墩的破坏情况

桥墩中上部混凝土保护层严重脱落, 核心混凝土产生明显沿桥切向的剪切斜裂缝, 呈弯剪破坏形态。但未发现箍筋拉断及纵筋的明显屈曲破坏, 且上部箱梁并未折断, 如图 8所示。



图 8 D匝道桥 2号墩破坏

Fig 8 Failure patterns for Pier₂ of ramp bridge D



图 9 D匝道桥 4号墩破坏

Fig 9 Failure patterns for Pier₄ of ramp bridge D

(4) D匝道桥 4号墩破坏情况

桥墩上部发生明显弯剪破坏, 纵筋屈曲, 箍筋拉断, 核心混凝土压溃, 桥墩破坏方向基本与桥切向呈 30° 夹角, 如图 9所示。同时上部箱梁发生横向断裂。

1.4 其余桥墩破坏情况

匝道桥其余桥墩破坏相对要轻得多, 主要破坏形态包括墩顶或墩底混凝土保护层脱落, 桥墩出现水平弯曲裂缝或剪切斜裂缝, 以及墩顶橡胶支座滑移等, 如图 10所示。

1.5 桥台破坏情况

C匝道桥 0号桥台发生了较为严重的破坏, 主要为桥台处箱梁翘起, 下部板式橡胶支座分离, 匝道桥与

桥台断开等, 如图 11 所示, 其余桥台则基本完好。



混凝土保护层脱落(C匝道4号墩)



水平弯曲开裂(D匝道德号墩)



剪切斜裂缝(B匝道3号墩)



橡胶支座滑移(C匝道10号墩)

图 10 其余桥墩的破坏情况

Fig 10 Damage to other Piers



(a) 梁体上翘



(b) 橡胶支座分离



(c) 桥台断开

图 11 C匝道 0号台破坏情况

Fig 11 Damage to abutment 0 of ramp bridge C

2 主桥及桥梁上部结构震害

自绵竹一侧开始, 主桥依次为 6 跨连续 + 5 跨简支 + 4 跨连续结构, 其中连续结构为整体箱梁, 简支结构为 14 片并排的预应力箱型梁。主桥均采用独柱墩, 每个墩顶安装 2 个橡胶支座, 连续结构中, 支座直接支承上部整体箱梁, 简支结构中, 支座通过盖梁支承上部梁体。

现场调查发现主桥下部除部分橡胶支座有滑移破坏外, 其余主体结构基本完好, 主桥桥墩混凝土未发现明显裂缝, 如图 12、图 13 所示。

桥梁上部结构破坏主要由碰撞引起, 其中包括匝道桥与主桥之间的横向碰撞破坏、由于匝道桥的横向移

位引起的挡块破坏、匝道桥自身纵向碰撞引起的破坏等,如图 14所示。



图 12 主桥下部结构基本完好

Fig 12 Infrastructures of main bridge remain intact



图 13 主桥支座滑移

Fig 13 Sliding of bearing of main bridge



主桥与匝道桥横向碰撞-A匝道



梁与挡块的碰撞破坏-A匝道



匝道桥纵向碰撞-B匝道

图 14 桥梁上部结构典型破坏

Fig 14 Damage to superstructures of the bridge

3 结语

在城市道路和高速公路桥梁建设中,由于功能原因及美观需要,曲线立交桥将是不可避免的选择,1971年美国 San Fernando地震、1994年 Northridge地震及 1995年日本 Kobe地震中发生的曲线桥梁破坏,引起了人们对曲线桥抗震问题的关注并直接推动了曲线桥抗震设计理论的发展。回澜立交桥是我国大陆首例遭受严重震害的小半径曲线立交桥,由于结构形式及地震作用的复杂性,强烈的地震力集中于两端刚结的个别矮墩上,加之桥墩自身抗剪能力不足而造成严重剪切破坏,使得回澜立交桥虽处于地震烈度相对较低地区却遭受重创。通过现场调查,总结回澜立交桥震害规律,并对其震害机理进行深入分析,进而发展曲线梁桥的抗震设计方法,为我国桥梁抗震水平的提高作出贡献。

参考文献:

- [1] 高晓安.曲线桥梁抗震设计方法研究[D].北京:中国建筑科学研究院,2003.
- [2] 易建国.预应力混凝土环形曲线连续箱梁桥的设计[J].国外桥梁,1992(4):16-21.
- [3] 全伟,李宏男.曲线桥多维地震时程分析主方向研究[J].振动与冲击,2008,27(8):20-24.
- [4] Williams D, Giddens W. Seismic response of long curved bridge structures: experimental model studies[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1979, 7(2): 107-128.
- [5] Kawashima K, Penzien J. Theoretical and experimental dynamic behavior of a curved model bridge structure[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1979, 7(2): 129-145.
- [6] JTJ004-89 公路工程抗震设计规范[S].北京:人民交通出版社,1990.
- [7] 周绪红,戴鹏,狄谨.曲线PC箱梁桥隔震体系的非线性分析[J].中国公路学报,2008,21(1):65-71.