

汶川大地震回澜立交桥震害分析

王东升, 孙治国, 李晓莉, 霍 焱

(大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026)

摘 要:利用数值模拟结合现场调查分析了汶川大地震回澜立交桥破坏机理。地震时设有支座的最矮的1号桥墩支座发生滑移,以致刚度较大(次矮)的2号刚构桥墩承受很大的地震惯性力,发生弯曲屈服,此后随延性发展因抗剪能力不足最终发生剪切破坏,呈现典型的弯剪破坏特征。

关键词:汶川大地震;回澜立交桥;震害;数值分析

中图分类号:U442.5

文献标识码:A

文章编号:1674-4764(2010)S2-0021-03

汶川大地震中以回澜立交桥、百花大桥为代表的小半径曲线梁桥(回澜立交桥曲率半径20 m,百花大桥垮塌部分曲率半径66 m)的倒塌和毁损引起了广泛关注^[1-3],它们是目前中国仅有的曲线梁桥严重震害实例。总体上看曲线梁桥属不规则桥梁,目前中国外桥梁抗震规范仅给出其抗震设计应遵循的很一般原则,并建议对大半径(R 大于20倍桥宽)曲线梁桥简化为直线桥进行抗震分析。而小半径曲线梁桥则缺少相关规定,抗震研究工作也仅局限于“个例”的分析上,缺少系统化研究,这与其在强震区的大量采用很不适合。为此,该文借助数值模拟和现场调查,研究了回澜立交桥震害机理,以为小半径曲线梁桥抗震设计提供参考。

1 汶川大地震回澜立交桥震害

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(文中暂命名为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。

匝道桥上部为连续箱梁,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,各墩高度约在2.0~7.0 m之间。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2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II级螺纹钢,直径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》(JTJ 004-89)要求(加密区内体积配箍率不低于0.3%且间距不大于100 mm)。箍筋接头处搭接长度为250~370 mm,焊接长度为150~250 mm,混凝土保护层厚度为50~65 mm。此外,沿桥墩圆周均匀分布有4根预应力波纹管,波纹管直径约50 mm,每根管中有2束钢绞线,钢绞线束为7 ϕ 15.2。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 \times 300 mm,支座厚度60 mm;桥

墩处为KJ-GPZ系列盆式橡胶支座,竖向承载力1500 kN。

回澜立交桥主桥震后基本完好,主要为支座滑移及与匝道桥间碰撞破坏。各匝道桥震害情况相近,主要为临近桥台处的墩梁固结的(矮)桥墩在墩顶处弯剪破坏,主箱梁底部拉裂。具体为桥墩塑性铰区核心混凝土被压碎,整体呈“X”型斜裂缝并延伸至区外,纵筋屈曲呈灯笼状,部分箍筋拉断。回澜立交桥及破坏情况如图1所示。图2-4给出了部分震害图片。

绵竹地震烈度为8度,震后经现场调查回澜立交桥所在位置地面比较平坦,没有发现土壤液化、土地沉降等现象。孙治国等^[2]对回澜立交桥震害进行了详细调查,不再赘述。

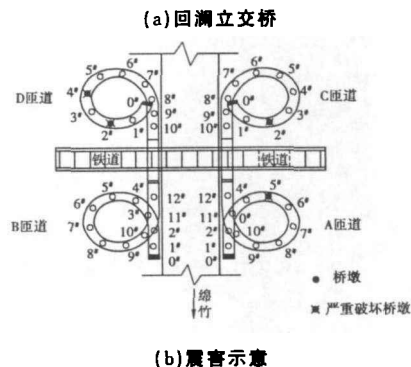


图1 回澜立交桥及震害

2 回澜立交桥震害数值模拟

回澜立交桥是目前中国仅有的小半径曲线梁桥严重震害实例。采用非线性时程分析方法,对回澜立交桥地震破坏过程进行了数值模拟及震害机理分析。

收稿日期:2010-10-31

基金项目:国家自然科学基金项目(50878033);中央高校基本科研业务费专项资金(2009QN055)资助

作者简介:王东升(1974-),男,教授,博士生导师,主要从事桥梁及结构抗震研究,(E-mail)dswang@dlmu.edu.cn

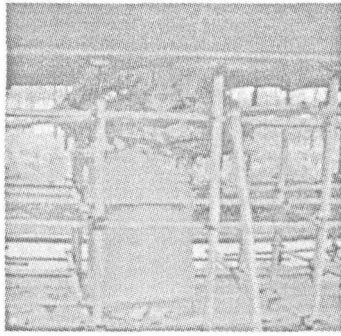


图 2 A 匝道桥 5 号墩破坏

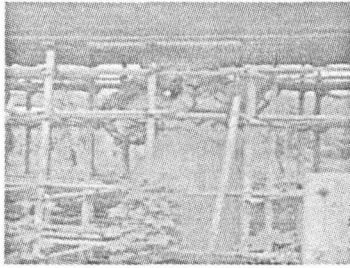
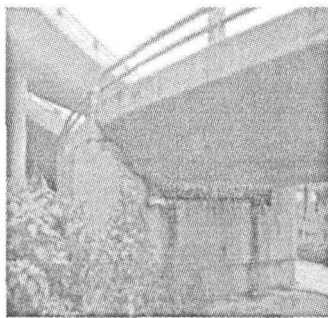
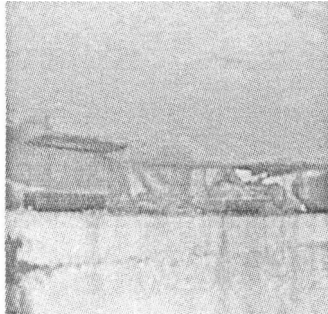


图 3 C 匝道桥 2 号墩破坏



(a) 梁体上翻



(b) 墩底上浮分离

图 4 C 匝道 0 号桥台震害情况

2.1 回澜立交桥分析模型

以 C 匝道桥为例进行结构有限元离散。采用“以直代曲”方式,通过多边形拟合连续曲线箱梁,利用空间直梁单元对箱梁进行模拟,桥台处边界条件为约束主梁横向、竖向自由度及绕桥梁纵向的扭转自由度,其余 3 个自由度全部释放。桥墩模拟分别考虑线弹性和弹塑性 2 种情况。其中弹塑性模型在其墩顶和墩底设置塑性铰,铰的恢复力特性由弯矩-轴力相互作用屈服曲(球)面定义。桥墩与上部结构的连接包括固接和铰接。铰接实质是支座的模拟,考虑 2 种情况,一是支座处理为理想铰接,二是考虑支座破坏后滑移,采用弹塑性连接单元模拟。

图 5 为建立的回澜立交桥 C 匝道桥有限元模型,规定矮

墩侧桥台为 0 号,依次为 1 号桥墩、2 号桥墩等。地震中严重破坏的为 2 号墩。

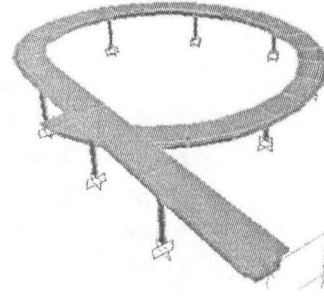


图 5 回澜立交桥有限元模型

表 1 回澜立交桥有限元模型

模型	主梁	桥墩	支座
模型 1	弹性	弹性	铰支(铰支)
模型 2	弹性	弹性	弹塑性(滑动)
模型 3	弹性	弹塑性	弹塑性(滑动)

表 1 列出了详细建模情况。共建立 3 个模型:模型 1 用于研究线弹性条件(无任何破坏)下桥墩及结构受力情况;模型 2 用于比较及研究支座破坏(发生滑移)情况下桥墩及结构受力的改变;模型 3 用于研究发现回澜立交桥抗震薄弱环节,特别是桥墩先后屈服的破坏顺序及机制。

2.2 回澜立交桥自振特性分析

表 2 模型 2 前 5 阶自振特性

振型	振型描述	周期/s
1	高墩侧沿横桥向摆动,矮墩侧横向摆动	0.43
2	高墩侧纵桥向摆动,矮墩侧横桥向摆动	0.40
3	高墩、矮墩侧均横桥向摆动,正对称振动	0.30
4	高墩、矮墩侧均横桥向摆动	0.23
5	高墩侧横向摆动,矮墩侧纵向摆动,伴有竖向	0.17

分别以模型 1 和模型 2 分析回澜立交桥的自振特性,发现考虑支座弹性后,基本周期略有延长。总体上看其自振特性表现为高墩侧和矮墩侧相互制约的整体性振动,且一般情况下高墩侧振幅明显大于矮墩侧。

2.3 回澜立交桥震害数值模拟

为研究回澜立交桥地震破坏机理,首先考虑桥墩塑性,采用模型 3 对全桥非线性模型进行倒塌分析,分析其全桥桥墩塑性铰出现先后及分布情况,目的在于找到其抗震最不利桥墩及抗震薄弱环节;其次比较分析了模型 1 和模型 2 桥墩受力变化情况,目的在于揭示支座发生滑移在整体震害发生中的作用机制;最后分析了破坏的 2 号桥墩(固接)的抗震能力与地震需求,指出其为典型的弯剪破坏模式。

选取绵竹清平和什邡八角 2 组 3 向地震波进行分析。考虑绵竹地震烈度 8 度,输入时依最大峰值情况将加速度峰值调整为 0.2 g。输入方向按回澜立交桥直桥段走向考虑,同时输入不同方向的各个地震动记录分量。

对模型 3 分别输入 3 向绵竹清平地震波和什邡八角地

震波,研究其塑性铰出现顺序。因较多桥墩出现塑性铰后,计算易出现失稳现象,经大量试算后选定了输入地震动峰值和持续时间:对绵竹清平地震波,加速度峰值 0.3 g,持续时间 30 s;对什邡八角地震波,加速度峰值 0.1 g,持续时间 15 s。从研究仪希望获得结构抗震薄弱环节而非获得严格的定量数据看,这样处理是合适的。

计算发现:无论清平输入还是八角输入,回澜立交桥都表现为 2 号桥墩底部最先出现塑性铰,然后是顶部,再后为其他刚构桥墩(图 6)。因此可以断定 2 号桥墩地震中易于破坏,为其抗震薄弱环节及最不利桥墩。至于塑性铰最先出现在底部与实际震害出现在顶部有所不同,是因为分析中未考虑土及基础柔性影响,其会使反弯点位于桥墩高度 1/2~1/3 处,桥墩顶部将承受更大弯矩。

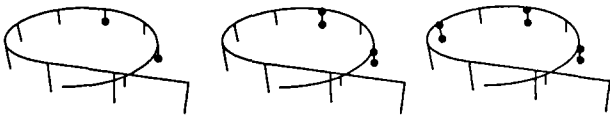
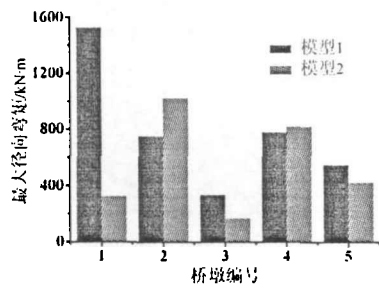
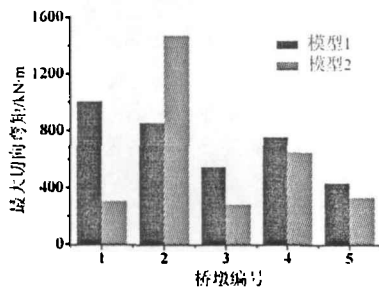


图 6 清平地震波下模型 3 塑性铰形成过程

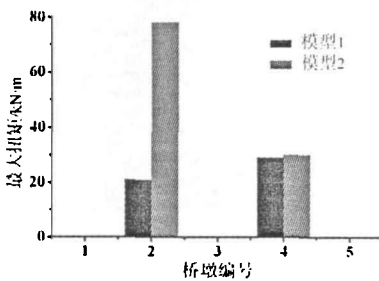
模型 1 和模型 2 差别在于是否考虑了支座滑移影响,将 2 个模型桥墩受力情况进行比较(图 7)。可以发现:不考虑支座滑移(模型 1)时,全桥最矮墩(1 号墩)承受弯矩最大,可



(a) 桥墩径向弯矩



(b) 桥墩切向弯矩



(c) 桥墩扭矩

图 7 清平地震波下 1-5 号墩内力对比
达其他桥墩 2 倍以上。考虑支座滑移(模型 2)后,设有支座

的 1 号墩承受弯矩急剧降低,而全桥次矮的 2 号刚构墩承受弯矩、扭矩显著增长,最大弯矩接近于模型 1 中 1 号墩。

从以上分析可以推断:地震时 1 号墩墩顶支座发生滑移后,1 号桥墩(最矮)受力显著减小,以致刚度较大(次矮)的 2 号墩(固接)承受很大的地震惯性力,最终发生屈服、破坏。

最后分析了 2 号(刚构)桥墩抗震能力。2 号桥墩在重力荷载作用下屈服弯矩约 1 284 kN·m,假定反弯点位于桥墩跨中(高度距地面 1.35 m),计算得到对应屈服剪力为 948 kN。利用中国、美国、日本和欧洲桥梁抗震规范计算,塑性铰区最终抗剪强度值在 400~600 kN 之间,要小于弯曲屈服对应剪力。

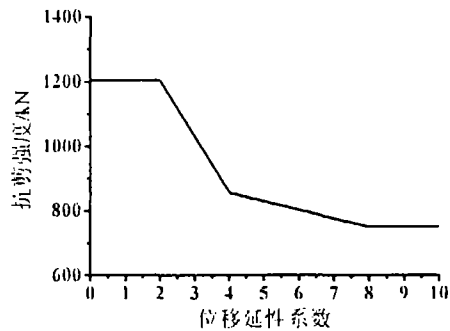


图 8 2 号桥墩抗剪强度分析

利用 Priestley 公式计算了桥墩抗剪强度与位移延性系数关系(图 8),可以这样认为:当位移延性系数小于 2 时,桥墩混凝土全截面参与抗剪,其值 1200 kN 要大于桥墩弯曲屈服时对应的剪力 948 kN,桥墩会发生弯曲屈服;此后随着位移延性增加,混凝土因裂缝开展等因素逐步退出抗剪,桥墩抗剪强度将下降至 800 kN 以下(位移延性系数为 4),此时桥墩必将发生剪切破坏。现场调查 2 号桥墩亦呈明显的弯剪破坏特征。

3 结论

该文介绍了汶川大地震回澜立交桥梁震害情况,利用数值模拟结合现场调查分析了回澜立交桥地震破坏机理。认为:1)地震时设有支座的最矮的 1 号桥墩支座发生滑移,以致刚度较大(次矮)的 2 号刚构桥墩承受很大的地震惯性力;2)2 号桥墩发生弯曲屈服,此后随延性发展因抗剪能力不足最终发生剪切破坏,呈现典型的弯剪破坏特征。这与现场调查一致。

参考文献:

[1] LI JIAN ZHONG, PENG TIAN BO, XU YAN. Damage investigation of girder bridges under the Wenchuan earthquake and corresponding seismic design recommendations [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7(4): 337-344.
 [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.
 [3] 王东升,郭迅,孙治国,等.汶川大地震公路桥梁震害初步调查[J].地震工程与工程振动,2009,29(3):84-94.
 [4] 杜修力,韩强,李志献,等.5.12 汶川地震中山区公路桥梁震害及启示[J].北京工业大学学报,2008,34(12):1270-1279.
 [5] 庄卫林,刘振宇,蒋劲松.汶川大地震公路桥梁震害分析及对策.岩石力学与工程学报,2009,28(7):1377-1387.

(编辑 胡英奎)