

[文章编号] 1002-8412(2007)03-0001-05

# 考虑地震行波效应大型高架桥梁破坏模拟

陆新征,叶列平,江见鲸,张炎圣(清华大学土木工程系,北京 100084)

[摘要] 大型高架桥梁是城市交通的重要生命线工程,准确预测高架桥(高架桥体系)在地震下的破坏模式,对减灾、救灾工程有着重要意义。本文基于高性能并行计算和非线性分析,对大型高架桥梁的破坏进行了模拟,并考虑了地震行波效应、桥墩塑性铰、上部结构落梁等多种破坏模式。计算结果表明,本文建议模型可以真实模拟大型高架桥梁的地震破坏。并对主要参数的影响加以讨论,为深入研究高架桥梁体系在地震灾害下的破坏模式和安全状况提供依据。

[关键词] 高架桥;地震;行波;破坏;模拟

[中图分类号] TU448.28 [文献标识码] A

## Failure Simulation for Large Viaducts with Traveling Wave Effect

Lu Xinzheng, Ye Lieping, Jiang Jianjing, Zhang Yansheng

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Viaducts are important life lines in the city transport system. Precision prediction for the failure modes of large viaducts (viaduct system) in earthquake is important for the disaster prevention and reduction. In this paper, based on high performance computation and nonlinear analysis, the failure of large viaducts in earthquake is simulated with the consideration of travel wave effect in the ground, plastic hinges in the pier and the girder falling in the superstructures. The simulation results show that the proposed model can correctly simulate the failure of large viaducts in earthquake. And parametrical study is carried out for the further research on the safety assessment of the large viaducts.

**Keywords:** viaduct; earthquake; traveling wave; failure; simulation

### 1 概述

随着城市规模的扩大和人口的增加,交通问题已经变得日益突出。目前我国解决城市交通问题的一个重要手段是发展立体交通,即通过大量修建高架桥梁来缓解地面交通压力。这些桥梁既是日常交通的重要枢纽,也是发生灾害时的重要生命线工程。由于我国是一个多地震国家,很多中心城市都位于地震高烈度区,准确预测地震作用下高架桥梁的安全性和抗灾能力,是一个非常关键的问题<sup>[1,2]</sup>。因此有必要采用精细化的非线性数值方法,准确模拟桥梁的各种破坏模式。同时,由于高架桥梁规模越来越大,传统的局部桥段分析已经不足以满足现代防灾工程的要求。因而非常有必要进行基于高性能计

算的大规模高架桥梁非线性分析,考虑行波效应导致不同桥段不同位置的地震输入差异,以真实模拟地震破坏。

本文基于大型非线性计算软件和高性能并行计算机,对某大型高架桥梁体系进行了考虑行波效应的地震破坏模拟,并讨论了桥梁的不同破坏形态,为深入研究高架桥梁体系在地震灾害下的破坏模式和安全状况提供了手段和依据。

### 2 桥梁模型及破坏模式

根据国内外大量地震灾害资料<sup>[3]</sup>,高架桥梁的破坏模式主要包括:

(1) 桥墩的破坏。包括桥墩钢筋的屈服、混凝土的压碎等,如图 1 所示;

(2) 桥墩和上部结构连接破坏。很多高架桥梁上部结构和桥墩之间采用筒支支座,在强烈地面运动下,很可能出现落梁破坏,如图 2 所示;

(3) 上部结构之间的碰撞破坏。上部结构间由于振动不同步,产生相对运动,进而相互碰撞,造成

[收稿日期] 2006-10-29

[基金项目] 十一五国家科技支撑计划子课题“台风、地震、滑坡等重大自然灾害耦合及其引发建筑和工程设施破坏的综合预测预警与智能决策技术”。

桥面破坏或者加剧桥墩和上部结构连接破坏,导致落梁。

因此,为了准确模拟地震作用下高架桥梁的破坏,在建立数值分析模型时,就必须对以上破坏模式加以考虑。



图1 桥墩塑性铰破坏



图2 落梁等上部结构破坏

### 2.1 桥墩破坏的数值模型

现阶段,我国高架桥梁多为钢筋混凝土桥墩,在动力荷载作用下,桥墩的钢筋可能会屈服,混凝土会开裂甚至会被压碎,且桥墩受到的轴力将会发生变化,轴力和弯矩间复杂的耦合关系,将会明显影响桥墩的承载力和延性。因此,大量已有研究表明,基于材料本构模型的钢筋混凝土杆件纤维模型,是分析此类结构非线性问题的较好手段<sup>[4]</sup>。因此,本文基于清华大学土木工程系在通用有限元软件 MSC. MARC 基础上开发的纤维模型有限元程序 THUFIBER<sup>[5,6]</sup>,来建立桥墩的有限元模型。THUFIBER 程序将构件截面划分成若干混凝土纤维或钢筋纤维(图3),根据截面曲率和应变计算得到每根纤维的应变,再由应变根据钢筋和混凝土的滞回本构模型(图4)得到纤维应力,最后积分得到截面弯矩和轴力。由于采用了比较准确的材料本构模

型,因而可以较好地模拟钢筋混凝土构件在复杂轴力下的强度、延性和滞回行为。

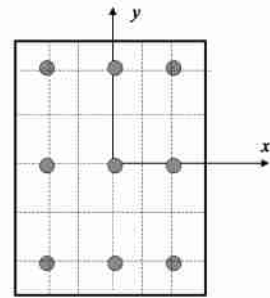
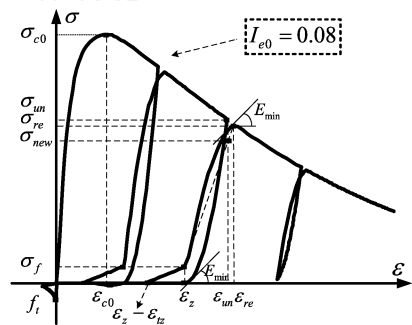
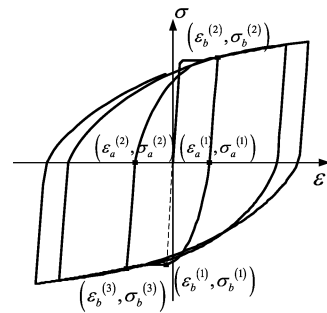


图3 THUFIBER 程序中截面纤维划分



(a) 混凝土本构模型



(b) 钢筋本构模型

图4 THUFIBER 程序中混凝土及钢筋纤维的本构模型

### 2.2 上部结构及落梁破坏的数值模型

在实际桥梁中,上部结构内部(主梁、桥板等)在地震下一般可以避免破坏,而上部结构和桥墩之间的交界部位,以及上部结构之间却可能发生接触、碰撞、脱落等破坏。因此与桥墩数值模型中重点考虑材料非线性和几何非线性有所不同,上部结构的破坏模拟主要是接触和分离导致的边界非线性。由于计算量等限制,已有的研究大多对此类接触破坏进行了简化处理<sup>[7,8]</sup>,很难真实模拟落梁破坏以及上部结构之间的相互接触。因此,本文基于高性能并行计算机,对上部结构和桥墩之间的相互作用,完全采

用基于面 - 面接触的精确接触模型加以模拟<sup>[9]</sup>。接触模型允许大范围的接触、分离、滑动甚至脱落,从而可以真实模拟落梁破坏。

箱梁上部结构采用壳单元建模;墩顶横梁采用实体单元建模;横梁和上部结构,以及上部结构之间,均考虑了面 - 面接触行为。

### 2.3 地震行波效应

由于分析的高架桥梁长度近 1500m,节段数超过 130 个,因此必须考虑地震的行波效应。根据每个桥墩底部的坐标相对于设定震中的距离,就可以得到地震波到达的时刻、以及各个方向的分量。严格的地震行波效应分析还需要考虑震源类型、覆盖层土体特性等因素建立符合该场地特点的多点地震输入<sup>[1-3]</sup>。本文为了简化起见,同时也为了便于对比分析,选用了 Kobe 地震波,并仅考虑了不同输入点时间上的差异。

### 3 全桥模型

最终建立的全桥模型如图 5 所示。其中,南北方向桥梁为双墩四车道结构,东西向为独墩两车道结构。计算软件采用通用有限元软件 MSC. MARC 2005r2 以及清华大学在 MSC. MARC 软件基础上开发的钢筋混凝土纤维模型程序 THUFIBER<sup>[5,6,9]</sup>。在清华大学土木工程系防灾减灾数字平台的曙光 64

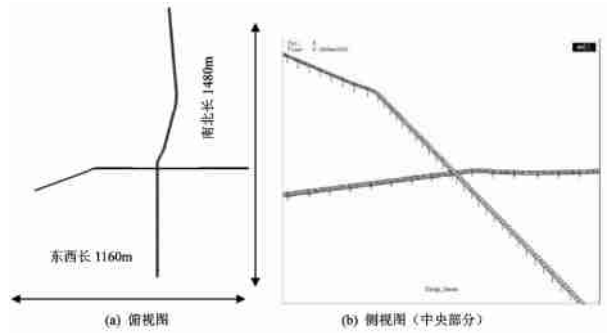


图 5 全桥模型

位高性能并行计算工作站上进行计算。需要特别指出的是,与一般的显式有限元碰撞分析不同,本次分析采用的是隐式有限元分析,每步计算都精确校验节点不平衡力直至满足收敛标准,有效保证了分析结果的可靠性。

分析时首先施加自重荷载,程序自动根据桥墩和上部结构之间的接触关系计算出接触面的法向应力和摩擦力,然后输入地震荷载。地震荷载在结构中产生内力,如果内力高于桥墩的开裂或屈服承载力,则桥墩会出现开裂或者屈服破坏;如果内力高于接触面的接触力或摩擦力,则会发生接触面之间的分离或相对滑移。

为了比较不同参数的影响,分别讨论了以下工况:

表 1 分析工况列表

| 编号 | 名称      | 结构特点                  | 荷载输入特点  |
|----|---------|-----------------------|---|
| 1  | 基本工况    | 考虑所有破坏模式(桥墩破坏、上部结构接触) | 震中距离桥梁交叉点以东 30 公里,以南 20 公里。Kobe 波,峰值加速度 0.6g,场地波速 200m/s。 |
| 2  | 弹性工况    | 弹性分析。不考虑结构非线性         | 同上  |
| 3  | 弹性桥墩    | 不考虑桥墩非线性,只考虑上部结构非线性   | 同上  |
| 4  | 无接触工况   | 不考虑上部结构接触,只考虑桥墩非线性    | 同上  |
| 5  | 不考虑行波效应 | 考虑所有破坏模式(桥墩破坏、上部结构接触) | 不考虑行波效应,荷载同步输入 Kobe 波,峰值加速度 0.6g。                         |
| 6  | 改变震中位置  | 考虑所有破坏模式(桥墩破坏、上部结构接触) | 震中距离桥梁交叉点以西 30 公里,以南 20 公里。Kobe 波,峰值加速度 0.6g,场地波速 200m/s。 |

### 4 计算结果

各个工况计算得到的桥梁破坏主要为以下两种类型:

- (1) 东西向独墩高架桥主要为落梁破坏;
- (2) 南北向双墩高架桥主要为桥墩脚部塑性较破坏。

东西向发生落梁的主要原因是因为独柱桥墩的

抗扭性能较差,在地震作用下发生了扭转,使得桥面系一角从主梁上脱落,进而发生倾倒落梁破坏(图 6)。但是,由于该方向高架桥的刚度较小,自振周期较长,在地震作用下吸收的能量较小,且桥墩较高,因此桥墩虽然开裂,但没有进入塑性。南北向高架桥的双墩结构刚度较大,且稳定性较好,因此没有出现落梁破坏。但是墩脚受到的地震力较大,大量出

现塑性铰。下面将针对这两种不同破坏模式,比较不同工况计算结果的差异。

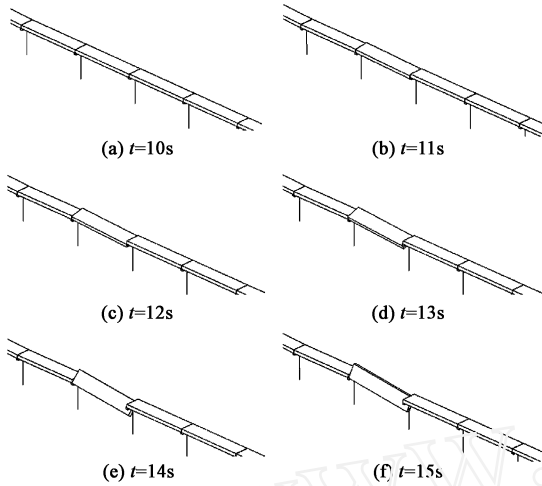


图6 落梁破坏过程

### 4.1 落梁破坏对比

因为工况 2、4 未考虑上部结构的非线性,因此可能发生落梁破坏的有 1、3、5、6 四个工况。这四个工况计算得到的落梁节段分布如图 7 中黑色区域所示,不同地震输入对落梁位置影响很大。可见要准确预测大型高架桥梁的破坏模式,进而分析城市交

通系统在地震灾害下的鲁棒性,必须要考虑震中位置以及行波效应的影响。

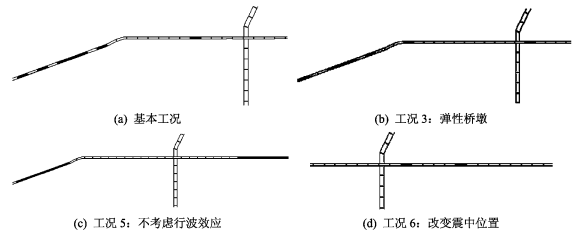
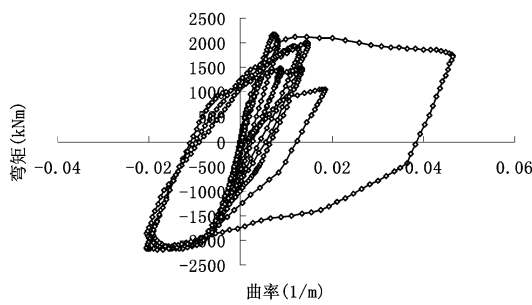


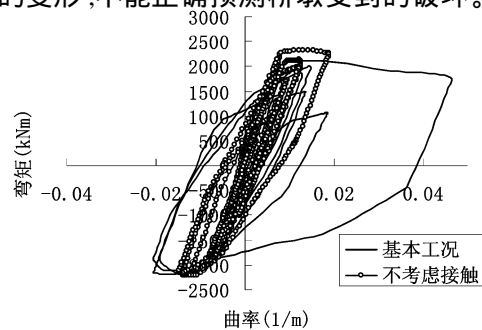
图7 计算得到不同工况的落梁桥段

### 4.2 桥墩破坏对比

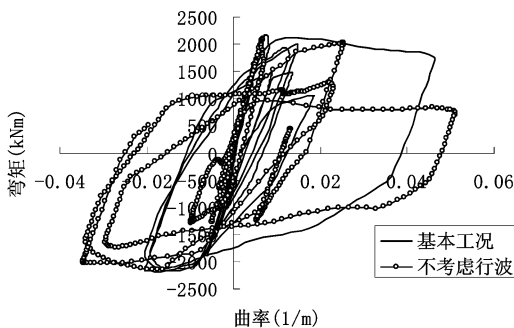
在地震作用下,南北向高架桥的桥墩脚部均进入塑性阶段。由于数据量较大,为节省篇幅,以位于分析模型中心位置的双向交叉点南北向高架桥桥墩为例,在基本工况下计算得到的底部弯矩-曲率关系如图 8(a) 所示。此时桥墩的钢筋拉应变已经超过 1%,说明此时桥墩已经基本进入破坏阶段。除了基本工况外,工况 4、5、6 桥墩也出现塑性破坏,将同一桥墩不同工况的计算结果对比如图 8(b~d) 所示。由图 8(b) 可见,不考虑上部结构和桥墩之间接触,按照通常结构力学方法分析时,会过高估计上部结构和桥墩之间的协同工作能力,进而会低估桥墩的变形,不能正确预测桥墩受到的破坏。而不同地



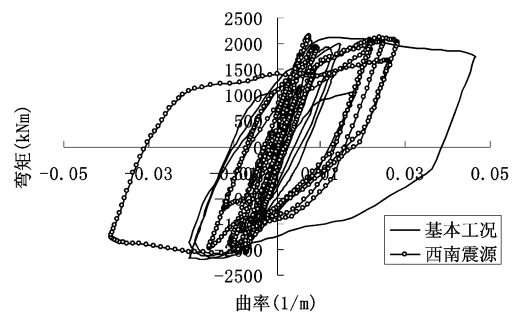
(a) 基本工况



(b) 工况 4: 不考虑上部结构接触



(c) 工况 5: 不考虑行波效应



(d) 工况 6: 改变震中位置

图8 桥墩底部弯矩-曲率关系

震输入也对桥墩的最大变形情况和损伤累积情况有着明显的影响。可见如果要准确预测桥梁的破坏模式,行波效应、上部结构和桥墩之间的接触效应都应该加以正确考虑。

### 4.3 结构变形情况对比

仍然以位于分析模型中心位置的双向交叉点南北向高架桥为例,将不同工况计算得到的上部结构之间的相对变形、上部结构和桥墩之间的相对变形、以及桥墩底部和顶部变形差的最大值绘于图 9 中。可以得到以下结论:

(1) 无论是否考虑行波效应,当考虑上部结构和桥墩之间的接触时,上部结构之间都有较大的相对变形,并可能出现相互碰撞(相对变形量 > 预留伸缩缝长度)。

(2) 如果不考虑行波效应,认为所有桥墩底部同时受到相同幅度的地震力作用,则会明显高估桥墩的相对变形(比考虑行波效应要高近一倍)。同样,上部结构和桥墩之间的相对变形也会明显增加。需要说明的是,本算例分析采用的是 Kobe 波,其主脉冲作用较强,因此考虑行波效应相当于减弱了主脉冲的作用,故会得到上述结论。但是对于其他类型的地震波,则未必会有相同的结论。应根据具体情况具体分析。

(3) 不考虑上部结构和桥墩之间的接触效应,则会过高估计桥墩和上部结构之间的共同工作能力,进而会低估桥墩的最大变形。图 8(b) 和图 9 均可观察到此类现象。特别值得关注的是,当桥墩底部截面进入破坏软化阶段时(图 8(a,b)),由于损伤集中效应,该截面的变形集中程度要远高于整体变形差异(图 9 中基本工况桥墩总变形只比工况 4 大 22%,但是图 8(b)中基本工况桥墩最大塑性转角比工况 4 大超过 1 倍)。由此亦可看出,当进行破坏模拟时,由于模型进入强非线性阶段,很多内力和变形的发展都不再是成比例变化,因此,必须在建模时恰当考虑结构的各种破坏可能,才能真正准确预测结构的破坏形式。

(4) 工况 3 不考虑桥墩的非线性时,桥墩的刚度相对基本工况偏大,使得桥墩和上部结构之间的相对变形比基本工况有明显增加。当桥梁设计或者施工预留的桥台支撑面积不足时,这种差异会对落

梁几率产生影响。因此桥墩的非线性同样会明显影响上部结构落梁分析的正确性。

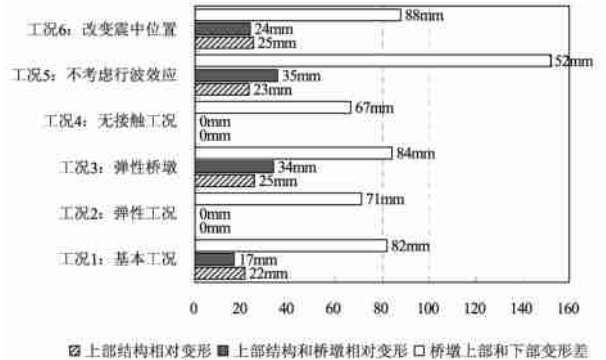


图 9 不同工况计算最大变形结果对比

## 5 结论

本文基于高性能计算,对大型高架桥在地震作用下的破坏模式进行了模拟分析。分析结果真实再现了桥梁在地震中可能经历的桥墩塑性铰、上部结构落梁等破坏模式。并得出结论:要真实模拟高架桥梁结构在地震作用下的安全性,在建模时应充分考虑桥梁可能发生的破坏模式并设定正确的数值模型加以模拟。

### 参考文献:

- [1] 周锡元, 吴育才. 工程抗震的新发展[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002
- [2] 江见鲸, 徐志胜, 等. 防灾减灾工程学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005
- [3] 范立础, 李建中, 王君杰. 高架桥梁抗震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001
- [4] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [5] 叶列平, Qazi AU, 马千里, 陆新征. 高强度钢筋对框架结构抗震破坏机制和性能控制的研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(1): 18~24
- [6] 陆新征, 缪志伟, 等. 静力和动力荷载作用下混凝土高层结构的倒塌模拟[J]. 山西地震, 2006, 126(2): 7~11
- [7] 林万杰. 大跨长联预应力混凝土连续梁桥地震反应分析[J]. 西南交通大学硕士学位论文, 2003
- [8] 王东升, 杨海红, 等. 考虑邻梁碰撞的多跨长筒支梁桥落梁灾害分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(3): 54~59
- [9] 江见鲸, 何放龙, 何益斌, 陆新征. 有限元法及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006

[作者简介] 陆新征(1978~),男,安徽芜湖人,博士,研究方向为结构非线性分析及仿真, E-mail: luxinzheng@263.net