

# 桥梁非线性地震反应分析若干问题研究现状

王东升<sup>1</sup>, 冯启民<sup>2</sup>, 凌贤长<sup>3</sup>, 翟桐<sup>1</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 青岛海洋大学, 山东 青岛 266071;

3. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 评述了钢筋混凝土桥墩非线性地震反应分析模型与损伤评估、桩-土-桥梁结构动力相互作用试验与理论研究和伸缩缝处的碰撞效应等问题的研究现状, 指出了进一步的发展趋势。

**关键词:** 钢筋混凝土桥墩; 桩-土-结构相互作用; 碰撞; 地震反应分析

**中图分类号:** P315.9 **文献标识码:** A

## State-of-the-art of nonlinear seismic response analysis of RC bridge

WANG Dong-sheng<sup>1</sup>, FENG Qi-min<sup>2</sup>, LIN Xian-zhang<sup>3</sup>, ZHAI Tong<sup>1</sup>

(1. Institute of Engineering Mechanics, Harbin 150080, China; 2. Qingdao University of Ocean, Qingdao 266071, China;

3. Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** Some subjects on nonlinear seismic response analysis of RC bridge are reviewed, which include analysis model and damage assessment of RC piers, model tests and theoretic researches on pile-soil-structure interaction and pounding effects at expansion joints during earthquake. Recent trends about them are also discussed.

**Key words:** RC pier; Pile-soil-structure interaction; Pounding; Seismic response analysis

## 1 引言

桥梁结构在强烈地震中的性能主要由非线性反应决定, 因此非线性地震反应分析在桥梁结构抗震中具有重要的地位。桥梁结构非线性主要来自以下几个方面: (1)梁、柱单元的材料非线性; (2)地基土的非线性; (3)桥梁支座、伸缩缝、挡块等边界及连接单元的非线性; (4)由于自重及端部拉力引起的斜向缆索的非线性轴力与伸长量的关系; (5)大变形引起的塔、梁和柱单元轴力与弯矩的相互作用以及大位移引起的形状改变。本文试图根据已有资料, 对钢筋混凝土桥梁结构非线性地震反应分析中涉及的桥墩建模与损伤评估、土-结构相互作用、伸缩缝处的碰撞效应等问题作一简要总结。

## 2 钢筋混凝土桥墩非线性地震反应分析模型与损伤评估

### 2.1 非线性地震反应分析模型

建立的钢筋混凝土桥墩模型可根据其采用的单元模式分为三维杆系模型、纤维模型和钢筋混凝土固体有限元模型 3 类。

收稿日期: 2001-10-20; 修回日期: 2001-12-28

基金项目: 地震科学联合青年基金资助(100015)

作者简介: 王东升(1974-), 男, 副研究员, 在职博士生, 主要从事桥梁抗震研究。

### 2.1.1 杆系模型

1986年 Imbsen 和 Penzien 开发了著名的 NEABS-2 程序, 在集中塑性铰杆系模型基础上建立了经典的钢筋混凝土三维屈服面模型, 包括屈服面的流动规则、硬化规则和加卸载准则。同济大学也开发了类似程序 NSRAP, 某些方面甚至优于 NEABS, 被广泛用于国内大跨度桥梁、立交桥等的抗震分析工作。集中塑性铰模型建立在经典的弹塑性力学屈服面模型基础上, 具有计算简单的优点, 但只能考虑双线型的力-位移关系, 不能考虑刚度和强度退化等效应, 而刚度退化效应又是影响结构非线性分析精度的重要因素 (M.J.N. Priestley 等, 1994)。Zhang 和 W.F.Cofer(1996, 1999) 通过引入与截面塑性转角相关的损伤指数定义了随损伤发展的新的屈服面函数, 使之能够考虑上述效应。

1987年 Park 提出了分布塑性铰杆系模型, 以反映钢筋混凝土从开裂到屈服到形成塑性铰的整个塑性区发展过程, 并开发了 IDARC 程序。该模型可以考虑开裂、屈服、硬化、刚度退化、强度退化等钢筋混凝土特性, 并且与损伤指数挂钩。M.S.Williams 等 (1997) 通过试验对其模型控制参数取值进行了详细研究。近来 A.M. Reinborn 等 (1998) 在美科学基金会和联邦公路委员会资助下开发了 IDARC-BRIDGE 程序, 以适应桥梁结构分析要求。

在杆系模型中, 恢复力滞回模型通常取为弯矩-曲率形式, 常用的模型有 Clough 模型、Takeda 模型、Park 模型等。当涉及三维问题时, 建立双向弯矩-曲率滞回模型至关重要, 在 IDARC-BRIDGE 程序中假定双向弯矩-曲率各自独立。国内杜宏彪 (1990) 依据试验结果, 建立了考虑其相互影响的双向弯矩-曲率滞回模型, 但从总体上看, 由于模型参数的复杂性, 限制了其进一步应用。除此而外, 三维杆系模型需深入研究的工作还有非线性的弯剪相互作用问题。

### 2.1.2 纤维模型

纤维单元模型由 G.H. Powell 和 F.C. Filippou 等提出并完善, 这种模型一般做法是对钢筋和混凝土分别划分单元, 中间联以连接单元反映二者粘结特性, 然后按考虑二者约束关系的本构方程建立各自的柔度方程, 再通过一定算法转化为通用的有限元方程。该模型可以很好地模拟双向弯曲和轴力相互作用及包括软化段在内的强非线性效应, 并且无须事先建立恢复力模型, 但不能反映剪切和钢筋握裹滑移影响。A.S. Elnashal 等 (1996) 详细研究了该模型假设和输入地震动特性对桥墩设计参数的影响问题。国内陈幼平 (1998) 采用纤维模型利用 MSC/NASTRAN 大型分析软件对钢筋混凝土圆形截面高架桥桥墩进行了弹塑性地震反应模拟分析, 认为桥墩的弹塑性破坏过程和延性系数可以由计算机仿真模拟。

目前, 纤维模型已广泛应用于单个桥墩的地震反应分析, 并且成为检验各类简化的三维杆系分析模型的标准。M.Petragli(1999) 在此模型基础上开始探讨弯、剪、轴力相互作用问题。纤维模型是桥梁结构动力分析的一大进步, 但仍有一些问题, 如裂缝开展与闭合(裂面效应)、钢筋握裹-滑移、剪切变形影响等, 需要进一步研究。另外, 李康宁还提出了与纤维模型相类似的多弹簧模型 (Multi-Spring Model), 用于钢筋混凝土结构的地震反应分析。

### 2.1.3 钢筋混凝土固体有限元模型

钢筋混凝土固体有限元模型发展已有近三十年的历史, 用于分析的模型可分为分离式、组合式和整体式三大类。当前分析工作较多地采用分离式模型, 即将钢筋混凝土结构构件离散成混凝土单元、钢筋单元和连结单元。在裂缝模式上, 通常采用分布裂缝 (Smeared Crack)。钢筋混凝土固体有限元模型较常用于对试验室分析结果的验证和理论探索, 在实际工程中应用不多。

对于固体有限元模型和纤维模型, 钢筋和混凝土本构关系选择很重要, 除要考虑正确反映各自的受力机理外, 还要计算简单, 所以一般采用等效的单轴应力-应变关系。对钢筋通常用弹塑性硬化模型和全曲线模型; 对混凝土, 则根据其所在截面和配筋位置, 要考虑拉伸强化、裂面效应、箍筋约束等因素, 分别采用不同的本构模型或模型参数。近年来, 基于损伤和断裂力学理论的本构模型逐步受到重视, 可以更好地反映结构的破坏机理。

### 2.1.4 分析模型比较研究

上述模型计算分析的精度怎样一直是人们所关心的问题, 它可以通过理论分析与试验对比或不同模型计算结果之间的对比给出。近些年来, 欧洲学者为发展欧洲统一规范 (Eurocode 8), 对桥梁非线性地震反应进行了系统研究, 其重要研究特色在于多种研究方法的对比和综合, 包括模型振动台试验, 拟动力试

验、现场测试和数值模拟。研究表明,桥梁结构地震反应数值模拟几乎可以得到与模型振动台试验相一致的结果,国内学者叶献国(1998)对框架结构的对比研究也有类似结论。W.F.Cofer(1999)针对某一排架桥墩在反复荷载作用下的反应,比较了改进的集中塑性铰模型、纤维单元模型和有限元模型的计算结果和试验结果的差异,指出:纤维模型可以给出较精确的结果,但计算效率低且结果受网格划分的影响;杆系模型计算结果稍差,但从计算效率和实际应用看,很值得推广;有限元模型由于受数值分析方法、材料本构、裂缝开展等因素的限制,分析结果较差,很难应用于实际工程。对此要补充说明的是 W.F.Cofer 采用的是通用有限元分析程序 ABAQUS,而不是钢筋混凝土专用有限元分析程序。T.Tanabe, K.Maekawa 和 M.Adachi(2000)采用分含钢筋混凝土有限元模型、纤维模型、杆系模型的 5 个专用分析程序,对分别按日本规范、欧洲规范、新西兰规范和美国 Caltrans 规范设计的 2 组 8 个桥墩进行了动力和静力非线性分析,其结果对研究工作的重要启示是:(1)对动力非线性分析,不同程序计算的位移可以得到很一致的结果,滞回曲线稍差,加速度时程最差;(2)对非线性静力分析,尽管各程序本构关系不同,但都得到了几乎一致的上升曲线,对于曲线下降段,分析结果离散性较大,因此在选择本构关系时更应注意对材料软化特性的描述;(3)按不同规范设计的钢筋混凝土桥墩其地震反应性态相差很大。

## 2.2 桥墩地震反应损伤评估

钢筋混凝土桥墩地震反应及损伤的定量评价,目前有多种方式,诸如位移、延性、能量、损伤指数、残留位移等。下面结合国外桥梁抗震设计规范的进展对此作一简要介绍:

(1)位移:与传统的结构内力相比,结构位移更能反映结构在地震中的反应性态,以结构位移作为设计极限状态,可以很好地控制结构在地震时的功能状态,因此基于位移的抗震设计方法得到了较大发展。国外 M.J.Kowalsky, M.J.N.Priestley 等(1995)、G.M.Clavi 和 G.R.Kingsley(1995)以及国内的朱希(2000)都做出了很好的工作。其分析方法主要基于“等效”概念,即将多自由度系统转化为单自由度系统,将非线性系统转化为线性系统。在地震动描述上,采用了位移谱。目前美国、日本推荐的可用于性态设计的方法中,如 FEMA-273, 274, ATC-40, 日本新的钢筋混凝土高层建筑抗震设计指南等,均以位移为设计目标,分析方法采用了基于非线性静力分析的能力谱法。

(2)延性:关于延性抗震研究历史已经很长了,延性一直作为结构抗震能力评价的重要指标,包括位移延性、曲率延性和转角延性。延性可认为是位移指标的另一种表达,但又包含了一些深层次的内容,如耗能特性、局部破坏特性等。M.J.N.Priestley 等(1997)建立了经验的基于延性表达的桥梁破损极限状态定量表达,包括:工作极限状态、破坏控制极限状态、不倒塌极限状态。作者在此基础上结合非线性静力分析方法建立了基于延性和钢筋与混凝土的应力、应变表达的桥梁破损极限状态。A.S.Elnashal 等(1996)在对单墩反应比较了位移延性、曲率延性和转角延性后,认为曲率延性更能表述结构的破坏与损伤。从各国规范看,目前倾向于在确定钢筋和混凝土的应力、应变关系后,利用分析手段计算其延性。

(3)应力和应变:它的发展是建立在试验研究和非线性静力分析方法基础上的,在未来 AASHTO 桥梁抗震设计规范蓝本中(1999),即采用了这一性能评价指标,与作者的工作不谋而合。

(4)残留位移:日本学者在 Kobe 地震后桥梁震害调查发现:残留位移对桥梁震后是否可修具有重要影响,是除延性外的最重要的指标。K.Kawashima 等(1998)建立了残留位移谱,反映在现行日本桥梁抗震规范(1996)中。

(5)损伤指数:目前应用较多的仍是 Park 和 Ang 等(1985)提出的基于位移的首次超越和塑性累积疲劳损伤的双参数累积损伤指数及其修正形式。近来随非线性静力分析技术的发展,Ghobarah 等(1999)提出采用震前与震后的结构 Pushover 分析初始刚度比定义结构和层损伤指数,被潘龙等(2000)引入,用于桥梁的破损评估。Rodriguez 等定义了一种新的损伤指数,将 MDOF 结构体系的损伤指数转化为 SDOF 体系损伤计算,考虑了地震、结构基本周期和延性水平的影响。S.K.Kunnath 等(1997)对 12 根钢筋混凝土柱通过随机反复加载试验比较了 Lybas 和 Sozen(1977)的基于刚度变化表达的损伤指数、Kratzig(1987)的基于能量表达的损伤指数、Park 和 Ang(1985)的双参数累积损伤指数、J.B.Mander(1994)基于经典疲劳破坏理论建议的疲劳损伤指数,都不是很满意,他以此试验为基础改进了疲劳损伤指数,认为可以较好描述结构损伤情况。D.E.Lehman 和 J.P.Moehle(2000)以疲劳损伤指数为基础建立了钢筋混凝土桥墩的性态抗震设计方法。在建筑工程领域,国内欧进萍和何政(2000)对结构损伤性能设计进行了深入研究。

(6)能量: 自 60 年代 Housner 提出能量准则以来, 尽管各国学者对其一直重视, 但进展缓慢。R.D. Bertero 等(1996)提出性能抗震设计分析方法依靠能量方法, 基于能量的分析方法得到进一步发展。在桥梁方面, 研究工作主要处于对线性或非线性 SDOF 系统的讨论和用于材料微观破坏准则上。

对于以上这些评价指标, 以疲劳损伤指数最为精确, 但需要复杂精细的动力时程分析。位移(残留位移)、延性、应力、应变可以通过简化分析(如非线性静力分析)得到, 较适合于设计分析工作。能量评价指标还需要深入研究。

### 3 桩-土-桥梁结构动力相互作用试验与理论研究

土-结相互作用在地震工程领域中的研究得益于 70-80 年代核电站、海洋平台及大坝等一些重大工程的抗震需求, 并由于有限元及边界元等数值分析技术的引入, 使土-结相互作用研究获得了极大的发展。一些著名程序, 例如 FLUSH 等至今仍被工程界广为应用。在土-结相互作用分析中, 直接法与子结构法相比获得了更多的应用, 在处理土体的非线性时采用了等效线性化的方法。1989 年美国 Loma Prieta 地震和 1995 年日本 Kobe 地震中桩基的大量破坏进一步促进了该领域的研究工作, 主要表现在试验和理论分析两个方面。

#### 3.1 桩-土-桥梁结构动力相互作用模型试验

1992 年日本和美国开始合作进行 EDUS(Earthquake Damage to Underground Structures)研究(T. Kagawa, 2000), 目的是通过试验研究深入认识与桩基础类似的地下结构的地震反应性能及其失效机理。在研究手段上, 大型离心机试验和模型振动台试验得到了较多的应用, 工作中既注意试验本身的研究, 也重视与数值方法的结合。在这些研究工作中, 1995 年以前主要是小比例尺试验, 1995 年后日本在其  $15\text{m} \times 15\text{m}$ 、载重 500 吨的大型振动台上作了大量的大比例尺甚至原型试验, 场地涉及软土和饱和砂土。EDUS 研究成果目前已陆续发表, 对研究工作的重要启示是: (1)模型振动台试验可以得到与离心机试验很一致的结果, 应该大力发展经济的小比例尺模型振动台试验和提高离心机试验技术水平; (2)在桩-土-结构动力相互作用数值模拟和理论研究方面, 建立在有效应力分析基础上的整体分析方法(液化条件)和基于非线性文克尔地基梁假定的并联弹簧-阻尼器分析方法得到了发展, 并获取了与试验相吻合的结果。

液化场地桩-土-桥梁结构动力相互作用是试验研究的热点问题。在涉及液化问题研究中, 早期倾向于采用离心机试验, 以准确模拟应力条件。由于受到边界条件、科氏效应及试验技术等的影响, 近年来模型振动台试验受到重视。在刚结束的 12WCEE 上, 涉及液化的模型振动台试验就有 16 篇论文, 研究对象涉及桥梁、码头、建筑及基础等各类工程结构, 部分属于 EDUS 研究项目。S. Tamura 等(2000)在其最大的振动台上, 完成了液化场地-钢筋混凝土双柱墩大比例尺地震破损和失效机理试验, 指出在场地液化前结构破损由惯性力控制, 液化后结构破损与液化密切相关, 结构整个破坏过程由液化控制。H. Funahara 等(2000)利用有效应力分析技术对试验过程进行了数值模拟, 结果较吻合。

国内同济大学的范立础和韦晓(1999)进行了桩-土-桥梁结构相互作用模型振动台试验, 并用 SHAKE 程序对自由场试验结果进行比较, 试验实测结果和理论分析在反应谱频谱、峰值上有很好的吻合, 由此得到一些有益的结论。

#### 3.2 桩-土-桥梁结构动力相互作用理论分析

桩-土-桥梁结构动力相互作用数值分析方面, 在原有的固体有限元方法基础上, 基于非线性文克尔地基梁假定的并联弹簧-阻尼器分析方法获得进一步发展(T. Ganve 等, 1998; W. Shaomin 等, 1998)。该方法建立在目前常用的 Penzien 桩-土相互作用模型基础上, 通过非线性文克尔地基梁假设, 并将桩-土结构相互作用区域分为近场、远场和自由场, 分别利用非线性弹簧与并联库仑阻尼表示桩-土非线性相互作用、粘滞阻尼器并联线性弹簧反映土层的辐射阻尼作用, 自由场分析(可以是一维有效应力分析)作为多点输入, 来分析桩-土动力相互作用。在 EDUS 计划中, 还发展了一种模型桩截面测试仪器(Model Pile-Section Test Device)用于测试静力或动力试验的桩-土相互作用关系( $P-Y$ )曲线。

另外在涉及液化时, 基于有效应力分析的桩-土-桥梁结构动力相互作用分析模型也有较多应用(H. Funahara 等, 2000; T. Kagawa 等, 2000)。其优点在于建立的模型与现有的土-结构相互作用分析的直接

法一致, 应用方便。但因人工边界条件处理、显式有限元波动理论分析数值稳定性及桩-土非线性耦合作用模拟等方面工作的复杂性, 该方法很难反映结构非线性, 特别是桩基损伤及破坏效应。最后, 我们要提及的是 1993 年钱令希教授首次将海洋土简化为二相饱和介质模型进行了地基海洋平台结构相互作用的动力有限元分析。

## 4 伸缩缝处的碰撞效应

碰撞对桥梁结构地震反应影响问题各国学者观点并不相同。在日本通常认为碰撞作用可以消耗地震能量, 对桥梁抗震设计是有利的。Kobe 地震后, 这种观点和基于“保险丝”理论的支座抗震设计理念受到怀疑。在欧美通常认为碰撞对桥梁抗震设计不利。

### 4.1 因碰撞引发的震害现象

主梁梁端碰撞或者主梁与桥台胸墙碰撞是桥梁结构常见的震害现象, 这种碰撞行为一般会带来诸如主梁梁端开裂、桥台胸墙局部混凝土脱落、伸缩缝挤压等对桥梁结构轻微的破坏, 但在某些情况下, 碰撞也会引起桥梁结构严重的落梁破坏。我国 1976 年唐山大地震中, 滦河大桥的严重落梁破坏曾引起桥梁抗震工作者们的广泛关注, 它们以各种可能原因对震害现象进行了解释, 在不同程度上都提到了碰撞作用。日本 1995 年 Kobe 地震桥梁震害经验再次表明, 随支座破坏后发生的碰撞作用是引起桥梁局部损坏和引发落梁破坏的原因之一。碰撞还可以发生在多层立交桥高度不同的相邻结构之间, 即标高较低的上部结构与相邻较高结构的桥墩发生碰撞。1989 年美国 Loma Prieta 地震中 China Basin/Southern 高架桥 I-280 截面处, 因下层路面与支承上层路面的桥墩之间预留的 150mm 的间距不足, 两者在地震中发生了冲撞, 桥墩和下层路面都发生了中等左右的破坏现象。

### 4.2 碰撞效应的理论研究

W. G. Godden(1976)、R. A. Imbsen 和 J. Penzien(1984) 等先后通过试验和理论研究指出考虑伸缩缝处碰撞等非线性因素对确定桥梁动力反应的重要性, 后者还在其开发的 NEABS 程序中提出了考虑碰撞、摩擦力、拉结措施等非线性效应的伸缩缝单元。1985 年墨西哥地震后, 由地震产生的结构碰撞行为引起了地震工程学者的广泛注意, 在建筑结构领域开展了大量研究(K. Kasai 等, 1992; S.A. Anagnostopoulos 等, 1995)。在此影响下和受近几次城市破坏性地震桥梁震害的直接推动, 碰撞对桥梁结构地震反应的影响受到进一步关注。E. Maragakis 等(1988)研究了简单的单墩刚构桥与桥台的碰撞相互作用, 考虑了桥墩的材料非线性和台后填土的非线性性质, 认为碰撞效应在结构地震反应中起决定作用。R. Jankowski 等(1998, 2000)利用 S.A. Anagnostopoulos 建立的碰撞模型, 考查了采用高阻尼橡胶支座(HDRB)隔震的长连续梁桥由行波效应产生的邻联主梁碰撞反应以及减轻碰撞效应的措施, 认为碰撞力大小与伸缩缝间距相关, 间距过大和过小都会显著降低碰撞效应, 并建议可以采用 Shock Transmission Units, 一种类似于液体油缸阻尼器的装置减轻碰撞。K. Kawashima 等(2000)和 J.M. Kim 等(2000)也分别建议利用橡胶冲击吸收垫和耗能拉结装置减轻碰撞效应, 这两种装置还可以有效地降低强烈地震中墩、梁相对位移反应, 防止落梁破坏。

1992 年 1 座位于美南加利福尼亚 I-10 和 I-215 公路连接处的多跨曲线梁桥获得了多组完整的强震记录, 表明伸缩缝碰撞发生的机理相当复杂, 包括横向运动的摩擦碰撞、纵向运动的不均匀碰撞、限位器引起的碰撞等, 同时碰撞产生的加速度脉冲还以波动的形式向远端传播。P. K. Malhotra 等(1995)、M.J. N. Priestely 等(1997)对此作了较为详细的介绍。P. K. Malhotra(1998)还在此基础上基于经典圆杆碰撞理论建立了恢复系数、主梁材料阻尼比和邻梁长度比的关系, 并认为碰撞持时可以取为较短主梁轴向振动基本周期。

目前, 碰撞对桥梁结构地震反应影响研究工作的困难仍在于建立合理的碰撞模型。S.A. Anagnostopoulos 模型可以很好地与有限元法协调, 并可以通过建立合理的主梁模型反映碰撞产生的行波效应, 但无法反映碰撞持时和波传播过程的能量耗散。P. K. Malhotra(1998)模型理论上可能是合理的, 但很难与现有的有限元法协调。另外, 结合智能材料、新型耗能阻尼器等开发安装方便、使用经济的减轻碰撞效应的装置也是今后需研究的重要内容。

## 5 结束语

桥梁非线性地震反应分析涉及问题较多, 本文仅对其中的钢筋混凝土桥墩非线性地震反应分析模型与损伤评估、土-结构相互作用试验与理论研究和伸缩缝处的碰撞效应3个问题作了简要的总结与评述。受学识限制, 文中部分观点可能会有不当, 甚至错误, 恳请读者批评指正。另外限于篇幅, 文中所引文献未能一一列出, 其中的英文文献读者可在美国地震工程研究中心(EERC)网站检索得到, 笔者也因此向未被列出文献的作者表示感谢和歉意。

## 参考文献:

- [1] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [2] 范立础, 韦晓. 桩-土-结构动力相互作用试验研究现状[A]. 大型复杂结构的关键科学问题研究文集[C], 大连理工大学, 1999.
- [3] M.J.N. 普瑞斯特雷, F. 塞勃勒等. 桥梁抗震设计与加固[M]. 袁万城等译. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [4] 叶献国. 基于非线性分析的钢筋混凝土结构地震反应与破损的数值模拟[J]. 土木工程学报, 1998, 31(4):3-12.
- [5] A. M. Reihorn, V. Simeonov, G. Mylonakis, *et al.* IDARC-BRIDGE: A Computational Platform for Seismic Damage Assessment of Bridge Structures[R]. University at Buffalo, State University of New York. MCEER Report: 98-0011.
- [6] A. S. Elnashai, D. C. McClure. Effects of Modeling Assumptions and Input Motion Characteristic on Seismic Design Parameters of RC Bridge Piers[J]. Earthquake Eng. Stru. Dyn., 1996, 25: 435-463.
- [7] E. Spacone, F. C. Filippou, F. F. Taucer. Fiber Beam-Column Model for Nonlinear Analysis of R/C Frames[J]. Earthquake Engng. Struct. Dyn., 1996, 25: 711-742.
- [8] G. A. Chang, J. B. Mander. Seismic Energy Based Fatigue Damage Analysis of Bridge Columns: Part 1-Evaluation of Seismic Capacity[R]. University at Buffalo, State University of New York, NCEER Report: 94-0006.
- [9] J. K. Kim, J. B. Mander. Truss Modeling of Reinforced Concrete Shear-flexure Behavior[R]. University at Buffalo, State University of New York. MCEER Report: 99-0005.
- [10] K. Kawashima. Seismic Design and Retrofit of Bridge[A]. 12WCEE[C], New Zealand, 2000, Reference NO.2828.
- [11] K. M. Pravean, J. H. Moh, F. S. Anthon. Seismic Interaction at Separation Joints of an Instrumented Concrete Bridge[J]. Earthquake Eng. Stru. Dyn., 1995, 24(3):1055-1067.
- [12] M. J. N. Priestley. Performance Based Seismic Design[A]. 12WCEE[C], New Zealand, 2000, Reference NO.2831.
- [13] M. Koichi, A. Xuehui. Shear Failure and Ductility of RC Columns after Yielding of Main Reinforcement[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 65:335-368.
- [14] M. Petranga, P. E. Pinto, V. Ciampi. Fiber Element for Cyclic Bending and Shear of RC Structure. (I) Theory, (II) Verification[J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 1999, 125(9): 994-1009.
- [15] M. S. Williams, R. G. Sexsmith. Seismic Assessment of Concrete Bridge Using Inelastic Damage Analysis[J]. Engineering Structure, 1997, 19(3):208-216.
- [16] R. Jankowski, K. Wilde, Y. Fujino. Reduction of Pounding Effects in Elevated Bridges during Earthquakes[J]. Earthquake Eng. Stru. Dyn., 2000, 29(2):195-212.
- [17] S. K. Kunnath. Cumulative Seismic Damage of Reinforced Concrete Bridge Piers[R]. University at Buffalo, State University of New York, NCEER Report: 97-0006.
- [18] T. Ganve, F. Yamazaki, H. Ishizak, *et al.* Response Analysis of the HIGASHI-KOBE Bridge and Surrounding Soil in the 1995 HYOGOKEN-NANBU Earthquake[J]. Earthquake Engng. Struct. Dyn., 1998, 27(3): 557-576.
- [19] W. F. Cofer. Document of Strengths and Weaknesses of Current Computer Analysis Method for Seismic Performance of RC Members[R]. University of California, Berkeley. PEER Report 1999/07.
- [20] W. Shaomin, B. L. Kutter, J. Chacko, *et al.* Nonlinear Seismic Soil-Structure Interaction[J]. Earthquake Spectra, 1998, 14(2): 377-396.