

文章编号: 1005-0930(2016)02-0322-011 中图分类号: U448 文献标识码: A  
doi: 10.16058/j.issn.1005-0930.2016.02.011

## 考虑桥墩剪切破坏的不规则 桥梁排架抗震分析模型

孙治国<sup>1</sup>, 李宏男<sup>2</sup>, 司炳君<sup>2</sup>, 陈 灿<sup>2</sup>, 王东升<sup>2</sup>

(1. 防灾科技学院 河北 三河 065201; 2. 大连理工大学建设工程学部 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 基于 OpenSees 数值分析平台的纤维梁柱、剪切弹簧和转动弹簧单元,建立了考虑桥墩剪切破坏的不规则桥梁排架抗震数值分析模型。其中纤维梁柱单元模拟桥墩、盖梁弯曲变形,剪切弹簧单元模拟桥墩剪切变形,转动弹簧单元模拟纵筋拔出变形。基于圆形截面桥墩抗震试验结果,并结合数值分析手段建立了桥墩剪切破坏时塑性铰区转角计算公式。并以此公式为基础,监测数值模型中桥墩剪切破坏,剪切破坏前桥墩以弯曲反应为主,剪切破坏后桥墩侧向强度和刚度发生显著退化。最后以3座实际不规则桥梁排架为工程背景,进行了排架横桥向地震作用下的滞回性能分析。研究表明,所建立的抗震分析模型可有效模拟由于桥墩剪切破坏造成的强度和刚度退化,为不规则桥梁结构抗震性能分析提供了依据。

**关键词:** 桥梁抗震; 不规则桥梁排架; 弯剪数值分析; 桥墩剪切破坏; OpenSees

由于受斜坡地形限制,山区桥梁排架各桥墩高度在横桥向可能存在显著差异,地震作用下,矮墩受力集中且承受显著的变轴力作用,剪切破坏风险较大。发展不规则桥梁排架抗震的数值分析模型,对认识山区桥梁结构的地震倒塌破坏机理及破坏过程具有重要意义。显而易见,建立不规则桥梁排架抗震数值分析模型的关键是对矮墩剪切破坏机理及反应的合理描述<sup>[1]</sup>。

目前,对弯曲破坏控制的钢筋混凝土构件,采用纤维梁柱单元可对其地震反应进行较为准确的模拟<sup>[2]</sup>。在纤维梁柱单元模型基础上,另外串联剪切弹簧单元,通过剪切弹簧单元模拟试件剪切变形,共同考虑构件的弯剪耦合作用,成为模拟弯剪及剪切破坏控制钢筋混凝土结构地震反应的重要手段<sup>[3]</sup>。其中又以 Lee 和 Elnashai 模型<sup>[4]</sup>、Elwood 模型<sup>[5]</sup>和 LeBorgne 模型<sup>[6]</sup>为代表。Lee 和 Elnashai 模型通过修正的压力场理论计算试件剪切变形,并通过剪切弹簧单元模拟,剪切变形与弯曲变形间的耦合通过“力”准则进行,即剪切弹簧极限荷载低于纤维梁柱单元模型时,变形成分以剪切为主;反之则以弯曲变形为主。因此, Lee 和 Elnashai 模型的关键是对试件抗弯及抗剪承载力的准确判断<sup>[7-8]</sup>。Elwood 模

收稿日期: 2014-08-26; 修订日期: 2014-12-31

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB013605); 国家自然科学基金项目(51008041; 51178071); 中国博士后科学基金项目(2013M540226; 2014T70250)

作者简介: 孙治国(1980—),男,博士(后),助理研究员, E-mail: szg\_1999\_1999@163.com

型<sup>[5]</sup>和 LeBorgne 模型<sup>[6]</sup>仍通过剪切弹簧单元模拟构件剪切变形并与纤维梁柱单元耦合, 但与 Lee 和 Elnashai 模型不同的是, Elwood 模型<sup>[5]</sup>和 LeBorgne 模型<sup>[6]</sup>都采用了破坏面的概念, 即通过试验结果的回归分析建立弯剪破坏墩柱的剪切破坏面, 当模型中墩柱总变形达到剪切破坏面前, 剪切弹簧单元保持弹性, 试件以弯曲变形控制, 达到剪切破坏面后, 试件以剪切变形控制. 需要说明的是, Elwood 模型<sup>[5]</sup>以墩顶位移角定义墩柱的剪切破坏面, 适用于悬臂式桥墩的分析, 对桥梁排架这种超静定结构而言, 由于盖梁、系梁、桩土作用等都会影响桥墩反弯点的位置, 数值模型中通过墩顶位移监测桥墩剪切破坏难以实现. 在此背景下, LeBorgne 模型通过桥墩塑性铰区转角监测其剪切破坏的发生时刻, 特别适用于桥梁排架及框架结构等超静定体系的数值分析<sup>[8]</sup>.

本文在 LeBorgne 模型的基础上, 进一步发展了不规则桥梁排架的抗震分析模型, 首先基于圆形截面桥墩抗震拟静力试验结果, 结合数值分析手段建立了圆形截面桥墩剪切破坏时塑性铰区转角计算公式, 并以此为基础, 监测数值模型中桥墩剪切破坏的发生时刻. 在此基础上, 建立了考虑桥墩剪切破坏的不规则桥梁排架抗震数值分析模型, 并最终应用于实际桥梁排架的抗震能力分析.

## 1 LeBorgne 模型及改进

### 1.1 LeBorgne 模型介绍

与目前通用的钢筋混凝土墩柱弯剪数值分析模型类似, LeBorgne 模型<sup>[6]</sup>的建立仍是由纤维梁柱单元、剪切弹簧单元和转动弹簧单元组成串联体系. 由基于柔度法的纤维梁柱单元模拟墩柱弹塑性弯曲变形, 剪切弹簧单元模拟剪切变形, 转动弹簧单元模拟纵筋拔出变形, 图 1 为悬臂式桥墩的数值分析模型. 节点 1、2 初始坐标相同, 两节点间建立转动弹簧单元. 节点 2、3 初始坐标相同, 两节点间建立剪切弹簧单元. 节点 3 与 4、节点 4 与 5 之间建立纤维梁柱单元.

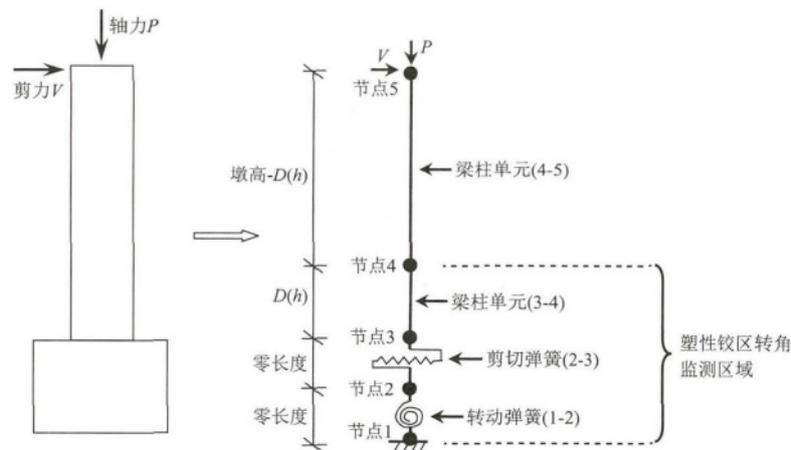


图 1 基于 LeBorgne 模型的钢筋混凝土桥墩抗震弯剪分析模型

Fig. 1 Flexural-shear analysis model for RC bridge piers based on LeBorgne model

需要说明, 由于 LeBorgne 模型通过监测墩柱塑性铰区转角判断试件剪切破坏发生时刻, 因此数值模型中, 塑性铰区高度  $D$  或  $h$  范围内需建立 1 个纤维梁柱单元, 以监测桥墩

塑性铰区转角(包括节点 1、2 之间转动弹簧转角).  $D$  为圆形截面桥墩直径  $h$  为矩形截面桥墩在加载方向的宽度. 本文中的塑性铰区高度  $D$  与桥梁抗震分析中的等效塑性铰长度以及抗震规范中定义箍筋加密区的塑性铰长度存在差别, 本文塑性铰长度是根据 Ghannoum 等<sup>[8]</sup>的研究, 为了监测桥墩转角而人为定义的高度.

LeBorgne 模型的主要特点在于通过监测墩柱塑性铰区转角判断试件剪切破坏的发生时刻, 剪切破坏发生前, 试件变形由纤维梁柱单元控制, 变形以弯曲成分为主, 剪切弹簧单元刚度  $K_{\text{shear}}$  可直接取墩柱弹性剪切刚度<sup>[9]</sup>

$$K_{\text{shear}} = \frac{GA}{L} \quad (1)$$

式中:  $A$  为桥墩截面积;  $L$  为墩高;  $G$  为混凝土的剪切模量, 按下式计算

$$G = \frac{E_c}{2(1 + \mu)} \quad (2)$$

其中:  $E_c$  为混凝土弹性模量;  $\mu$  为泊松比, 本文取 0.2.

剪切破坏发生后, 则由剪切弹簧单元控制试件反应. 为实现数值模型中由弯曲反应向剪切反应的转化, 剪切弹簧单元应具有如下特性: (1) 可通过对纤维梁柱单元塑性铰区转角的监测, 决定构件的强度退化; (2) 具有补偿由于其强度退化引起弯曲变形损失的功能; (3) 当塑性铰区转角达到破坏值后, 剪切弹簧可模拟墩柱的侧向荷载退化. 剪切破坏后墩柱的刚度及强度退化通过改变剪切弹簧滞回规则中的捏拢效应、再加载刚度及强度退化考虑. 且采用了基于能量、位移及滞回次数的损伤破坏准则, 通过对剪切弹簧单元弹性刚度、再加载刚度以及强度的改变来实现损伤的模拟.

图 2 为剪切弹簧的剪力-剪切位移骨架曲线及滞回规则, 试件剪切破坏前, 剪切弹簧按弹性剪切刚度  $K_{\text{shear}}$  加卸载. 塑性铰区转角达到定义的剪切破坏值后, 剪切弹簧骨架曲线发生退化, 以退化斜率  $K_{\text{deg}}$  和残余抗剪强度  $V_r$  定义. 反复荷载作用下, 笔者可通过 6 个捏拢参数定义的 3 线性捏拢曲线定义剪切弹簧的滞回规则, 详细见文献 [6].

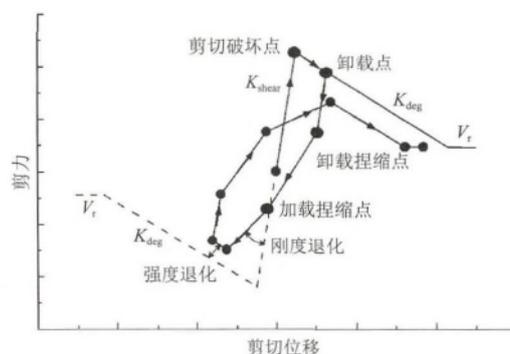


图 2 剪切弹簧骨架曲线及滞回规则

Fig. 2 Skeleton curve and hysteretic model of the shear spring

LeBorgne 模型建立的关键是对桥墩剪切破坏发生时刻塑性铰区转角的准确估计, Ghannoum 等<sup>[8]</sup>基于 56 个弯剪破坏矩形截面墩柱试验结果, 建议了如下矩形截面墩柱剪切破坏时塑性铰区转角  $\theta_f$  计算公式

$$\theta_r = 0.044 - 0.017 \frac{s}{d} - 0.021\eta - 0.024 \frac{v}{\sqrt{f_c}} \geq 0.009 \quad (3)$$

式中:  $s$  为塑性铰区箍筋间距;  $d$  为受拉纵筋中心至截面受压边缘的距离;  $\eta$  为轴压比;  $f_c$  为混凝土抗压强度;  $v$  为截面承受的最大剪应力. Ghannoum 公式认为, 矩形截面墩柱剪切破坏时塑性铰区转角主要与轴压比、箍筋间距和剪应力有关.

说明一点, 目前绝大多数桥墩抗震试验数据基本以提供剪力-位移滞回曲线为主, 对桥墩塑性铰区转角的测量结果较少. 因此 Ghannoum 公式<sup>[8]</sup>建立的关键是对剪切破坏时桥墩塑性铰区转角值的获取. Ghannoum 的思路是基于桥墩抗震试验结果首先获取剪切破坏时刻的墩顶位移值. 然后建立如图 1 所示的桥墩抗震数值分析模型, 按试验加载工况对模型施加轴力和侧向荷载, 直至桥墩达到剪切破坏位移. 并记录此时数值模型中桥墩塑性铰区转角. 最终通过对 56 个桥墩塑性铰区转角的回归分析, 建立矩形截面桥墩剪切破坏时的塑性铰区转角计算公式.

对 LeBorgne 模型的其它单元, 纤维梁柱单元混凝土采用基于 Kent-Scott-Park 的混凝土应力-应变关系, 不考虑混凝土的受拉强度和刚度; 钢筋采用 Giuffre-Menegotto-Pinto 模型, 考虑了循环加载下的包辛格效应. 纵筋拔出变形采用转动弹簧单元模拟, 采用了基于 Zhao<sup>[10]</sup> 提出的 Bond-SP01 模型, 转动弹簧单元拥有和纤维梁柱单元相同的截面和纤维划分, 但钢筋和混凝土的本构关系与纤维梁柱单元存在差异. 零长度转动弹簧单元中, 以纵筋应力-滑移量关系表示钢筋本构; 且混凝土的峰值应变较纤维梁柱单元大大增加, 以保持零长度转动弹簧单元和纤维梁柱单元间的协调关系.

## 1.2 LeBorgne 模型的改进

注意到 Ghannoum 公式是针对矩形截面墩柱试验结果建立的, 不适用于圆形截面桥墩的分析, 为建立不规则桥梁排架抗震分析模型, 首先需建立圆形截面桥墩剪切破坏时对应的塑性铰区转角计算公式. 仍借鉴 Ghannoum<sup>[8]</sup>的思路, 基于 Ghee 等<sup>[11]</sup>、Arakawa 等<sup>[12]</sup>、Petrovski 等<sup>[13]</sup>、Wong 等<sup>[14]</sup>、Priestley 等<sup>[15]</sup>、Kenchiku<sup>[16]</sup>、Hamilton 等<sup>[17]</sup>完成的 36 个弯剪和剪切破坏圆形截面钢筋混凝土桥墩抗震试验数据, 建立如图 1 所示的桥墩抗震数值分析模型, 按试验加载历程加载至剪切破坏时的墩顶位移, 记录此时桥墩塑性铰区的转角  $\theta_r$ .

说明一点, 本文收集的部分圆形截面桥墩抗震试验加载装置可能为两端固结的双曲型, 与图 1 中的悬臂式桥墩不同. 本文在建模时已考虑了加载装置对试验结果的差异, 并将滞回曲线全部与悬臂式加载方式统一. 因此, 本文模型适用于悬臂式及双曲型构件的分析. 图 3 为模拟得到的 Specimen 28 试件<sup>[12]</sup>、Specimen 2 试件<sup>[14]</sup>剪切破坏前滞回曲线及与试验结果的对比. 可以看出, 本文建立弯剪数值分析模型在墩柱剪切破坏前具有足够的精度, 这主要是由于剪切破坏前试件反应以弯曲为主, 此时以纤维梁柱单元进行模拟具有足够的精度. 这也从一个侧面反应此时应用数值模拟得到的塑性铰区转角监测试件剪切破坏是可行的.

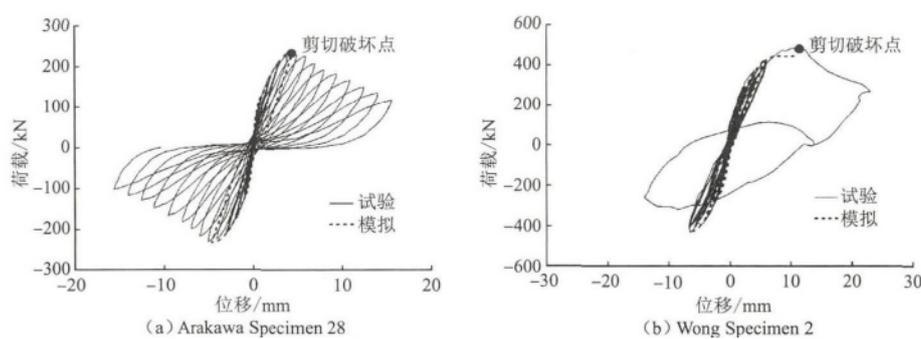


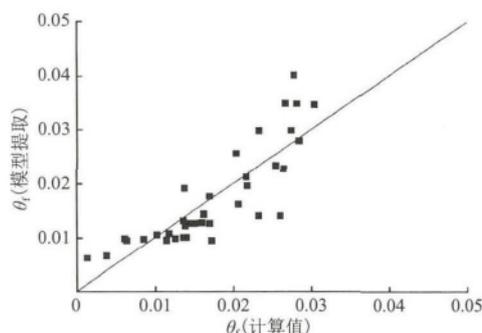
图3 试件剪切破坏前滞回曲线的模拟

Fig. 3 Simulation of the hysteretic curves before shear failure of the specimens

通过对 36 个弯剪和剪切破坏圆形截面桥墩剪切破坏时塑性铰区转角  $\theta_f$  的回归分析,建立了圆形截面桥墩塑性铰区转角计算公式

$$\theta_f = 0.011 - 0.02\eta - 0.04 \frac{s}{D_c} + 0.01\lambda + 0.022 \frac{\rho_s f_{yt}}{f_c} \quad (4)$$

式中:  $D_c$  为圆形截面桥墩箍筋核心之间的距离;  $f_{yt}$  为箍筋屈服强度;  $\lambda$  为剪跨比;  $\rho_s$  为体积配箍率. 分析式(4), 可发现剪切破坏发生时圆形截面桥墩塑性铰区转角随轴压比、箍筋间距增大而减少, 随剪跨比和力学含箍率增加而增加. 图4为式(4)计算的  $\theta_f$  及与基于试验提取结果的对比情况, 可发现按式(4)计算结果与试验结果吻合较好, 证实了回归公式(4)的准确性.

图4  $\theta_f$  计算值与试验结果的对比Fig. 4 Comparison between the calculated and tested  $\theta_f$ 

仍基于图1的弯剪数值分析模型, 利用式(4)监测试件剪切破坏的发生时刻, 建立了圆形截面桥墩的抗震分析模型. 对 Ghee 等<sup>[11]</sup>完成的 No. 18、No. 20、No. 23 试件进行模拟分析. 各试件均为圆形截面, 剪跨比分别为 1.5、1.75 和 2.0, 除 No. 23 号试件为弯剪破坏外, 其余为剪切破坏. 将模拟得到的桥墩滞回曲线与试验结果进行了对比, 如图5所示. 可以看出, 模拟滞回曲线与试验结果吻合良好, 所建模型很好模拟了试件由于剪切破坏造成的强度和刚度退化, 表明本文建立的圆形截面桥墩抗震弯剪数值分析模型具有足够的精度, 可对剪切及弯剪破坏圆形截面桥墩滞回性能进行准确的模拟.

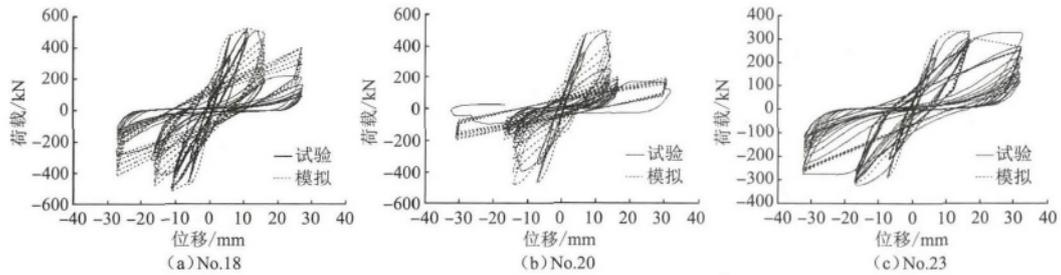


图5 Ghee 试件模拟与试验滞回曲线的对比

Fig. 5 Comparisons between the simulated and tested hysteretic curves for specimens tested by Ghee

## 2 不规则桥梁排架抗震分析模型

### 2.1 工程概况

以云南省某山区桥梁为工程背景进行分析说明,该桥下部结构为双柱式排架,本文选取6~8号排架为研究对象。由于受地形限制,桥墩高度沿桥梁横向不一致,本文仅考虑基础以上部分,墩底按固结处理。各排架详细设计情况如图6所示。桥墩均为直径1500mm圆形墩,纵筋为32根直径28mm的HRB335钢筋,沿截面圆周均匀布置。桥墩箍筋为直径12mm的HPB235光圆钢筋,螺旋状配箍,桥墩塑性铰区域,箍筋间距为100mm,其余部分为200mm。盖梁截面宽度为1900mm,高1850mm,盖梁截面上下端纵筋为直径32mm的HRB335钢筋,由于墩柱顶部纵筋弯起的影响,盖梁跨中与墩柱顶部纵筋配置发生变化,排架墩、盖梁混凝土强度均为C30。

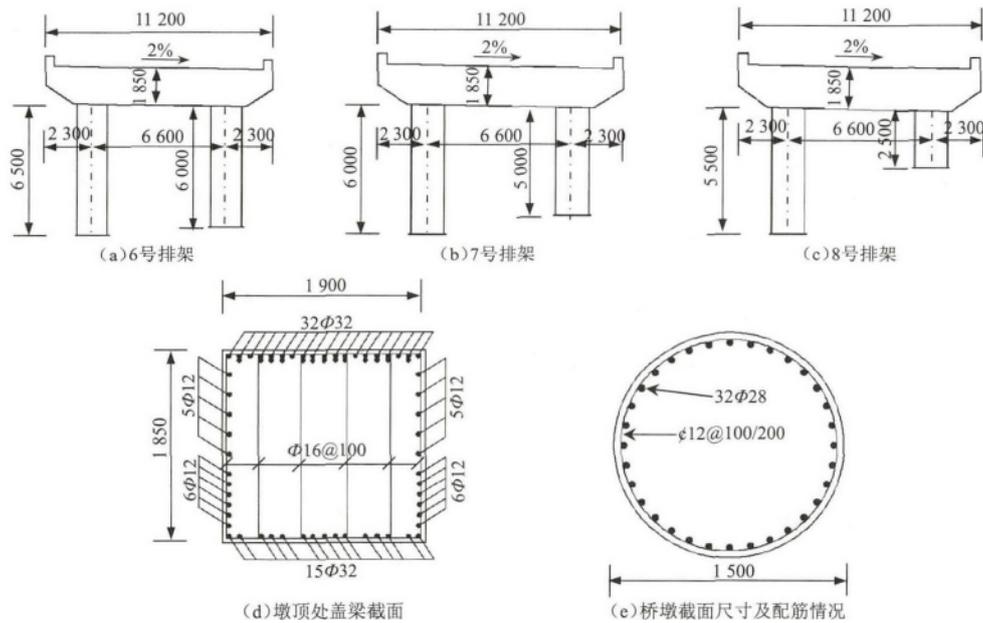


图6 不规则桥梁排架设计情况(单位: mm)

Fig. 6 Design details of the irregular bridge bents( units: mm)

显然,横桥向地震作用下,各排架桥墩剪跨比均较低,发生剪切破坏的可能性较

大<sup>[18]</sup>. 建立此类排架抗震数值分析模型的关键是对桥墩剪切破坏后地震反应的模拟.

## 2.2 不规则桥梁排架抗震分析模型建立

借鉴 LeBorgne 模型的建模思路,建立了不规则桥梁排架横桥向抗震的数值分析模型.采用纤维梁柱单元模拟桥墩、盖梁的弯曲变形,零长度转动弹簧单元模拟桥墩纵筋在盖梁、桩基中的拔出引起的变形,通过剪切弹簧单元模拟桥墩剪切变形,并基于式(4)监测桥墩剪切破坏的发生时刻.注意到盖梁抗弯强度远大于桥墩,桥墩与盖梁相交处的节点位置发生破坏的可能性很小,模型中采用刚域处理.

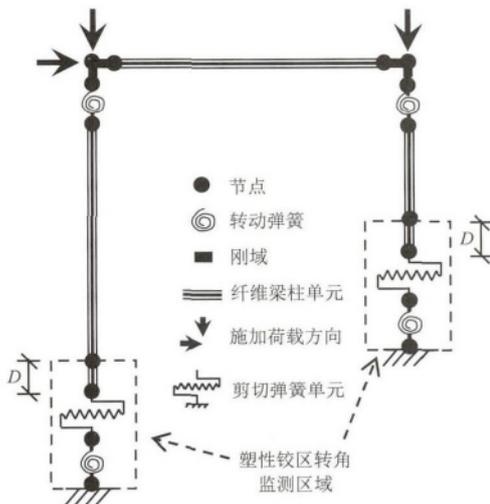


图7 不规则桥梁排架抗震分析模型

Fig. 7 Seismic analysis model for irregular bridge bents

需要说明,本文主要目的在于发展不规则桥梁排架的抗震分析模型,现仅以墩底以上部分作为分析对象,数值模型中墩底按固结考虑.由于盖梁刚度远大于桥墩,因此实际桥墩受力状态接近于两端固结的双曲型.桥墩剪力沿墩高不变,且底部和顶部承受同样的弯矩.因此,墩底和墩顶的破坏概率相似,本文模型中仅在墩底建立剪切弹簧单元,通过监测墩底  $D$  高度范围内的转角(包括墩底转动弹簧转角)确定桥墩剪切破坏发生时刻,这种建模方式可大大提高模型收敛性<sup>[6]</sup>.详细模型如图7所示.

另外需要说明的是,横桥向地震作用下桥墩实际承受变轴力作用,式(4)定义的剪切破坏点与轴压比有关,考虑到高轴压更易引起桥墩剪切破坏,因此基于式(4)计算剪切破

坏点利用的是桥墩可能承受的高轴压值.桥墩具体承受的轴力值可先利用纤维梁柱单元建立排架抗震数值分析模型,通过静力 Pushover 分析获得.此时模型仅采用了纤维梁柱单元,与本文发展的不规则桥梁排架抗震分析模型相比,不包含考虑桥墩剪切破坏的剪切弹簧单元和考虑纵筋拔出变形的转动弹簧单元.基于纤维梁柱单元的排架抗震分析模型可对剪切破坏前排架桥墩的轴力进行较为准确的估计<sup>[19]</sup>.

在不规则桥梁排架的抗震分析模型中,式(4)计算的剪切破坏点为高轴压下计算的固定值,即墩柱的抗剪能力保持不变,不再考虑由于变轴力导致的抗剪能力变化.

## 3 不规则桥梁排架抗震能力

### 3.1 不规则桥梁排架滞回反应

基于图7建立的不规则桥梁排架抗震分析模型,对6~8号排架进行横桥向加载下滞回性能的模拟分析.图8为模拟得到的各排架总剪力-墩顶位移滞回曲线以及排架各桥墩的剪力-墩顶位移滞回曲线,图中同时标出了各桥墩剪切破坏的时刻.显然,左墩及右墩剪力之和为排架总剪力.

由于一般以剪跨比 2.0 作为短柱和正常桥墩的分界线,6号排架左墩和右墩横桥向

剪跨比分别为 2.2 和 2.0, 存在剪切破坏风险. 从模拟结果看, 总滞回曲线及各桥墩滞回曲线总体来看较为饱满, 当墩顶侧向位移达到 140mm 时, 左墩与右墩均发生剪切破坏, 此时左墩侧移角为 1.85%, 右墩侧移角为 2.3%.

对 7 号排架, 横桥向左墩和右墩剪跨比分别为 2.0 和 1.7, 桥墩较 6 号排架剪切破坏风险增大. 从模拟结果看, 排架总滞回曲线及左、右桥墩滞回曲线在加载早期较为饱满, 呈弯曲破坏特征. 当墩顶侧向变形达 100mm 时, 右墩发生剪切破坏, 对应侧移角为 2.0%, 墩顶变形为 120mm 时, 左墩发生剪切破坏, 对应桥墩侧移角为 2.0%. 且剪切破坏引起排架及各桥墩滞回曲线发生显著的强度、刚度退化.

对 8 号排架, 由于两侧墩高相差较大, 左墩及右墩横桥向剪跨比分别为 1.8 和 0.8, 右墩为超短柱, 极易发生剪切破坏. 从模拟结果来看, 两桥墩发生剪切破坏的时刻差别较大. 当墩顶侧向变形为 40mm 时, 右墩剪切破坏, 桥墩侧移角为 1.6%; 墩顶侧向变形为 100mm 时, 左墩发生剪切破坏, 对应桥墩侧移角为 1.8%. 且剪切破坏后左、右两桥墩均发生显著的强度和刚度退化.

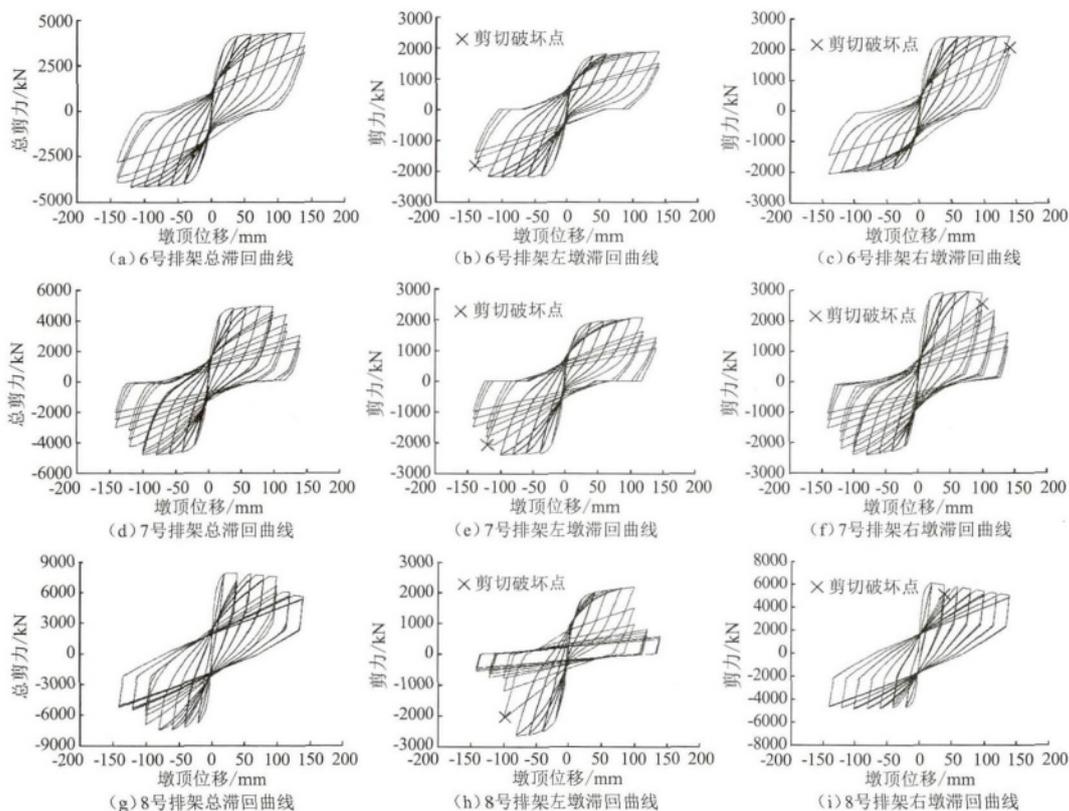


图 8 不规则桥梁排架滞回曲线

Fig. 8 The hysteretic curves of the irregular bridge bents

### 3.2 不规则桥梁排架轴力变化

图 9 为模拟得到的桥墩轴压比随墩顶侧向位移变化情况, 图中同时标出了桥墩发生剪切破坏的时刻. 可以看出, 各桥墩初始轴压比约为 0.15, 在横桥向地震作用下, 排架桥

墩承受显著的变轴力作用. 初始加载阶段, 随侧向位移增大, 桥墩轴压比变化幅度逐渐增大. 之后, 由于桥墩屈服, 轴压比变化幅度随侧向位移增加不再变化, 基本保持为恒定, 各桥墩轴压比变化范围约为 0.08 ~ 0.22. 桥墩剪切破坏发生后, 随侧向承载力降低, 桥墩轴压比变化幅度减少.

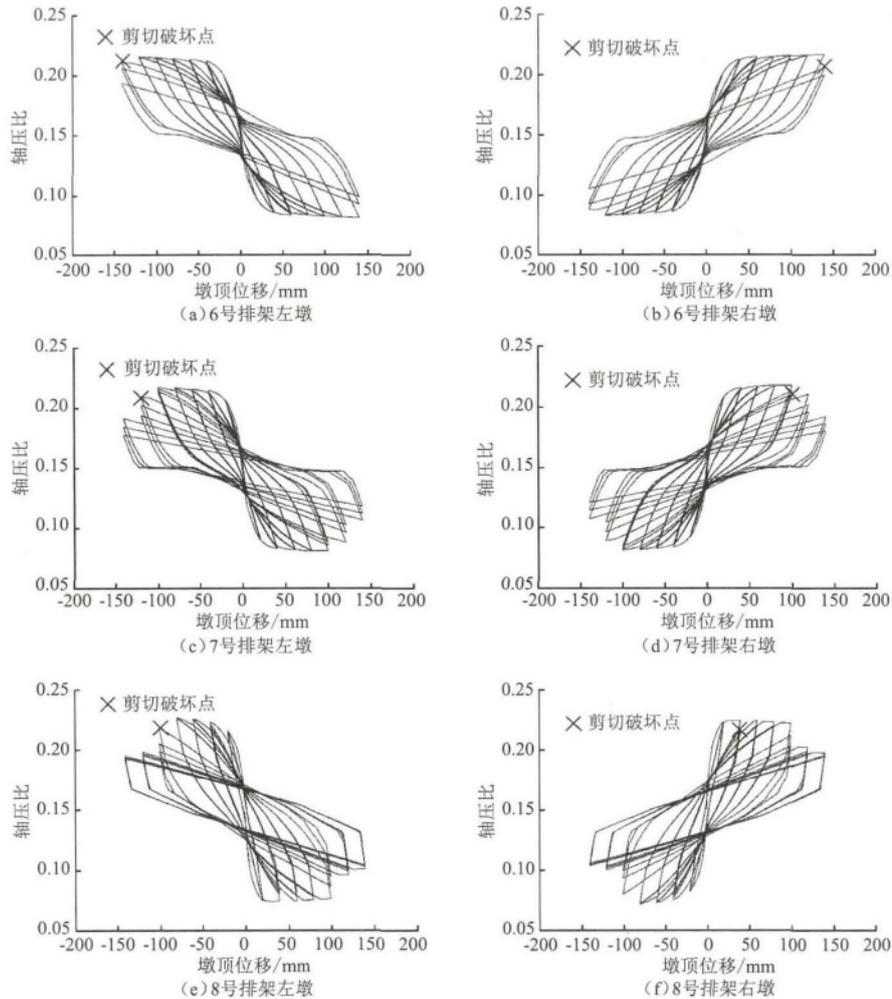


图9 不规则桥梁排架桥墩轴压比

Fig.9 Axial load ratio for the piers of the bridge bents

## 4 结论

本文以 LeBorgne 建立的钢筋混凝土墩柱弯剪数值分析模型为基础, 基于试验结果并结合数值分析手段, 发展了圆形截面钢筋混凝土桥墩抗震性能模拟的数值分析模型. 并以此为基础, 建立了考虑桥墩剪切破坏的不规则桥梁排架抗震数值分析模型, 并应用于 3 个实际桥梁排架的抗震性能分析. 主要研究结论为:

(1) 剪切破坏发生时圆形截面桥墩塑性铰区转角随轴压比、箍筋间距增大而减少, 随剪跨比和力学含箍率增加而增加;

(2) 建立的圆形截面钢筋混凝土桥墩抗震弯剪数值分析模型具有足够的精度,可对剪切及弯剪破坏圆形截面桥墩滞回性能进行准确的模拟分析;

(3) 建立的不规则桥梁排架抗震分析模型可有效模拟桥墩剪切破坏发生时刻,以及剪切破坏后桥墩强度、刚度的退化行为,为此类构件抗震性能分析提供了依据;

(4) 不规则桥梁排架的滞回分析结果表明,在横桥向地震力作用下,桥墩承受显著的变轴力作用. 桥墩屈服前,轴压比变化幅度随侧向位移增加而增大. 屈服后至剪切破坏前,随侧向位移增加,桥墩轴压比变化幅度基本保持稳定. 剪切破坏发生后,由于桥墩侧向承载力显著退化,桥墩轴压比变化幅度减小.

### 参 考 文 献

- [1] 李小军,贺秋梅,齐兴军. 地震动速度脉冲对大跨斜拉桥减震控制的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(2): 272-285  
Li Xiaojun, He Qiumei, Qi Xingjun. Seismic mitigation control effects of long-span cable-stayed bridges to ground motions with velocity pulse[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(2): 272-285
- [2] Ceresa P, Petrini L, Pinho R. Flexure-shear fiber beam-column elements for modeling frame structures under seismic loading-State of the art[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2007, 11(S1): 46-88
- [3] Xu S Y, Zhang J. Hysteretic shear-flexure interaction model of reinforced concrete columns for seismic response assessment of bridges[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2011, 40(): 315-337
- [4] Lee D H, Elnashai A S. Seismic analysis of RC bridge columns with flexure-shear interaction[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2000, 127(5): 546-553
- [5] Elwood K J. Modelling failures in existing reinforced concrete columns[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004, 31(5): 846-859
- [6] LeBorgne M R. Modeling the post shear failure behavior of reinforced concrete columns[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2012
- [7] Setzler E J, Sezen H. Model for the lateral behavior of reinforced concrete columns including shear deformations[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(2): 493-511
- [8] Ghannoum W M, Moehle J P. Rotation-based shear failure model for lightly confined RC columns[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2012, 138(10): 1267-1278
- [9] 孙治国, 王东升, 李宏男, 等. 钢筋混凝土桥墩弯剪数值分析模型[J]. 计算力学学报, 2013, 30(2): 249-254  
Sun Zhiguo, Wang Dongsheng, Li Hongnan, et al. Flexural-shear analysis model for reinforced concrete bridge piers[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013, 30(2): 249-254
- [10] Zhao J, Sritharan S. Modeling of strain penetration effects in fiber-based analysis of reinforced concrete structures[J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(2): 133-141
- [11] Ghee A B, Priestley M J N, Paulay T. Seismic shear strength of circular reinforced concrete columns[J]. ACI Structural Journal, 1989, 86(1): 45-59
- [12] Arakawa T, He M X, Arai Y, et al. Shear resisting behavior of reinforced concrete columns with spiral hoops[J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1998, 10: 155-162
- [13] Petrovski J, Ristic D. Reversed cyclic loading test of bridge column models[R]. Report IZIIZ 84-164, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, 1984
- [14] Wong Y L, Pauly T, Priestley M J N. Response of circular reinforced concrete columns to multi-directional seismic attack[J]. ACI Structural Journal, 1993, 90(2): 180-191
- [15] Priestley M J N, Benzoni G. Seismic performance of circular columns with low longitudinal reinforcement ratios[J]. ACI Structural Journal, 1996, 1996, 93(4): 1-12
- [16] Kenchiku K S. Aseismic analysis of building structural members: a list of experimental results on deformation ability of reinforced concrete columns under large deflection( No. 3) [R]. Japan: Building Research Institute, Ministry of Construction, 1978
- [17] Hamilton C H, Pardoen G C, Kazanjy R P. Experimental testing of bridge columns subjected to reversed-cyclic and

- pulse-type loading histories [R]. Report 2001-03 ,Civil Engineering Technical Report Series. Irvine: University of California 2002
- [18] 邓宗才,李辉. 预应力钢绞线加固混凝土短柱抗震性能研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(5): 941-951  
Deng Zongcai ,Li Hui. Seismic behavior of RC columns strengthened with prestressed steel wires [J]. Journal of Basic Science and Engineering 2014 22(5): 941-951
- [19] 张永亮,陈兴冲. 客运专线大跨斜拉桥减震方案优化分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(1): 160-169  
Zhang Yongliang ,Chen Xingchong. Optimization analysis of the seismic damping scheme for long-span cable-stayed bridges on a passenger-dedicated railway line [J]. Journal of Basic Science and Engineering 2014 22(1): 160-169

## Seismic Analysis model for Irregular Bridge Bents Considering Shear Failure of the Piers

SUN Zhiguo<sup>1</sup> , LI Hongnan<sup>2</sup> , SI Bingjun<sup>2</sup> , CHEN Can<sup>2</sup> , WANG Dongsheng<sup>2</sup>

(1. Institute of Disaster Prevention ,Sanhe 065201 ,China; 2. Faculty of Infrastructure Engineering ,Dalian University of Technology ,Dalian 116024 ,China)

### Abstract

Seismic analysis model for irregular bridge bents considering shear failure of the piers was built based on OpenSees platform. The seismic analysis model for the bents consisted of fiber beam-column element that connected in series with shear spring and rotational spring elements. Fiber beam-column element was used to model the flexural deformation of the piers and cap beams ,while shear and slip deformation of the piers were modeled by shear spring and rotational spring elements ,respectively. A shear failure model relates shear failure to circular pier end rotation ,was derived based on collected test results and numerical analysis ,and the model was used to monitor shear failure initiation of the bridge piers in the seismic analysis model for irregular bridge bents. Before shear failure ,the seismic behavior of the pier was dominated by flexural response. Once shear failure was detected ,the seismic analysis model initiated lateral-strength and stiffness degradation. At last ,the hysteretic behavior of 3 irregular bridge bents under bridge transverse seismic action are simulated by the proposed seismic analysis model ,and the strength and stiffness degradation of the bents as a result of the pier shear failure could be predicted. The model would provide references for seismic analysis of irregular bridges.

**Keywords:** seismic design of bridges; irregular bridge bents; flexural-shear analysis; shear failure of the piers; OpenSees