

山区桥梁排架抗震能力评价方法

孙治国¹, 司炳君¹, 陈 灿¹, 王东升²

(1. 大连理工大学 建设工程学部 辽宁 大连 116024; 2. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026)

摘 要: 排架在山区桥梁工程中应用广泛, 其横桥向地震破坏机理复杂且缺乏工程实用的抗震分析手段。通过拟静力和动力时程分析给出了山区桥梁排架抗震能力评估的一般性方法, 借助纤维梁柱单元并结合截面抗剪强度模型, 首先基于静力分析手段确定了排架桥墩可能的破坏模式及排架变形能力。在此基础上通过动力时程分析, 揭示不同地震动强度下排架的破坏模式和变形能力。以某山区桥梁 2 个排架墩为例, 将建立的评价方法对排架横桥向抗震能力进行评价。结果表明: 横桥向在地震作用下, 排架桥墩承受显著的变轴力作用, 桥墩屈服前, 随侧向位移增大, 桥墩轴压变化范围逐渐增大, 桥墩屈服后轴压变化范围基本稳定; 且变轴力易引起排架桥墩发生剪切破坏。该方法可为桥梁排架结构抗震设计和评估提供参考手段。

关键词: 桥梁抗震; 桥梁排架; 抗震性能; 弯剪破坏; 数值分析

中图分类号: U448

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.18.001

Seismic analysis method for RC bridge bents in mountain areas

SUN Zhi-guo¹, SI Bing-jun¹, CHEN Can¹, WANG Dong-sheng²

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Bents are widely used as bridge columns in mountain areas. The seismic failure mechanism of the bents is complex under transverse seismic actions. Also, no practical seismic analysis method is available to evaluate the seismic behavior of the bents. A practical seismic analysis method for RC bridge bents in mountain areas was proposed based on the quasi-static and dynamic time-history analysis. The failure mode of the pier and the deformation capacity of the bent were analysed by using the fiber column element and shear strength model for column section. Then, the failure mode and deformation capacity of the bent under different ground motion intensity were revealed according to the time-history analysis. The seismic behaviors of 2 bridge bents in one bridge in mountain areas were evaluated by the proposed method. It is found that the axial load of the piers in the bent will be changed significantly as a result of the transverse seismic action. Before yielding of the pier, the variation range of the axial load increases as the lateral displacement increases. After yielding of the pier, the range will change no more and the variable axial load would lead to shear failure of the piers. The results provide reference to the seismic design and analysis of bridge bents.

Key words: seismic design of bridge; bridge bents; seismic behavior; flexural-shear failure; numerical analysis

桥梁排架在我国山区桥梁工程中占有相当大的比例, 因受山区斜坡地形限制, 排架各桥墩高度在横桥向可能存在较大差异, 易形成矮墩, 为典型的不规则结构。另外, 横桥向在地震作用下, 即使不考虑竖向地震动影响, 桥墩仍会承受明显的变轴力作用, 对其抗震能

力不利^[1-2]。实际上, 自 1994 年 Loma Prieta 地震中 Cypress 双层桥梁排架发生严重倒塌破坏后, 在 1995 年日本 Kobe 地震、1999 年我国台湾集集地震以及 2008 年汶川大地震中, 桥梁排架结构均遭受了不同程度的震害, 凸显其抗震能力的薄弱性^[3-4]。Loma Prieta 地震后, Cypress 双层高架桥的震害引发了人们对桥梁排架抗震问题研究的热潮。在延性抗震设计的理论框架内, 众多学者针对排架节点地震破坏机理与构造细节^[5]、排架结构体系地震反应^[6-7]及抗震加固策略^[8]等进行了一系列的试验研究和理论分析工作, 为保证桥梁排架延性抗震设计目标的实现奠定了基础。

基金项目: 国家自然科学基金(51008041, 51178071); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0751); 中国博士后科学基金(2013M540226, 2014T70250)

收稿日期: 2014-06-10 修改稿收到日期: 2014-09-12

第一作者 孙治国 男, 博士后, 讲师, 1980 年生

由于结构形式的特殊性,桥梁排架实际抗震能力评估较为复杂,对不规则桥梁排架抗震分析所面临的轴力-弯矩耦合效应、短柱桥墩剪切破坏等的模拟和分析,缺乏既具有相当计算精度,且工程实用的抗震分析手段。Marsh等^[9]基于DRAIN-2D软件建立了排架抗震的数值分析模型,讨论了桥墩抗弯能力对排架地震反应的影响。Zhang等^[10]改进了桥梁抗震分析软件NEABS,基于梁柱单元并考虑构件损伤,建立了抗震加固排架分析模型。Jeremić等^[11]以一座实际桥梁排架抗震能力评价为背景,基于OpenSees软件建立了考虑桩-土-结构效应的抗震分析模型。Johnson等^[12]则分别通过SAP2000和DRAIN-3DX软件讨论了排架抗震能力评估的建模方法。Pantelides等^[13]发展的排架抗震分析模型则基本以DRAIN-2D软件为工具。应当注意到,上述研究以构件层次经典的恢复力模型或纤维梁柱单元为主要分析工具,目的在于获得排架在地震动下的地震力或变形需求,以构件不发生剪切破坏为基本假定。这与排架桥墩所面临的实际剪切破坏风险不符。

本文给出了桥梁排架抗震能力评估的一般性方法,并以一座山区实际桥梁工程为例,对2座排架横桥向抗震能力进行了分析计算,为排架实际抗震能力的认识和评估提供依据。

1 不规则桥梁排架抗震评估方法

1.1 桥梁排架抗震能力评估的难点

从抗震角度分析,排架盖梁、节点为能力保护构件,一般要求不发生屈服,系梁为耗能构件,地震下允许通过其屈服耗能。排架抗震关注的重点在于桥墩,排架桥墩抗震的难点在于:①横桥向在地震作用下,由于倾覆力矩的影响,桥墩承受显著的变轴力影响,这要求数值模型中能够有效考虑桥墩轴力-弯矩的耦合效应;②由于地形限制和排架中盖梁、系梁的影响,桥墩易形成短柱,强震下可能发生剪切破坏,这要求排架抗震性能评估必须考虑桥墩可能的剪切破坏风险。

目前,纤维梁柱单元在钢筋混凝土结构的非线性数值分析中获得了广泛应用,可有效模拟轴力-弯矩耦合作用下结构的受力及变形反应。在纤维梁柱单元基础上,外加零长度转动弹簧单元模拟纵筋拔出变形,可对弯曲反应控制的钢筋混凝土结构非线性地震反应进行较准确的模拟分析^[14]。

对墩柱剪切破坏模式的判别,一般基于纤维梁柱单元计算构件抗弯能力曲线,并与构件抗剪能力曲线对比(见图1)。抗剪与抗弯能力曲线的交汇点即为墩柱发生剪切破坏对应的变形能力。应当注意,目前各国主要抗震规范及学者建议的桥墩抗剪强度分析模

型,基本以悬臂柱构件的拟静力试验结果为依据建立,且构件变形能力一般以位移延性系数形式给出。而桥梁排架为多次超静定体系,根据纤维梁柱单元仅能获得排架整体结构抗弯能力曲线,这就使目前通用的墩柱弯剪判别模式不适用于桥梁排架结构的分析。

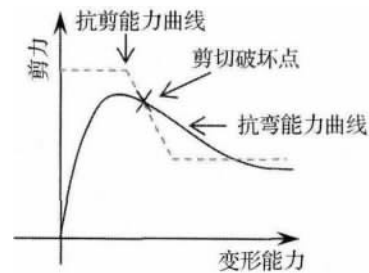


图1 墩柱剪切破坏的判别方法

Fig. 1 Method for determining shear failure of the bridge piers

1.2 排架抗震能力评估方法

由于变轴力的影响和排架本身为超静定体系,在悬臂构件基础上建立的桥墩弯剪分析模型无法应用于排架桥墩,应寻求在曲率延性系数角度对桥墩危险截面进行抗剪分析。本文初步建立的桥梁排架抗震能力评估方法为:首先基于静力Pushover分析确定排架在横桥向地震作用下的轴力变化范围、危险截面及反弯点位置;通过与桥墩截面抗剪强度模型对比在静力范畴确定桥墩危险截面破坏模式及排架整体变形能力。然后通过动力时程分析获得不同地震动强度下排架破坏模式及变形能力。

(1) 基于纤维梁柱单元建立排架抗震非线性数值分析模型,基于拟静力加载手段分析确定排架各构件屈服顺序、桥墩轴压变化、排架侧向荷载-墩顶位移滞回反应等。

(2) 根据各构件屈服顺序判断排架桥墩抗震危险截面,利用拟静力加载获得的塑性阶段弯矩分布情况,确定桥墩危险截面至反弯点的高度。

(3) 根据排架桥墩设计情况,以及拟静力加载计算的桥墩轴压变化范围,在曲率延性范畴计算桥墩危险截面抗剪强度,可按照Priestley抗剪强度模型计算^[15-16]:

$$V_n = V_c + V_p + V_s \quad (1)$$

$$V_c = k \sqrt{f'_c} (0.8A_g) \quad (2)$$

$$V_p = \frac{D - c}{2a} P \quad (3)$$

对圆形截面墩柱:

$$V_s = \frac{\pi}{2} \frac{A_{st} f_{yt} D'}{s} \cot \theta \quad (4)$$

式中: f'_c 为混凝土抗压强度, A_g 为桥墩截面积, D 为截

面直径 ρ 为截面受压区高度。 P 为轴力,由于变轴力影响,桥墩在两个方向的轴力取进入塑性阶段后的稳定值。 a 为桥墩墩底至反弯点高度, A_b 为箍筋截面面积; f_{yt} 为箍筋屈服强度; D' 为自箍筋中心计算的截面核心直径尺寸; s 为箍筋竖向间距; θ 为剪切裂缝与墩柱轴线的夹角,取为 30° ; k 为考虑混凝土抗剪强度退化系数,本文根据曲率延性系数计算,可取为:

$$k = 0.29 \quad \mu_\phi \leq 3.0 \quad (5)$$

$$k = 0.29 - 0.0475(\mu_\phi - 3) \quad 3.0 < \mu_\phi \leq 7.0 \quad (6)$$

$$k = 0.1 - 0.00625(\mu_\phi - 7) \quad 7.0 < \mu_\phi \leq 15.0 \quad (7)$$

$$k = 0.05 \quad \mu_\phi > 15.0 \quad (8)$$

(4) 将式(1) ~ 式(8)计算的桥墩危险截面抗剪强度与基于纤维模型计算的排架危险截面剪力 - 曲率关系进行对比,即可获得不同加载方向下桥墩是否发生剪切破坏及剪切破坏对应的截面曲率延性系数值。同时,排架整体侧向变形能力也可获得。此位移值即为排架在地震作用下可达到的最大变形能力。

(5) 对排架模型进行动力时程分析,获得不同 PGA 下的排架桥墩危险截面剪力 - 曲率滞回关系,与式(1) ~ 式(8)进行对比,可判断不同 PGA 下桥墩是否发生剪切破坏及破坏时对应的排架变形能力。

图 2 给出了排架抗震性能的评估流程。

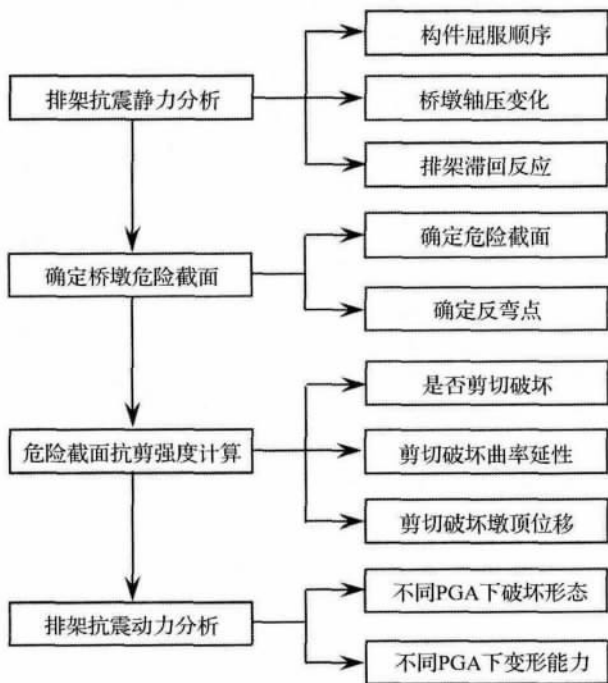


图 2 排架抗震性能评估流程

Fig. 2 Seismic evaluation sequence for bridge bents

2 示例工程概况及分析模型建立

2.1 示例工程概况

以云南省大理 - 丽江高速公路水东瓜山 2 号大桥为工程背景进行分析说明,该桥下部结构为双柱式排架,

由于受地形限制,部分桥墩沿桥梁横向高度不一致。本文选取具有代表意义的 1 号排架和 4 号排架进行说明。图 3 为排架设计情况,墩柱为直径 1 500 mm 圆形墩,纵筋为 32 根直径 28 mm 的 HRB335 钢筋,箍筋为直径 12 mm 的 HPB235 光圆钢筋,螺旋状配箍,塑性铰区箍筋间距为 100 mm,其余为 200 mm。盖梁截面宽度 1 900 mm,高 1 850 mm,盖梁截面上下端纵筋为直径 32 mm 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。系梁截面宽度为 1 000 mm,高 1 200 mm,主要纵筋配置为上下端各配 9 根直径 28 mm 的 HRB335 钢筋。每根墩柱下部为单桩基础,圆形截面,直径 1 700 mm,纵筋为 32 根直径 28 mm 的 HRB335 钢筋。根据钻孔结合野外地质调查,桥位处地层岩性分别为粉质黏土、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩等。盖梁、墩柱、系梁、桩基等均采用 C30 混凝土。

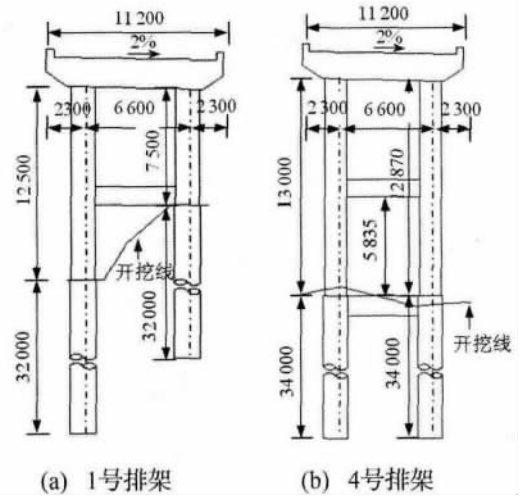


图 3 桥梁排架设计情况 (单位: mm)

Fig. 3 Design details of the bridge bents (units: mm)

2.2 数值分析模型建立

采用 OpenSees 软件建立了排架墩横桥向抗震数值分析模型,桥墩、盖梁、系梁均采用纤维梁柱单元模拟,混凝土本构关系采用 Kent-Park 受压应力 - 应变关系,不考虑混凝土的受拉强度和刚度。钢筋本构关系采用 Giuffre-Menegotto-Pinto 模型,考虑了包辛格效应。地震作用下,桥墩纵筋在与墩底、盖梁、系梁连结处,以及系梁纵筋在与桥墩连结处会产生拔出变形,且对试件变形能力及初始刚度产生显著影响,采用零长度转动弹簧单元模拟纵筋拔出变形^[17-18];梁柱节点部分按刚域处理。数值模型中考虑了桩 - 土相互作用的影响,桩基采用纤维梁柱单元模拟,桩与土的作用简化为土弹簧对桩基的约束作用,土弹簧的刚度按“m 法”计算。模型详细情况见图 4。

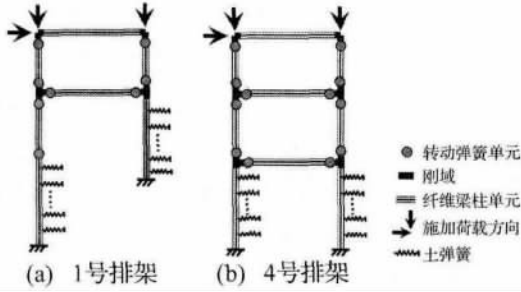


图4 排架数值分析模型

Fig. 4 Numerical analysis model for the bridge bents

3 静力加载下排架抗震能力

3.1 排架构件屈服顺序及危险截面确定

基于静力 Pushover 分析研究了排架各构件塑性铰的形成顺序,对不规则结构,在不同方向侧向荷载下,排架各构件屈服顺序并不一致,但基本遵守先系梁后桥墩的顺序。图5为向右推覆下,排架中塑性铰出现的先后情况,可以看出,无论是规则排架还是不规则排架,均为系梁首先屈服,随后墩柱上下端部才开始屈服,盖梁由于刚度大,始终不屈服。

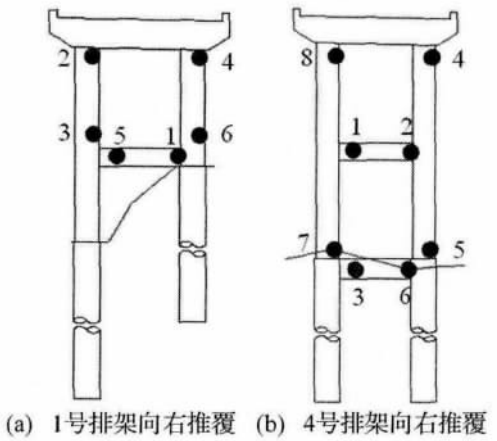


图5 侧向推覆分析下塑性铰出现顺序

Fig. 5 The order for formation of each plastic hinge in the bents under pushover analysis

根据图5中的分析结果,可以看出向右推覆下,1号排架左侧桥墩墩顶,4号排架右侧桥墩墩顶最早屈服,是桥墩危险截面。但4号排架左右两侧桥墩高度相差不多,基本为规则排架,两侧墩顶屈服对应的荷载值较为接近,本文中均以左侧桥墩墩顶作为危险截面进行分析。

3.2 桥墩轴压比变化

图6为排架左右两侧桥墩墩顶位移-轴压比的变化情况。从图中轴压比的变化可以看出,随正向位移增大,左侧桥墩的轴压比逐渐减小,右侧桥墩轴压比逐渐增大;随负向位移增大,则表现出相反的趋势,造成桥墩轴压比变化的主要原因是倾覆力矩的影响。对本

文而言,桥墩初始轴压比约为0.15,随侧向位移变化,轴压比在0.08~0.22之间变化,且在弹性阶段,桥墩轴压比变化范围随侧向位移增加而增加,进入塑性阶段至结构倒塌破坏前,轴压比变化范围则基本稳定。轴力变化会影响桥墩的抗弯强度、抗剪强度和弹塑性变形能力,同时可能对其破坏形态产生影响,工程设计中应引起重视。

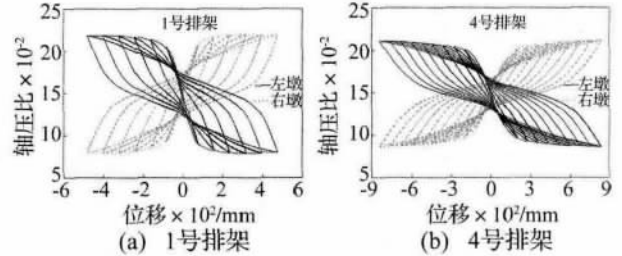


图6 桥墩中轴压比变化情况

Fig. 6 Changes of axial load ratio in the pier

3.3 排架滞回曲线及桥墩反弯点位置

图7为排架基底总剪力-墩顶位移滞回曲线及左墩、右墩剪力-墩顶位移滞回曲线。可以看出,基底总剪力-墩顶位移滞回曲线是对称的,而左右两侧桥墩由于轴压比的变化,滞回曲线呈明显不对称状态。

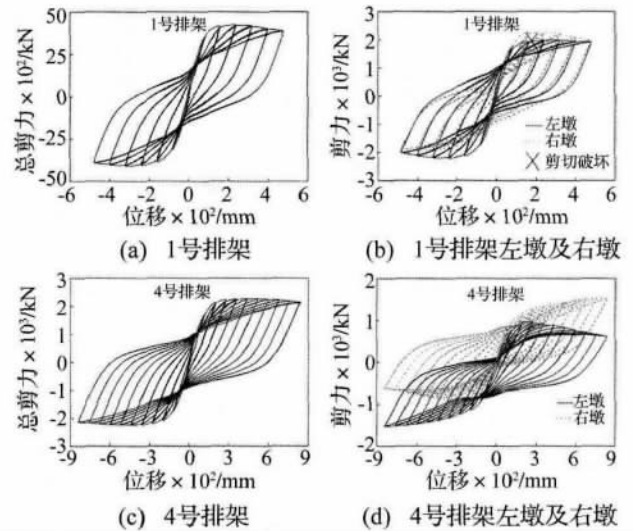


图7 排架滞回曲线

Fig. 7 The hysteretic curves of the bents

为根据式(1)~式(8)计算桥墩危险截面抗剪强度,需要计算桥墩截面至反弯点高度 a ,由于侧向加载方向和侧向荷载大小不同,桥墩反弯点实际上是动态变化的。注意到桥墩屈服后,随墩顶侧向位移增加,桥墩各截面承受的弯矩变化不大,因此桥墩中反弯点位置变化不大,本文以桥墩屈服后的弯矩分布情况确定反弯点高度 a 。由于本文关心的是左侧桥墩墩顶截面抗剪能力,桥墩进入塑性阶段后的弯矩图及反弯点高度 a (见图8)。

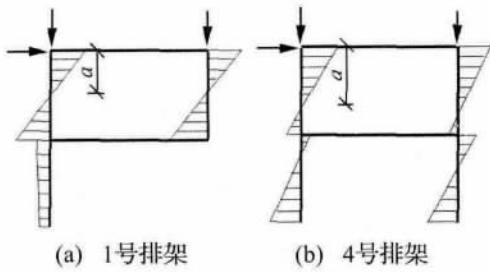


图 8 桥墩进入塑性阶段后的弯矩图

Fig. 8 Bending moment diagram of the piers after yielding

3.4 危险截面抗剪承载力及排架变形能力分析

基于 OpenSees 的纤维单元模型仅考虑了试件的弯曲反应,忽略了结构实际存在的剪切破坏可能。为评价排架桥墩实际存在的剪切破坏风险,基于 Priestley 抗剪强度模型^[15-16]在构件截面曲率延性范畴评价桥墩可能的破坏模式。本文均选取左侧桥墩墩顶截面为研究对象,根据纤维单元模型计算的截面剪力-曲率关系(代表截面抗弯能力)并与 Priestley 抗剪强度模型(代表截面抗剪能力)进行对比(见图 9)。可以看出,对 1 号排架左侧桥墩,墩顶截面曲率延性系数达到 10.5,对应墩顶侧向位移为 192 mm 时,桥墩发生剪切破坏,即 1 号排架左墩可达到的最大侧向位移为 192 mm,之后发生剪切破坏。图 9(a)和图 7(b)中,墩柱剪切破坏点均已标出。对 4 号排架左侧桥墩,墩顶曲率延性系数超过 15,墩顶位移达到 840 mm 时,桥墩仍未发生剪切破坏。

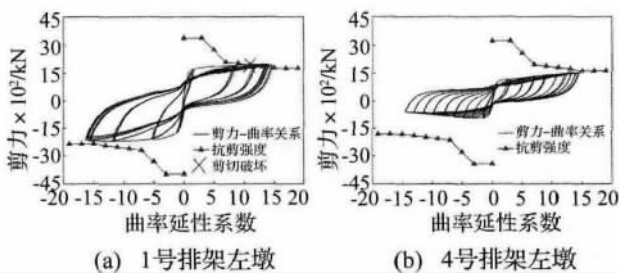


图 9 桥墩抗剪强度与抗弯能力对比

Fig. 9 Comparison between the shear strength and flexural strength of the piers

4 排架抗震能力动力分析

对排架进行静力加载下抗震能力分析的目的在于确定:① 桥墩危险截面,② 截面抗剪强度,③ 桥墩破坏模式,④ 排架变形能力。在此基础上对排架进行动力分析,确定不同地震动强度下排架桥墩破坏模式及变形能力。

选择集集地震中具有显著近断层效应的 TCU054-EW 地震波,对排架横桥向进行动力时程分析,研究排架在实际地震动作用下的地震反应。应说明,结构实际动

力时程分析一般至少选取 3 条地震波,本文仅为介绍排架抗震能力动力评估方法,不代表排架实际的地震风险评估^[19-20]。

对 1 号排架,加速度峰值 PGA 分别调整为 0.2 g、0.4 g,仍以左墩墩顶截面为考察对象,时程分析获得截面剪力-曲率关系及与截面抗剪强度的对比见图 10。可以看出,PGA 为 0.2 g 时,截面曲率延性系数不超过 5,且截面抗剪强度大于抗弯强度,桥墩未发生剪切破坏,根据时程分析结果,排架最大变形能力约为 130 mm。PGA 为 0.4 g 时,截面抗剪强度低于抗弯需求对应的剪力值,桥墩发生剪切破坏,排架的最大变形能力与静力分析时桥墩剪切破坏对应的变形能力一致,为 192 mm,仅为墩高的 1.5%,即 1 号排架实际是由于桥墩剪切破坏引起的倒塌。

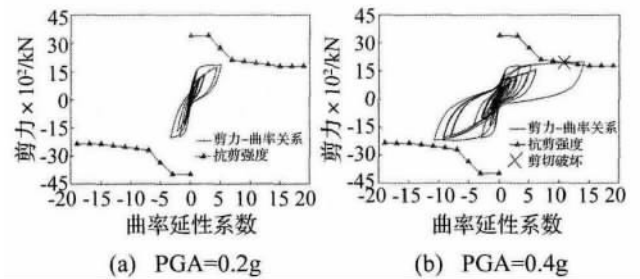


图 10 1 号排架左墩时程分析结果

Fig. 10 Time-history analysis results of the left pier in bent 1

对 4 号排架墩,输入 PGA 分别为 0.4 g 和 0.6 g 下,排架左墩顶截面剪力-曲率关系及与截面抗剪强度的对比见图 11。可以看出,PGA 达到 0.6 g 时,左墩抗剪强度仍大于抗弯强度对应的剪力值,试件以弯曲变形为主,未发生剪切破坏。注意时程分析结果显示,排架最大变形能力为 1 200 mm,超过墩高的 9%,已超过桥墩弯曲破坏可达到的最大变形值^[21],排架实际会由于桥墩抗弯能力不足引起倒塌。

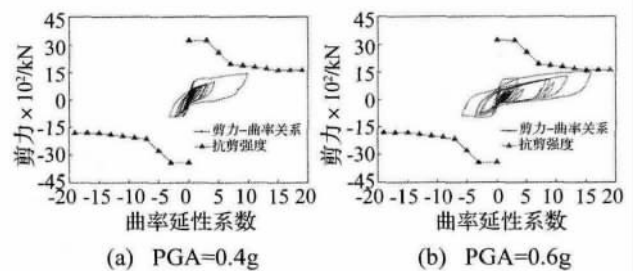


图 11 4 号排架左墩时程分析结果

Fig. 11 Time-history analysis results of the left pier in bent 4

5 结论

本文建立了山区桥梁排架抗震能力的评估方法,以纤维梁柱单元建立排架抗震数值分析模型,首先基

于静力分析手段获得桥墩在横桥向地震作用下的轴力变化范围,确定桥墩危险截面及反弯点位置,并基于危险截面的抗剪强度分析获得静力加载下桥墩破坏模式及排架变形能力。在此基础上,通过动力时程分析手段,揭示不同地震动强度下排架桥墩倒塌破坏模式及变形能力。最终以某山区桥梁2座排架墩为例,对其抗震性能进行了评价,本文主要结论为:

(1) 横向地震作用下,排架桥墩承受显著的变轴力影响,桥墩屈服前,轴力变化幅度随侧向位移增大而增大;桥墩屈服至倒塌破坏,轴力变化幅度不再增加。

(2) 不规则桥梁排架在横桥向地震作用下,桥墩存在很大剪切破坏风险,抗震设计及分析时应予以注意。

参考文献

- [1] Esmaily A, Xiao Y. Behavior of reinforced concrete columns under variable axial loads [J]. *ACI Structural Journal*, 2004, 101(1): 124-132.
- [2] 王东升, 司炳君, 孙治国, 等. 地震作用下钢筋混凝土桥墩塑性铰区抗剪强度试验 [J]. *中国公路学报*, 2011, 24(2): 34-41.
WANG Dong-sheng, SI Bing-jun, SUN Zhi-guo, et al. Experiment on shear strength of reinforced concrete bridge column in plastic hinge zone under seismic effect [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2011, 24(2): 34-41.
- [3] Kunnath S K, Gross J L. Inelastic response of the Cypress viaduct to the Loma Prieta Earthquake [J]. *Engineering Structures*, 1995, 17(7): 485-493.
- [4] 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.
WANG Dong-sheng, GUO Xun, SUN Zhi-guo, et al. Damage to highway bridges during Wenchuan earthquake [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2009, 29(3): 84-94.
- [5] Shattarat N K, Mclean D I. Seismic behavior and retrofit of outrigger knee joints [J]. *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 2007, 12(5): 591-599.
- [6] Paolacci F, Giannini R. An experimental and numerical investigation on the cyclic response of a portal frame pier belonging to an old reinforced concrete viaduct [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2012, 41(6): 1109-1127.
- [7] 彭天波, 李建中, 胡世德, 等. 双层高架桥的抗震性能 [J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(10): 1355-1359.
PENG Tian-bo, LI Jian-zhong, HU Shi-de, et al. Seismic performance of a double-deck viaduct [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2004, 32(10): 1355-1359.
- [8] Pantelides C P, Fitzsimmons G. Case study of strategies for seismic rehabilitation of reinforced concrete multicolumn bridge bents [J]. *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 2012, 17(1): 139-150.
- [9] Marsh M L, Brown C B. Effects of column flexural strength on the seismic response of a multiple-column bridge bent [J]. *Earthquake Spectra*, 1994, 10(4): 757-776.
- [10] Zhang Y, Cofer W F, Mclean D I. Analytical evaluation of retrofit strategies for multicolumn bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 1999, 4(2): 143-150.
- [11] Jeremić B, Kunnath S, Xiong F. Influence of soil-foundation-structure interaction on seismic response of the I-880 viaduct [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(3): 391-402.
- [12] Johnson N, Saiidi M S, Sanders D. Nonlinear earthquake response modeling of a large-scale two-span concrete bridge [J]. *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 2009, 14(6): 460-471.
- [13] Pantelides C P, Duffin J B, Reaveley L D. Seismic strengthening of reinforced-concrete multicolumn bridge piers [J]. *Earthquake Spectra*, 2007, 23(3): 636-664.
- [14] Yavari S, Elwood K J, Wu C L. Collapse of a nonductile concrete frame: evaluation of analytical models [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2009, 38(2): 225-241.
- [15] Priestley M J N, Verama R, Xiao Y. Seismic shear strength of reinforced concrete columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1994, 120(8): 2310-2329.
- [16] Kowalsky M J, Priestley M J N. Improved analytical model for shear strength of circular reinforced concrete columns in seismic regions [J]. *ACI Structural Journal*, 2000, 97(3): 388-396.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 樊健生, 刘晓刚, 李果, 等. 考虑双向地震作用的组合刚构桥抗震性能研究 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33(13): 135-141.
FAN Jian-sheng, LIU Xiao-gang, LI Guo, et al. Seismic performance investigation of composite rigid frame bridge under bi-directional seismic excitations [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(13): 135-141.
- [20] 孟杰, 刘钊, 张建东. 汶川地震回澜立交桥震害成因分析 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33(12): 99-105.
MENG Jie, LIU Zhao, ZHANG Jian-dong. Causation analysis of seismic failure for huilan flyover under wenchuan earthquake [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(12): 99-105.
- [21] 孙治国, 王东升, 杜修力, 等. 钢筋混凝土桥墩塑性铰区约束箍筋用量研究 [J]. *中国公路学报*, 2010, 23(3): 48-57.
SUN Zhi-guo, WANG Dong-sheng, DU Xiu-li, et al. Research on amount of confining reinforcement in potential plastic hinge regions of RC bridge columns [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, 23(3): 48-57.