

文章编号:1671-8879(2015)04-0076-07

桥台及台后填土破坏的桥梁 纵向地震碰撞响应

李晓莉^{1,2}, 孙治国^{1,2}, 王东升^{1,2}, 石 岩^{1,2}

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026; 2. 辽宁省公路工程重点实验室, 辽宁 大连 116026)

摘 要:以汶川地震中发生严重破坏的高原大桥为工程背景,采用“多模型多平台”分析技术研究了主梁与桥台及台后填土的纵向碰撞效应及对全桥地震反应的影响。首先利用 ANSYS 软件建立桥台及台后填土非线性数值分析实体模型,基于静力 Pushover 分析模拟其在主梁撞击下水平力-位移关系。将上述力-位移关系引入到 MIDAS 软件中,主要以间隙单元模拟桥台及台后填土与主梁的碰撞作用,并建立全桥抗震分析模型。通过非线性时程分析及与震害对比,讨论了桥台及台后填土破坏、伸缩缝处安装碰撞缓冲装置等情况下主梁与桥台间的纵向碰撞响应。研究结果表明:桥台及台后填土破坏将增大桥台伸缩缝处桥台与主梁间的相对位移,增加了落梁风险;由于地震动输入和桥台位置不同,碰撞缓冲装置对台、梁间碰撞力的影响存在不确定性,建议碰撞缓冲装置刚度宜取为桥台及台后填土整体抗推刚度的 1%~5%,并优先选用耗能型。

关键词:桥梁工程;桥梁抗震;碰撞;非线性时程分析;主梁-桥台-台后填土相互作用

中图分类号:U443.21; U442.54 **文献标志码:**A

Longitudinal seismic pounding effect of bridges abutment and backfilling damage

LI Xiao-li^{1,2}, SUN Zhi-guo^{1,2}, WANG Dong-sheng^{1,2}, SHI Yan^{1,2}

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China;

2. Key Laboratory of Highway Engineering of Liaoning Province, Dalian 116026, Liaoning, China)

Abstract: Taking the severely damaged Gaoyuan bridge in Wenchuan earthquake as background, the seismic longitudinal pounding effect among girder, abutment and backfilling, and the influence of pounding on the seismic behavior of the bridge were analyzed by using multi model-multi platform analysis method. Firstly, the nonlinear 3D finite element model for the abutment and backfilling in Gaoyuan bridge was developed by ANSYS software, and the lateral force-displacement relationship of the abutment under girder pounding was obtained by static pushover analysis. The force-displacement relationship of the abutment was introduced into MIDAS software to simulate pounding effect on the bridge based on gap element. Also, the seismic analysis model of Gaoyuan bridge was established. Longitudinal pounding effect between girder and abutment was studied by nonlinear time-history analysis

收稿日期:2015-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51008041,51178071);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0751);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(3132014073,3132014326)

作者简介:李晓莉(1977-),女,辽宁大连人,讲师,工学博士,E-mail:xiaoli_li_2014@163.com。

considering the damages to abutment and backfilling, and installation of pounding bumper device at expansion joint. Also, the analysis results were compared with those of damage investigation during Wenchuan earthquake. The results show that the pounding damage to abutment and backfilling would increase the gap between girder and abutment, and bridge superstructure may be unseated. Also, the influence of bumper device on pounding force between girder and abutment is random as a result of different earthquake excitations and abutment locations. It is finally suggested that the stiffness of pounding bumper device should be taken as 1%~5% of the abutment and backfilling stiffness, and energy dissipation device would be preferentially selected in order to decrease pounding effect between girder and abutment. 4 tabs, 7 figs, 17 refs.

Key words: bridge engineering; seismic design of bridge; pounding; nonlinear time history analysis; girder-abutment-backfilling interaction

0 引言

强烈地震作用下,钢筋混凝土主梁与桥台间因伸缩缝间距不足会发生明显的纵向碰撞,进而使得桥台发生严重破坏,导致主梁纵向位移增大,并可能引起落梁^[1-2]。桥台及台后填土对主梁纵向位移的约束效应及引起的全桥动力特性的改变即受到关注^[3]。而关于桥台及台后填土与全桥动力相互作用的研究重点在于获得其侧向力-位移关系的合理描述及对全桥动力反应的影响上。Wilson 等通过线性弹簧单元模拟桥台及台后填土的作用,并给出弹簧刚度的取值方法;其后,基于线弹性平面应变分析给出桥台横(桥)向和纵(桥)向刚度的计算方法,并根据 1 座实际桥梁的强震记录进行了对比^[4-5]; Shamsabadi 等基于极限平衡理论和试验结果,给出了桥台及台后填土的侧向力-位移关系,并通过 1 座 2 跨桥梁的非线性时程分析,阐述了桥台及台后填土对全桥地震反应的影响^[6]; EL-Gamal 等也基于土力学基本理论推导了桩基桥台非线性刚度的计算方法,并与现场试验结果进行了对比验证^[7]。近期,中国学者也针对此类问题进行了讨论分析^[8-9]。但以上学者均未能给出考虑台后填土及主梁和桥台碰撞的一般实用分析方法。

为此,本文以汶川地震中发生严重震害的高原大桥为例,采用“多模型多平台”分析技术研究了汶川地震动输入下高原大桥主梁与桥台及台后填土间的纵向碰撞及全桥响应,阐述了联合应用 ANSYS 和 MIDAS 通用软件的综合建模策略,其目的在于为桥台(含台后填土)以及全桥抗震能力评估提供工程可用的一般性方法,并寻求减少梁、台碰撞效应的可靠工程措施。

1 高原大桥及震害介绍

高原大桥连接虹口与高原村,为 4 孔 25 m 预应力混凝土筒支空心板桥,按 7 度抗震设防考虑。桥梁宽度布置为净-7+2×0.5 m 护轮带;桥梁上部为 C40 预应力混凝土空心板结构;下部结构采用双柱式排架,钻孔灌注桩基础,桩、墩、盖梁采用 C30 混凝土,台帽、挡块、系梁均采用 C25 混凝土;两侧为 U 型重力式桥台,混凝土强度为 C15。上部空心板与下部盖梁、桥台间通过 128 块橡胶支座支承。桥址地层为冲洪堆积层和中白垩系砂岩组成,高原大桥设计详图及地质条件情况如下页图 1 所示,关于桥台的详细构造情况参见文献^[10]。

汶川地震中,高原大桥遭受严重破坏。主要为 主梁整体沿纵桥向向高原村一侧滑移,在第 3 跨处发生落梁破坏,如下页图 2 所示。高原村一侧桥台胸墙被主梁撞碎并被顶入路基 50 cm 以上,一侧翼墙倒塌,另一侧翼墙出现严重斜向开裂破坏。虹口村一侧桥台基础有滑动迹象,台身严重破坏并向河心倾斜,导致翼墙上产生严重的竖向开裂,前墙混凝土严重破坏,接近脱落,一侧翼墙和挡墙下部沿桥纵向出现明显开裂,如下页图 3 所示^[2]。

2 高原大桥分析模型

采用“多模型多平台”分析技术研究了主梁与桥台(含台后填土)间的纵向碰撞效应及全桥地震反应。其核心思路为:基于通用有限元软件 ANSYS 建立两侧桥台及台后填土的三维有限元模型,将主梁对桥台的撞击力按静力施加于桥台胸墙,采用静力 Pushover 分析技术,完成桥台及台后填土在主梁撞击下的受力全过程分析,并得到其主梁撞击下的破坏形态及力-位移关系;基于 MIDAS 软件建立

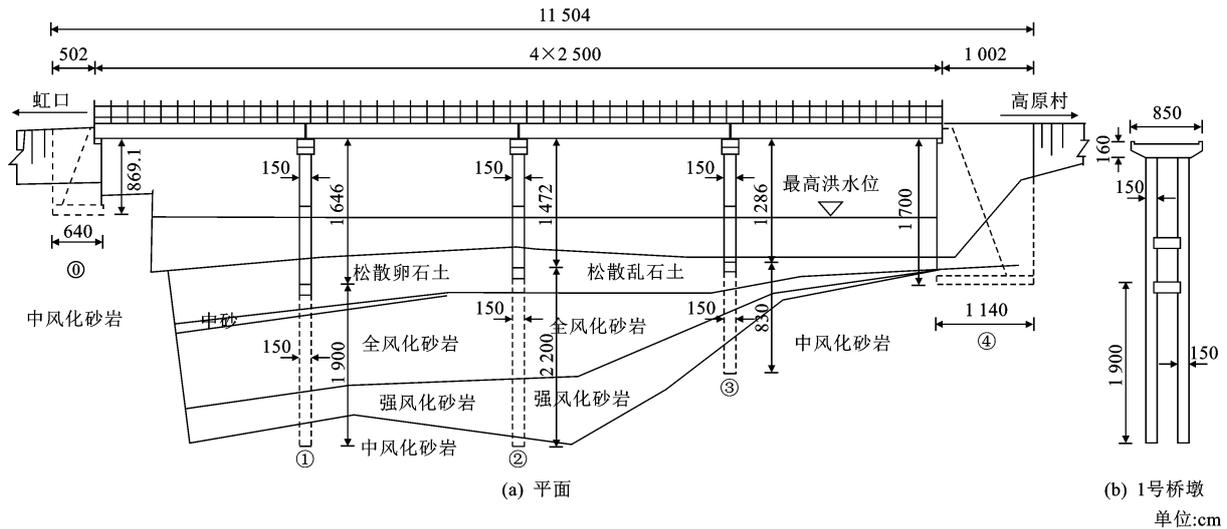


图 1 高原大桥设计

Fig. 1 Design details of Gaoyuan bridge



图 2 高原大桥落梁震害

Fig. 2 Unseating damage of Gaoyuan bridge



(a) 高原侧



(b) 虹口侧

图 3 桥台震害

Fig. 3 Damages of abutments

全桥有限元分析模型,对桥台及台后填土与主梁间的撞击作用以间隙单元模拟,间隙单元模型参数按

前述 ANSYS 分析得到的水平力-位移关系采用,最后对全桥有限元模型进行汶川地震动输入非线性时程分析,讨论桥梁的地震反应及落梁破坏情况,重点关注了主梁与桥台间的碰撞效应。

2.1 桥台及台后填土的 Pushover 分析

采用 ANSYS 软件建立桥台及台后填土的三维有限元模拟,基于静力 Pushover 分析技术对桥台及台后填土在主梁撞击下的破坏机理进行分析,桥台混凝土采用 Solid65 单元模拟,应力-应变曲线采用改进的 Park 模型,采用 Mises 屈服准则和 Willam-Warnke5 参数破坏曲面。土体与基岩均采用 Solid45 单元模拟,采用 DP 屈服准则,弹性模量 E 、黏聚力 C 、内摩擦角 Φ 、膨胀角 Φ_f 、泊松比 ν 等参数见表 1。下页图 4 为虹口侧桥台的有限元模型(因对称性取 1/2 模型分析),下页图 5 为模拟得到桥台及台后填土在主梁撞击下的撞击力 $F-\Delta$ 位移曲线。可以看出虹口侧桥台的破坏荷载(近似屈服荷载) F_H 约为 6 600 kN,刚度 k_H 约为 3.8×10^5 kN/m,高原侧桥台破坏荷载 F_G 约为 8 200 kN,刚度 k_G 约为 7.5×10^5 kN/m。另需说明,图 5(a)中曲线出现了竖直段转折,这主要是由于桥台混凝土基本未配筋,混凝土的大量拉断破坏导致桥台承载力急剧降低。具体分析过程可参考文献[10]。

表 1 土体和基岩材料详细情况

Tab. 1 Details about soil and bed rock in the abutment

| 材料 | $E/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$ | $C/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$ | $\Phi/(\text{°})$ | $\Phi_f/(\text{°})$ | ν |
|----|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|---------------------|-------|
| 土体 | 20 | 0.03 | 32 | 30 | 0.28 |
| 基岩 | 500 | 0.50 | 30 | 25 | 0.30 |

2.2 全桥分析模型的建立

基于 MIDAS 软件建立高原大桥全桥有限元模

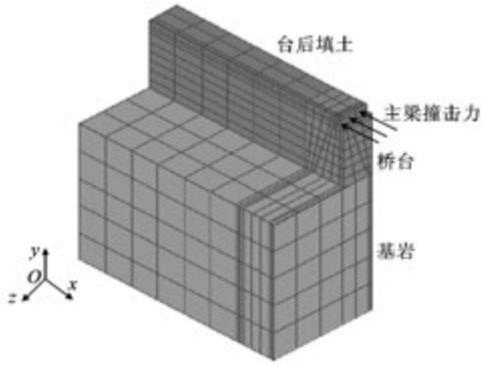


图 4 虹口侧桥台有限元模型

Fig. 4 Finite element model of abutment in Hongkou side

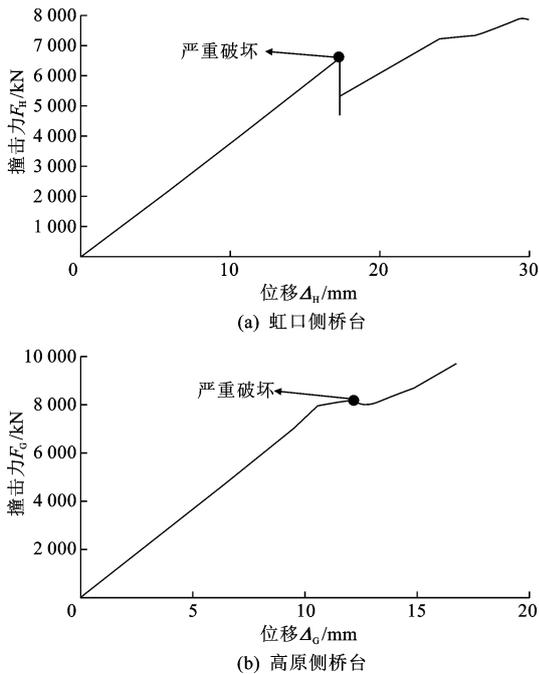


图 5 桥台及台后填土的撞击力-位移曲线

Fig. 5 Collision force-displacement of abutments and backfilling

型,利用非线性时程分析方法对高原大桥震害进行分析,重点考察桥台伸缩缝处的纵向碰撞效应。主梁、桥墩、桩基均采用弹性梁单元模拟,为考虑桥墩混凝土开裂导致的截面抗弯刚度降低,取折减系数 0.67。桥墩下部桩基的桩-土-结构相互作用按“m”法计算,以 MIDAS 中的一般连接(相当于弹性弹簧单元)在数值模型中考虑。橡胶支座采用弹塑性滞回系统(弹塑性弹簧单元)模拟,取混凝土与橡胶间的摩擦因数为 0.15,计算得到水平剪切刚度 K_b 为 1.14×10^4 kN/m,水平屈服力 F_b 为 2.8×10^2 kN。全桥结构阻尼比 ξ 取为 5%,采用 Rayleigh 阻尼。

对桥梁中邻梁碰撞相互作用的模拟,目前较多地采用碰撞单元(带间隙的弹簧-阻尼元件),而较多

学者认为桥梁纵向弹簧碰撞刚度与梁体轴向刚度较为接近^[11-14]。在桥台伸缩缝处如假定仍满足这样的条件,则计算得到的主梁与桥台间纵向弹簧碰撞刚度约为桥台及台后填土刚度的 10 倍左右,二者串联后刚度将由后者决定,因此数值模型中主梁与桥台及台后填土间的碰撞刚度按 2.1 节计算参数选取。通过 4 种工况考虑桥台伸缩缝处的碰撞效应及桥台破坏对全桥地震反应的影响,各工况及建模策略如下。

工况 1:假定桥台处于弹性工作状态。采用间隙单元(只压)模拟主梁与桥台间的碰撞关系,伸缩缝间隙 $d_0 = 80$ mm,间隙单元刚度 k 取 2.1 节计算的(弹性)刚度。梁、台碰撞力学模型及建模策略如下页图 6(a)所示。

工况 2:考虑桥台(含胸墙及台后填土)受主梁撞击的破坏影响,假定其处于弹塑性工作状态,MIDAS 软件中单独的间隙单元尚无法考虑桥台及台后填土进入弹塑性状态。为此,数值上采用间隙单元和弹塑性弹簧单元串联模拟的方式解决,要求弹塑性弹簧单元初始刚度 k_e 远大于间隙单元刚度 k (可取 k_e 约为 10 倍的 k)。串联模型中间隙单元模拟桥台及台后填土的刚度和伸缩缝间隙,而其破坏强度则由弹塑性弹簧单元决定(取 2.1 节中桥台破坏荷载)。与工况 1 比较研究桥台破坏对台梁、墩梁最大相对位移的影响。碰撞模型及建模策略如下页图 6(b)所示。

工况 3:假定桥台及台后填土处于弹性工作状态,并在伸缩缝处设置弹性碰撞缓冲装置,该模型中主梁、碰撞缓冲装置、桥台等碰撞效应物理上为串联模型,但由于该装置受压刚度远小于桥台及台后填土刚度,且 MIDAS 中的间隙单元难以有效考虑碰撞缓冲装置受挤压后刚度增大的情况。为模拟这一受力机理,采用 2 个间隙单元并联共同考虑缓冲装置与桥台刚度的组合作用,如下页图 6(c)所示。其中间隙单元 1 刚度取桥台及台后填土刚度 k , d_{01} 取伸缩缝间距 80 mm;间隙单元 2 刚度 k_2 取 βk , d_{02} 取 5 mm,模拟主梁与桥台的弹性缓冲装置。取碰撞缓冲装置刚度与桥台水平抗推刚度比 λ 分别为 0.005、0.01、0.05、0.1 作为参数讨论。与工况 1 比较研究碰撞缓冲装置对减轻桥台冲击力的有效性。

工况 4:假定桥台及台后填土处于弹性工作状态,并在伸缩缝处设置耗能型碰撞缓冲装置,采用间隙单元与弹性阻尼连接单元串联(模拟耗能碰撞缓冲装置),再与另一间隙单元(模拟桥台处撞击作用)

并联的方式模拟,如图 6(d)所示。弹性阻尼连接单元刚度 k_3 取 λk ,等效阻尼比 ξ 取为 3%^[15],阻尼系数确定方法详见文献[16];间隙单元刚度 k_2 取远大于 k_3 的数值, d_{02} 取 5 mm。与工况 1、3 比较研究耗能碰撞缓冲装置对减轻桥台冲击力的有效性。

图 6 为各模型主梁与桥台连接处的建模情况,

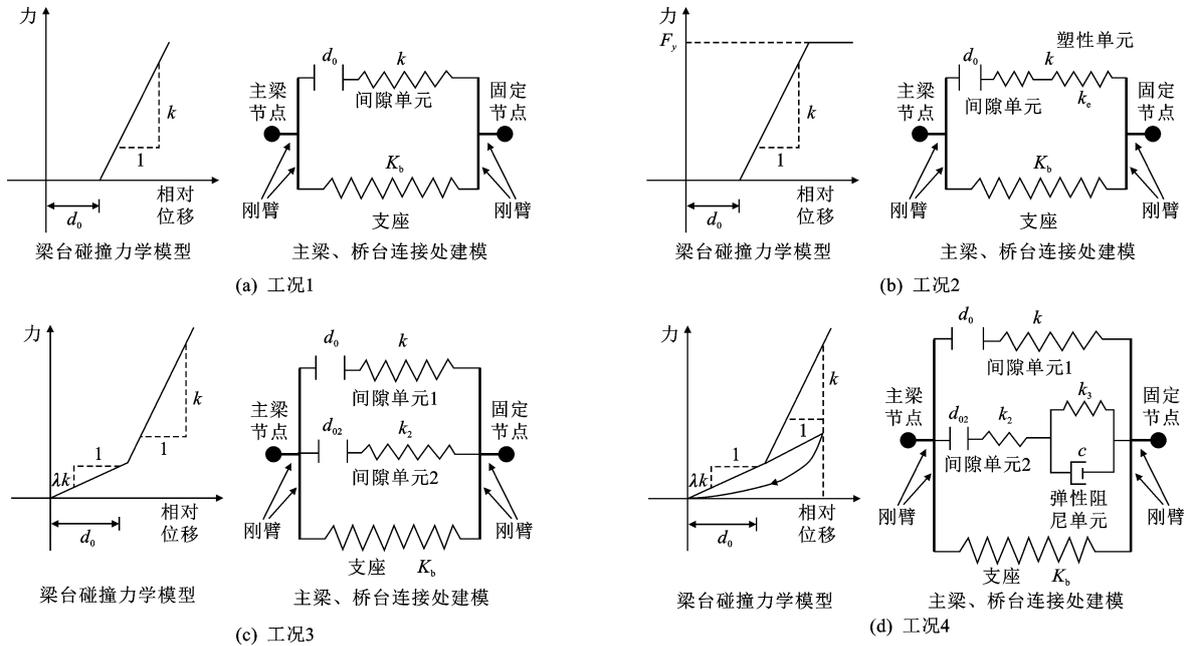


图 6 主梁与桥台连接处建模情况

Fig. 6 Model details of abutment and girder

2.3 输入地震波

采用汶川地震中主震加速度峰值最大的卧龙、清平和什邡 3 组强震记录 NS 向作为输入,以与高原大桥走向近似南北相适应。参考文献[17]中汶川地震断层距离与加速度峰值近似关系,输入加速度峰值取为 1.0 g。图 7 给出了这 3 条 NS 方向地震波的放大系数 β 反应谱,以供参考。

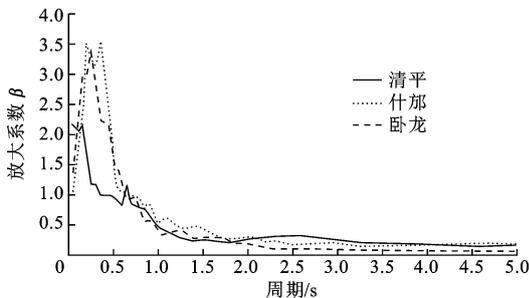


图 7 输入地震波的放大系数反应谱

Fig. 7 Amplification coefficient spectra of selected earthquake records

3 分析结果及讨论

首先研究碰撞缓冲装置的有效性。表 2 列出了

主要包括桥台处橡胶支座、桥台及台后填土(水平)刚度、伸缩缝及碰撞装置模拟单元等。补充说明一点,由于橡胶支座刚度远小于两侧桥台及台后填土的刚度,因此支座破坏前,桥台的侧向变形可以忽略,因此可按照支座与主梁、桥台间隙单元并联的方式建模。

不同地震波下工况 1、工况 3(取 $\lambda=0.05$)和工况 4 ($\lambda=0.05$)桥台碰撞力计算结果。可以看出采用弹性碰撞缓冲装置存在减少桥台所受碰撞力的情况,也可能很大程度增加桥台的碰撞力,与具体的地震波及桥台位置有关。在本文中除卧龙波外,总体上高原侧碰撞缓冲装置很好地降低了桥台的碰撞力,而虹口侧则表现为明显增加的趋势。比较工况 3 和工况 4 可以看出耗能型碰撞缓冲装置的缓冲效果要优于弹性碰撞缓冲装置。

表 2 桥台与主梁间的碰撞力

Tab. 2 Pounding force between abutment and girder

| 地震波 | 虹口侧 F_H/kN | | | 高原侧 F_G/kN | | |
|-----|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| | 工况 1 | 工况 3 | 工况 4 | 工况 1 | 工况 3 | 工况 4 |
| 清平波 | 6 840 | 8 180 | 7 590 | 9 230 | 2 470 | 2 410 |
| 什邡波 | 3 680 | 5 880 | 4 890 | 3 510 | 2 730 | 2 620 |
| 卧龙波 | 5 510 | 8 670 | 8 670 | 260 | 1 460 | 1 270 |

下页表 3 给出了工况 3 中桥台处碰撞力随碰撞缓冲装置刚度的变化情况。结合工况 1 比较可发现,高原侧桥台在 λ 分别为 0.005、0.01 和 0.05 这 3 种情况下均取得了很好的减少碰撞效果,而虹口侧

桥台仅在清平波输入下且 λ 为 0.005、0.01 情况下效果较佳。特别应注意在 λ 为 0.1 情况下,两侧桥台碰撞力均明显增大。综上,建议碰撞缓冲装置刚度宜取为桥台抗推刚度的 1%~5%,过小可能起不到缓冲作用($\lambda=0.005$),过大则可能很大程度增加碰撞力($\lambda=0.1$)。

再考虑桥台、墩柱与主梁的最大相对位移(即支座最大反应位移)情况,工况 1 分析表明仅清平波输入下(表 2)两侧桥台均达到了破坏荷载,因此以清平

波输入为例进行分析。表 4 给出了清平波输入下墩梁最大相对位移反应,工况 2 和工况 1 比较可以看出考虑桥台破坏后,相对位移均表现出增加趋势,但幅度不大,这可能与数值模型中仅考虑支座滑移而未考虑失效破坏后抗力衰减有关。注意到桥台、墩柱与主梁相对位移在 10 cm 左右,要明显小于盖梁的支承宽度(72 cm),因此就其落梁破坏原因而言,可能更多地与断层永久位移相关,文献[2]也指出震后高原大桥两桥台间净跨径缩短了 1.78 m。

表 3 桥台碰撞力随碰撞缓冲装置刚度变化情况(工况 3)

Tab. 3 Variety of pounding force between abutment and girder with the stiffness of bumper device in case 3

| 地震波 | 虹口侧 F_H/kN | | | | 高原侧 F_G/kN | | | |
|-----|-----------------|----------------|----------------|---------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|
| | $\lambda=0.005$ | $\lambda=0.01$ | $\lambda=0.05$ | $\lambda=0.1$ | $\lambda=0.005$ | $\lambda=0.01$ | $\lambda=0.05$ | $\lambda=0.1$ |
| 清平波 | 6 160 | 5 980 | 8 180 | 8 470 | 8 390 | 7 440 | 2 470 | 4 930 |
| 什邡波 | 4 590 | 4 400 | 5 880 | 14 080 | 2 440 | 2 870 | 2 730 | 5 230 |
| 卧龙波 | 6 050 | 6 580 | 8 670 | 9 330 | 100 | 210 | 1 460 | 4 360 |

表 4 墩(台)梁最大相对位移(清平波输入)

Tab. 4 Relative displacement between girder and abutment/pier under the Qingping earthquake excitation

| 工况 | 虹口侧桥台 Δ_H/cm | 1号墩墩顶 Δ_1/cm | | 2号墩墩顶 Δ_2/cm | | 3号墩墩顶 Δ_3/cm | | 高原侧桥台 Δ_G/cm |
|------|------------------------|---------------------|------|---------------------|------|---------------------|------|------------------------|
| | | 左支座 | 右支座 | 左支座 | 右支座 | 左支座 | 右支座 | |
| 工况 1 | 9.5 | 8.7 | 8.7 | 8.6 | 8.6 | 7.2 | 7.2 | 9.3 |
| | -9.8 | -9.1 | -9.1 | -9.7 | -9.7 | -7.1 | -7.1 | -10.0 |
| 工况 2 | 9.6 | 8.7 | 8.7 | 8.6 | 8.6 | 7.2 | 7.2 | 9.4 |
| | -10.1 | -9.4 | -9.4 | -10.0 | -9.7 | -7.3 | -7.3 | -10.3 |

注:位移以向高原侧为正。

4 结 语

(1)采用碰撞缓冲装置存在减少桥台所受碰撞力的情况,也可能很大程度增加桥台的碰撞力,与具体的地震波输入及桥台位置有关。

(2)采用耗能型碰撞缓冲装置,其减震效果要优于弹性碰撞缓冲装置。建议碰撞缓冲装置刚度宜取为桥台抗推刚度的 1%~5%。

(3)桥台的撞击破坏将增大桥台与主梁间的相对位移,增加了落梁的风险。

(4)本文力图联合应用 ANSYS 和 MIDAS 等通用软件,提供复杂桥梁结构的整体抗震能力评估技术。提出的评估方法仅考虑了桥台及台后填土、地基的拟静力效应,忽略了土的动力特性、辐射阻尼等影响因素,认为是一种工程可接受的近似方法。断层永久位移、动力撞击下桥台力-位移关系、支座实际破坏、桥墩地震反应以及桩-土间反应非线性特性的模拟等,都将为合理揭示高原大桥震害提供进一步的参考。

参考文献:

References:

[1] 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]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(3): 84-94. (in Chinese)

[2] 谢和平,台佳佳,邓建辉,等.虹口高原大桥的破坏机制分析[J].四川大学学报:工程科学版,2009,41(3):51-55.
XIE He-ping, TAI Jia-jia, DENG Jian-hui, et al. Analysis of damage mechanism of Gaoyuan bridge in Hongkou[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(3): 51-55. (in Chinese)

[3] Wilson J C. Stiffness of non-skew monolithic bridge abutments for seismic analysis[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1988, 16(6): 867-883.

[4] Wilson J C, Tan B S. Bridge abutments: formulation of

- simple model for earthquake response analysis[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1990, 116(8): 1828-1837.
- [5] Wilson J C, Tan B S. Bridge abutments: assessing their influence on earthquake response of Meloland road overpass[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1990, 116(8): 1838-1856.
- [6] Shamsabadi A, Rollins K M, Kapuskar M. Nonlinear soil-abutment-bridge structure interaction for seismic performance-based design[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(6): 707-720.
- [7] EL-Gamal M, Siddharthan R V. Stiffnesses of abutments on piles in seismic bridge analyses[J]. Soils and Foundations, 1998, 38(1): 77-87.
- [8] 李悦, 宋波, 川岛一彦. 考虑土、上部结构和桥台相互作用的桥台抗震性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1162-1168.
LI Yue, SONG Bo, Kawashima K. Research on abutment aseismic performance considering interaction of soil, superstructure and abutment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1162-1168. (in Chinese)
- [9] 高玉峰, 蒲黔辉, 李晓斌. 考虑碰撞效应的双柱式高墩桥梁非线性地震反应特性研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(4): 36-45.
GAO Yu-feng, PU Qian-hui, LI Xiao-bin. Nonlinear seismic response characteristics of bridge with double-column high-rise piers considering pounding effect[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(4): 36-45. (in Chinese)
- [10] 孙治国, 王东升, 张蓓, 等. 高原大桥桥台地震破坏机理与抗震措施分析[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(4): 79-87.
SUN Zhi-guo, WANG Dong-sheng, ZHANG Bei, et al. Analysis of seismic failure mechanism and earthquake resistant measures for the abutments of Gaoyuan bridge[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(4): 79-87. (in Chinese)
- [11] Jankowski R, Wilde K, Fujino Y. Pounding of superstructure segments in isolated elevated bridge during earthquakes[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1998, 27(5): 487-502.
- [12] 李建中, 范立础. 非规则梁桥纵向地震反应及碰撞效应[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 84-90.
LI Jian-zhong, FAN Li-chu. Longitudinal seismic response and pounding effects of girder bridges with unconventional configurations[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 84-90. (in Chinese)
- [13] 邓育林, 彭天波, 李建中. 强震作用下大跨斜拉桥伸缩缝处碰撞效应的影响研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(6): 26-30.
DENG Yu-lin, PENG Tian-bo, LI Jian-zhong. Effect of pounding at expansion joints on seismic response of long-span cable-stayed bridge under strong earthquake[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(6): 26-30. (in Chinese)
- [14] Raheem S E A. Pounding mitigation and unseating prevention at expansion joints of isolated multi-span bridge[J]. Engineering Structures, 2009, 31(10): 2345-2356.
- [15] 孟庆利, 闫维明, 冯军和. 形状记忆合金金属橡胶阻尼器防高墩桥梁地震碰撞振动台试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(2): 201-206.
MENG Qing-li, YAN Wei-ming, FENG Jun-he. Shaking table testing of seismic pounding of high-pier bridge with an SMA PRM damper[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(2): 201-206. (in Chinese)
- [16] Chopra A K. 结构动力学: 理论及其在地震工程中的应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
Chopra A K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese)
- [17] 于海英, 王栋, 杨永强, 等. 汶川 8.0 级地震强震动加速度记录的初步分析[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(1): 1-13.
YU Hai-ying, WANG Dong, YANG Yong-qiang, et al. The preliminary analysis of strong ground motion records from the Ms 8.0 Wenchuan earthquake[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(1): 1-13. (in Chinese)