

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211111001

近断层桥梁最小搭接长度数值分析*

贾宏宇¹, 岳伟勤¹, 杨磊², 陈应高^{1,3}, 唐清华⁴, 郑史雄¹

- (1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003;
3. 贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550081;
4. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 为了研究近断层地震作用下桥梁合理的最小搭接长度, 防止落梁破坏, 基于有限元软件 ANSYS 建立了连续刚构桥三维有限元模型; 考虑了近断层和断层处地震动以及结构弹塑性特征对高墩连续梁桥最小搭接长度的影响; 基于国内外抗震设计规范, 分析了远场、近断层和断层处地震动下结构的最小搭接长度需求。针对该桥分析, 研究表明: 根据各国抗震规范要求, 中国和日本规范相对较保守, 其搭接长度约为美国规范计算结果 2 倍和 1.5 倍; 考虑近断层地震的最小搭接长度满足《公路桥梁抗震设计规范》要求, 而地表破裂的跨断层地震作用下最小搭接长度需求超出规范要求, 跨断层桥梁应采用防落梁措施; 搭接长度与桥梁结构设计参数(跨径, 墩高和材料等)和地震动强度指标(PGA, 断层错位, PGV 和 PGV/PGA 等)有关。

关键词: 近断层地震; 断层地震动; 搭接长度; 高墩桥梁; 弹塑性分析

中图分类号: TU433 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1324-09

Numerical Analysis on Minimum Support Length of Near-fault Bridges

JIA Hongyu¹, YUE Weiqin¹, YANG Lei², CHEN Yinggao^{1,3}, TANG Qinghua⁴, ZHENG Shixiong¹

- (1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. Yellow River Planning Survey and Design Academe Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;
3. Guizhou Transportation Planning Survey and Design Academe Co., Ltd., Guiyang 550081, China;
4. Yangtze River Planning Survey and Design Academe Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: In order to study the reasonable minimum support length of the bridge under the action of near-fault earthquakes and prevent the beam from falling under the action of near-fault earthquakes, a three-dimensional finite element model of a continuous beam bridge was established based on the general finite element software ANSYS. The effect of near-field and on-fault ground motions as well as the structural elastoplastic characteristics on the minimum support length of high-pier continuous beam bridges was considered in the model. Based on domestic and foreign seismic design codes, the minimum support length requirements of structures under far-field, near-field and on-fault ground motions were compared and analyzed. The research results show that among the calculation formulas for the minimum support length of simple-supported beam bridges and continuous beam bridges proposed by various countries' seismic codes, the calculation results of Chinese and Japanese codes are relatively

* 收稿日期: 2021-11-11; 修回日期: 2021-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178169, U21A20154, 2021YFB1600300)、四川省科技计划(2019YFG0460)资助

作者简介: 贾宏宇(1981—), 男, 副教授, 硕导, 博士后。主要从事桥梁抗震研究。E-mail: Hongyu1016@swjtu.edu.cn

通讯作者: 郑史雄(1965—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事桥梁抗风与抗震研究。E-mail: Zhengsx@swjtu.edu.cn

conservative, and the support length is larger than that of the American code. The minimum support length under the action of the fault earthquake meets the requirements of Specifications for Seismic Design of Highway Bridges, and the minimum support length requirement under the action of the earthquake with the surface rupture exceeds the specification requirements. Anti-falling measures should be taken for beams in bridges across the faults. The support length is related to the design parameters of the bridge structures (span, pier height and material, etc.) and ground motion intensity indexes (PGA , fault dislocation, PGV and PGV/PGA , etc.)

Keywords: near-fault earthquake; fault ground motion; support length; high-pier bridge; elastoplastic analysis

引言

地震中桥梁上部结构与桥墩间的相对位移超过其最小搭接长度是导致梁体落梁的主要原因。在洛马·普里埃塔地震中,由于桥梁的最小搭接长度设置不足,旧金山-奥克兰海湾大桥引桥发生落梁破坏^[1]; San Fernando 和 Kobe 等^[2]地震中均发生因主梁与桥台之间的相对位移过大,而搭接长度不足的落梁破坏;阪神地震中,西宫港大桥的预留墩梁搭接长度太小,第 1 跨引桥发生落梁^[3]。2008 年中国汶川地震中,百花大桥由于墩梁相对位移过大而出现落梁破坏,交通中断,极大影响了抗震救灾进度^[4]。因此,设置合理搭接长度对防落梁破坏,减轻桥梁震害有着至关重要的作用^[5-6]。为减轻落梁破坏, J. Robert 等^[7]采用合理搭接长度、阻尼器和可压碎装置等措施来减小落梁破坏; A. Ruangrassamee 等^[8]基于连续梁桥模型分析,通过使用磁流变阻尼器减少墩梁相对位移; M. Sami 等^[9]通过试验探究了剪力键的抗震性能,防止出现落梁破坏。

防止落梁破坏最根本的方法是提供足够的墩梁搭接长度。搭接长度作为防落梁系统中的重要措施和第一道防护,国内外学者对设置合理的最小搭接长度进行了研究。H. Hao^[10]研究纵向地震作用下不同参数对相邻梁体间相对位移需求的影响; A. Ruangrassamee 等^[11]通过模拟桥梁碰撞,研究其相对位移,为一般桥梁搭接长度的计算提供了参考;朱文正^[12]基于桥墩延性能力提出了一种静力计算方法计算墩梁相对位移; R. Desroches 等^[13]利用数学中的相关系数来分析相邻桥跨的不同向振动形式,提出了一种计算最小搭接长度的新方法。近年来,国内外学者对搭接

长度的研究主要集中在较简单的桥梁结构^[14],并且主要考虑跨径和墩高对搭接长度的影响,规范所涉及的相关公式也主要考虑跨径和墩高对搭接长度计算的影响。研究人员将地震强度作为影响因素分析搭接长度的研究较少,对近断层地震作用下桥梁最小搭接长度的研究更少。地震作用下,高墩桥梁的桥墩纵向位移较大,从而增加了梁体发生落梁破坏的概率^[15]。我国西南山区大多数地区处于近断层附近,因此,进行近断层桥梁最小搭接长度的研究对桥梁抗震和防护有着非常重要的意义^[16]。

综上所述,本文以龙潭河高墩大桥为研究对象,建立高墩连续刚构桥的有限元模型。然后选取具有速度大脉冲和带永久地表破裂位移地震波分别表征近断层地震动和跨断层地震动。最后通过动力时程响应分析对高墩大跨度连续刚构桥最小搭接长度的需求进行研究。估算和评估该桥最小搭接长度需求,预测该类桥梁是否满足近断层和跨断层地震动下的性能需求。

1 理论简介

1.1 动力方程及求解

地震激励作用下,桥梁结构运动方程以分块矩阵表示为^[17]:

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & 0 \\ 0 & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_s \\ \dot{X}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ X_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ P_b \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, X_b 为强迫位移向量; X_s 为节点位移向量; M 为质量矩阵、 C 表示阻尼矩阵、 K 是刚度矩阵; P_b 代表桥梁墩底处地震力向量。

基于大质量法则地震力 $P_b = M_{bb} \ddot{X}_g$, “s”和“b”分别指结构节点和地表基础节点。

将式(1)中第一项展开并简化移项得到:

$$M_{ss} \ddot{X}_s + C_{ss} \dot{X}_s + K_{ss} X_s = -K_{sb} X_b \quad (2)$$

式(2)为多点地震激励下结构动力平衡方程。

将式(1)中第二项展开得到:

$$M_{bb} \ddot{X}_b + C_{bb} \dot{X}_b + K_{bs} X_s + K_{bb} X_b = P_b + M_{bb} \ddot{X}_g \quad (3)$$

假设基础底部质量 $M_{bb} \rightarrow \alpha$, 则式(3)两边同时除以 M_{bb} 得:

$$\ddot{X}_b = \ddot{X}_g \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)中得:

$$M_{ss} \ddot{X}_s + C_{ss} \dot{X}_s + K_{ss} X_s + K_{bb} X_b = -K_{sb} X_g \quad (5)$$

式(5)为多点激励下的位移输入方程。

多点地震激励模型采用相对动力位移和拟静力位移分别模拟断层两侧地面运动和断层永久地面位移,能够真实反映断层处地震动的空间性。对于跨断层桥梁采用多点地震激励的地震输入模型是十分合理的。

1.2 各国规范最小搭接长度计算公式

表1^[18]列出了中国、美国、日本规范中的搭接长度计算公式。其中,《公路桥梁抗震设计规范》^[19]是在《公路桥梁抗震设计细则》^[20]和美国AASHTO规范^[21]的基础上进行完善的。搭接长度是指简支梁桥或连续梁桥上部结构梁端到墩、台帽或盖梁边缘的距离,如图1所示。

表1 国内外规范梁式桥最小搭接长度算公式^[18]

Table 1 Formula for minimum support length of beam bridges at home and abroad^[18]

规范名称	计算公式	说明
城市桥梁设计规范 ^[20]	$a = 0.005L + 0.4$ 直桥(6度区)	仅考虑跨径的影响
	$a = 0.005L + 0.7$ 直桥(>6度区)	
	$a = 0.5L(\sin\theta - \sin(\theta - a_E))$ 斜桥	
公路桥梁抗震设计规范 ^[19]	$a \geq 0.5 + 0.001L + 0.008H + 0.005L_k$ 直桥	考虑跨径、墩高的影响
	$a = 0.5L(\sin\theta - \sin(\theta - a_E))$ 斜桥	
	$a \geq 0.01\delta_E \frac{\sin\varphi}{\cos(\varphi/2)} + 0.3$ 曲线桥	
美国加州抗震设计规范 ^[22]	$a > 0.76$ 桥台 $a > 0.60$ 中间支点	采用固定值
美国AASHTO规范 ^[21]	$a = \gamma(0.0017L + 0.0067H + 0.2)(1 + S^2/8000)$	考虑墩高、跨径的影响
日本桥梁抗震设计规范 ^[23]	$a = 0.005L + 0.7$ 直桥	仅考虑跨径的影响
	$a = 0.5L(\sin\theta - \sin(\theta - a_E))$ 斜桥	
	$a \geq 0.01\delta_E \frac{\sin\varphi}{\cos(\varphi/2)} + 0.3$ 曲线桥	

注: a 为最小搭接长度, m; L 为计算跨径, m; H 为墩高, m; θ 为斜交角, ($^\circ$); γ 为抗震等级系数; a_E 为转角极限, ($^\circ$)

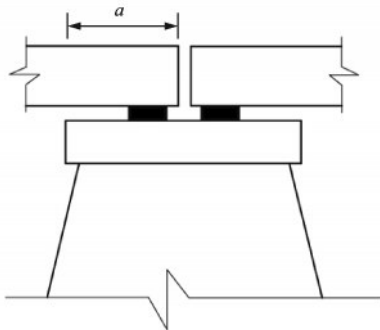


图1 搭接长度

Fig.1 Support length

2 工程数值算例

2.1 桥梁简介及模型

龙潭河大桥全长420 m,为60 m+250 m+110 m三跨预应力混凝土连续刚构桥,主梁混凝土为C50,桥墩采用C40混凝土。1到8号桥墩的墩高分别为17.3、47、79、95、47、25.3、15.3和10.3 m,其中2、3、4和5号墩为单柱墩,采用空心椭圆截面,1、6、7和8号墩为双柱式桥墩,采用实心圆截面。通过

ANSYS 平台对全桥进行模拟,其中主梁使用 Beam44 单元模拟,塑性铰采用 Combine40 单元模拟,支座型号为 GJZ500×600×110 板式橡胶支座,通过 Combine14 单元模拟,其纵向弹簧刚度取值分别为:41 125、23 873 和 20 062 kN/m。桥台和桥墩采用 D240 型伸缩缝,伸缩缝的位移量为 240 mm。本文不考虑桩土效应对桥梁结构的影响,桥墩墩底为固结。桥梁中连续刚构部分近似简化为一联。该桥的有限元模型如图 2 所示,全桥布置如图 3 所示。

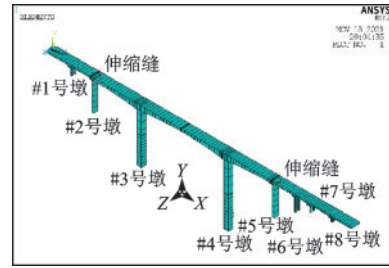


图 2 有限元模型
Fig.2 Finite element model

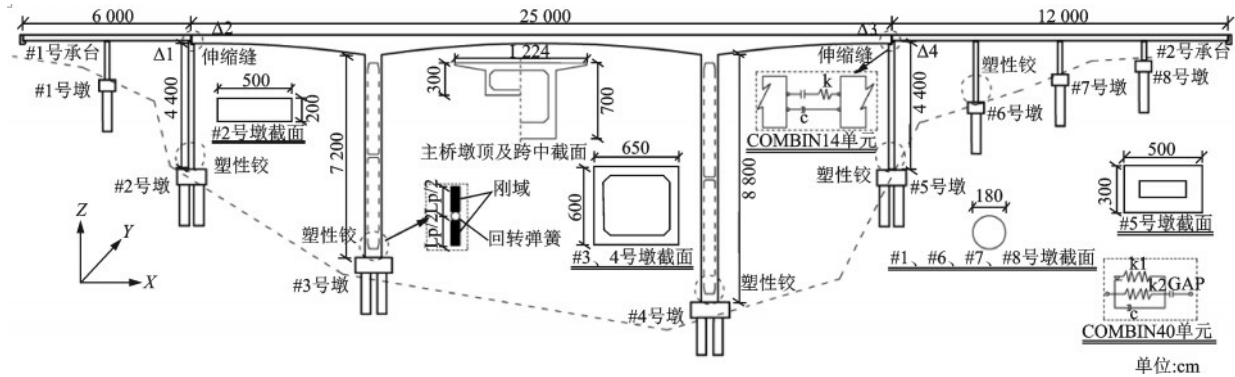


图 3 全桥布置

Fig.3 Layout of entire bridge structure

注:#2、#3、#4、#5为单柱墩,#1、#6、#7、#8为双柱墩

2.2 近断层地震动特点

地震工程界还没对近断层区域进行明确的标准定义,学者将断层距小于 20 km 的区域称为近断层区域。历年来通过对地震中近断层地震动的统计分析得出近断层地震动具有以下显著特征^[24]:

(1)速度脉冲效应:在近断层地震时程中含有一个或多个能量高、周期长的脉冲型地面运动。速度脉冲主要来源于滑冲效应和破裂前方效应两个方面。

(2)滑冲效应:在地震过程中,静力形变场导致断层某一方向的位移时程中出现永久性地表位移。

(3)破裂方向效应:同一地震中,断层破裂的不同方向地震波的频谱特性差异很大。

(4)上盘效应^[25]:地震动发生时断层裂缝一般是倾斜的。靠下的板块称为下盘,靠上的板块称为上盘。强震观测记录研究表明,在断层距相等的范围内,上盘观测点的地震动峰值大于下盘,且上盘场地各点的反应谱值也大于下盘,但是,下盘地震动持续时间长于上盘(图 4)。

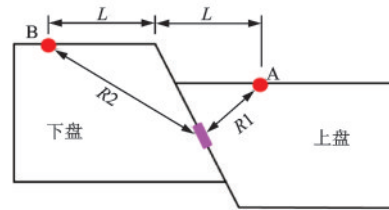


图 4 上盘效应

Fig.4 Hanging wall effect

2.3 输入地震动确定

根据国内外学者对近断层地震动的特性进行研究得出,震源对近断层地震动的影响较大。在不同的地震事件中,由于断层破裂机制、断层上升时间和断层破裂尺寸等复杂因素的影响,地震动的特性可能出现较大的差异^[26-27]。为了排除震源对地震动的影响,本文采用相同事件中的地震记录作为输入地震动。

抗震规范中规定时程分析选取的地震波应该满足三要素:频谱特征、幅值和持时。文中研究特定场地条件下近断层地震动桥梁的弹塑性特征和位移响应,更加关注地震动的幅值和持时。根据断层距选取了 4 条台湾集集地震波(CHI-CHI),所地震动的具体信息见表 2。近断层地震动的加速度

表2 地震波信息

Table 2 Information of ground motion records

序号	地点	台站	时间	$V_{s30}/(m \cdot sec^{-1})$	震级	震距/km	PGA/g	调整后 PGA/g
1	Chi-Chi	TCU039	1999	540.66	7.62	19.89	0.197	0.2
2	Chi-Chi	TCU049	1999	487.27	7.62	3.76	0.193	0.4
3	Chi-Chi	TCU052	1999	579.1	7.62	0.66	0.358	0.6
4	Chi-Chi	TCU102	1999	714.27	7.62	1.49	0.263	0.8

(a~d)、速度(e~h)和位移(i~l)时程曲线如图5所示。为了便于比较和分析地震动强度对搭接长度

的影响,对所选取地震动的峰值加速度(PGA)进行调幅,调幅结果分别为 $0.2g, 0.4g, 0.6g$ 和 $0.8g$ 。

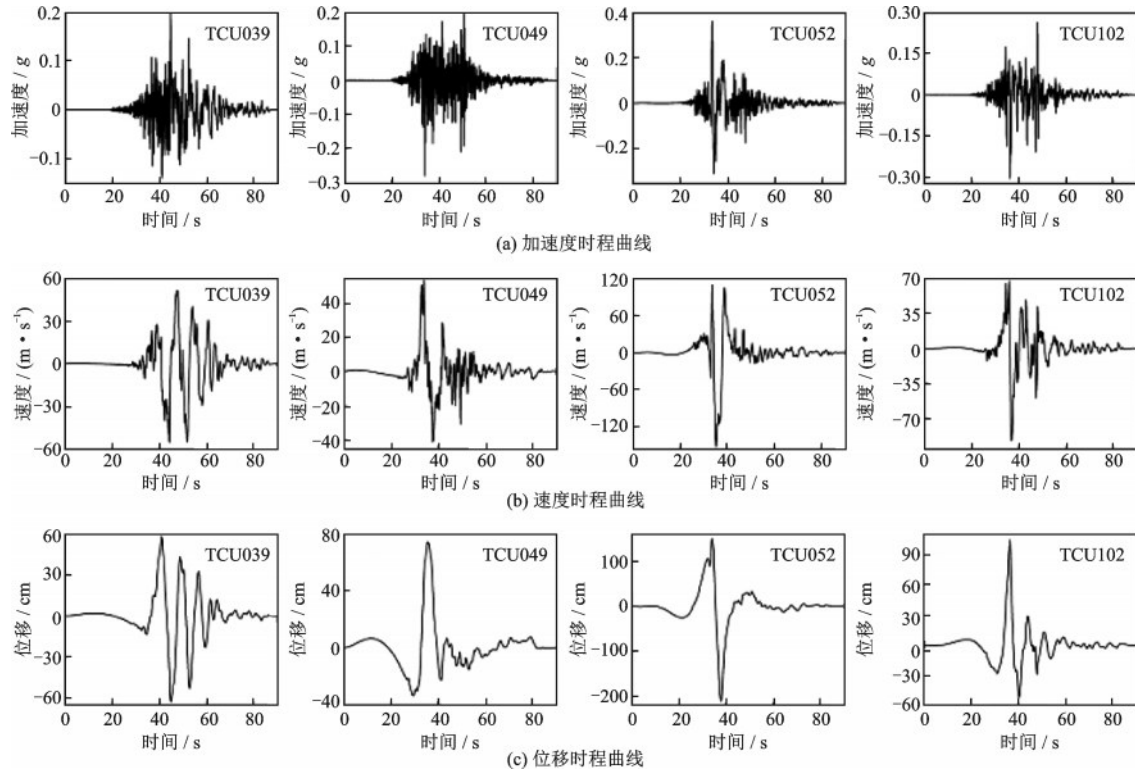


图5 近断层地震波

Fig.5 Near-fault ground motions

同时,为了探究跨断层地震作用下搭接长度的搭接长度需求,对所选取的4条跨断层地震的位移时程进行基线校正,并将基线校正后的位移时程分别施加 $0.1, 0.2$ 和 0.3 m的地表破裂位移作为断层地震的目标位移(图6),然后研究高墩桥梁在跨断层地震作用下的搭接长度需求。

因本桥梁结构采用墩底固结,且纵桥向尺寸远大于横桥向尺寸,在纵桥向地震激励下,梁体更容易发生落梁破坏。文中将研究范围限制在纵桥向地震激励下高墩桥梁的搭接长度,仅输入纵桥向的地震动,不考虑横桥向和竖向地震动的影响。

有限元模型以左边引桥为第一联,中间连续刚构部分近似为第二联,右边引桥为第三联。分析近断层地震动下搭接长度需求时,分别输入 $PGA=$

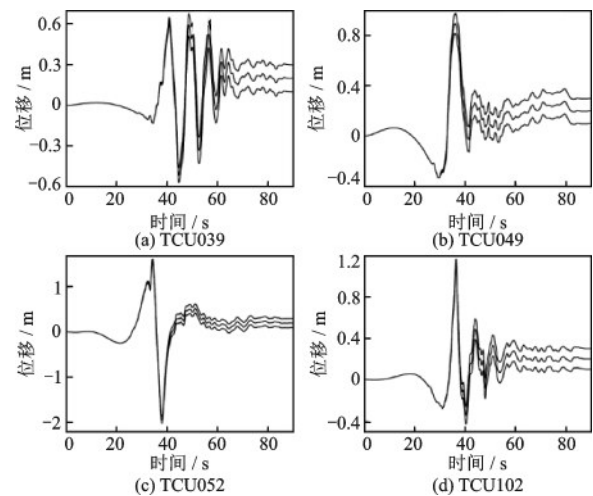


图6 跨断层地震波位移时程

Fig.6 Displacement time history of fault ground motions

0.2g、0.4g、0.6g和0.8g的加速度地震动。计算分析跨断层地震动下的搭接长度时,采用多点激励的方法输入位移时程,具体计算工况见表3。其中工况1、3、5、7表示断层出现在2号墩和3号墩间;工况2、4、6、8表示断层出现在4号墩和5号墩间,“-”表示反方向输入。

表3 断层地震输入工况

Table 3 Fault seismic input conditions

工况	第一联	第二联	第三联
工况1	TCU039	-TCU052	-TCU052
工况2	TCU039	TCU039	-TCU052
工况3	TCU049	-TCU102	-TCU102
工况4	TCU049	TCU049	-TCU102
工况5	TCU052	-TCU039	-TCU039
工况6	TCU052	TCU052	-TCU039
工况7	TCU102	-TCU049	-TCU049
工况8	TCU102	TCU102	-TCU049

2.4 结果分析

根据各国规范中的计算公式所得出的最小搭接长度见表4和图7。由图7可知,《城市桥梁规范》^[20]、《公路桥梁抗震设计规范》^[19]以及日本规范^[23]所计算出该桥的墩梁搭接长度较大,可见中国规范和日本规范在计算该桥搭接长度时比较保守;美国加州SDC1.7^[22]提出的搭接长度是一个固定值,其搭接长度大于等于60 cm,美国AASHTO规范^[21]计算出的搭接长度值较中国和日本规范小。对于该桥梁,中国城市桥梁规范和日本规范^[23]计算出的搭接长度比AASHTO规范^[21]大1.178倍;《公路桥梁抗震设计规范》^[19]计算出的搭接长度比AASHTO规范^[21]大0.425倍。

当以不同的峰值加速度输入地震动时,2号墩和5号墩左右两端的相对位移见表5和图8。 Δ_1 、

表4 规范计算出的搭接长度

Table 4 Support length from different national standards

规范名称	单位:cm		
	第一联	第二联	第三联
城市桥梁设计规范 ^[20]	99.96	194.84	129.92
公路桥梁抗震设计规范 ^[19]	71.47	124.57	78.98
美国加州抗震设计规范 ^[22]	60	60	60
美国AASHTO规范(2014) ^[21]	43.81	103.99	54.61
日本桥梁抗震设计规范(2012) ^[23]	99.96	194.84	129.92

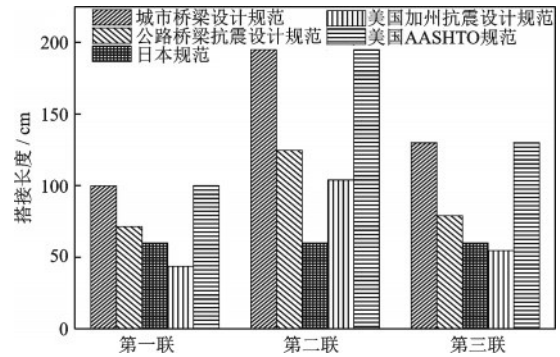


图7 规范计算出的搭接长度

Fig.7 Support length from different national standards

Δ_2 、 Δ_3 和 Δ_4 分别表示左引桥与2号墩、主桥与2号墩、主桥与5号墩、右引桥与5号墩的相对位置。其位置如图3所示。

由表5和图8可知,当 $PGA=0.2g$ 和 $0.4g$ 时,各墩梁处的相对位移较小且变化不大,当 $PGA=0.6g$ 时,墩梁处相对位移变化较大, Δ_1 和 Δ_4 增加了1.79倍和1.34倍, Δ_2 和 Δ_3 增加了3.12倍和1.1倍,表明墩梁间的相对位移对地震动的 PGA 比较敏感; Δ_2 和 Δ_3 相较于 Δ_1 和 Δ_4 大很多,这是因为连续刚构部分桥墩较高、跨径较大。由规范可知,搭接长度的计算值跟桥墩的高度和梁体跨径有较大关系。除此之外,规范计算出的 Δ_2 和 Δ_3 相等是因为连续刚构的平均墩高。而 Δ_2 和 Δ_3 实际存在偏差是因为

表5 相对位移响应

Table 5 Relative displacement responses

工况/g	单位:cm			
	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4
$PGA=0.2$	7.15	17.92	20.22	5.78
$PGA=0.4$	10.82	24.45	27.36	10.63
$PGA=0.6$	30.16	100.84	76.90	24.90
$PGA=0.8$	40.20	120.70	92.90	37.90

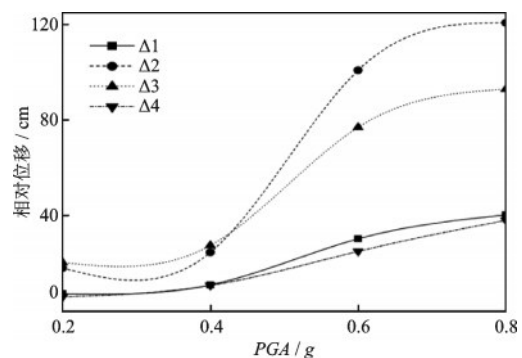


图8 相对位移响应

Fig.8 Relative displacement responses

3号墩和4号墩的墩高存在差异。

近断层地震动 $PGA=0.2g, 0.4g, 0.6g$ 和 $0.8g$ 强度下和按《公路桥梁抗震设计规范》^[19](2020)计算结果对比结果如图9所示。通过图9可以看出,规范计算出的搭接长度相对保守,其结果能包络 $PGA=0.8g$ 及以下近断层地震动作用下的搭接长度需求。

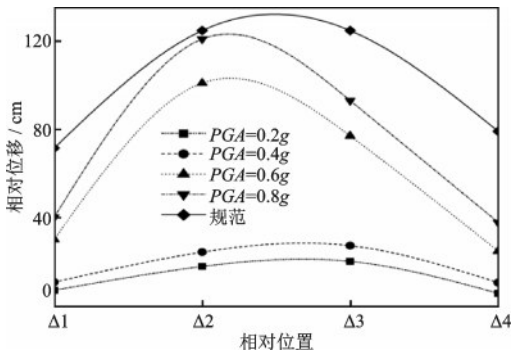


图9 搭接长度分析

Fig.9 Support length analysis

在进行跨断层地震动的位移输入时,设置永久位移为 $0.1, 0.2$ 和 0.3 m,探究该桥的位移响应均在跨断层地震作用下的变化规律和目标位移的影响。定义一个比值系数,即地震作用下各工况墩梁相对位移的均值与规范所计算搭接长度的比值。当比值系数大于1时,说明墩梁相对位移大于最小搭接长度,此时桥梁发生破坏;相反,该桥的墩梁相对位移满足规范的要求。

由表6可知,在跨断层地震动下, $\Delta 1, \Delta 2, \Delta 3$ 和 $\Delta 4$ 的值均超过规范计算出的搭接长度,桥梁发生破坏,引桥部分出现落梁破坏。近场地震作用下,当 $PGA=0.8g$ 时,该桥墩梁处的相对位移依然小于规范计算值。但在跨断层地震作用下,当 $PGA=0.2g$

表6 相对位移响应

Table 6 Relative displacement responses

工况	$\Delta 1$	$\Delta 2$	$\Delta 3$	$\Delta 4$
工况1	296.13	426.01	503.04	418.67
工况2	131.93	188.03	209.07	268.77
工况3	176.17	242.70	286.03	168.07
工况4	140.93	133.07	137.83	229.33
工况5	179.67	196.33	200.33	147.33
工况6	406.03	471.33	450.67	266.33
工况7	136.07	133.67	145.33	133.67
工况8	196.33	286.02	231.05	239.04

时,该桥墩梁处的相对位移超过规范计算值。故跨断层地震动作用下的位移需求响应要远远大于近场地震。这也是桥梁选址应尽量规避断层的主要原因。

假设工况9为 $PGA=0.2g, 0.4g, 0.6g$ 和 $0.8g$ 下 $\Delta 1, \Delta 2, \Delta 3$ 和 $\Delta 4$ 的均值。将9个工况下的墩梁相对位移与规范计算的搭接长度进行对比,通过比值系数分析判断该桥在近场和断层地震动下的搭接长度是否合理。

由表7和图10可知,跨断层地震动下墩梁相对位移与规范计算的搭接长度比值都大于1,而近场地震动下的墩梁相对位移与规范计算的搭接长度比值小于1。说明此类桥梁在近断层地震动下规范计算出的最小搭接长度是满足需求的,而在跨断层地震动下则远远不足,从而导致引桥发生落梁破坏,故该桥跨越断层时还需做专门的研究。

表7 相对位移比值

Table 7 Relative displacement ratio

工况	$\Delta 1$	$\Delta 2$	$\Delta 3$	$\Delta 4$
工况1	4.14	3.42	4.04	5.30
工况2	1.85	1.51	1.68	3.40
工况3	2.46	1.95	2.30	2.13
工况4	1.97	1.07	1.11	2.90
工况5	2.51	1.58	1.61	1.87
工况6	5.68	3.78	3.62	3.37
工况7	1.90	1.07	1.17	1.69
工况8	2.75	2.30	1.85	3.03
工况9	0.31	0.53	0.44	0.25

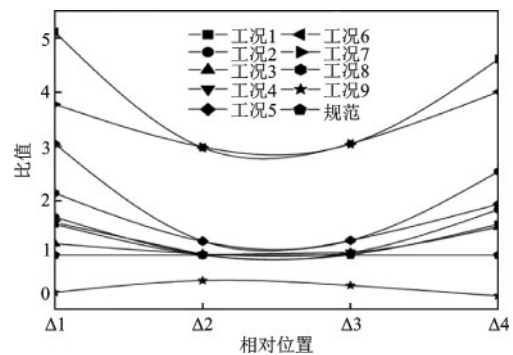


图10 相对位移比值

Fig.10 Relative displacement ratio

3 结论

以龙潭河大桥为研究对象,基于 ANSYS 平台

建立了该桥的有限元模型,分析了近断层和跨断层地震作用下高墩桥梁的结构弹塑性响应和搭接长度需求,结论如下:

(1)中国和日本规范对此类桥梁最小搭接长度计算相对保守,中国城市桥梁规范和日本规范比美国规范大1.178倍,《公路桥梁抗震设计规范》计算结果比美国规范大0.425倍。

(2)此类桥梁最小搭接长度不仅与墩高和跨径有关,还与地震强度有关,当 $PGA=0.6g$ 时,墩梁的相对位移是 $PGA=0.4g$ 的3倍,但仍满足规范要求。

(3)断层错动产生的地表破裂位移是导致跨断层落梁的主要因素,且墩梁相对位移超过规范要求,发生落梁破坏,故跨越断层桥梁需做专门的抗震研究。

参考文献:

[1] 王军文,李建中,范立础.桥梁结构地震碰撞效应及防落梁措施研究现状[J].公路交通科技,2007,24(5):71-75,80.
Wang J W, Li J Z, Fan L C. State of art of current studies on the effect of seismic induced pounding between adjacent bridge decks and falling-off prevention measures [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007,24(5):71-75,80.(in Chinese)

[2] 蓝先林,贾宏宇,郑史雄,等.实际土层对高墩桥梁端碰撞的影响[J].公路交通科技,2020,37(2):82-90.
Lan X L, Jia H Y, Zheng S X, et al. The influence of actual soil layer on the end collision of high-pier bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020,37(2):82-90. (in Chinese)

[3] Jack M, Gre F. Highway bridge and traffic management [J]. Earthquake Spectra, 1995, 11 (Sup2) :287-372.

[4] 陈大鹏.近断层地震下高架连续梁桥地震响应分析及减隔震控制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
Chen D P. Research on seismic response and reduction-isolation control of continuous girder viaduct under near-fault ground motion [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)

[5] Kawashima K, Takahashi Y, Ge H, et al. Reconnaissance report on damage of bridges in 2008 Wenchuan, China, earthquake [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2009,13(7):965-996.

[6] 陆新征,林旭川,田源,等.汶川、芦山、鲁甸地震极震区地面运动破坏力对比及其思考[J].工程力学,2014,31(10):1-7,20.

Lu X Z, Lin X C, Tian Y, et al. Comparison and discussion on destructive power of the ground motions recorded in the hardest-hit regions of Wenchuan, Lushan and Ludian earthquakes [J]. Engineering Mechanics, 2014,31(10):1-7,20. (in Chinese)

[7] Robert J, Krzysztof W, Yozo F. Reduction of pounding effects in elevated bridges during earthquakes [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2000, 29 (2) :195-212.

[8] Ruangrassamee A, Kawashima K. Control of nonlinear bridge response with pounding effect by variable dampers [J]. Engineering Structures, 2003, 25 (5) :593-606.

[9] Sami M, Perdo F S, Frieder S. Seismic response of sacrificial shear keys in bridge abutments [R]. Report No. SS-RP-2001/23. San Diego: Department of Structural Engineering University of California, 2001.

[10] Hao H. A parametric study of the required seating length for bridge decks during earthquake [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1998, 27 (1) :91-103.

[11] Ruangrassamee A, Kawashima K. Relative displacement response spectra with pounding effect [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamic, 2001, 30 (10) :1511-1538.

[12] 朱文正.公路桥梁减、抗震防落梁系统研究[D].西安:长安大学,2004.
Zhu W Z. Study on the collapse-proof systems for bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004. (in Chinese)

[13] Desroches R, Muthukumar S. Effect of pounding and restrainers on seismic response of multiple-frame bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(7) :860-869.

[14] Jia H Y, Zhang D Y, Zheng S X, et al. Local site effects on a high-pier railway bridge under tridirectional spatial excitations: nonstationary stochastic analysis [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 52:55-69.

[15] 贾宏宇,杜修力,李兰平,等.地震作用下梁体碰撞间隙宽度的概率分析方法[J].工程力学,2018,35(8):39-45.
Jia H Y, Du X L, Li L P, et al. Probability analysis method of pounding separation distance of bridges subjected to earthquake excitations [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(8):39-45. (in Chinese)

[16] Jia H Y, Lan X L, Zheng S X, et al. Assessment on required separation length between adjacent bridge segments to avoid pounding [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 120:398-407.

- [17] Jia H Y, Yue W Q, Zheng S X, et al. Time-dependent pounding probability analysis between adjacent decks of bridges under non-stationary stochastic seismic excitations[J]. Structures, 2020, 28: 2355-2366.
- [18] 孔艺达. 梁式桥防落梁最小搭接长度初步研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
Kong Y D. Preliminary study on the unseating prevention minimum seat length of girder bridge[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [19] 公路桥梁抗震设计规范: JTG/T 2231-01—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [20] 城市桥梁设计规范: CJJ 11—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [21] AAOSHTO. AASHTO LRFD bridge specification [S]. Washington D C: [s.n.], 2017.
- [22] Caltrans seismic design criteria version 1.1[S]. California: CALTRANS, 1999.
- [23] 日本道路协会. 道路桥示方书·同解说. V 耐震设计篇 [R]. 东京: 日本建设省土木研究所, 2012.
- [24] 刘泳伶. 近断层地震动作用下山区隔震建筑框架结构抗震性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
Liu Y L. Study on seismic performance of mountain isolated building frame structure under near-fault ground motion [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)
- [25] 陶夏新, 王国新. 近场强地震动模拟中对破裂的方向性效应和上盘效应的表达[J]. 地震学报, 2003, 25(2): 191-198.
Tao X X, Wang G X. Expression of rupture directional effect and hanging wall effect in the simulation of near-field strong ground motion[J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(2): 191-198. (in Chinese)
- [26] 陈志伟. 近断层脉冲地震作用下高墩大跨连续刚构桥梁抗震性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
Chen Z W. Study on seismic performance of long span rigid frame-continuous bridge subjected to near-fault pulse like ground motions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [27] 岳伟勤, 贾宏宇, 吴芮, 等. 远场地震下多跨简支梁桥搭接长度需求分析[J/OL]. 铁道标准设计: 1-9 [2022-09-22]. DOI:10.13238/j.issn. 1004-2954.202201240005.
Yue W Q, Jia H Y, Wu R, et al. Demand analysis of support length of multi-span simply supported beam bridge under far-field earthquake[J/OL]. Railway standard design: 1-9 [2022-09-22]. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.202201240005. (in Chinese)

(本文责编: 周小潭)