张玥,薛磊,陈帅,等.地震作用下高烈度区连续刚构桥参数敏感性分析[J].地震工程学报,2020,42(2):311-317.doi:10.3969/j. issn.1000-0844.2020.02.311

ZHANG Yue, XUE Lei, CHEN Shuai, et al. Parameter Sensitivity Analysis of Continuous Rigid-frame Bridges in High Seismic Intensity Regions under Seismic Action[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(2): 311-317. doi: 10.3969/j.issn. 1000-0844.2020.02.311

地震作用下高烈度区连续刚构桥参数敏感性分析

张 $玥^1$,薛 $磊^1$,陈 h^2 ,周 χ^3

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院,陕西 西安 710054; 2. 苏交科集团股份有限公司,江苏 南京 210017;3. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室,陕西 西安 710054)

摘要:大跨连续刚构桥的参数变化对其地震响应影响较大,为了进一步研究地震作用下刚构桥各参 数变化对桥梁内力的影响,以一连续刚构桥为例,采用正交数值试验的方法,以主梁跨中横桥向弯 矩、墩顶顺桥向弯矩、墩底顺桥向弯矩及墩底横桥向弯矩为考核指标,分析地震作用下结构参数(边 中跨比、梁底幂次、墩高比)的变化对桥梁内力的影响规律及其参数敏感性。研究结果表明:对于跨 中横桥向弯矩,墩高比对其影响较大,墩高比的增加可使弯矩值最大增加 28%;对于墩顶顺桥向弯 矩、墩底顺桥向弯矩以及墩底横桥向弯矩,边中跨比对其影响较大,边中跨比的增加可使弯矩值最 大分别增加 51%、55%和 52%。高烈度区的桥梁设计应重视边中跨比及墩高比的选择。

关键词: 刚构桥; 正交数值试验; 边中跨比; 敏感性

 中图分类号:
 TU311
 文献标志码:A
 文章编号:
 1000-0844(2020)02-0311-07

 DOI:
 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.311
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0</

Parameter Sensitivity Analysis of Continuous Rigid-frame Bridges in High Seismic Intensity Regions under Seismic Action

ZHANG Yue¹, XUE Lei¹, CHEN Shuai², ZHOU Mi³

(1.School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
 2. JSTI Group Co., Ltd., Nanjing 210017, Jiangsu, China;

3. Key Laboratory for Bridge and Tunnel Engineering of Shaanxi, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The seismic response of long-span, continuous rigid-frame bridges is greatly affected by a parameter change. To further study the influence of various parameters of rigid-frame bridges on the internal force of the bridge under the action of an earthquake, the orthogonal numerical test method was adopted with a continuous rigid-frame bridge as an example. The transverse bending moment at the middle span of the main beam, the longitudinal bending moment at the pier top and bottom, and the transverse bending moment at the pier bottom were taken as the evaluation indices. The influence law of structural parameters (side span-to-central span ratio, power of beam bottom, pier height ratio) on the internal force of the bridge under seismic action, and the parameter sensitivity were analyzed. Results in-

第一作者简介:张 玥(1978-),女,河北唐山人,博士,硕士研究生导师,副教授。E-mail:zhangyue7810@163.com。

通信作者:周 敉(1977-),男,陕西商州人,教授,工学博士。E-mail:zhoumi@chd.edu.cn。

收稿日期:2019-07-05

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2018SF-359);陕西省创新人才推进计划-科技创新团队(2018-TD-040);旧桥检测与加固技术交通运输行业重点实验室(长安大学)开放基金(300102210513)

dicated that the pier height ratio had a great influence on the mid-span transverse bending moment. Additionally, it was observed that with the rise in pier height ratio, the maximum bending moment value increased by 28%. The side span-to-central span ratio had a large influence on both the longitudinal bending moment at the pier top and bottom and the transverse bending moment at the pier bottom, and with the increase of side span-to-central span ratio, the maximum value of the bending moment increased by 51%, 55%, and 52%, respectively. Bridge design in high-intensity areas should pay close attention to the choice of side span-to-central span ratio and pier height ratio.

Keywords: rigid-frame bridge; orthogonal numerical experiment; side span-to-central span ratio; sensitivity

0 引言

桥梁结构作为生命线工程之一,一旦发生毁坏 会给抗震救援工作带来重重困难^[1]。位于高烈度区 的大跨度连续刚构桥通常要比常规的连续刚构桥地 震动效应规律性弱^[2],设计的复杂程度更大,需要考 虑的因素更多。大跨刚构桥因其结构特点,各种参 数变化对其地震响应影响较大。

Liu Haosu 等^[3]研究了不同设计参数时桥梁的 地震响应,Taysi 等^[4]对箱型直线桥和曲线桥进行 了优化;在不考虑地震作用时,朗强强^[5]、吴俊虢 等^[6]、惠涛^[7]、宋恒扬等^[8]研究了刚构桥上部结构及 下部结构设计参数的合理取值范围,并研究了参数 变化对经济性的影响。周勇军等^[9]除了考虑结构参 数变化外,同时考虑了地震波参数变化对刚构桥地 震响应的影响。魏忠臣^[10]、张敏^[11]进行正交试验 在考虑地震作用时分别研究了上部结构参数、下部 结构参数及其上下部结构参数同时变化时对桥梁地 震响应的影响,并对连续刚构桥的参数进行了优化。

通过以上分析可以看出,国内外学者针对桥梁 结构参数变化时对结构受力性能的影响多集中在基 本荷载作用时的研究,而研究地震作用下结构参数 变化对受力性能的影响较少,对于高烈度地震区的 结构分析就更少。为了进一步研究位于高烈度地震 区的刚构桥参数变化对桥梁结构地震响应的影响, 以一高烈度地震区的连续刚构桥为例,采用正交数 值试验的设计方法,以跨中横桥向弯矩、墩顶顺桥向 弯矩、墩底顺桥向弯矩以及墩底横桥向弯矩为考核 指标,研究刚构桥在结构参数(边中跨比、梁底幂次、 墩高比)变化时的地震响应规律及其参数的敏感性, 以期为高烈度地震区的桥梁设计提供参考依据。

1 工程背景与有限元模型

以某高速公路上一座大跨连续刚构桥为依托工程,其跨径组合为 90 m+148 m+80 m,总体布置图如图 1 所示。主梁采用预应力混凝土变截面箱梁,中跨支点处梁高 8.8 m,中跨跨中梁高 3.5 m。主墩墩身截面采用矩形实心墩,截面尺寸为 2.5 m×5 m,2 号主墩高 12.854 m,3 号主墩高 16.509 m。基础采用桩基础。上部结构主梁采用 C55 混凝土,桩基础与承台均采用 C35 混凝土,主墩墩身采用 C40 混凝土。



Fig.1 General layout (Unit:cm)

该桥选择有限元软件 Midas civil 进行模拟分析。计算模型以 X 轴为纵桥向, Y 轴为横桥向, Z 轴为竖桥向,全桥模型共计 400 个节点, 377 个单

元,主梁、墩柱、承台以及桩基础均采用梁单元模拟; 采用分层土弹簧模型模拟桩土相互作用,按照土层 厚度及单元划分施加土弹簧,弹簧刚度按照"m"法





2 地震动的输入

地震反应分析方法采用反应谱法和非线性时程 分析法,桥址区抗震设防烈度为9度,设计地震分组 为第一组,场地类别为Ⅲ类。根据《公路桥梁抗震设 计细则》(JTG/T B02-01—2008)^[12],该桥属于 B 类 桥,场地系数为1.0,常遇地震和罕遇地震的地震重 要性系数分别为0.5和1.7,地震输入按照一致激励 分别沿纵桥向+竖桥向、横桥向+竖桥向输入,常遇 地震和罕遇地震下的水平向地震加速度峰值分别为 PGA=0.2g和PGA=0.68g。选取1940年 Imperial Valley 的 El Centro 地震波、1971年 San Fernando 地震波、1979年 James RD 的 El Centro 地震 波作为地震输入,调整各条地震波的加速度峰值分 别为 0.2g 和 0.68g,调整方式如下:

$$\dot{a}(t) = a(t) * \frac{\dot{A}_{\max}}{A_{\max}}$$
(1)

式中:a(t)、 A_{max} 分别为原地震记录的加速度曲线 和峰值; $\dot{a}(t)$ 、 \dot{A}_{max} 分别为调整后地震的加速度曲 线和峰值。

水平向的加速度反应谱及地震加速度曲线如图 3、图 4 所示。对各数值模型在 E1 地震作用时的地 震响应特性进行分析,地震响应的结果取 3 条地震 波和反应谱分析结果的最大值。











3 参数选取及有限元正交数值试验设计

大跨度刚构桥参数变化对其地震响应影响较 大,选取边中跨比、梁底曲线幂次及墩高比为研究对 象,对刚构桥在上述三种参数变化时其地震响应规 律及各参数对其影响的敏感程度进行分析。根据已 建桥梁的数据确定各参数的取值^[13-15],将边中跨比、 梁底曲线幂次和墩高比三个影响因素分为三个水 平,不考虑交互作用的无重复试验,利用正交表 L9 (3⁴)建立9个数值试验模型对其数值试验数据进行 比较分析。因素与水平表及正交表如表1、表2 所列。

★Ⅰ 囚索与水平衣				
	Table 1	Factor and level		
→k TC		因素		
小十 -	A(边中跨比)	B(梁底曲线幂次)	C(墩高比)	
1	0.54	1.6	0.5	
2	0.56	1.8	0.75	
3	0.58	2.0	1.0	

表 2 L9(3⁴)正交表

 Table 2
 L9 (3⁴) orthogonal table

☆ 込 旦		列	号	
头独写 -	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

4 参数敏感性分析

经查阅结构在地震作用下的内力值发现,跨中 截面的横桥向弯矩、墩顶截面的顺桥向弯矩、墩底截 面的顺桥向弯矩和墩底截面的横桥向弯矩较大,对 结构设计起控制作用,因此,以跨中横桥向弯矩、墩 顶顺桥向弯矩、墩底顺桥向弯矩、墩底横桥向弯矩、墩 目标函数,分析边中跨比、梁底幂次、墩高比的变化 对其影响的规律及其参数的敏感性。各个数值试验 下控制截面的内力变化如图 5 所示。由图 5 可得: 结构参数的变化使得结构内力值呈波浪式变化,参 数的改变对内力值的影响较大,内力值甚至会出现 成倍增加的情况,因此有必要针对参数改变对内力



图 5 各个数值试验下控制截面的内力



值的影响做进一步研究。以方差与极差分析结果来 研究各个参数的敏感性,方差结果取置信度为 95% 的 *F* 检验,*F* 的临界值为 19。

(1) 跨中横桥向弯矩结果分析

跨中横桥向弯矩的正交数值试验结果如表 3 所 列,极差分析结果与方差分析结果如表 4 所列,跨中 横向弯矩与各影响因素的关系如图 6 所示。

表 3 跨中横桥向弯矩 M_z 正交数值试验结果(×10⁵ kN・m)

 Table 3
 Orthogonal test results of the transverse bending

moment M_z in mid-span ($imes 10^5$ kN \cdot m)

计心化标		影响因素	
14、3型1目7小	Α	В	С
k 1	4.50	4.03	3.53
k 2	4.03	4.10	4.10
k 3	3.63	4.03	4.53

注:ki 表示某个因素在第i 个水平下指标的平均值

表 4 极差与方差分析结果

Table 4 Range and variance analysis results

44 甲		影响因素	
泊木	A	В	С
极差结果/(×105 kN・m)	0.85	0.05	1.03
方差结果	114.3	0.53	165.9





对于跨中横向弯矩,因素墩高比的极差最大,即 墩高比的改变对于主梁跨中横桥向弯矩影响最大, 随着墩高比的增加,跨中横桥向弯矩呈增加趋势,墩 高比的增加使弯矩值最大增加 28%;其次是边中跨 比的影响,随着边中跨比的增加,跨中横桥向弯矩呈 减小趋势,边中跨比的增加使弯矩值最大减小 19%;梁底曲线幂次的影响最小,弯矩的变化值最大 不超过 1.7%。因此采用较大的边中跨比和较小的 墩高比可以减小跨中横向弯矩,较理想的参数组合 为 A3-B1-C1。从方差分析结果来看,墩高比的影响显著,边中跨比次之,梁底幂次最不显著,各个因素影响的显著顺序为 C-A-B。

(2) 墩顶顺桥向弯矩结果分析

3 # 桥墩墩顶顺桥向弯矩的正交数值试验结果 如表 5 所列,极差分析结果与方差分析结果如表 6 所列,墩顶顺向弯矩与影响因素的关系如图 7 所示。

表 5 墩顶顺桥向弯矩 M_y 正交数值试验结果(×10⁵ kN・m) Table 5 Orthogonal test results of the longitudinal bending

moment M_y at pier top ($\times 10^5$ kN \cdot m)

计心化标		影响因素	
山迎 11 1/1	A	В	С
k 1	1.46	1.63	1.83
k 2	1.93	2.00	1.97
k 3	2.20	1.96	1.80

表 6 极差与方差分析结果

 Table 6
 Range and variance analysis results

(仕田		影响因素	
知术	Α	В	С
极差结果/(×10 ⁵ kN・m)	0.73	0.36	0.16
方差结果	5.5	1.6	0.3





moment of pier top and the influencing factors

对于墩顶顺向弯矩,因素边中跨比的极差最大, 即边中跨比的改变对于墩顶顺桥向弯矩影响较大, 随着边中跨比的增加,墩顶顺桥向弯矩呈增加趋势, 边中跨比的增加使弯矩值最大增加51%;其次是梁 底幂次的影响,随着梁底幂次的增加,墩顶顺桥向弯 矩呈先增加后略微减小的趋势,当梁底幂次由1.6 变为1.8时,弯矩值增加23%左右,梁底幂次由1.8 变为2.0时,弯矩值减小2%左右;最后是墩高比的 影响,随着墩高比的增加,墩顶顺桥向弯矩先增加后 减小,当墩高比的增加,墩顶顺桥向弯矩先增加后 7.7%左右,墩高比由 0.75 变为 1.0 时,弯矩值减小 8.6%左右。因此采用较小的边中跨比和较小的梁 底幂次可以减小墩顶顺向弯矩,较理想的参数组合 为 A1-B1-C3。从方差分析结果来看,三个因素的 影响均不显著,各个因素影响的显著顺序为 A-B-C。

(3) 墩底顺桥向弯矩结果分析

墩底顺桥向弯矩的正交数值试验结果如表 7 所 列,极差分析结果与方差分析结果如表 8 所列,墩底 顺向弯矩与影响因素的关系如图 8 所示。

表 7 墩底顺桥向弯矩 M_y 正交数值试验结果 (×10⁵ kN・m)

Table 7 Orthogonal test results of the longitudinal bending

moment M_y at pier bottom (×10⁵ kN • m)

计心长行		影响因素	
山迎1117/1	Α	В	С
k 1	1.53	1.77	2.00
k 2	2.13	2.13	2.10
k 3	2.37	2.13	1.93

表 8 极差与方差分析结果

Table 8 Range and variance analysis results

4本 甲		影响因素	
4 禾	A	В	С
极差结果/(×10 ⁵ kN・m)	0.81	0.38	0.17
方差结果	6.5	1.7	0.3







对于墩底顺向弯矩,因素边中跨比的极差最大, 即边中跨比的改变对于墩底顺桥向弯矩影响较大, 随着边中跨比的增加,墩底顺桥向弯矩呈增加趋势, 边中跨比的增加使弯矩值最大增加55%;其次是梁 底幂次的影响,随着梁底幂次的增加,墩底顺桥向弯 矩呈先增加后趋于稳定的趋势,梁底幂次的增加使 弯矩值最大增加20%左右;墩高比的变化对弯矩的 影响微乎其微。因此采用较小的边中跨比和较小的 梁底幂次可以减小墩底顺向弯矩,较理想的参数组合 为 A1-B1-C3。从方差分析结果来看,三个因素的影 响均不显著,各个因素影响的显著顺序为 A-B-C。

(4) 墩底横桥向弯矩结果分析

墩底横桥向弯矩的正交数值试验结果如表 9 所 列,极差与方差分析结果如表 10 所列,墩底横向弯 矩与影响因素的关系如图 9 所示。

表 9	墩底横桥向弯矩 <i>M</i> ₂	正交数值试验结果($\times 10^5$	kN•	m)

Table 9 Orthogonal test results of the transverse bending

tmon	nent M_z at p	oier bottom	$(\times 10^5 \text{ kN})$	• m)
试验指标		影响日	因素	
风迎佰协	A	В		С

	A	B	C	
<i>k</i> 1	2.23	2.70	3.36	
k 2	2.90	2.93	2.80	
k 3	3.40	2.90	2.37	
				_

表 10 极差与方差分析结果

 Table 10
 Range and variance analysis results

45 甲		影响因素	
47本	A	В	С
极差结果/(×10 ⁵ kN・m)	1.16	0.24	1.02
方差结果	35.7	1.9	27.6







对于墩底横向弯矩,因素边中跨比的极差最大, 即边中跨比的改变对于墩底横桥向弯矩影响较大, 随着边中跨比的增加,墩底横桥向弯矩呈增加趋势, 边中跨比的增加使弯矩值最大增加 52%;其次是墩 高比的影响,随着墩高比的增加,墩底横桥向弯矩呈 减小趋势,墩高比的增加使弯矩值最大减小 29%; 最后是梁底幂次的影响,随着梁底幂次的增加,弯矩 值呈先增加后减小的趋势,当梁底幂次由 1.6 变为 1.8 时,弯矩值增加 8.5%左右,梁底幂次由 1.8 变为 2.0 时,弯矩值减小1%左右。因此采用较小的边中 跨比和较大的墩高比可以减小墩底横向弯矩,较理 想的参数组合为 A1-B1-C3。从方差分析结果来 看,边中跨比的影响最显著,其次是墩高比,最后是 梁底幂次,各个因素影响的显著顺序为 A-C-B。

从上述分析不难看出,边中跨比和墩高比的变 化对结构内力的影响较为显著,而梁底幂次的变化 对结构内力的影响不显著,因此高烈度区的桥梁设 计时边中跨比及墩高比的选择应予以重视。

5 结论

本文采用正交数值试验方法研究了地震作用下 连续刚构桥结构参数边中跨比、梁底幂次、墩高比的 变化对跨中横桥向弯矩、墩顶顺桥向弯矩、墩底顺桥 向弯矩、墩底横桥向弯矩的影响规律及其参数敏感 性,得到以下结论:

(1)对于跨中横桥向弯矩,边中跨比和墩高比的变化对其影响较大,边中跨比和墩高比的增加使 弯矩值最大分别减小19%和增加28%;采用较大的 边中跨比和较小的墩高比可以减小跨中横向弯矩;

(2)对于墩顶顺桥向弯矩和墩底顺桥向弯矩, 边中跨比和梁底幂次的变化对其影响较大,边中跨 比和梁底幂次的增加可使墩顶顺桥向弯矩值最大分 别增加51%和23%,使墩底顺桥向弯矩值最大分别 增加55%和20%;采用较小的边中跨比和较小的梁 底幂次可以减小墩顶和墩底顺向弯矩;

(3)对于墩底横向弯矩,边中跨比和墩高比的 变化对其影响较大,边中跨比和墩高比的增加可使 弯矩值最大分别增加52%和减小29%;采用较小的 边中跨比和较大的墩高比可以减小墩底横向弯矩。

边中跨比和墩高比的变化对结构内力的影响较 为显著,在高烈度区的桥梁设计时应对边中跨比及 墩高比的选择予以重视。

参考文献(References)

- [1] 唐永久,方圣恩.桩土作用对隔震梁桥地震易损性及震后通行 能力影响[J].地震工程学报,2018,40(4):721-727.
 TANG Yongjiu,FANG Sheng'en.Influence of Pile-Soil Interaction on the Seismic Fragility and Post-Earthquake Traffic Capacity of an Isolated Bridge[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(4):721-727.
- [2] 普云浩,廖玉凤,卢朝勇,高烈度区某高速铁路实心单薄壁墩连 续刚构桥抗震分析[J].建筑结构,2018,48(增刊2):982-985.
 PU Yunhao,LIAO Yufeng,LU Chaoyong.Seismic Analysis of Continuous Rigid Frame Bridge with Solid Single Thin-walled Piers in High Intensity Region of a High Speed Railway[J].

317

Building Structure, 2018, 48(Supp2): 982-985.

- [3] LIU H S.DONG J. YANG Y. et al. Analysis of Seismic Response for an Extradosed Cable-Stayed Curved Bridge Based on Different Design Parameters [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 226-228, 1551-1554.
- [4] TAYŞI N, ÖZAKÇA M. Free Vibration Analysis and Shape Optimization of Box-Girder Bridges in Straight and Curved Planform[J].Engineering Structures, 2002, 24(5):625-637.
- [5] 郎强强.预应力砼连续刚构桥的主梁与主墩的设计参数研究
 [D].重庆:重庆交通大学,2017.
 LANG Qiangqiang. Study on Design Parameters of the Main

Beam and the Main Pier of the PCContinuous Rigid Frame Bridge[D].Chongqing :Chongqing Jiaotong University,2017.

- [6] 吴俊虢,刘汉锡,王惠队,等.连续刚构桥主梁设计参数优化方法研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(7):1473-1480.
 WU Junguo,LIU Hanxi,WANG Huidui, et al.Study on Optimization Method for Design Parameters of Main Beam of Continuous Rigid Frame Bridge[J].Journal of Railway Science and Engineering,2017,14(7):1473-1480.
- [7] 惠涛.基于经济性的空腹式连续刚构桥设计参数优化[J].公 路,2017,62(6):90-94.

HUI Tao.Optimization of Design Parameters for Hollow Abdomen Continuous Rigid Frame Bridge Based on Economy[J]. Highway,2017,62(6):90-94.

[8] 宋恒扬,胡俊,彭元诚.空腹式连续刚构桥设计参数的正交试验 研究[J].世界桥梁,2015,43(1):55-58.

SONG Hengyang, HU Jun, PENG Yuancheng. Study of Orthogonal Test for Design Parameters of Open-Web Continuous Rigid-Frame Bridge[J].World Bridges,2015,43(1):55-58.

[9] 周勇军,全伟,贺拴海.基于正交试验的连续刚构桥地震响应敏 感性参数分析[J].地震研究,2006,29(2):176-181. ZHOU Yongjun,QUAN Wei,HE Shuanhai.Analysis on Sensitive Parameters to Earthquake Response of Continuous Rigid Frame Bridges Based on Cross Test Technique[J].Journal of Seismological Research, 2006, 29(2): 176-181.

[10] 魏中臣.不同参数下连续刚构桥地震响应研究[D].昆明:昆明 理工大学,2017.

> WEI Zhongchen.Research on Continuous Rigid Frame Bridge Grider Design Parameter Optimization Based on Dynamic Response[D].Kunming: Kunming University of Science and Technology.2017.

[11] 张敏.连续刚构桥地震响应下的设计参数优化[D].昆明:昆明 理工大学,2018.

> ZHANG Min.Optimization of Design Parameters for Seismic Response of Continuous Rigid Frame Bridges[D].Kunming: Kunming University of Science and Technology,2018.

- [12] 公路桥梁抗震设计细则:JTG/T B02-01-2008[S].北京:人民 交通出版社,2008.
 Guidelinesfor Seismic Design of Highway Bridges:JTG/T B02-01-2008[S].Beijing:China Communivation Publishing,2008.
- [13] 毛圣杰.连续刚构桥的抗震分析及桥墩结构参数优化[D].郑 州:郑州大学,2012.

MAO Shengjie.Seismic Analysis and the Parameter Optimization of Bridge Pier for Continuous Rigid Frame Bridge[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University,2012.

- [14] 苏佩,钱若霖,邬晓光.连续刚构桥墩高敏感性分析[J].沈阳 大学学报(自然科学版),2017,29(5):405-409.
 SU Pei,QIAN Ruolin,WU Xiaoguang.Sensitivity of Continuous Rigid Frame Bridge[J].Journal of Shenyang University (Natural Science),2017,29(5):405-409.
- [15] 李民伟,宁晓骏.不等高双肢薄壁墩对大跨连续刚构静力影响
 [J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2012,36(6):
 1279-1282.

LI Minwei NING Xiaojun. Analysis of the Static Influence of Large-Span Continuous Rigid Frame Bridge Considering Unequal Height of Double Thin-Wall Piers[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2012, 36(6):1279-1282.