

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.01.019

## 典型桥墩大跨梁桥施工全过程抗震性能综合决策\*

郑玉国, 宋英梁, 夏鸿翔

(湖南科技大学土木工程学院, 湖南湘潭 411201)

**摘要:** 在满足永久状态桥梁抗震设计要求的前提下, 针对典型桥墩大跨梁桥施工全过程抗震设计的难题, 通过综合考虑施工全过程抗震设计中的各种关键因素, 联合应用能力需求比法和层次分析法, 建立施工全过程抗震性能综合决策的框架。然后提出合理的决策策略, 定量决策出典型桥墩大跨梁桥施工全过程综合性能最优的抗震设计方案。研究表明, 在施工全过程的抗震能力满足要求的条件下, 典型桥墩大跨梁桥: 花瓶形实体桥墩连续梁桥、矩形空心薄壁桥墩连续梁桥、双柱实体桥墩连续梁桥施工全过程综合抗震性能的权重之比为 0.340:0.327:0.333。花瓶形实体桥墩连续梁桥施工全过程综合抗震性能为最优。所提出的方法和建立的框架, 可以广泛应用于各类桥梁施工全过程抗震设计及抗震性能综合决策。

**关键词:** 典型桥墩大跨梁桥; 施工全过程; 能力需求比法; 层次分析法; 抗震设计; 综合决策

**中图分类号:** U442.5; U448.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)01-0139-06

## A Comprehensive Decision on Seismic Performance of Long Span Girder Bridges with Typical Piers for Whole Construction Process

ZHENG Yuguo, SONG Yingliang, XIA Hongxiang

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** This study focuses on the seismic design difficulties of long span girder bridges with typical piers of the whole construction process. The capacity/demand method and the analytic hierarchy process were combined to establish a set of comprehensive decision frame for the synthetic decision on their seismic performance of the whole construction process by considering all essential factors in the design under the condition that their seismic design requirements of the permanent state were met. Then rational decision strategies were presented to decide the optimal seismic design scheme in the bridges quantitatively in terms of the comprehensive seismic performance of the whole construction process. The results show that the weight ratio of the bridges with typical piers, the vase-type-solid-pier continuous girder bridge, the rectangle-hollow-thin-wall-pier, and the double-column-solid-pier is 0.340:0.327:0.333 when their earthquake resistance in the whole construction process is satisfied. Namely, the vase-type-solid-pier bridge has the optimal comprehensive seismic performance of the whole construction process. The proposed method and frame can be extended to seismic design and comprehensive decision on seismic performance of other kinds of bridges of the whole construction process.

\* 收稿日期: 2018-02-07; 修回日期: 2018-05-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973计划, 2015CB057702)、湖南省自然科学基金项目(14JJ3109)资助

作者简介: 郑玉国(1978-), 男, 副教授, 博士。主要从事桥梁抗震方面的研究。Email: 666zyg@tongji.edu.cn

**Keywords:** long span girder bridges with typical piers; whole construction process; capacity/demand method; analytic hierarchy process; earthquake resistant design; comprehensive decision

## 引言

在多次大地震发生之前,均针对桥梁的永久状态进行良好的抗震设计,然而有些桥梁却在施工过程中遭受地震破坏且产生巨大损失<sup>[1-3]</sup>,表明施工桥梁的地震风险和抗震性能应受到更多的重视。大跨桥梁结构在施工过程中,其质量特性、刚度特性、边界条件和所受的荷载情况随施工过程的推进而不断改变,因此其多阶段施工状态的特性与成桥后永久状态的特性有很大的不同。许多国家基于桥梁永久状态而制定的抗震规范虽然已经非常成熟,但对施工桥梁的抗震设计并没有给出明确建议,这与防止施工桥梁地震损坏的现实需求并不相符。

郑玉国等<sup>[4]</sup>对大跨梁桥施工全过程的地震需求进行分析和比较,应用反应谱法探索了地震需求随施工过程推进而变化的规律,确定地震需求最不利的施工阶段。但由于施工全过程抗震性能评价的复杂性,不同典型桥墩大跨梁桥的地震需求之间不能直接比较,从而无法做出最合理的方案选择。

很显然,单独从地震需求或抗震能力的角度来评价结构的抗震性能并不全面和合理,而作为一种经济合理的抗震性能综合评价方法,能力需求比法(C/DR)将二者有效结合起来<sup>[5]</sup>。另一方面,作为一种定性和定量相结合的综合评价与决策方法,层次分析法(AHP)在桥梁的方案决策方面获得良好的效果<sup>[6]</sup>。

因此,联合应用C/DR和AHP,全面考虑桥梁施工全过程抗震设计的各种关键因素,决策出施工全过程综合抗震性能最优的设计方案,从而解决大跨梁桥施工全过程抗震设计方案选择的难题。

## 1 典型桥墩背景桥梁

以文献[4]中的三跨连续梁桥为背景桥梁,总体布置如图1所示,跨径分布为(45+80+45)m,上部结构为单箱单室变截面箱梁,采用挂篮悬臂施工方法。悬臂施工全过程包括0#梁段至9#梁段悬臂施工、边跨合拢(桥台处盆式支座参与工作)、体系

转换(中墩处盆式支座参与工作)、中跨合拢和桥面体系施工等共计14个阶段。

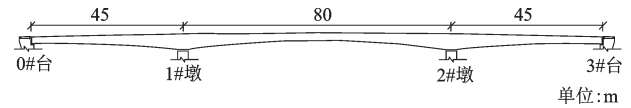


图1 桥梁立面总体布置

Fig.1 Elevation of the bridge

选取连续梁桥常用的三种典型桥墩型式分别作为该梁桥的1#和2#主墩:花瓶形实体桥墩、矩形空心薄壁桥墩和双柱实体桥墩,如图2所示。

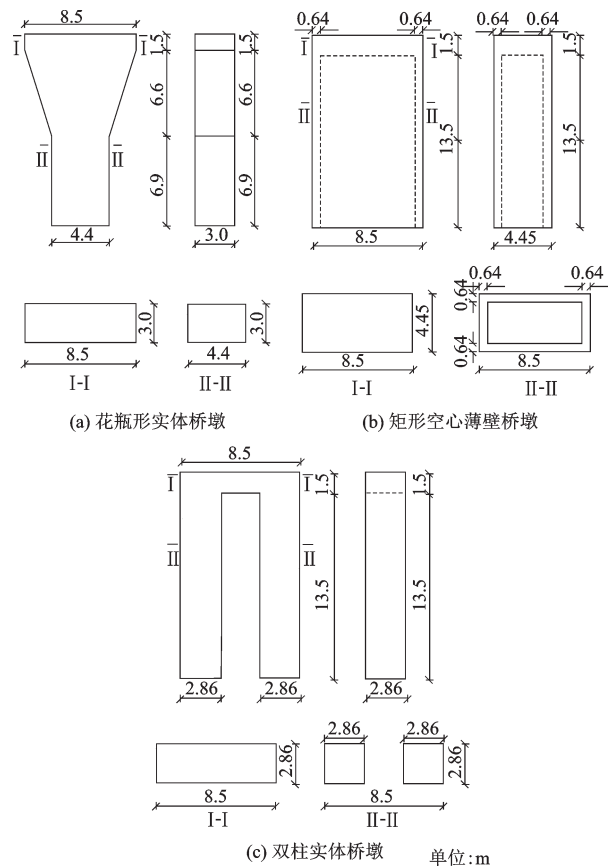


图2 桥墩布置与构造

Fig.2 Layouts and details of piers

为了具有可比性,各不同典型桥墩的连续梁桥均采用相同的盆式支座体系、桥墩承台和桩基础。桥墩和桩基采用C40混凝土,箍筋采用16mmR235钢筋,纵向钢筋采用28mmHRB335钢筋。

考虑桥梁处于I类场地,抗震设防类别为B类,

抗震设防烈度为8度,永久状态的桥梁经过良好的抗震设计,抗震设计均满足抗震规范<sup>[7]</sup>的要求。桩基和桥墩的配筋根据永久状态桥梁的抗震要求来确定,各典型桥墩的纵筋配筋率为0.652%,墩顶和墩底塑性铰区体积配箍率为0.459%,其它区域的体积配箍率为0.306%。

## 2 能力需求比评价

### 2.1 地震需求分析

在有限元建模过程中,各类施工临时荷载通过转化为对应节点的集中质量来进行模拟,采用六弹簧模型来模拟桩基,承台通过集中质量来模拟,上部结构主梁和下部结构桥墩分别采用非线性梁柱单元来进行模拟。边跨合拢之后两桥台上的盆式支座参与工作,体系转换之后两中墩上的盆式支座参与工作,盆式支座参与到整个结构体系中之后采用非线性 Wen 模型<sup>[8]</sup>来进行模拟。

考虑到桥梁所处的场地类型为I类,以对应规范反应谱<sup>[7]</sup>为基准生成包含横桥向、纵桥向和竖桥向的7组地震波。

虽然悬臂施工全过程经历时间较长,但面临的地震风险相对基于桥梁的设计基准期而确定的地震风险来说仍然较小,因此偏安全地采用 WSDOT 推荐的2.5的折减系数<sup>[9]</sup>来对其地震响应进行折减。

考虑上述施工桥梁的所有关键因素,基于所建立各施工阶段有限元模型,分别考虑横桥向、纵桥向和竖桥向的地震波输入,在考虑P-Δ效应的基础上,以7组地震波输入之后非线性时程分析结果的包络作为各典型桥墩大跨梁桥施工全过程最终的地震需求<sup>[10]</sup>。

### 2.2 抗震能力计算

对于塑性铰区的混凝土其本构关系采用式(1)所示的约束混凝土 Mander 模型,其他区域采用非约束混凝土 Mander 模型<sup>[11]</sup>。而对于钢筋,其本构关系采用 Park 模型<sup>[8]</sup>。

$$f_c = \frac{f_{cc}'(\epsilon_c/\epsilon_{cc})r}{r-1+(\epsilon_c/\epsilon_{cc})^r} \quad (1)$$

$$\epsilon_{cc} = [5(\frac{f_{cc}'}{f_c'} - 1) + 1] \epsilon_{c0} \quad (2)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (3)$$

式中, $f_{cc}'$ 、 $\epsilon_{cc}$ 为约束混凝土的最大压应力及对应的压应变; $f_c'$ 和 $\epsilon_{c0}$ 为无约束混凝土的抗压强度与相应的压应变; $E_c$ 为无约束混凝土的弹性模量; $E_{sec}$ 为约束混凝土最大强度值 $f_{cc}'$ 对应的割线模量。

基于相关材料的本构模型,考虑地震需求分析的结果,采用数值积分的方法即可得到各钢筋混凝土构件的抗震能力<sup>[12]</sup>。对于相关的盆式支座,在其参与到整个结构体系之后,根据对应的支座型号和规范<sup>[13]</sup>确定其抗震能力。

### 2.3 能力需求比评价

根据能力需求比法的基本原理<sup>[5]</sup>,结构构件能力需求比的计算如式(4)所示:

$$r_i = \frac{C_i - \sum D_{NSi}}{D_{EQ}} \quad (4)$$

式中, $C_i$ 为构件的抗震能力; $\sum D_{NSi}$ 为非地震荷载产生的结构响应; $D_{EQ}$ 为结构的地震需求。

如果结构构件的能力需求比大于给定的限值,则认为其抗震性能满足要求。在地震需求和抗震能力均确定的条件下,根据式(4)可以方便地计算出各典型桥墩连续梁桥施工全过程各构件纵桥向和横桥向的能力需求比及其分布。

若以各桥梁最不利桥墩的纵桥向能力需求比为例,其最小能力需求比的结果见表1,可以看出各典型桥墩桥梁最不利桥墩的最小能力需求比均大于2.5,说明它们的抗震能力均满足要求。

## 3 层次分析建模及决策

由于施工全过程抗震设计本身的复杂性,从表1可以看出,各典型桥墩大跨梁桥的抗震能力需求比无法在施工全过程的角度上直接而明确地进行比较,从而导致无法做出最优的方案选择。

因此,采用层次分析法依次递进地建立层次分析模型。首先,以各施工阶段的综合抗震性能最优为决策目标,按照施工阶段的划分对每个施工阶段进行层次分析决策。在此基础上,以施工全过程的抗震性能最优为决策目标,进行施工全过程综合性能最优的抗震设计方案决策。

### 3.1 层次分析建模

由于施工全过程大跨梁桥的抗震设计中横桥

表 1 最不利桥墩纵桥向最小能力需求比

Table 1 Longitudinal min-C/DRs of most unfavorable piers

施工阶段	最小能力需求比		
	花瓶形 实体桥墩	矩形空心 薄壁桥墩	双柱 实体桥墩
0#梁段	3.760	3.773	4.183
1#梁段	3.453	3.648	3.875
2#梁段	3.140	3.200	3.635
3#梁段	3.225	3.153	3.515
4#梁段	3.100	3.088	3.405
5#梁段	3.293	2.905	3.520
6#梁段	3.435	3.190	3.130
7#梁段	3.168	3.278	2.980
8#梁段	3.230	2.873	2.980
9#梁段	3.303	3.068	2.873
边跨合拢	3.788	4.740	2.828
体系转换	2.728	2.630	2.978
中跨合拢	3.073	3.613	2.500
桥面体系	3.015	3.493	2.978

向和纵桥向的抗震性能都需要兼顾,每个施工阶段的抗震设计包含许多关键构件:桩基、桥墩、支座等,因此以横桥向和纵桥向的抗震性能作为第一层次的决策准则,桩基、桥墩、支座等关键构件的抗震性能作为第二层次的决策准则,相应地各典型桥墩连续梁桥就作为层次分析的方案层。

根据上述分析,分别针对节段施工阶段(0#梁段至9#梁段施工阶段)、体系施工阶段(边跨合拢、体系转换、中跨合拢和桥面体系施工阶段)建立层次分析模型如图3(a)、(b)所示。在图3(a)中,根据能力需求比评价的结果,分别以桩基和桥墩的横桥向及纵桥向最小能力需求比、桩基和桥墩的横桥向及纵桥向最小能力需求比均匀性为二级评价准则。在图3(b)中,基于能力需求比评价的结果,分别以桩基、桥墩和支座的横桥向及纵桥向最小能力需求比、桩基、桥墩和支座的横桥向及纵桥向最小能力需求比均匀性为二级评价准则。相应地,横桥向和纵桥向的抗震性能分别确定为施工阶段层次分析模型的一级评价准则。

在各施工阶段层次分析的基础上,建立施工全过程的层次分析模型如图3(c)所示,该模型依据各

施工阶段层次分析的结果,以各施工阶段的综合抗震性能为评价准则。

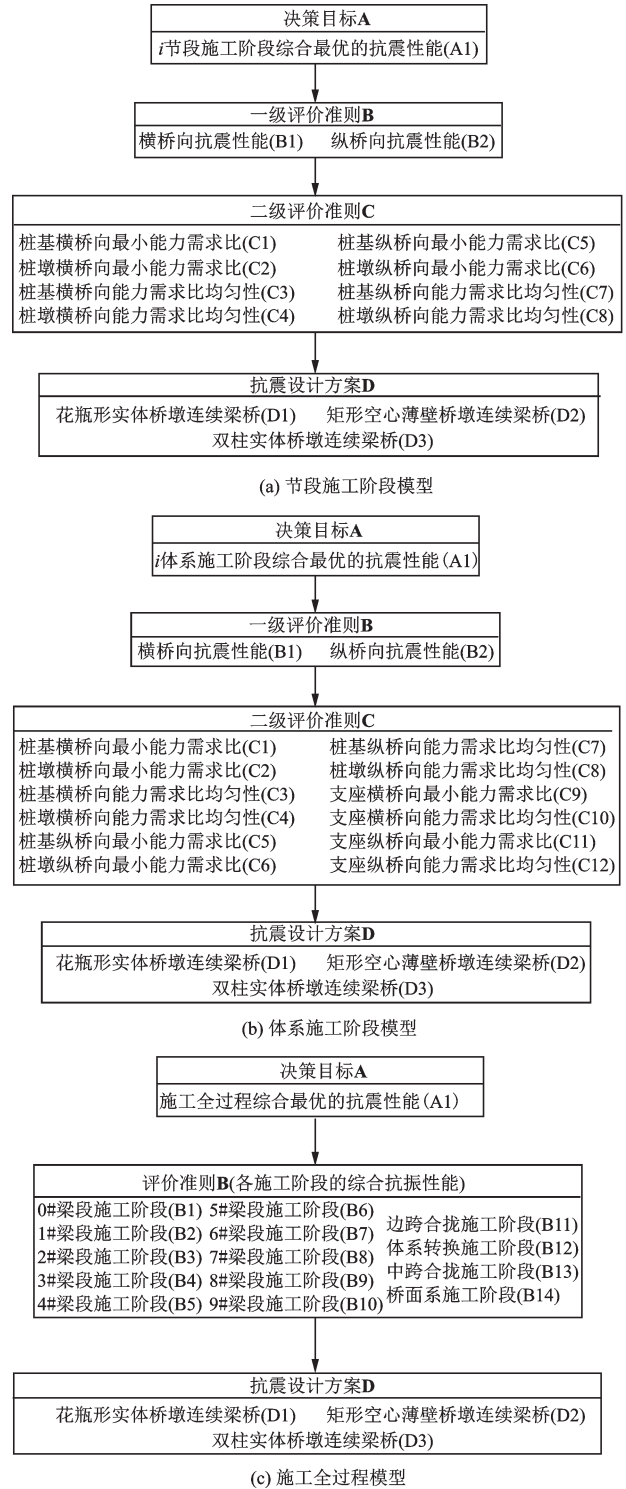


图 3 层次分析模型  
Fig.3 AHP models

### 3.2 决策策略

层次分析中非常重要的一项工作是确定下一

层次各元素相对于紧邻上一层次各元素的比较矩阵,通常基于专家咨询法来定性确定比较矩阵。由于不同专家的主观性非常强,而且不同专家的定性判断可能存在比较大的偏差,所以专家咨询法这种定性方法可能会导致层次分析的一致性检验不能通过或检验精度较低。

很显然,对于如图3(a)、(b)所示节段施工阶段和体系施工阶段的层次分析模型,方案层D相对于二级评价准则层C的比较矩阵由能力需求比分析的结果来定量确定。

对于如图3(c)所示施工全过程层次分析模型,其方案层D相对于评价准则层B的比较矩阵则由各施工阶段的层次分析结果来定量确定。因此将能力需求比法与层次分析法结合起来,毫无疑问可以得到更加定量而合理的最终决策结果。

对于如图3(a)和(b)所示施工阶段的层次分析模型中二级评价准则层C相对于一级评价准则层B的比较矩阵,可以通过二级评价准则中各元素相对于一级评价准则层各元素的相对权重来确定。

考虑到施工中大跨梁桥在地震作用下不同构件的重要性及潜在的维修加固难度和成本,很显然各构件最小能力需求比的重要性要高于其相应能力需求比均匀性的重要性,而支座、桥墩和桩基在地震作用下潜在的维修加固难度和费用依次增大,因此定义施工阶段的层次分析模型中二级评价准则层C各元素的相对权重见表2。

表2 施工阶段层次分析模型二级评价准则层相对权重定义  
Table 2 Defined priorities of elements in C respect to B for construction stages

	元素	相对权重定义
横桥向	桩基的最小能力需求比(C1)	6
	桥墩的最小能力需求比(C2)	5
	支座的最小能力需求比(C9)	4
	桩基的能力需求比均匀性(C3)	3
	桥墩的能力需求比均匀性(C4)	2
	支座的能力需求比均匀性(C10)	1
纵桥向	桩基的最小能力需求比(C5)	6
	桥墩的最小能力需求比(C6)	5
	支座的最小能力需求比(C11)	4
	桩基的能力需求比均匀性(C7)	3
	桥墩的能力需求比均匀性(C8)	2
	支座的能力需求比均匀性(C12)	1

另一方面,对于大跨梁桥施工阶段的抗震性能而言,横桥向和纵桥向的抗震性能具有相同的重要性,因此一级评价准则B相对于决策目标A的比较矩阵也可以很容易地确定。

对于如图3(c)所示施工全过程层次分析模型中评价准则层B相对于决策目标A的比较矩阵,可以通过评价准则中各元素相对于决策目标的相对权重来确定。很显然随着施工阶段的不断推进,相应结构的重要性越来越大、地震作用下结构的潜在维修加固难度和成本逐渐增大,因此定义施工全过程层次分析模型中评价准则层B各元素的相对权重见表3。

表3 施工全过程层次分析模型评价准则层相对权重定义  
Table 3 Specialized priorities of B respect to A for whole construction process

元素 <i>i</i> (施工阶段的综合抗震性能)	相对权重定义
0#梁段施工阶段(B1)	1
1#梁段施工阶段(B2)	2
2#梁段施工阶段(B3)	3
3#梁段施工阶段(B4)	4
4#梁段施工阶段(B5)	5
5#梁段施工阶段(B6)	6
6#梁段施工阶段(B7)	7
7#梁段施工阶段(B8)	8
8#梁段施工阶段(B9)	9
9#梁段施工阶段(B10)	10
边跨合拢施工阶段(B11)	11
体系转换施工阶段(B12)	12
中跨合拢施工阶段(B13)	13
桥面体系施工阶段(B14)	14

### 3.3 决策结果

根据建立的层次分析模型和所确立的决策策略,编制程序来对典型桥墩大跨梁桥施工全过程的综合抗震性能进行决策,程序框如图4所示。

基于确立合理的决策策略,构造各层次中的所有判断矩阵,在满足一致性检验的前提下,采用递阶加权算法<sup>[6]</sup>,计算得到决策结果。决策的结果表明:花瓶形实体桥墩连续梁桥、矩形空心薄壁桥墩连续梁桥和双柱实体桥墩连续梁桥,归一化的施工全过程综合抗震性能之比为0.340:0.327:0.333,即花瓶形实体桥墩连续梁桥施工全过程的综合抗震性能为最优。

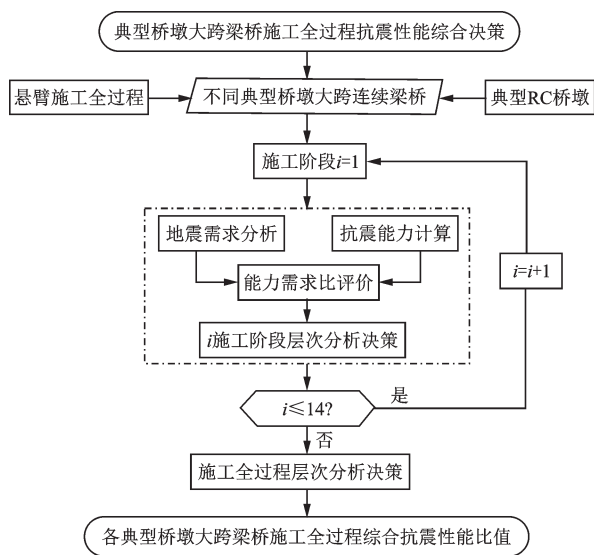


图4 决策程序框

Fig.4 Flow chart of the decision program

## 4 结论

联合应用C/DR与AHP,在层次分析建模和制定合理决策策略的基础上,建立典型桥墩大跨梁桥施工全过程抗震性能综合决策的框架并编制程序,对典型桥墩大跨梁桥施工全过程的抗震性能进行综合决策,结论如下:

(1)在施工全过程的抗震能力满足要求的前提下,各典型桥墩大跨梁桥:花瓶形实体桥墩连续梁桥、矩形空心薄壁桥墩连续梁桥和双柱实体桥墩连续梁桥,归一化的施工全过程综合抗震性能之比为0.340:0.327:0.333。

(2)能力需求比法与层次分析法的联合应用,可以获得更加定量而合理的大跨梁桥施工全过程抗震性能决策结果。

(3)提出的方法和建立的框架,可以广泛应用于各类桥梁的施工全过程抗震设计及方案决策。

## 参考文献:

[1] Kusnowidjaja M, Hiromichi H, Kazuki K. Derivation of near-source ground motions of the 1995 Kobe (Hyogoken Nanbu) earthquake from vibration records of the Akashi Kaikyo Bridge and its implications [J]. *Engineering Structures*, 2001, 1(23):1 256-1 268.

[2] Chang K C, Mo Y L, Chen C C, et al. Lessons learned from the damaged Chilú cable-stayed bridge [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2004, 9 (4) : 343-352.

[3] 庄卫林,刘振宇,蒋劲松.汶川大地震公路桥梁震害分析及对策[J].*岩石力学与工程学报*,2009,28(7): 1 377-1 387.

Zhuang W L, Liu Zh Y, Jiang J S. Earthquake induced damage analysis of highway bridges in Wenchuan earthquake and countermeasures [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(7) :1 377-1 387. (in Chinese)

[4] 郑玉国,袁万城.典型大跨连续梁桥悬臂施工全过程地震反应谱分析[J].*湖南科技大学学报(自然科学版)*,2013,28(3): 59-65.

Zheng Y G, Yuan W Ch. Response spectrum analyses of long span typical continuous girder bridges for whole cantilever construction process [J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 28(3): 59-65. (in Chinese)

[5] Buckle I, Friedland I, Mander J, et al. Seismic retrofitting manual for highway structures: part1-bridges [M]. McLean: FHWA, 2006.

[6] Valeo M, Nassif H, Issa L, et al. Analytic hierarchy process to improve simple bridge security checklist [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2014,2313(1): 201-207.

[7] 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.

Guidelines for seismic design of highway bridges: JTG/T B02-01—2008 [S]. Beijing: China Communications Press Co. Ltd., 2008.(in Chinese)

[8] CSI. Bridge seismic design [M]. Berkeley: Computers & Structures Inc., 2010.

[9] WSDOT. Bridge design manual [M]. Olympia: WS-DOT, 2008.

[10] 郑玉国,袁万城,罗阳青.大跨梁桥施工全过程地震响应非线性影响分析[J].*公路工程*,2015,40(6): 30-35.

Zheng Y G, Yuan W Ch, Luo Y Q. Nonlinear influencing analyses of long span girder bridge's seismic response for whole construction process [J]. *Highway Engineering*, 2015, 40(6): 30-35. (in Chinese)

[11] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. *Journal of the Structural Division of ASCE*, 1988, 114(8): 1 804-1 826.

[12] CALTRANS. Seismic design criteria version 1.4 [M]. Sacramento: CALTRANS, 2006.

[13] 公路桥梁盆式橡胶支座:JT 391—1999 [S]. 北京:人民交通出版社,1999.

Pot-type elastomeric pad bearing for highway bridge:JT 391—1999 [S]. Beijing: China Communications Press Co. Ltd., 1999.(in Chinese)

(本文责编:周小潭)