

# 典型大跨连续梁桥悬臂施工全过程 地震反应谱分析

郑玉国<sup>1</sup>, 袁万城<sup>2</sup>

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:**考虑大跨连续梁桥悬臂施工所面临的各种因素,对3座典型大跨连续梁桥:花瓶型实体桥墩桥梁、矩形空心薄壁桥墩桥梁和双柱实体桥墩桥梁,进行施工全过程地震反应谱分析,获得悬臂施工全过程桥梁结构地震响应的变化规律及比较特性。结果表明,在整个施工过程中内力峰值较多地集中在6<sup>#</sup>梁段、8<sup>#</sup>梁段、9<sup>#</sup>梁段、边跨合拢和桥面施工阶段,位移峰值主要集中在9<sup>#</sup>梁段和桥面施工阶段。3座桥梁之间的比较表明,总体上矩形空心薄壁桥墩桥梁在整个施工过程中表现出较大的抗震刚度,双柱实体桥墩桥梁次之,花瓶型实体桥墩桥梁最小。从抗震安全和抗震经济性的角度来看,应综合考虑施工阶段的地震风险和多个施工状态来进行大跨连续梁桥悬臂施工全过程的抗震设计。

**关键词:**典型大跨连续梁桥;悬臂施工;施工全过程;反应谱分析;抗震设计

**中图分类号:**U448.21<sup>+</sup>5

**文献标识码:**A

**文章编号:**1672-9102(2013)03-0059-07

采用悬臂施工的连续梁桥,由于施工阶段的受力与成桥阶段的受力比较接近、施工过程中利于桥下通航或者通行、施工技术比较成熟且成本较低<sup>[1]</sup>,所以在大跨桥梁和震区桥梁的建设中应用广泛。如1991年采用悬臂挂篮施工建成的云南六库怒江大桥<sup>[2]</sup>,为一座主跨154 m跨越怒江的三跨连续梁桥,抗震设防烈度为9度。大跨连续梁桥的悬臂施工过程一般会持续较长时间,例如跨径分布为90+3×165+90 m的南京长江二桥北汉桥<sup>[3]</sup>,其整个施工过程持续约3年时间。但在桥梁施工的任何时刻和任何阶段其面临的地震风险会一直存在,日本明石海峡大桥<sup>[4]</sup>和台湾集鹿大桥<sup>[5]</sup>在施工过程中发生地震破坏的情况就是很好的例证,施工中的青藏铁路也曾受到地震的影响而发生破坏<sup>[6]</sup>,汶川地震对施工中的奥运“鸟巢”也造成了一定的影响<sup>[7]</sup>。

一方面悬臂施工的大跨连续梁桥经历很多个施工阶段才能建成,结构在各施工阶段的质量、刚度等

特性不断发生变化,所受的边界约束和荷载等条件不断发生改变,各施工阶段的结构特性与抗震规范<sup>[8]</sup>所依据的成桥状态或永久状态的特性有本质区别。另一方面,在桥梁施工的任何时刻和任何阶段,结构所在震区可能发生地震的情况既是可以预期的也是客观存在过的。而当前国内外关于大跨连续梁桥地震性能方面的相关研究<sup>[9-14]</sup>和抗震设计方面的相关规范<sup>[8,15-17]</sup>,都是以桥梁的成桥状态或永久状态为基准来进行地震性能分析和抗震设计,很少关注或开展过大跨连续梁桥施工全过程地震性能方面的研究。

因此,进行大跨连续梁桥悬臂施工全过程地震性能方面的研究,了解和掌握结构的地震性能随施工过程的推进而变化的规律和特点,有助于完善大跨连续梁桥的抗震设计理论,进一步促进抗震设计规范的完善和发展。

收稿日期:2013-03-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50978194);湖南科技大学博士科研启动基金(E51364)

通信作者:郑玉国(1978-),男,湖北宜城人,博士,讲师,主要从事桥梁工程及结构优化方面的研究。E-mail: zyg780418@163.com

# 1 结构建模

选取跨径 45 + 80 + 45 m 的实际三跨连续梁桥作为研究对象,其上部结构为预应力混凝土变截面箱梁,上部结构的总体布置和横截面如图 1 所示. 该桥上部结构采用悬臂挂篮现浇法施工,半桥结构施

工梁段的划分如图 2 所示. 在梁段施工过程中,每个单“T”通过临时支座和 0<sup>#</sup>块的竖向预应力在主墩上进行临时固结,然后拆除相应的临时支座进行体系转换,再按先边跨后中跨的顺序进行合拢段施工,形成三跨连续箱梁,最后进行桥面系施工.

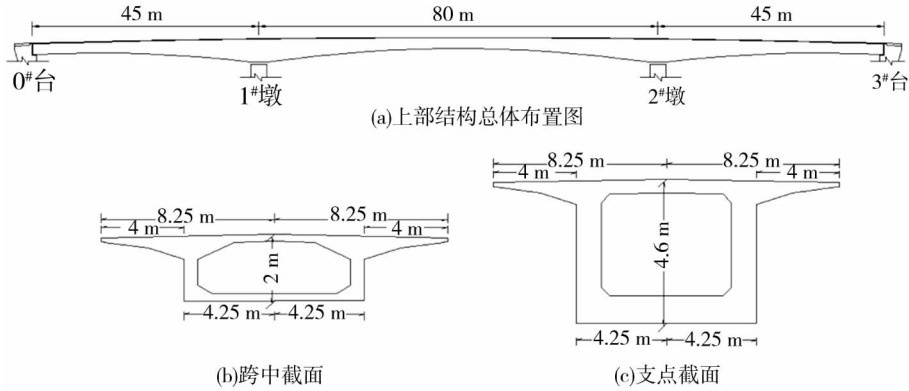


图 1 桥梁上部结构总体布置和横截面

Fig. 1 Layout and cross sections of the superstructure

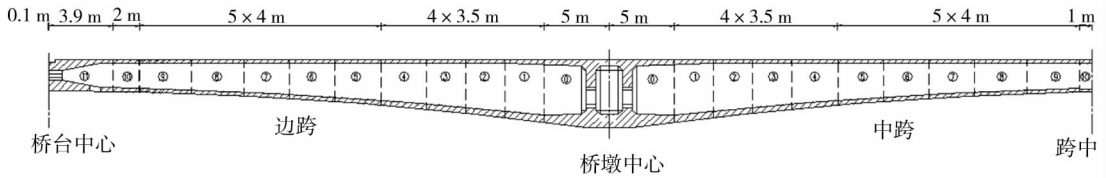


图 2 半桥结构施工梁段划分

Fig. 2 Girder construction segments for half a bridge

考虑到下部结构在桥梁的地震性能研究中具有十分重要的地位,因此选取 3 种典型而常用的桥墩型式来建立模型,分别是花瓶型实体桥墩、矩形空心

薄壁桥墩和双柱实体桥墩,在材料用量相同的条件下 3 种不同型式桥墩的几何布置及尺寸如图 3 所示.

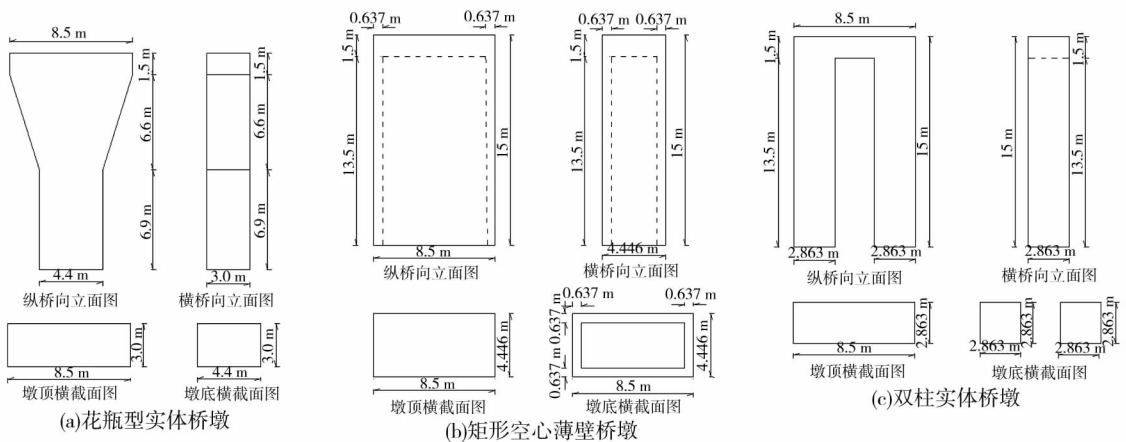


图 3 桥墩布置及尺寸

Fig. 3 Layouts and dimensions of piers

为了具有可比性,3座不同桥墩形式的悬臂施工大跨连续梁桥均采用如图1所示的上部结构,桥梁的基础均采用相同的承台和钻孔灌注桩基础,长方体承台的尺寸为 $8.5\text{ m} \times 8.5\text{ m} \times 3.0\text{ m}$ ,每个承台下为 $4\phi 2.2\text{ m}$ 的圆柱形钻孔灌注桩,桩长均为 $27.50\text{ m}$ ,材料均为C40混凝土。

对于施工状态中的桥梁结构,其与永久状态桥梁的一个很大区别在于各类施工荷载的存在。对于堆放在已施工梁段上的机具、材料、模板等临时荷载,它们大多自由放置于已施工完成的结构之上,因此对结构的地震性能影响不大,建模时可以忽略。但对于作为施工移动荷载的挂篮,一方面其在整个悬臂施工过程中基本上都是锚固于已施工完成的梁段之上,另一方面其自身重量较大,一般为 $300 \sim 700\text{ kN}$ ,在整个结构的质量体系中占有一定的分量。文献[18]的研究也表明,挂篮对施工全过程结构的动力特性有一定程度影响,因此在结构建模中必须考虑挂篮的作用。对于所研究的实际桥梁,每个挂篮的重量为 $450\text{ kN}$ ,挂篮前后支点间距 $4.0\text{ m}$ ,挂篮重心距前支点 $0.54\text{ m}$ ,根据挂篮的结构特性和锚固点位置,采用分别作用于前锚点和后锚点的集中质量来模拟挂篮的作用。

对连续梁桥的支座,通常为了简便将实际空间布置的支座简化为平面布置形式<sup>[14,19]</sup>,无疑这种简化可使计算简便并节省计算时间,但文献[18]的研究表明,支座的平面布置对结构的动力特性有较大程度影响。因此为了精确研究结构的地震性能,在结构建模时必须考虑支座的平面布置效应。

除此之外,建模时主梁和桥墩采用空间梁单元模拟,承台采用集中节点质量模拟。由于复杂的桩-土-结构相互作用效应,关于桩基础迄今为止出现了很多实用的简化模型,如六弹簧模型、等效嵌固模型、弹性嵌固模型、截断模型和全桩模型等<sup>[20]</sup>。本文基于规范的M法<sup>[21]</sup>,采用六弹簧模型来对桩基进行模拟。

## 2 桥梁施工过程中的地震荷载

关于施工桥梁的界定,AASHTO规范<sup>[22-23]</sup>和南卡罗莱纳州抗震设计规范<sup>[24]</sup>规定,对于持续时间5年以上的施工桥梁,应按永久结构的要求进行抗震设计。华盛顿州桥梁设计手册<sup>[25]</sup>规定,对于持续时间3年以上的施工桥梁,就应按永久结构的要求来进行抗震设计。否则,应按临时或施工结构的要求而非永久结构的要求来进行地震性能分析和抗震设计。

由于在桥梁的整个设计寿命之内地震的发生是一个小概率事件,因此施工桥梁的地震风险相对于永久桥梁来说要小。若按永久结构的地震风险来对施工桥梁进行抗震设计,从经济性的角度来说是不能接受的。AASHTO桥梁设计规范<sup>[22]</sup>规定,整体上施工桥梁的地震响应最大折减为相应永久结构的 $1/3$ 。而AASHTO桥梁抗震设计规范<sup>[23]</sup>和华盛顿州桥梁设计手册<sup>[25]</sup>规定,施工结构的地震响应最大折减为相应永久结构的 $1/2.5$ 。可以看出,相对于AASHTO桥梁设计规范<sup>[22]</sup>来说,AASHTO桥梁抗震设计规范<sup>[23]</sup>和华盛顿州桥梁设计手册<sup>[25]</sup>偏于安全和保守。

在国内,文献[26]提供的资料显示,三门峡黄河公路大桥在结构施工安全性与稳定性验算时,曾考虑过地震荷载,但并没有考虑地震荷载的折减效应。

综合考虑施工桥梁的地震风险、抗震安全和抗震设计的经济性,其地震响应偏安全地按照AASHTO桥梁抗震设计规范<sup>[23]</sup>和华盛顿州桥梁设计手册<sup>[25]</sup>的规定进行折减,折减系数取为 $2.5$ 。

## 3 反应谱分析

反应谱法是一种从给定地面运动反应谱或者光滑设计谱来确定结构最大地震响应的一种方法,其一般是基于具有有效刚度特性和等效粘滞阻尼比的单质点弹性模型来进行分析<sup>[27]</sup>。采用有限元法,可以建立多质点体系的地震振动方程:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = -[M]\{I_x\}\ddot{\delta}_g(t). \quad (1)$$

对于这一联立方程组,可利用振型分解法将多质点体系的复杂振动分解为各个振型的独立振动,从而可以采用单质点体系的反应谱理论来计算各振型的最大响应<sup>[28]</sup>。最后,将各个振型的最大响应按适当的方法进行组合,即可得到多质点体系的各项响应值。

为具有一般性,在分析的过程中地震动输入采用规范反应谱<sup>[8]</sup>,且分别考虑I类场地和III类场地。其中水平反应谱如式(2)所示,竖向反应谱取为水平反应谱的 $0.65$ 。

$$S_h = \begin{cases} S_{\max}(5.5T + 0.45) & T < 0.1\text{ s}; \\ S_{\max} & 0.1\text{ s} \leq T \leq T_g; \\ S_{\max}(T_g/T) & T > T_g \end{cases} \quad (2)$$

其中 $S_{\max} = 2.25C_i C_s C_d A$ , $C_i$ , $C_s$ , $C_d$ , $A$ 分别为抗震重要性系数、场地系数、阻尼调整系数和水平向设计基本地震动加速度峰值。

由于地震动主要集中在 20 Hz 以下的频带,从而激发的结构响应频率较低,因此运用反应谱法对结构进行地震响应分析只需要少数几个低阶振型即可获得满意的效果<sup>[28]</sup>.但应注意的,对于一个给定方向的分析,一般认为有效参与质量达到总质量的 80%~90% 才能获得桥梁结构地震响应的主要特征.因此为了获得比较精确的结果,取结构前 200 阶周期和振型来进行施工全过程的反应谱分析,此时各方向的累计振型质量参与系数均可达到 90% 以上.

在对桥梁结构进行横桥向或者纵桥向反应谱分析时,采用 CQC 法进行模态组合;同时将该方向的水平反应谱响应与相应竖向反应谱响应进行组合,方向组合采用 SRSS 法.

对施工各阶段结构所处的状态而言,下部结构的墩底截面是受力比较不利的位置,而墩顶是位移相对比较大的位置.而且很显然,在横桥向反应谱作用下,结构以横桥向受力和变形为主,而在纵桥向反应谱作用下结构以纵桥向受力和变形为主.

## 4 结果比较与讨论

### 4.1 横桥向反应谱分析结果

分别对 3 座不同桥墩型式的桥梁进行横桥向反应谱分析之后,3 座桥梁的墩底受力、墩顶位移随施工过程推进而变化的规律以及 3 座桥梁受力及变形之间的比较分别如图 4~图 7 所示.

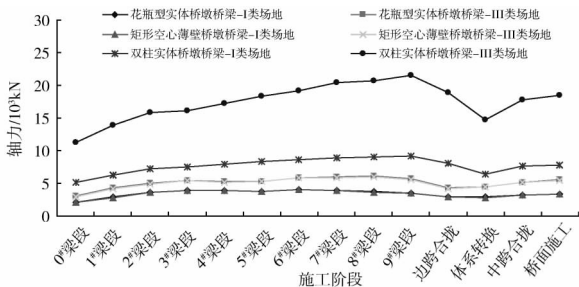


图 4 横桥向反应谱分析墩底轴力变化及比较  
Fig. 4 Variation and comparison of axial forces at pier bottoms in transverse response spectrum analysis

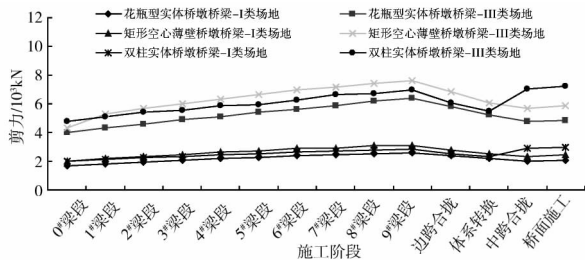


图 5 横桥向反应谱分析墩底剪力变化及比较  
Fig. 5 Variation and comparison of shears at pier bottoms in transverse response spectrum analysis

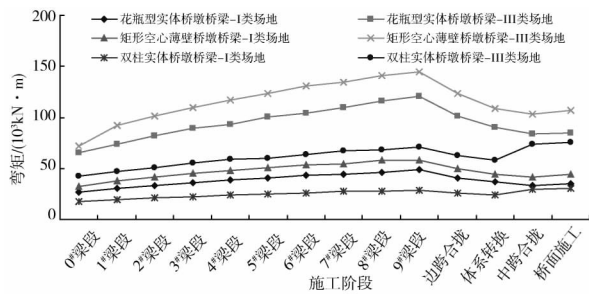


图 6 横桥向反应谱分析墩底弯矩变化及比较  
Fig. 6 Variation and comparison of bending moments at pier bottoms in transverse response spectrum analysis

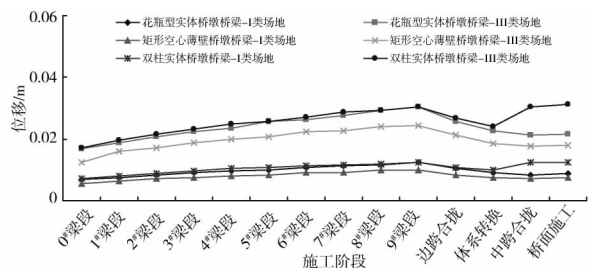


图 7 横桥向反应谱分析墩顶位移变化及比较  
Fig. 7 Variation and comparison of displacements at pier tops in transverse response spectrum analysis

横桥向反应谱分析的结果表明,3 座桥梁的墩底轴力随施工过程推进而变化的规律基本类似,轴力峰值主要集中于 6# 梁段、8# 梁段、9# 梁段和桥面施工阶段.另一方面从数值大小来看,在整个施工过程中花瓶型实体桥墩桥梁和矩形空心薄壁桥墩桥梁的墩底轴力非常接近,而双柱实体桥墩桥梁的墩底轴力比以上二者大许多.

在墩底剪力方面,3 座桥梁的墩底剪力随施工过程推进而变化的规律也基本类似,剪力峰值主要集中于 9# 梁段、边跨合拢和桥面施工阶段.而从数值大小来看,3 座桥梁的墩底剪力差别稍大,花瓶型实体桥墩桥梁的墩底剪力最小,双柱实体桥墩桥梁次之,矩形空心薄壁桥墩桥梁最大.

在墩底弯矩方面,3 座桥梁的墩底弯矩随施工过程推进而变化的规律基本相同,弯矩峰值主要集中于 9# 梁段和桥面施工阶段.从数值大小来看,在整个施工过程中 3 座桥梁的墩底弯矩差别较大,双柱实体桥墩桥梁的墩底弯矩最小,花瓶型实体桥墩桥梁次之,矩形空心薄壁桥墩桥梁最大.

在横桥向反应谱作用下,3 座桥梁的墩顶位移随施工过程推进而变化的规律也基本类似,位移峰

值主要集中于9<sup>#</sup>梁段和桥面施工阶段. 而从数值大小来看, 在整个施工过程中3座桥梁的墩顶位移大小差别稍大, 矩形空心薄壁桥墩桥梁的墩顶位移最小, 花瓶型实体桥墩桥梁次之, 双柱实体桥墩桥梁最大.

#### 4.2 纵桥向反应谱分析结果

分别对3座不同桥墩型式的桥梁进行纵桥向反应谱分析之后, 3座桥梁的墩底受力、墩顶位移随施工过程推进而变化的规律以及3座桥梁受力与变形之间的比较分别如图8~图11所示.

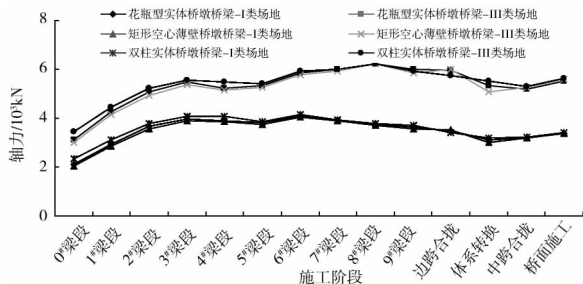


图8 纵桥向反应谱分析墩底轴力变化及比较

Fig. 8 Variation and comparison of axial forces at pier bottoms in longitudinal response spectrum analysis

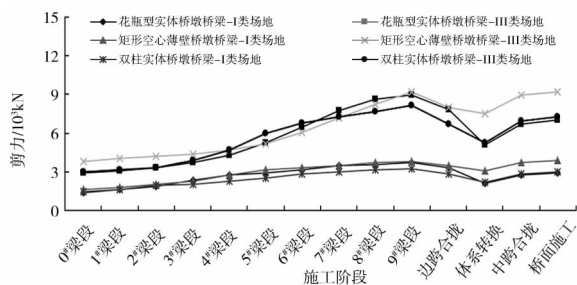


图9 纵桥向反应谱分析墩底剪力变化及比较

Fig. 9 Variation and comparison of shears at pier bottoms in longitudinal response spectrum analysis

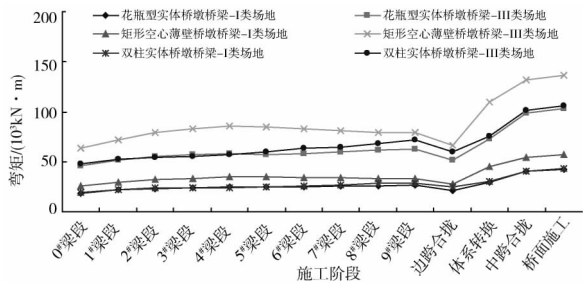


图10 纵桥向反应谱分析墩底弯矩变化及比较

Fig. 10 Variation and comparison of bending moments at pier bottoms in longitudinal response spectrum analysis

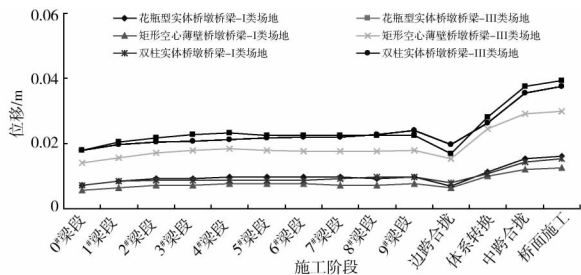


图11 纵桥向反应谱分析墩顶位移变化及比较

Fig. 11 Variation and comparison of displacements at pier tops in longitudinal response spectrum analysis

纵桥向反应谱分析的结果表明, 3座桥梁的墩底内力及墩顶位移随施工过程推进而变化的规律基本类似. 在整个施工过程中, 墩底轴力的峰值主要集中于6<sup>#</sup>梁段, 8<sup>#</sup>梁段和桥面施工阶段, 墩底剪力的峰值主要集中于9<sup>#</sup>梁段和桥面施工阶段, 而墩底弯矩峰值主要集中于桥面施工阶段, 墩顶位移的峰值主要集中于9<sup>#</sup>梁段和桥面施工阶段.

从数值大小来看, 3座不同桥墩型式桥梁结构的墩底轴力和剪力随施工过程推进而变化的曲线均交织在一起, 数值大小比较接近, 很难明确地区分哪座桥梁的墩底轴力和剪力在整个施工过程中一直保持最大或者最小. 在墩底弯矩方面, 矩形空心薄壁桥墩桥梁的墩底弯矩在整个施工过程中均保持最大, 而双柱实体桥墩桥梁和花瓶型实体桥墩桥梁的墩底弯矩随施工阶段推进而变化的曲线交织在一起, 数值也比较接近. 在墩顶位移方面, 矩形空心薄壁桥墩桥梁的墩顶位移在整个施工过程中一直保持最小, 而双柱实体桥墩桥梁和花瓶型实体桥墩桥梁的墩顶位移随施工过程推进而变化的曲线也交织在一起.

## 5 结论

3座典型大跨连续梁桥悬臂施工全过程地震反应谱分析的结果表明, 在整个施工过程中结构内力的峰值较多地集中在6<sup>#</sup>梁段、8<sup>#</sup>梁段、9<sup>#</sup>梁段、边跨合拢和桥面施工阶段, 而位移的峰值主要集中在9<sup>#</sup>梁段和桥面施工阶段.

桥墩型式不同的3座桥梁结构施工全过程地震响应之间的比较表明, 在大多数情况下, 矩形空心薄壁桥墩桥梁在整个施工过程中的内力相对最大而位移最小, 双柱实体桥墩桥梁次之, 花瓶型实体桥墩桥梁内力最小而位移最大. 这在一定程度上说明, 矩形空心薄壁桥墩桥梁在整个施工过程中表现出较大的抗震刚度, 双柱实体桥墩桥梁次之, 花瓶型实体桥墩桥梁最小.

考虑到地震响应峰值,包括内力响应和位移响应的峰值会在多个施工阶段出现,且内力峰值所处的施工阶段与位移峰值所处的施工阶段并不一一对应,而整个悬臂施工的过程又会持续较长时间,因此从抗震安全和抗震经济性的角度来看,应综合考虑施工阶段的地震风险和多个施工状态来进行悬臂施工大跨连续梁桥施工全过程的抗震设计。

## 参考文献:

[1] 范立础. 预应力混凝土连续梁桥[M]. 北京:人民交通出版社,1988.  
Fan L C. Prestressed concrete continuous girder bridge [M]. Beijing:China Communications Press,1988.

[2] 张继尧,王昌将. 悬臂浇筑预应力混凝土连续梁桥[M]. 北京:人民交通出版社,2004.  
Zhang J Y,Wang C J. Prestressed concrete continuous girder bridge constructed by cantilever method [M]. Beijing: China Communications Press,2004.

[3] 南京长江第二大桥有限责任公司. 南京长江第二大桥建设历程[EB/OL]. [2011-11-16]. <http://www.nj2q.com/construct.asp>.  
The Second Nanjing Yangtze River Bridge Compang Limited. The construction course of the Second Nanjing Yangtze River Bridge [EB/OL]. [2011-11-16]. <http://www.nj2q.com/construct.asp>.

[4] 胡兆同,刘建新. 明石海峡大桥的施工特点[J]. 国外公路,1997,17(6):20-23.  
Hu Z T,Liu J X. Construction features of Akashi Kaikyō Bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway,1997,17(6):20-23.

[5] 张国镇,周智杰. 集鹿大桥震害评估与修复之研究[R]. 台湾:国家地震工程研究中心,2004.  
Zhang G Z,Zhou Z J. The study of the damage evaluation and bridge retrofit in the CHI-LU Bridge [R]. Taiwan:National Center for Research in Earthquake Engineering,2004.

[6] 新浪. 地震“撕开”昆仑山脉 8.1 级地震余震不断施工中的青藏铁路受到破坏[EB/OL]. [2001-11-16]. <http://news.sina.com.cn/c/2001-11-16/401121.html>.  
Sina. Kunlun Mountains are torn, aftershock earthquake of the earthquake M 8.1 is continued and the construction of Qinghai-Tibet railway is damaged [EB/OL]. [2001-11-16]. <http://news.sina.com.cn/c/2001-11-16/401121.html>.

[7] 中国新闻网. 地震来袭只感轻微晃动“鸟巢”施工脚步不止[EB/OL]. [2008-05-19]. <http://www.chinanews.com/olympic/news/2008/05-19/1255263.shtml>.  
Chinanews. A slight shaking is felt by the Beijing's bird's nest and the construction will not stop [EB/OL]. [2008-05-19]. <http://www.chinanews.com/olympic/news/2008/05-19/1255263.shtml>. 2008-05-19.

[8] 重庆交通科研设计院. JTG/T B02-01-2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京:人民交通出版社,2008.

Chongqing Communications Research and Design Institute. JTG/T B02-01-2008 Guidelines for seismic design of highway bridges [S]. Beijing: China Communications Press,2008.

[9] 李建中,袁万城,范立础. 连续梁桥减、隔震体系的优化设计[J]. 土木工程学报,1998,31(3):47-54.  
Li J Z,Yuan W C,Fan L C. Optimal design of seismic isolation system for continuous bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 1998,31(3):47-54.

[10] Kowalsky M J. A displacement-based approach for the seismic design of continuous concrete bridges [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,2002,31(3):719-747.

[11] Ren W X,Zatar W,Harik I E. Ambient vibration-based seismic evaluation of a continuous girder bridge [J]. Engineering Structures,2004,26(5):631-640.

[12] 郭磊,李建中,范立础. 大跨度连续梁桥减隔震设计研究[J]. 土木工程学报,2006,39(3):81-85.  
Guo L,Li J Z,Fan L C. Research on seismic isolation design for long-span continuous bridges [J]. China Civil Engineering Journal,2006,39(3):81-85.

[13] Ghosha G,Singh Y,Thakkar S K. Seismic response of a continuous bridge with bearing protection devices [J]. Engineering Structures, 2011,33(4):1149-1156.

[14] 雷新弋. 典型大跨度连续梁桥地震反应规律与抗震性能[D]. 上海:同济大学,2009.  
Lei X Y. Seismic response law and performance of long span typical continuous girder bridges [D]. Shanghai:Tongji University, 2009.

[15] 日本道路协会. 道路桥示方书. 同解说 V 耐震设计编[S]. 东京:丸善出版株式会社,2002.  
Japan Road Association. Guidelines for road and bridge design V, seismic design [S]. Tokyo:MARUZEN Compang Limited,2002.

[16] Standards New Zealand Technical Committee. Structural design actions - Part 5: Earthquake actions - New Zealand [S]. Wellington:Standards New Zealand,2004.

[17] European Committee for Standardization. Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance - Part 2: Bridges [S]. Brussels:BSI,2005.

[18] Zheng Y G, Yuan W C. Study on dynamic characteristics of long span continuous bridge from construction to completion constructed by cantilever method based on perspective of earthquake resistance [C]//Advances in Civil Engineering and Architecture Innovation. Kreuzstrasse:Trans Tech Publications LTD,2012(368-373):988-992.

[19] 张国镇,李有丰,刘光晏. 应用非线性静力侧推分析于多跨简支钢筋混凝土桥梁抗震能力评估之研究[C]//台湾:中华民国第六届结构工程学术研讨会,2002.  
Zhang G Z, Li Y F, Liu G Y. Seismic evaluation of multi-span simple supported reinforced bridge by nonlinear static pushover analysis [C]// Taiwan:The 6th National Conference on Structural Engineering,2002.

[20] 周牧. 高桩承台桥梁抗震性能试验和理论研究[D]. 上海:同济大学,2008.  
Zhou M. Experimental and theoretical studies on seismic

- performance of elevated pile caps [ D ]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [ 21 ] 中交公路规划设计院有限公司. JTG D63 – 2007, 公路桥涵地基与基础设计规范[ S ]. 北京:人民交通出版社, 2007.  
China Highway Planning and Design Institute Compang Limited. JTG D63 – 2007, Code for design of ground base and foundation of highway bridges and culverts [ S ]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [ 22 ] AASHTO. AASHTO LRFD bridge design specifications [ S ]. Washington, DC: American Association of Highway and Transportation Officials, 2004.
- [ 23 ] AASHTO. AASHTO guide specifications for LRFD seismic bridge design [ S ]. Washington, DC: American Association of Highway and Transportation Officials, 2009.
- [ 24 ] SCDOT. Seismic design specifications for highway bridges [ S ]. South Carolina Department of Transportation, 2002.
- [ 25 ] WSDOT. Bridge design manual [ M ]. Olympia: Washington State Department of Transportation, 2008.
- [ 26 ] 雷俊卿. 桥梁悬臂施工与设计 [ M ]. 北京:人民交通出版社, 2000.  
Lei J Q. The cantilever construction and design of bridges [ M ]. Beijing: China Communications Press, 2000.
- [ 27 ] 普瑞斯特雷, 赛勃勒, 卡尔维. 桥梁抗震设计与加固 [ M ]. 袁万城, 胡勃, 崔飞等, 译. 北京:人民交通出版社, 1997.  
Priestley M J N, Seible F, Calvi G M. Seismic design and retrofit of bridges [ M ]. Yuan W C, Hu B, Cui F, et al, tran. Beijing: China Communications Press, 1997.
- [ 28 ] 范立础. 桥梁抗震 [ M ]. 上海:同济大学出版社, 1997.  
Fan L C. Earthquake resistance of bridges [ M ]. Shanghai: Tongji University Press, 1997.

## Response spectrum analyses of long span typical continuous girder bridge for whole cantilever construction process

ZHENG Yu – guo<sup>1</sup>, YUAN Wan – cheng<sup>2</sup>

- (1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China )

**Abstract:** Kinds of influencing factors in construction were considered, the seismic response spectrum analyses for whole cantilever construction were studied and compared with three long span typical continuous girder bridges, the vase – type solid pier, the thin – wall type rectangular hollow pier and the double – column type solid pier. The variation law of the seismic responses along with the construction stages was obtained and the comparison features were found out among the three bridges. The results show that the seismic internal force peaks mainly focus on the 6<sup>#</sup>, 8<sup>#</sup>, 9<sup>#</sup> girder segment, the side span closure and the deck construction stages. However the displacement peaks mainly appear at the 9<sup>#</sup> girder segment and the deck construction stage. The comparisons among the three bridges show that the bridge with the thin – wall type rectangular hollow pier has the maximum seismic stiffness in a great degree, the bridge with the double – column type solid pier takes second place and the bridge with the vase – type solid pier has the minimum stiffness. The seismic design should comprehensively consider the earthquake hazard in construction and multi – construction stages for the long span bridge constructed by the balanced cantilever method from the perspective of seismic safety and economy.

**Key words:** long span typical continuous girder bridge; cantilever construction; whole construction process; response spectrum analysis; earthquake resistant design