

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.07.015

# 六跨连续刚构组合梁桥合龙方案研究

陈荣刚

(福建省高速公路有限责任公司, 福建 福州 350001)

**摘要:** 根据福州绕城高速公路闽江特大桥六跨连续刚构组合梁桥的结构特点, 利用有限元软件 MIDAS/civil 建立了空间有限元模型进行施工仿真模拟。对不同合龙顺序合龙前后的应力增量和变形增量进行了分析比较, 探讨该类型桥梁合龙顺序的一般规律。结果表明: 不同体系转换次序对主梁应力和变形均存在不同程度的影响, 但合龙段全部完成后再进行体系转换, 主梁的应力增量和变形增量均较小; 六跨连续梁连续刚构桥采取次边跨对称合龙→边跨对称合龙→中跨对称合龙→体系转换为最合理的合龙顺序。分析结果可以为该桥合龙施工决策提供理论依据, 可以对类似桥梁合龙顺序的选择提供参考。

**关键词:** 桥梁工程; 合龙顺序; 仿真; 六跨连续刚构组合梁桥; 施工控制

中图分类号: U448.235

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2014)07-0091-06

## Study on Closure Scheme of Six-span Continuous Rigid Frame Composite Girder Bridge

CHEN Rong-gang

(Fujian Provincial Expressway Co., Ltd., Fuzhou Fujian 350001, China)

**Abstract:** According to the structural characteristics of 6-span continuous rigid frame composite girder bridge of Min River grand bridge on Fuzhou ring expressway, the FE model of the bridge is established by using FE software MIDAS/civil to simulate the construction process. The stress and deformation increments before and after closure with different closure sequences are comparatively analysed, and the general regularities of closure sequence for such kind of bridge are analyzed. The analysis result shows that (1) the impact of different system conversion orders on the main girder stress and deformation are different, but if system conversion is conducted after completion of all closure segments, the stress and deformation increments of the main girder are small; (2) the most reasonable closure sequence for 6-span continuous rigid frame composite girder bridge is secondary side span symmetrical closure→side span symmetrical closure→middle span symmetrical closure→system conversion. The analysis result provided a theory basis for closure decision-making of the studied bridge, which can be a reference for the closure sequence selection of such kind of bridges.

**Key words:** bridge engineering; closure sequence; simulation; 6-span continuous rigid frame composite girder bridge; construction control

### 0 引言

连续刚构组合桥是连续梁桥与连续刚构桥的合体, 兼顾了二者的诸多优点, 如桥面连续、整体性好、增大联长又突破了矮墩的限制<sup>[1]</sup>。目前, 连

续刚构桥的施工技术比较成熟, 一般按对称悬臂浇注→边跨合龙→中跨合龙→体系转换的顺序进行施工, 但对于多跨连续梁-连续刚构桥, 合龙顺序存在多样化。多跨连续刚构桥常见的合龙顺序有<sup>[2-6]</sup>: (1) 多跨连续体系1次合龙, 这样可使合龙段的荷

收稿日期: 2013-10-16

作者简介: 陈荣刚(1972-), 男, 福建尤溪人, 硕士, 高级工程师。(576633800@qq.com)

载同时均匀作用在最终结构上,且内力计算要简单得多,但施工控制难度大;(2)先将各静定T构小合龙,再按既定顺序对各超静定结构进行大合龙或大、小合龙方式综合采用,这样可以多点同时实施、互不干扰,且温度应力较小,施工容易。由于多跨连续梁-连续刚构桥的合龙顺序多样化<sup>[7-8]</sup>,且其高次超静定、连续孔数多,最终成桥需经历复杂的体系转换过程<sup>[9-11]</sup>,有关多跨连续梁-连续刚构桥的合龙顺序已有一些研究,但由于跨数、跨径、宽跨比、箱梁截面型式等因素的影响,工程应用中亦采用不同的合龙顺序。

本文以福州绕城高速公路闽江特大桥的六跨刚构连续组合桥为工程背景,采用有限元软件 MIDAS/Civil 进行施工仿真模拟,研究该桥最合理的合龙顺序,为类似桥梁合龙顺序的选择提供参考。

## 1 工程概况

闽江特大桥位于福州市闽侯县竹岐乡和荆溪镇之间的闽江上,全长 1 555 m,其中主桥为 (70+4×110+70) m 的预应力混凝土连续刚构组合梁桥,桥宽 2×16.5 m,总体布置图见图 1,并定义主桥各孔分别为边跨、次边跨和中跨。主桥 27<sup>#</sup>墩和 31<sup>#</sup>墩设置 GPZ 盆式支座,28<sup>#</sup>墩~30<sup>#</sup>墩与主梁固结形成刚构。

主桥箱梁为分幅式变截面单箱单室截面。中间支点处梁高 6.5 m,边跨直线段及各跨跨中处梁高 2.8 m,梁高变化段梁底曲线采用 1.8 次抛物线。箱梁横截面为单箱单室直腹板,箱梁顶板宽度为 16.5 m,底宽为 8.5 m,箱梁梁体 2 翼板悬臂长度为 4 m。箱梁底板水平,通过两腹板的高差实现顶板单向横坡,主梁标准断面图见图 2。

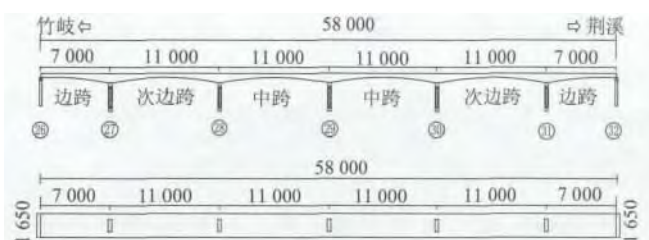


图1 六跨刚构连续组合桥总体布置图(单位:cm)

Fig. 1 Layout of 6-span continuous rigid frame composite girder bridge (unit: cm)

## 2 有限元模型和合龙顺序研究

### 2.1 有限元模型

采用桥梁专业软件 MIDAS/Civil 对结构进行分

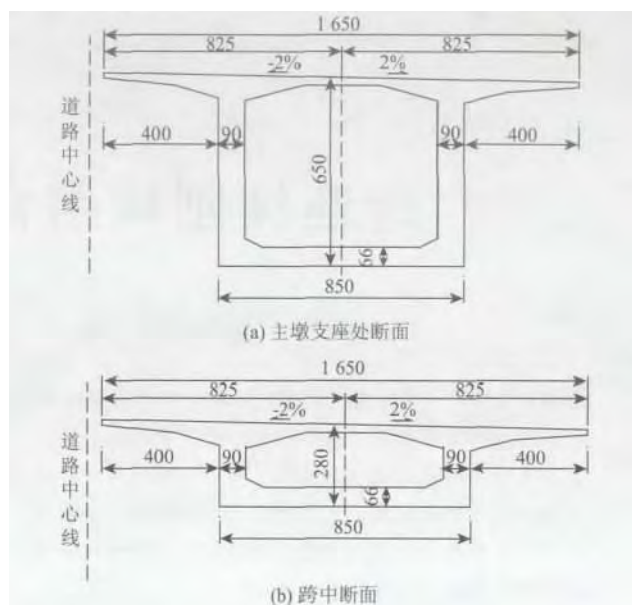


图2 主梁标准断面图(单位:cm)

Fig. 2 Standard section of main girder (unit: cm)

析计算,空间总体模型见图 3。全桥共 288 个节点,252 个梁单元,其中主梁单元 192 个,主墩单元 60 个。模型中在 26<sup>#</sup>、27<sup>#</sup>、31<sup>#</sup>、32<sup>#</sup>墩顶设置滑动支座,28<sup>#</sup>、29<sup>#</sup>、30<sup>#</sup>墩顶与相应主梁梁底刚性连接,预应力齿块和 0<sup>#</sup>块处横隔板以节点荷载计入,模型中不考虑横坡与纵坡的影响。考虑结构自重,预应力荷载和混凝土收缩徐变作用。计算简图见图 4。



图3 主桥总体模型

Fig. 3 Overall model of main bridge

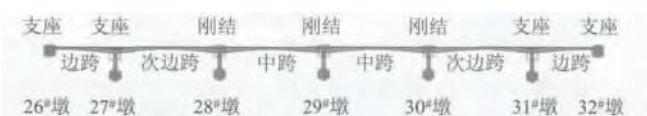


图4 计算简图

Fig. 4 Calculation diagram

### 2.2 合龙顺序划分

闽江特大桥的合龙段有边跨合龙段、中跨合龙段、次边跨合龙段,同时还要经过复杂的体系转换过程。考虑该桥的施工条件,根据中跨合龙的先后顺序,将合龙方案分为 6 种,列于表 1。限于篇幅,本文采取以下方式进行讨论:分析比较这 6 种合龙方案,确定最合理的方案,再对最合理方案的体系转换次序进行讨论。

表 1 各合龙方案的合龙顺序及简称

Tab. 1 Closure sequence of each closure scheme and abbreviation

| 方案 | 合龙的顺序                   | 简称  |
|----|-------------------------|-----|
| 1  | 中跨对称合龙, 边跨对称合龙, 次边跨对称合龙 | 中边次 |
| 2  | 中跨对称合龙, 次边跨对称合龙, 边跨对称合龙 | 中次边 |
| 3  | 边跨对称合龙, 中跨对称合龙, 次边跨对称合龙 | 边中次 |
| 4  | 次边跨对称合龙, 中跨对称合龙, 边跨对称合龙 | 次中边 |
| 5  | 边跨对称合龙, 次边跨对称合龙, 中跨对称合龙 | 边次中 |
| 6  | 次边跨对称合龙, 边跨对称合龙, 中跨对称合龙 | 次边中 |

2.3 合龙前的初始状态

不同的合龙顺序对成桥累计变形和内力的影响不同。为了得到合龙前后的主压应力增量和变形增量, 此处定义桥梁在进行各跨合龙前的状态为合龙前的初始状态。图 5 给出了合龙前的主压应力图和累计变形图。

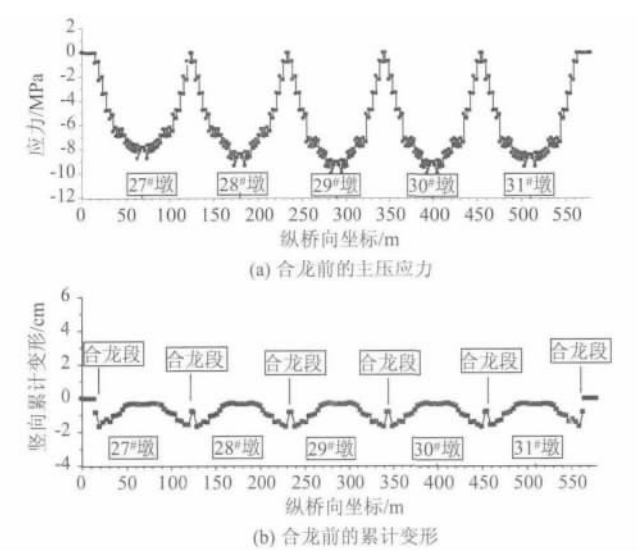


图 5 合龙前的主压应力图和累计变形图  
Fig. 5 Principal compressive stress and cumulative deformation before closure

3 合龙顺序研究

3.1 应力

不同的施工合龙顺序下桥梁的应力不同。通过 MIDAS 计算得到各合龙段全部浇注并张拉预应力后的应力, 并根据合龙前的初始状态, 最终得到各方案在合龙前后的主压应力增量, 见图 6, 各跨应力增量最大值见表 2 (由于结构变形对称, 故仅列出一半应力增量最大值)。

从图 6 和表 2 可以看出, 各合龙方案的主压应力曲线的最值点沿纵桥向位置相近且相差甚小, 经比较在各跨应力最值点的位置最大相差仅为 0.76 MPa, 因

此不同合龙顺序对主梁的主压应力影响并不显著。

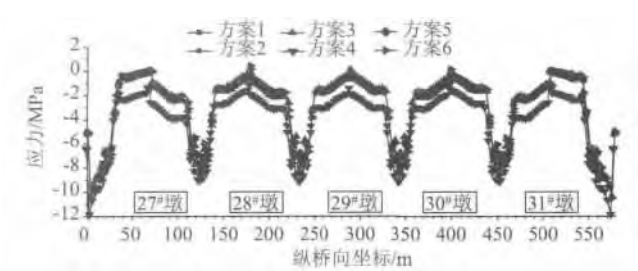


图 6 各方案在合龙后的主压应力增量图  
Fig. 6 Principal compressive stress increment in each scheme after closure

表 2 各方案合龙后的各跨应力增量最大值 (单位: MPa)

Tab. 2 Maximum stress increment of each span in each scheme after closure (unit: MPa)

| 方案 | 边跨     | 次边跨   | 中跨    |
|----|--------|-------|-------|
| 1  | -10.49 | -8.36 | -7.35 |
| 2  | -10.49 | -7.97 | -7.42 |
| 3  | -10.39 | -8.34 | -7.46 |
| 4  | -10.49 | -7.60 | -7.75 |
| 5  | -10.49 | -7.78 | -7.93 |
| 6  | -10.49 | -7.61 | -7.95 |

3.2 变形

依据《公路桥涵施工技术规范》(JTG T F 50—2011)<sup>[12]</sup>, 合龙段两端高差的控制精度应在 2 cm 以内。图 7 为各种合龙方案下合龙前后的主梁变形增量, 各合龙段两端的变形增量差值汇总于表 3。由图 7 可知, 不同的合龙顺序对合龙前后的主梁变形增量有较大的影响, 方案 1 和方案 3 的合龙端两端的变形增量差值达 2 cm 以上, 这无疑增加了施工线形控制的难度。以下从施工经济简便和施工线形控制等方面来讨论各合龙方案。

表 3 不同合龙顺序下合龙段两端变形增量差值 (单位: cm)

Tab. 3 Deformation increment differences between two ends of closure segment in different closure sequences (unit: cm)

| 方案 | 边跨合龙段 | 次边跨合龙段 | 中跨合龙段 |
|----|-------|--------|-------|
| 1  | 0.1   | 2.7    | 0.2   |
| 2  | 0.5   | 0.8    | 0.2   |
| 3  | 0.1   | 2.6    | 0.2   |
| 4  | 1.3   | 0.1    | 0.4   |
| 5  | 0.0   | 1.8    | 0.5   |
| 6  | 0.4   | 0.0    | 0.5   |

(1) 对于方案 1 和方案 2, 中跨均最先合龙。可以看出, 与方案 1 相比, 方案 2 采取中跨合龙后先进行次边跨合龙可有效减少次边跨两侧合龙段的两端变形增量差值, 但边跨直线段一旦施工完成, 该线形不易通过压重来调整, 方案 2 采取边跨最后合

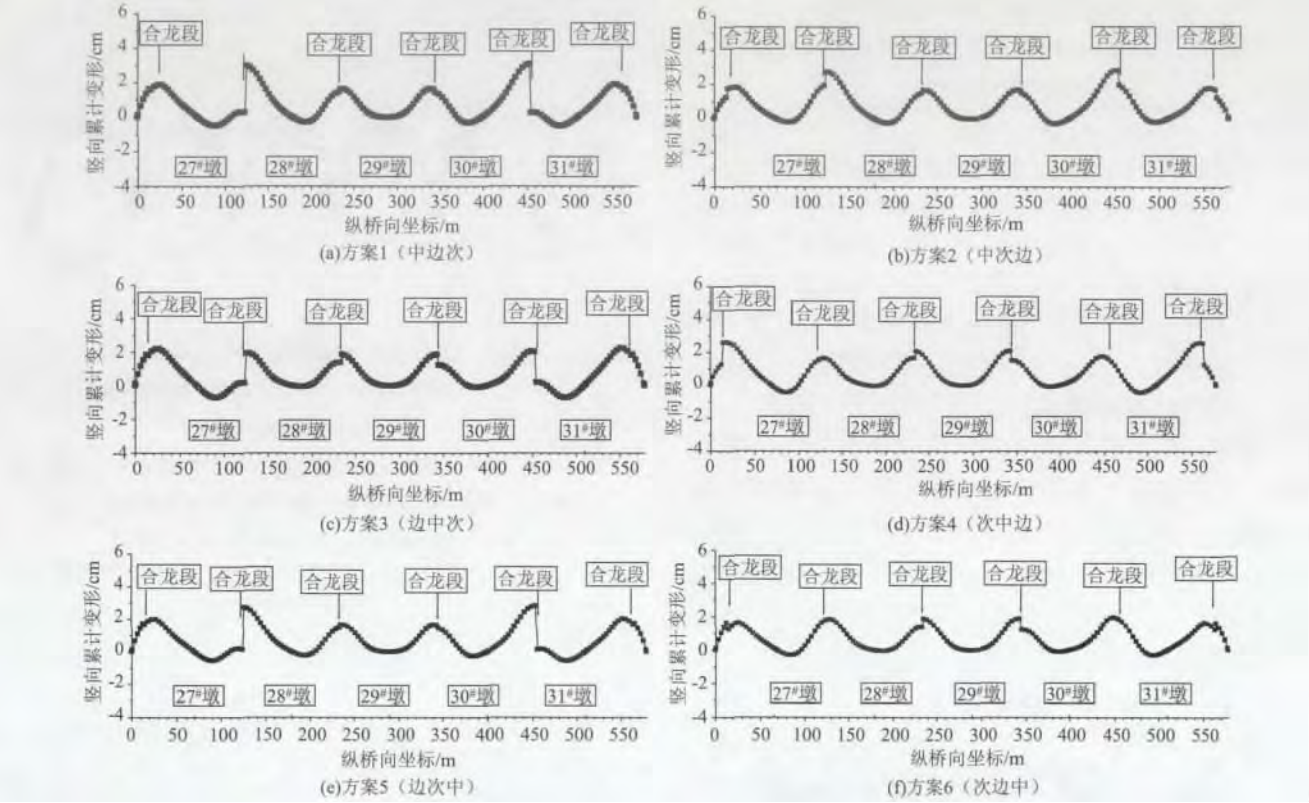


图 7 各方案合龙后的变形增量图

Fig. 7 Deformation increment of each scheme after closure

龙不利于边跨线形的控制。

(2) 对于方案 3 和方案 4，中跨合龙顺序排在第二。可以看出，与方案 1 相比，方案 4 采取次边跨最先合龙可有效减少次边跨两侧的合龙段两端变形增量差值，但边跨最后合龙不利于边跨线形控制。

(3) 对于方案 5 和方案 6，中跨最后合龙。可以看出，方案 6 优于方案 5，方案 6 采取次边跨最先合龙减少了次边跨两侧的合龙段两端变形增量差值，其次进行边跨合龙，最后进行中跨合龙，此时中跨和边跨两侧的合龙段两端变形增量差值仅为 0.5 cm。

因此，方案 6 不仅有利于边跨线形的控制，而且在中跨合龙前，主桥的连续长度较小，超静定次数较低，温度对桥梁线形影响也较小，这也与连续刚构桥的一般施工顺序相符。

3.3 体系转换次序研究

通过对各方案的比较可知，合龙方案 6（次边跨对称合龙→边跨对称合龙→中跨对称合龙）为最合理合龙方案。现对方案 6 的体系转换次序进行研究。表 4 列出了方案 6 的体系转换次序划分及简称，此处命名为次序 1、次序 2、次序 3。以各跨合龙前的状态为初始状态，各跨合龙后且体系转换后为最终状态，得到这 2 种状态的主压应力增量和变形增量，

见图 8、图 9。

表 4 合龙方案 6 的体系转换次序划分及简称

| Tab. 4 System conversion sequence division and abbreviation of closure scheme 6 |                            |      |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|------|
| 次序                                                                              | 体系转换的次序                    | 简称   |
| 1                                                                               | 次边跨对称合龙,边跨对称合龙,中跨对称合龙,体系转换 | 次边中体 |
| 2                                                                               | 次边跨对称合龙,体系转换,边跨对称合龙,中跨对称合龙 | 次体边中 |
| 3                                                                               | 次边跨对称合龙,边跨对称合龙,体系转换,中跨对称合龙 | 次边体中 |

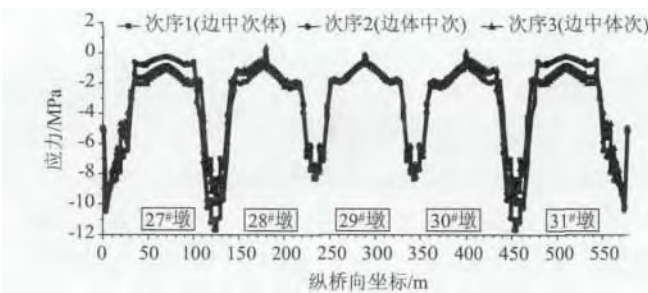


图 8 不同体系转换次序的主压应力增量图

Fig. 8 Principal compressive stress increments in different system conversion sequences

从图 8 和表 5 可以看出，次序 1 与次序 3 的应力增量差别不大，而次序 2 的次边跨应力增量最大值

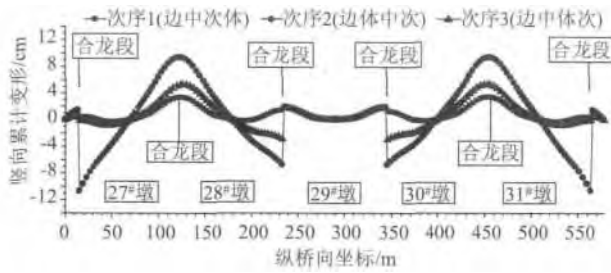


图9 不同体系转换次序的变形增量图

Fig. 9 Deformation increments of different system conversion sequences

较次序1、次序3大2.6 MPa,可见不同体系转换次序对主梁的应力有影响,表现在进行体系转换时的结构超静定次数越低,主梁应力变化越明显。

表5 不同体系转换次序的应力增量最大值(单位: MPa)

Tab. 5 Maximum stress increments of different system conversion sequences (unit: MPa)

| 次序 | 边跨    | 次边跨   | 中跨   |
|----|-------|-------|------|
| 1  | -10.2 | -9.1  | -8.4 |
| 2  | -10.5 | -11.7 | -8.2 |
| 3  | -10.1 | -9.9  | -8.2 |

从图9和表6可以看出,不同体系转换次序对主梁的变形影响较大,次序1的体系转换次序最为合理,次序2的合龙段两端变形增量差值最大,边跨合龙段两端的变形增量差值达12.2 cm,这对施工线形监控很不利,由此可见进行体系转换时的结构超静定次数越低,主梁变形越明显。

### 3.4 最合理合龙方案选择

综上分析可以得知,采取次边跨对称合龙→边跨对称合龙→中跨对称合龙→体系转换为最合理合龙方案,该方案采取单个T构先小合龙成Ⅱ构,最后T构与Ⅱ构之间大合龙,此合龙过程主桥的连续长度较小,超静定次数较低,温度对桥梁线形影响也较小。待各合龙段全部施工完成后,再进行体系转换,主梁的应力增量和变形增量也较小。该方案的各合龙段两端变形增量相差在0.5 cm以内,这对于施工中的线形控制十分有利。

表6 不同体系转换次序下合龙段两端变形增量差值(单位: cm)

Tab. 6 Deformation increment differences between two ends of closure segment in different system conversion sequences (unit: cm)

| 次序 | 边跨合龙段 | 次边跨合龙段 | 中跨合龙段 |
|----|-------|--------|-------|
| 1  | 0.5   | 0.0    | 0.5   |
| 2  | 12.2  | 0.0    | 8.6   |
| 3  | 0.5   | 0.0    | 4.7   |

## 4 结论

(1) 不同合龙顺序对6跨连续梁连续刚构桥的主梁应力影响较小。

(2) 对于6跨连续梁连续刚构桥,次边跨先于边跨合龙有利于桥梁线形的控制。

(3) 不同体系转换次序对主梁应力和变形均存在不同程度的影响,但合龙段全部完成后再进行体系转换,主梁的应力增量和变形增量均较小。

(4) 分析结果表明,六跨连续梁连续刚构桥采取次边跨对称合龙→边跨对称合龙→中跨对称合龙→体系转换为最合理的合龙顺序。

参考文献:

References:

- [1] 曹淑上,江建斌,张永水,等. 少联大跨径连续-刚构组合桥的受力分析及合龙顺序探讨[J]. 现代交通技术,2006,3(6): 34-37.  
CAO Shu-shang, JIANG Jian-bin, ZHANG Yong-shui, et al. Analysis on Mechanical Property and Closure Order of Long Span Continuous Rigid Frame Compounding Bridge [J]. Modern Transportation Technology, 2006, 3(6): 34-37.
- [2] 焦庆. 多跨连续刚构桥的合龙技术研究[J]. 现代交通技术,2008,5(6): 32-35.  
JIAO Qing. Research on Closure Technique of Multi-span PC Continual Rigid Frame Bridge [J]. Modern Transportation Technology, 2008, 5(6): 32-35.
- [3] 陈列,徐公望. 高墩大跨预应力混凝土桥桥式方案及合龙顺序选择[J]. 桥梁建设,2005(1): 33-35, 51.  
CHEN Lie, XU Gong-wang. Selection of Structural Types and Closure Sequences for Long-span and High-rise Pier PC Bridge [J]. Bridge Construction, 2005(1): 33-35, 51.
- [4] 蔡素军,张谢东,石明强,等. 连续梁桥不同合龙方案对施工控制的影响[J]. 交通科技,2007(5): 18-21.  
CAI Su-jun, ZHANG Xie-dong, SHI Ming-qiang, et al. Influence of the Different Girder Joint Scheme of Continuous Girder Bridge on Construction Control [J]. Transportation Science & Technology, 2007(5): 18-21.
- [5] 干学军,陈刚毅,魏霞,等. 大跨径多跨连续梁桥设计技术要点分析[J]. 建材世界,2011,32(4): 100-103.  
GAN Xue-jun, CHEN Gang-yi, WEI Xia, et al. Analysis of Technical Points of Long and Multi-span Continuous Girder Bridges [J]. The World of Building Materials, 2011, 32(4): 100-103.
- [6] 姚国文,宋文锋,周志祥,等. 多跨连续刚构桥水平

- 顶推力与合龙顺序优化 [J]. 公路与汽运, 2008 (1): 91 - 93.
- YAO Guo-wen, SONG Wen-feng, ZHOU Zhi-xiang, et al. Optimization for Top Horizontal Thrust Force and Closure Order of Multi-span Continuous Rigid Frame Bridge [J]. Highways & Automotive Applications, 2008 (1): 91 - 93.
- [7] 曹水东, 林云, 李传习, 等. 多跨连续刚构桥合龙方案分析 [J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2011, 36 (4): 576 - 581.
- CAO Shui-dong, LIN Yun, LI Chuan-xi, et al. Analysis on Closure Scheme of Multi-span Continuous Rigid Rame Bridges [J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2011, 36 (4): 576 - 581.
- [8] 刘小燕, 祁巍. 高墩大跨连续刚构桥合龙方案研究 [J]. 中外公路, 2009, 29 (5): 185 - 189.
- LIU Xiao-yan, QI Wei. Study on Closure Scheme of Continuous Rigid Frame Bridge with Large Span and High Piers [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009, 29 (5): 185 - 189.
- [9] 万重文, 肖星星. 多跨长联预应力混凝土连续箱梁桥合龙方案分析 [J]. 中外公路, 2009, 29 (1): 106 - 111.
- WAN Chong-wen, XIAO Xing-xing. Study on Closure Scheme of Multi-span PC Continuous Box Girder Bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009, 29 (1): 106 - 111.
- [10] 刘沐宇, 杜细春. 多跨 PC 刚构 - 连续组合梁桥的合龙次序分析 [J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29 (6): 107 - 110.
- LIU Mu-yu, DU Xi-chun. Analysis of Closure Process for PC Bridges with Rigid Frame-continuous Girders [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29 (6): 107 - 110.
- [11] 黄芳, 汪建竹. 五跨连续 - 刚构组合体系桥的合龙顺序对成桥状态的影响分析 [J]. 建筑施工, 2011, 33 (9): 868 - 869.
- HUANG Fang, WANG Jian-zhu. Impact Analysis of Closure Order of 5-span Rigid Frame Combined System Bridge upon Its Completed Status [J]. Building Construction, 2011, 33 (9): 868 - 869.
- [12] JTG T F50—2011, 公路桥涵施工技术规范 [S].
- JTG T F50—2011, Technical Specification for Construction of Highway Bridges and Culverts [S].

#### (上接第 83 页)

- [2] 庞加斌, 宋锦忠, 林志兴. 四渡河峡谷大桥桥位风的湍流特性实测分析 [J]. 中国公路学报, 2010, 23 (3): 42 - 47.
- PANG Jia-bin, SONG Jin-zhong, LIN Zhi-xing. Field Measurement Analysis of Wind Turbulence Characteristics of Sidu River Valley Bridge Site [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23 (3): 42 - 47.
- [3] 陈政清, 李春光, 张志田, 等. 山区峡谷地带大跨度桥梁风场特性试验 [J]. 试验流体力学, 2008, 22 (3): 54 - 59, 67.
- CHEN Zheng-qing, LI Chun-guang, ZHANG Zhi-tian, et al. Model Test Study of Wind Field Characteristics of Long-span Bridge Site in Mountainous Valley Terrain [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2008, 22 (3): 54 - 59, 67.
- [4] 李宇, 管青海, 刘建新, 等. 悬索桥施工猫道三维非线性静风失稳分析 [C] // 第十五届全国结构风工程学术会议暨第一届全国风工程研究生论坛论文集. 北京: 人民交通出版社, 2011: 170 - 173.
- LI Yu, GUAN Qing-hai, LIU Jian-xin, et al. 3D Nonlinear Aerostatic Wind Instability Analysis for the Catwalk of a Suspension Bridge [C] // Proceedings of the 15th National Conference on Structural Wind Engineering and the 1st National Forum on Wind Engineering Graduate Students. Beijing: China Communications Press, 2011: 170 - 173.
- [5] 李加武, 车鑫, 高斐, 等. 窄悬索桥颤振失稳控制措施效果研究 [J]. 振动与冲击, 2012, 31 (23): 77 - 81, 86.
- LI Jia-wu, CHE Xin, GAO Fei, et al. Effects of Wind-resistant Control Measures against Flutter Instability of a Narrow Suspension Bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31 (23): 77 - 81, 86.
- [6] JTG/T D60 - 01—2004, 公路桥梁抗风设计规范 [S].
- JTG/T D60 - 01—2004, Wind-resistant Design Specification for Highway Bridge [S].
- [7] BS5400, Steel, Concrete and Composite Bridges—Part 1 [S].
- [8] SIMIU E, SCANLAN R H. Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design [M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons Incorporation, 1996.
- [9] 陈政清. 桥梁风工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- CHEN Zheng-qing. Bridge Wind Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [10] ANDERSON J D. Fundamentals of Aerodynamics [M]. New York: McGraw-Hill, Inc., 1991.