

# Influence Factors Analysis for a Long-Span PC Continuous Girder Bridge Broadened with Seamless Method

Liang Liu<sup>1</sup>, Jianming Gu<sup>2</sup>, Fangyuan Li<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Bridge Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

<sup>2</sup>Zhejiang Jiaying Foda Construction Co., Ltd., Jiaying Zhejiang

Email: [fyli@tongji.edu.cn](mailto:fyli@tongji.edu.cn)

Received: Feb. 18<sup>th</sup>, 2016; accepted: Mar. 2<sup>nd</sup>, 2016; published: Mar. 9<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

In view of the deformation characteristics with time of long-span continuous beam, the creep and shrinkage, bearing settlement and loss of prestress impacted mechanical behaviours obviously. This paper selected a long-span continuous prestressed concrete (PC) girder bridge as an example, used the spatial finite element program, and analyzed the deformation and stress with different broaden times to study the influence on the seam with mechanism. The corresponding conclusions provided the theory basis for design and construction of broaden bridge.

## Keywords

Prestressed Concrete Continuous Girder Bridge, Bridge Broaden, Broaden Seam, Creep and Shrinkage

---

# 大跨径预应力混凝土连续梁桥无缝拓宽影响因素分析

刘 亮<sup>1</sup>, 顾建明<sup>2</sup>, 李方元<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>同济大学土木工程学院桥梁工程系, 上海

\*通讯作者。

<sup>2</sup>浙江嘉兴福达建设股份有限公司, 浙江 嘉兴  
Email: fyli@tongji.edu.cn

收稿日期: 2016年2月18日; 录用日期: 2016年3月2日; 发布日期: 2016年3月9日

## 摘 要

受大跨径连续梁长期变形特点的影响, 其无缝拓宽受到收缩徐变、支座沉降、预应力损失等因素影响明显。本文以某大跨径连续混凝土桥梁为例, 采用空间有限元程序, 研究大跨径预应力混凝土连续梁桥拓宽时, 五个时间段因素导致拓宽后桥梁接缝的受力特点, 分析接缝处应力作用机理, 为相应的拼接缝设计与施工提供理论依据。

## 关键词

预应力连续梁桥, 桥梁拓宽, 拼接缝, 收缩徐变

## 1. 前言

随着我国经济的快速发展, 导致现有公路无法适应交通流量的迅猛增长, 促使全国各地均在努力发掘现有公路的资源, 其中扩建已有公路是其中重要的方面。目前全国一半以上的高速公路网均在不同程度地进行不同规模的扩建, 包括线路延长、局部拓宽, 甚至全线拓宽等。按照交通部公路水路交通“十一五”科技发展规划, 高速公路改扩建是扩充运输能力的重要手段。

我国第一条进行改扩建的高速公路——沈大高速在 1984 年修建时建议投资约 22 亿元人民币, 而其改扩建工程总投资达 75 亿元。辽宁省将沈阳至四平高速公路改扩建成双向 8 车道、沈阳至山海关高速公路改扩建成双向 8 或 10 车道。广东省首条高速公路广(州)佛(山)高速公路于 1989 年 7 月建成通车, 于 1999 年由原设计的双向 4 车道扩建为双向 6 车道(部分 8 车道), 2002 年至 2004 年进行了大修, 2007 年至 2009 年又进行了扩建[1]。较大的工程还有: 沪宁高速公路于 1996 年建成通车, 2004 年开始从 4 车道向 8 车道的扩建工作。2009 年开始的连(云港)霍(尔果斯)高速公路潼关至西安段将原双向 4 车道高速公路双侧拼接加宽为双向 8 车道高速公路[2]。沈海高速公路福(州)厦(门)漳(州)段于 2008 年底全线动工扩建, 扩建长 262.1 公里, 将全线扩建为 8 车道, 总概算约 205.5 亿元。

在公路扩建过程中, 基本上以原有线路的拓宽为主。其中包括有较高比例的桥梁工程, 这在广佛高速、沪宁高速扩建中都存在。如京津塘高速公路拓宽工程中, 需拼接加宽的特大桥 2 座, 合计 4913.5 m; 大桥 4 座, 合计 1022.6 m; 中桥 26 座, 合计 1396 m; 小桥 18 座, 合计 380 m。总计桥梁 50 座, 7712.1 延米[3] [4]。

针对拓宽中的桥梁工程部分, 按桥梁拓宽扩建时新、旧桥桥面结构是否相连分为两种类型: 一类是在原有线路边一定距离的新建拓宽; 另一类是改造既有线路, 进行桥面无缝拓宽扩建。本文是以无缝拓宽扩建中的桥梁拼接缝为研究对象。

然而, 在无缝拓宽时, 扩建部分与既有部分桥梁由于建设时间的不同而导致的设计、施工、使用、维护等方面的差异, 导致两者在拼接缝处存在应变不协调或应力缺陷。这些差异可能导致无缝拓宽拼接后, 新旧桥拼接缝处出现开裂破坏现象十分明显, 导致拼接缝出现破坏的原因可能包括新旧桥不同的基础沉降、混凝土收缩徐变、温度效应、预应力效应, 以及新旧桥设计时采用的设计规范或标准不一致

[5]-[8]。按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2004) [9]的定义, 以上因素均属于桥梁的永久作用或可变作用范畴。

受上述单个作用或多种作用的共同影响, 新旧桥梁接缝处的应力或应变一旦超出允许范围后, 导致接缝处的开裂或“啃边”现象严重, 即发生沿接缝两侧的撕裂和啃蚀破坏, 导致裂缝在桥面横向扩展出现新的裂缝, 且这些裂缝会随时间进一步增大。其中表现较为明显的是竖向位移差将会直接影响行车平稳, 严重时会影响行车安全。加上可能出现的排水渗漏等, 导致桥梁使用性能和使用寿命大打折扣。实践证明, 从结构角度处理新旧桥拼接缝的问题不能根本解决其长期使用性, 而且后期的改造维护或采用分阶段施工的方法不仅影响行车安全, 也降低了桥梁使用性[5] [6] [10]。

大跨径预应力混凝土桥梁, 受预应力损失、混凝土收缩徐变、基础沉降、温度作用、汽车荷载分布等因素, 导致其后期使用过程中的变形特征会因时而异。如果采用无缝拓宽方式进行改造, 新旧桥梁受上述主要因素的影响必然导致拼接缝受力的不利, 从而导致拼接缝破坏。本文以某大跨径拓宽桥梁为例, 通过空间有限元分析, 探讨大跨径预应力混凝土桥梁进行无缝拓宽时拼接缝处受力特点及其影响因素, 为相应的拼接缝设计与施工提供理论依据。

## 2. 背景工程

### 2.1. 背景工程介绍

相对于小跨径简支梁桥, 在拓宽过程中, 其影响因素较为单一, 结构刚度与变形等需要的结构和构造处理也相对容易。而大跨径连续桥梁则多因素影响明显。因此本文选择分析对象桥梁为三跨等宽变截面预应力混凝土连续箱梁桥, 跨径组合 85 m + 125 m + 85 m, 全长 295 m。两幅桥宽均为 12.75 m, 桥面间间隔为 150 cm。道路等级为一级公路, 设计车速为 100 km/h, 设计荷载为汽车超-20 级, 验算荷载取挂车-120 [11]。桥梁整体布置图如图 1 所示, 桥梁的关键截面图如图 2 所示。拼接缝设置考虑施工及后期受力, 参考原有桥梁横向布置, 综合各方面因素也取接缝宽 10 cm, 拼接厚度 20 cm。本文重点关注上部结构的处理, 下部基础除基础沉降差异外, 连接设置不作分析。

拼接缝受力为新旧桥间的受力差或变形差所引起。为了获取拼接后接缝的应力状态, 需要掌握既有桥梁与新桥在拼接前和拼接后的状态。为此研究的方法是先分析既有桥梁的实际受力状态和在各因素作用下的变形或应力状态, 以此为基准来分析新桥建成后及拼接缝施工前、施工完成、施工后一段时间(如 10 年)的受力状态, 分别对应拼接前后接缝的受力差异、拼接后受新桥长期性能变化影响导致的缝受力差异[12]-[14]。由于拼接缝受力为多向多尺度影响, 因此采用 Midas/Civil 空间有限元程序进行分析。

### 2.2. 旧桥既有状态

关于该桥的计算分析, 计算模型采用梁单元, 一共有 385 个节点和 384 个单元。其边界条件按照实际桥梁支座设置, 即其中一中墩支座设置铰结外, 其他支座设置竖向约束和横桥向约束。由于实际关注的是后期影响, 因此在计算过程中不考虑施工过程, 该桥的成桥模型如图 3 所示。

图 4 和图 5 分别为旧桥在持久状况正常使用极限状态荷载效应组合下的竖向变形包络图和持久状况正常使用极限状态自重作用下竖向变形图。图 4 和图 5 为各跨的竖向变形如表 1 所示。

按规范 JTG D62-2004 第 7.1.1 条[9]: 按持久状况设计的预应力混凝土受弯构件, 应计算其使用阶段正截面混凝土的法向压应力、受拉区钢筋的拉应力和斜截面混凝土的主压应力, 并不得超过规范规定的允许值(图 6)。在使用荷载作用下, 持久状态下预应力混凝土构件的法向压应力容许值为(扣除全部预应力损失)应符合下列规定:  $\sigma_{pc} \leq 0.5f_{ck} = 0.5 \times 32.4 = 16.2 \text{ MPa}$ 。

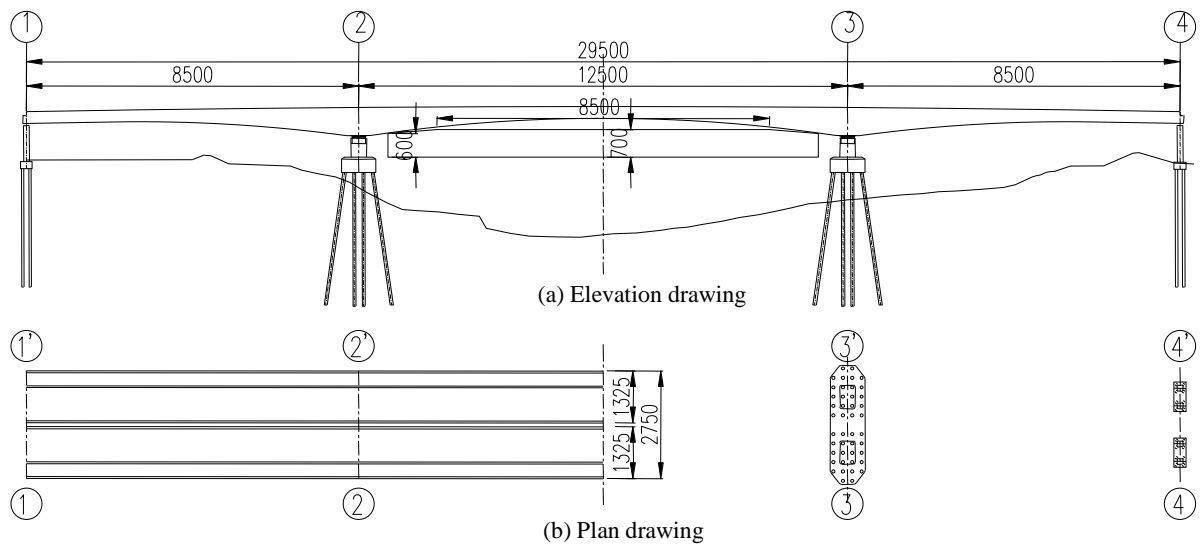


Figure 1. Elevation and plan layout of bridge (unit: cm)

图 1. 桥梁的立面和平面图

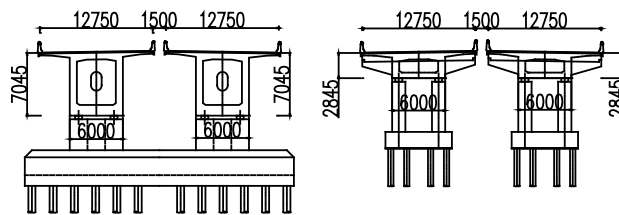


Figure 2. Main sections layout

图 2. 桥梁的剖面图

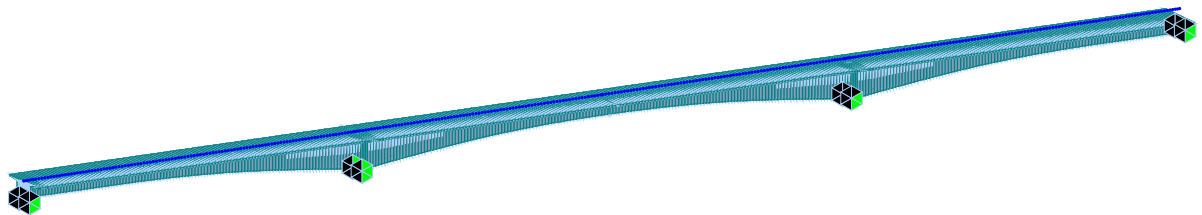


Figure 3. Finite element model of old bridge before broaden

图 3. 老桥拼接前有限元模型图



Figure 4. The envelope of vertical deformation under short-term load

图 4. 短期荷载作用下竖向变形包络图



Figure 5. The vertical deformation under long-term self-weight load

图 5. 自重长期作用下竖向变形图

**Table 1.** The vertical deformation at different span (unit: mm)**表 1.** 各跨的竖向变形(单位: mm)

项目	左边跨	中跨	右边跨
短期荷载作用下竖向变形	45.119	-60.56	45.007
自重长期作用下竖向变形	-60.734	-154.601	-60.734

**Figure 6.** The normal pressure of concrete under long-term condition**图 6.** 长期状况下混凝土法向压应力图

从图 6 可以看出, 在荷载长期效应组合下, 箱梁最大法向压应力值为  $\sigma_{pc} = 16.36 \text{ MPa} > 16.2 \text{ MPa}$ , 则持久状态下预应力混凝土构件的法向压应力不满足该要求。鉴于原有设计是依据 85 规范, 此处按 04 规范验算, 且超限范围和截面区间较少, 认为基本满足。在使用荷载作用下, 持久状态下预应力混凝土构件的主压应力容许值为:  $\sigma_{cp} \leq 0.6f_{ck} = 0.6 \times 32.4 = 19.44 \text{ MPa}$ 。在荷载长期效应组合下, 箱梁最大主压应力值为  $\sigma_{pc} = 16.36 \text{ MPa} < 19.44 \text{ MPa}$ , 则持久状态下预应力混凝土构件的主压应力满足该要求。

由规范 JTG D62-2004 第 7.2.8 条[9], 按短暂状况设计时, 预应力混凝土构件, 预应力和构件自重等施工荷载作用下, 截面边缘的混凝土的法向应力应满足下列要求(图 7 和图 8): 其中压应力:  $\sigma = \leq 0.7f_{ck}' = 0.7 \times 32.4 = 22.68 \text{ MPa}$ ; 拉应力:  $\sigma_{ict} \leq 1.15f_{tk}' = 1.15 \times 2.65 = 3.05 \text{ MPa}$ 。

该模型只是进行成桥受力状况分析, 没有考虑施工阶段, 这里只给出在成桥状态下箱的轴向应力。从图可以看出, 成桥在短期荷载作用下, 轴向最大和最小压应力分别是 2.5 MPa 和 -16.70 MPa, 满足要求。

### 3. 拼接缝影响因素分析

众所周知, 大跨径预应力混凝土桥梁受混凝土收缩徐变、预应力损失影响明显。而这些影响因素与时间直接相关, 主要表现在成桥初期增长较快, 一定时间期趋向于稳定。此处通过拼接缝完成时、完成一段时间(0.5 年), 完成 1 年和完成 10 年来对比分析拼接缝受力随时间变化的规律。同时通过单因素影响的对比, 判断各因素影响大小。

#### 3.1. 新旧桥拼接整体模型

在模拟拼接过程中, 新桥采用与旧桥完全相同的模型。拼接缝采用板单元模拟。与主梁采用刚性连接形式实现变形协调。由于在分析中, 需要考虑新桥成桥初期对应的拼接缝和新桥成桥后期(成桥 10 年)的拼接缝受力, 因此, 需要进行主要施工阶段的模拟, 尤其是拼接施工前、施工完成后, 以及成桥 10 年后的模拟。拼接桥的成桥模型如图 9 所示。

由于新桥采用和旧桥完全相同的结构设计, 因此, 新桥成桥时, 其在接缝完成前的状态与上述旧桥既有状态完全相同, 此处不再作对比分析。一旦接缝施工完成, 受新旧桥的成桥时间差异性, 必然会产生相互作用, 而其作用是通过拼接缝来传递或实现。因此, 接缝完成后才是研究重点。考虑到拼接缝位于桥面部位, 因此新旧桥桥面部位的变形差或应力差则是对拼接缝的直接作用。

#### 3.2. 时间对变形的影响分析

受收缩徐变等不同因素的影响, 新旧桥必然存在变形差异性, 必然导致拼接缝受到不利影响。图 10 示出了拉接缝完成到 0.5 年、1 年、2 年、6 年和 10 年后新旧桥变形差值变化情况。可以清楚看出新旧桥



Figure 7. The minimum normal pressure of concrete under shot-term condition  
图 7. 短期状况下成桥混凝土法向最小应力图



Figure 8. The maximum normal pressure of concrete under short-term condition  
图 8. 短期状况下成桥混凝土法向最大应力图

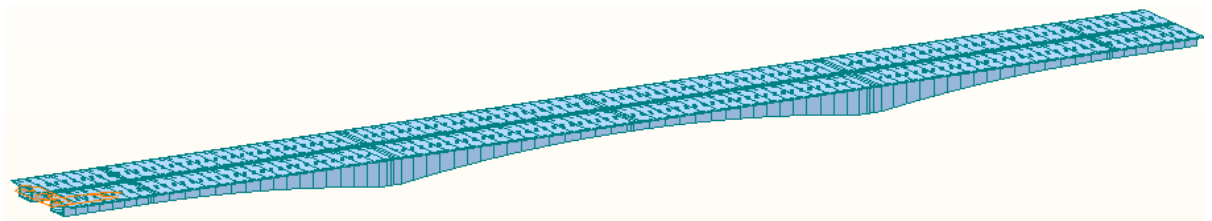


Figure 9. Finite element model of old and new bridge after broaden  
图 9. 新旧桥拼接后有限元模型图

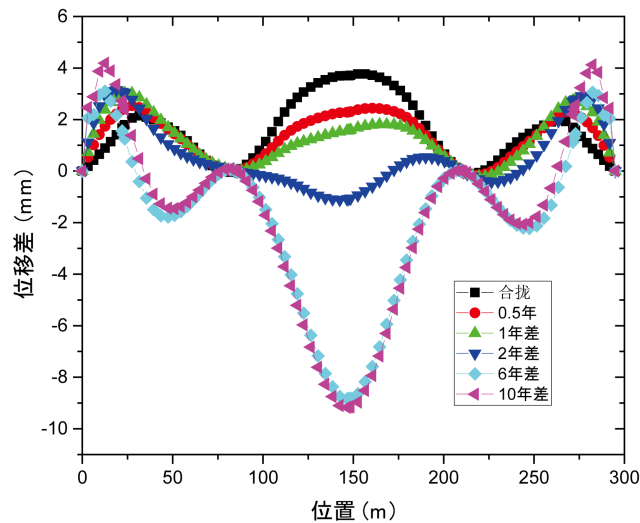


Figure 10. The deformation difference at different period after broaden  
图 10. 拼接完成不同时间后的新旧桥变形差

的变形差并不是根据通常想象的表现早期受收缩徐变影响大而明显，反面是基本在几年以后才趋于稳定。拼接缝完成到拼接前 2 年内，出现新桥的变形差的反转。究其原因应该是收缩徐变的影响表现在两个方面，一是拼接缝自身的收缩徐变作用，二是新桥的收缩徐变作用。

### 3.3. 桥梁无缝拼接应力分析

对应新旧桥变形差值的则是新旧桥间的应力差值，即是在拼接缝处产生相应的应力影响。为了明显各因素的影响，借助软件分别读取各因素作用下的相应影响大小，从而定量分析影响程度。结合上述变形规律，本文仅以拼接后 2 年内的应和变化结果来进行对比分析(图 11)。



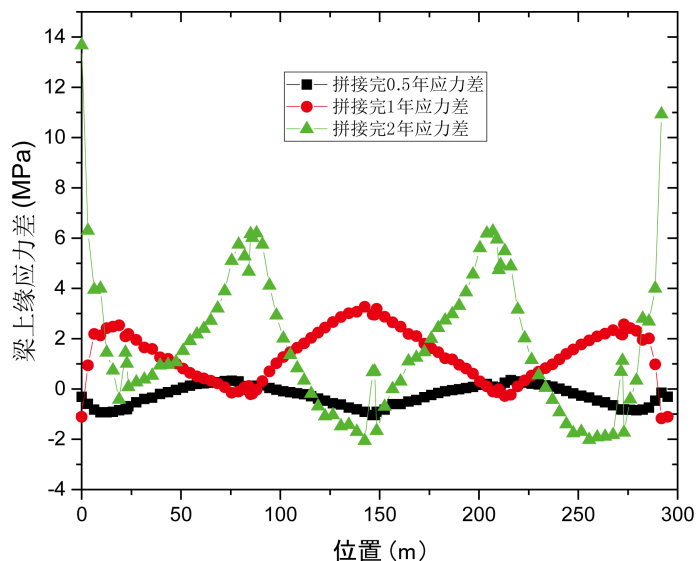


Figure 11. The stresses difference at different period after broaden  
图 11. 不同阶段后新旧桥上缘应力差

从图 11 可以清楚看出，边跨和中跨，甚至不同支座截面位置的应力变化十分明显。具体表现在拼接完初期至一年期间，上缘应力差值方向发生改变，且主要是边跨和中跨跨中变化明显。但到拼接完 2 年时间后，却以各支座附近的应力差表现明显。分析其原因是收缩徐变影响，导致新桥跨中下挠明显，而此时因为已成桥 10 年以上且变形稳定。同时受收缩徐变影响，中支座负弯矩区的影响增大，负弯矩区的应力改变相对于旧桥的增长使得同样出现明显变化。

需要注意的是，随时间变化，边跨端支座附近截面的应力变化在 2 年以后出现较大的跳跃式增长，这与新桥的变形影响通过拼接缝受旧桥限制，新桥截面转动受到约束，其截面应力差明显。

#### 4. 结论

1) 相对于小跨径桥梁，大跨径连续梁桥受其截面刚度影响，导致在不同跨间出现不同的变形影响致使拼接缝的受力更加复杂，且变化规律会因时间变化在跨中和支座截面是不同的。

2) 对于大跨径连续梁桥，受收缩徐变的影响，中跨变形差异导致的拼接缝受力最为明显，新旧桥产生的竖向变向差直接导致拼接缝承受较大剪应力。

3) 受收缩徐变和预应力损失的影响，新桥的纵向变形引起边跨的拼接缝横向受力较大，而在中跨则基本不存在，这个可以边跨端支座截面应力和变形规律来判断。

4) 从新桥成桥接缝完成与接缝完成 10 年后的比较可知，期间的应力调整是明显的。这也为借助延期施工拼接缝来调整拼接缝受力提供了思路。

#### 参考文献 (References)

- [1] 广佛高速公路大修工程建设筹建处, 编. 广佛高速公路大修工程建设管理与技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [2] 吴文清, 叶见曙, 鞠金荧, 华斌. 高速公路扩建中桥梁拓宽现状与方案分析[J]. 中外公路, 2007, 27(6): 100-104.
- [3] 谌润水, 胡钊芳, 帅长斌. 公路旧桥加固技术与实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002: 249-301.
- [4] 王学军, 杜进生, 吴沛林. 高速公路桥梁拓宽中几个问题的讨论[J]. 公路, 2008(7): 170-174.
- [5] Li, F.-Y., Xie, Z.-Y. and Guo, X.-S. (2012) Literature Reviews and Summary of Concrete Bridge Seamless Broaden

Technology. *Applied Mechanics and Materials*, **193-194**, 1290-1295.

<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.193-194.1290>

- [6] Li, F.-Y. and Guo, X.-S. (2014) Parsing on the Processing Methods of Seamline for Concrete Bridge with Seamless Broaden Technology. *Applied Mechanics and Materials*, **587-589**, 1581-1585.  
<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.1581>
- [7] Hosseini, M. and Jefferson, A.D. (1998) Time-Dependent Behaviour of Widened Reinforce Concrete Under-Bridge. *Materials and Structures*, **31**, 714-719. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02480449>
- [8] Counsell, J.H.W. and Nossiter, P.A. (2001) Widening and Strengthening of Kingston Bridge, London, *The 3rd International Conference on Arch Bridges*, Paris, September 2001, 249-254.
- [9] 中华人民共和国交通部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范(JTG D60-2004) [S]. 北京: 中华人民共和国交通部, 2004.
- [10] Shi, X.F., Li, X.X., Ruan, X. and Ying, T.Y. (2008) Analysis of Structural Behaviour in Widened Concrete Box Girder Bridges. *Structural Engineering International*, **18**, 351-355. <http://dx.doi.org/10.2749/101686608786455117>
- [11] Li, F.Y., Wu, P.F. and Yan, X.F. (2015) Analysis and Monitoring on Jacking Construction of Continuous Box Girder Bridge. *Computers and Concrete*, **16**, 49-65. <http://dx.doi.org/10.12989/cac.2015.16.1.049>
- [12] 李茂奇, 张广寅. 桥梁拓宽中混凝土徐变对桥梁受力性能的影响研究[J]. 混凝土世界, 2015(1): 84-85.
- [13] 温庆杰, 叶见曙. 新旧钢筋混凝土梁横向拼接的收缩徐变效应分析[J]. 东南大学学报, 2006, 36(14): 596-600.
- [14] 杜进生, 赵刚, 赵永国, 惠小荣. 桥梁加宽中新旧桥面挠度差的控制[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31(4): 58-62.