

文章编号:1673-2049(2014)04-0103-07

# 旧空心板简支梁桥的连续化改造加固研究

韦建刚,黄 蕾,李佩元,吴庆雄

(福州大学 土木工程学院,福建 福州 350108)

**摘要:**为提高既有旧空心板简支梁桥的承载能力和安全储备,将先简支后连续施工方法中的体系转换思想运用到旧空心板简支梁桥的加固改造上,提出了一种旧桥改造提载加固方案——简支连续化改造,并对此加固技术的实施方法进行了介绍;对简支连续化改造后的荷载效应以及连续化后新、旧混凝土收缩徐变效应进行了分析计算。结果表明:最不利工况下跨中最大弯矩下降了13.8%,边跨外侧支点最大剪力降低7.6%,中跨挠度最大减小42%;后浇墩顶连续段混凝土由新、旧混凝土龄期差引起的收缩徐变弯矩为正弯矩,对跨中截面受力不利,次边跨跨中弯矩最大增幅为3.9%;墩顶负弯矩有所下降,边跨墩顶负弯矩最大降幅为4.3%,影响均不显著。

**关键词:**桥梁工程;旧空心板简支桥;加固;改造;收缩;徐变

**中图分类号:**U445.6

**文献标志码:**A

## Research on Continuous Transformation and Reinforcement for Old Simply Supported Hollow Slab Bridge

WEI Jian-gang, HUANG Lei, LI Pei-yuan, WU Qing-xiong

(School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

**Abstract:** In order to improve bearing capacity and safety margin of the old simply supported hollow slab bridge in service, the authors applied the system transformation thought that was used in the construction of transforming a simply supported bridge structure into a continuous one to the reinforcement of the old simply supported hollow slab bridge in service, and put forward a method that could reinforce the old bridge and improve their bearing capacity of simply supported continuous transformation. Meanwhile, the implementation method of this reinforced technology was introduced. The effect of load, shrinkage and creep of the new and old concrete after simply supported continuous transformation was analyzed. The results indicate that the largest bending moment in the mid-span is decreased by 13.8% under the most unfavorable conditions, and the maximum shear in the edge across the lateral pivot is reduced by 7.6%, and the deflection in the mid-span is even decreased by 42%. The bending moment led by the shrinkage and creep of the new and old concrete with different ages on pier top is positive bending moment, which is harmful to the force in cross section. The bending moment in the cross section of the secondary side span across is the biggest increase by 3.9%. Negative bending moment value on pier top decreased at the same time, the biggest decrease of that in the side span is 4.3%, so the effects are not significant.

**Key words:** bridge engineering; old simply supported hollow slab bridge; reinforcement; trans-

收稿日期:2014-08-01

作者简介:韦建刚(1971-),男,广西上思人,研究员,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:weijg@fzu.edu.cn。

formation; shrinkage; creep

0 引言

简支梁桥由于其明确的受力性能,简单的构造形式和快捷的施工方法,能较好地适应山区以及软弱地基基础,因而在过去一段时期内得到了广泛的运用。随着运营年限的增加和重载交通的影响,大量简支梁桥出现了各种桥梁病害并引起承载能力下降的现状,严重影响了桥梁的安全性和耐久性<sup>[1-7]</sup>。如果将旧桥全部拆除,不仅需要花费很多人力和物力,而且还会对当地的交通产生一定的影响。考虑到旧桥并没有完全丧失承载力,可以通过对旧桥进行加固来发挥其作用,因此,对该类桥梁进行提载加固是较好的选择,具有较大的经济和社会意义<sup>[8-15]</sup>。

旧桥加固的方法很多,如粘贴钢板、粘贴碳纤维布和施加预应力法等。对于早期建造的简支梁桥,由于构造的原因在后期施加预应力相当复杂,且效果也较差。粘贴碳纤维布和钢板虽然可以在一定程度上提高桥梁承载能力,但是并没有从根本上提高荷载等级,大都用于提高桥梁的安全储备能力<sup>[16-17]</sup>。

新建连续梁桥经常采用先简支后连续的施工方法完成结构体系转换,而简支梁连续化改造在经济

发达国家,如美国、加拿大、英国、意大利、瑞士等,已得到应用并且仍在不断发展中,其改造的桥型多是钢梁或箱梁<sup>[18-22]</sup>。本文将这种体系转换的思想用于旧空心板简支梁桥的加固改造,对简支梁桥端部进行连续化改造。这样既可以利用旧桥的原有结构,又可以提高旧桥的承载能力,同时由于简支连续化后,减少了伸缩缝,提高了行车的舒适性,可以有效减少由于伸缩缝破坏而引起的各类病害<sup>[23]</sup>。本文以某多跨空心板简支梁桥为例,进行简支梁桥连续化改造的应用研究和理论分析。

1 工程概况及病害状况

背景工程桥建于 1995 年,桥梁全长 111.85 m,为 6 跨钢筋混凝土简支空心板桥,每跨标准跨径为 16 m(图 1)。桥面宽度为 26.85 m,原设计荷载为汽-20 级和挂-100 级。桥面铺装采用水泥混凝土,下部结构采用浆砌块石重力式桥墩与明挖扩大基础。随着交通量的不断增长和超载车辆的日益增加,该桥左幅出现了多处纵向、横向裂缝,铰缝位置和桥面破损较严重,承载能力显著下降,急需对该桥左幅进行提载加固。

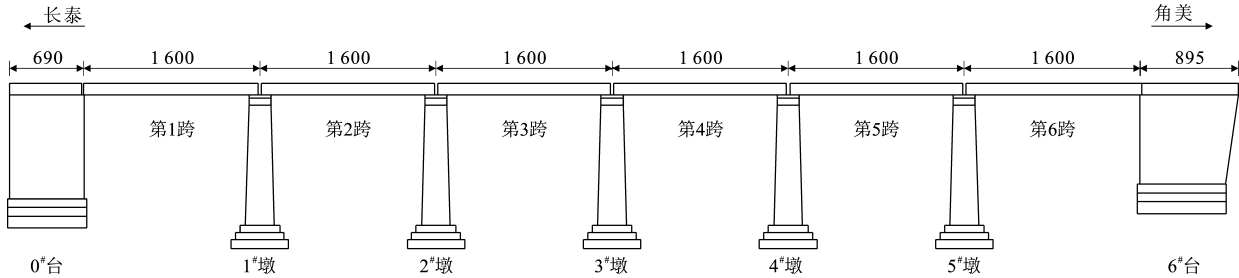


图 1 大桥立面(单位:cm)

Fig. 1 Elevation Drawing of Bridge (Unit:cm)

上部结构病害主要集中于空心板底之间的铰缝位置,板底出现较多平行于铰缝的纵向裂缝和部分混凝土碎裂。下部结构病害主要是由于墩顶桥面处出现裂缝而引起在墩台处大面积的渗水现象。桥面系病害中最主要的是发生在伸缩缝位置处大量的纵向、横向裂缝以及伸缩缝变形和桥面积水严重等病害。某跨简支梁桥病害如表 1 所示。依据《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)<sup>[24]</sup>评定,该桥为 3 类桥,有中等缺损,建议维修加固。

2 旧桥承载能力评估验算

依据《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/

T J21—2011)<sup>[25]</sup>有关规定对桥梁承载能力折减,桥梁承载力折减系数见表 2。对该桥进行承载能力系数的确定并进行极限承载能力评估验算。

跨中截面极限承载能力为

$$M = \frac{1}{\gamma_0} \left[ \zeta_c R_a b x \left( h_0 - \frac{1}{2} x \right) + \zeta_s R_a (b'_f - b) h'_f \cdot \left( h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) \right] Z_1 (1 - \zeta_c) a_s = 1\,013.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

式中: $M$ 为简支梁跨中截面所能承受的最大弯矩; $\gamma_0$ 为桥梁结构的重要性系数; $R_a$ 为材料强度设计值; $b$ 为腹板宽度; $x$ 为混凝土受压区高度; $h_0$ 为梁的有效高度; $b'_f$ 为受压翼缘的有效宽度; $h'_f$ 为

表 1 某跨简支梁桥病害

Tab. 1 Diseases of Simply Supported Bridge				
位置	结构类型	病害描述	标度	扣分
上部结构	上部承重结构	1# 梁出现少量裂缝	2	35
		1#, 3# 梁局部混凝土剥落	2	25
		10# 梁出现纵向裂缝	3	45
		1#, 2#, 4# 梁有少量裂缝	2	35
下部结构	一般构件	3# 铰缝处混凝土剥落	3	40
	桥墩	局部混凝土剥落和露筋	2	25
	桥台	局部空洞和孔洞	2	25
桥面系	桥面铺装	纵横缝长约 2 m	3	40
	伸缩缝	伸缩缝阻塞	3	40
	人行道	人行道出现少量缺失	2	25
	排水系统	桥下多处出现漏水	3	40

表 2 桥梁承载力折减系数

Tab. 2 Reduction Coefficient of Bridge Bearing Capacity				
承载力检算系数 $Z_1$	承载力恶化系数 $\zeta_e$	结构截面折减系数 $\zeta_c$	钢筋截面折减系数 $\zeta_s$	活载影响修正系数 $\zeta_q$
1. 09	0. 09	0. 93	0. 95	1. 06

受压翼缘厚度; $a_s$  为钢筋截面重心至截面受拉边缘距离。

利用大型通用有限元程序 MIDAS 计算得到在公路-I 级汽车荷载下,该桥最不利工况荷载作用下跨中截面的最大弯矩  $M_0=987\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,则  $M=1\,013.5\text{ kN}\cdot\text{m}<\zeta_q M_0=1\,046\text{ kN}\cdot\text{m}$  这说明该桥承载能力已经存在不足。

3 简支连续化改造

由上述计算分析可知,该桥的承载能力已经无法满足繁重的交通现状,因此需要对整桥进行提载加固。除了在主梁下粘贴碳纤维板和砂浆以降低裂缝的影响外,同时在墩顶进行简支梁桥连续化改造,通过对全桥进行体系改变来提高桥梁的安全储备能力。

首先将空心板的混凝土顶板凿除,范围为最不利工况下负弯矩的覆盖范围,并布设负弯矩钢筋,以抵抗因结构体系转换后而产生的负弯矩。在凿除混凝土顶板时要保留原有钢筋,将其与桥墩处主梁负弯矩钢筋焊接,然后浇筑混凝土,将相邻的主梁连为一体,同时将梁端 1 m 范围内空心部分填充混凝土以增大抗剪刚度和纵向的整体刚度(图 2)。

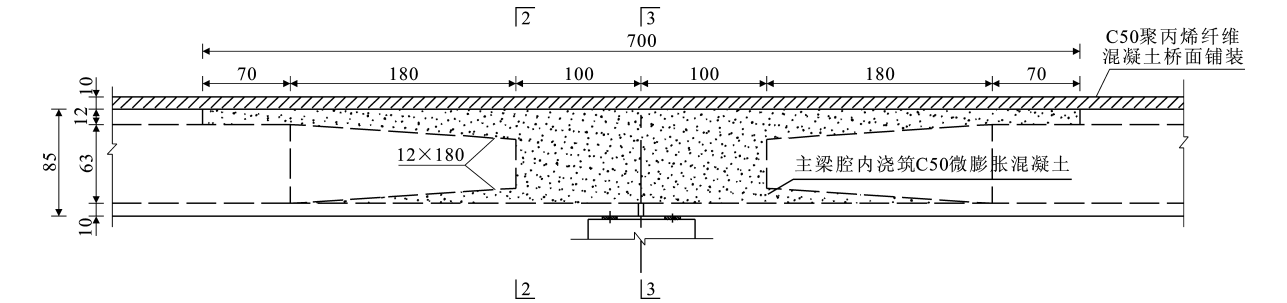


图 2 墩顶连续构造立面(单位:cm)

Fig. 2 Elevation Drawing of Continuous Structure on Pier Top (Unit:cm)

简支无缝连续化改造对跨中抗弯承载能力改善较明显,但是对提高支点附近斜截面抗剪承载力的作用不是很明显,因此连续化后需要对抗剪承载力进行复核,并根据实际情况进行加固补强。

为了计算方便,空心板应按照面积和惯性矩相等的原则等效为 T 形梁计算。首先,依据连续化后的荷载标准求出支点最不利截面处的剪力值,并复核截面尺寸,即

$$\gamma_0 V_d = \gamma_0 (V_{d1} + V_{d2}) \leqslant 5.1 \times 10^{-4} \sqrt{f_{cu,k}} b h_0 \quad (1)$$

式中: $V_d$  为验算截面处由荷载产生的剪力组合值; $f_{cu,k}$  为混凝土立方体抗压强度; $V_{d1}$  为按先期简支梁状态计算的自重和一期恒载剪力组合值; $V_{d2}$  为按后期连续梁状态计算的自重和二期恒载剪力组合值。

若不满足复核公式,则应对空心板腹板和顶板

进行加宽,加宽的尺寸可以由如下公式确定,即

$$\frac{\gamma_0 V_{d1}}{b h_1} + \frac{\gamma_0 V_{d2}}{(b + 2\Delta b) h_2} \leqslant 5.1 \times 10^{-4} \sqrt{f_{cu,k}} \quad (2)$$

式中: $h_1$  为凿除原桥面铺装层后梁的有效高度; $h_2$  为计入后加混凝土结构层后梁的有效高度; $\Delta b$  为腹板(梁肋)每侧的加宽厚度。

该桥连续无缝化后经过复核验算,对支点截面进行加宽处理,截面在墩顶支点最不利截面范围内的腹板加厚了 15 cm,顶板、底板加宽了 12 cm,渐变长度取 1.8 m。墩顶连续构造如图 3 所示。

在简支连续化改造时,为了能够加强后期整体化铺装层与连续化后的主梁共同作用,两者之间的相互连接效果是实现整体化受力的重要保障。为了加强相互之间的可靠连接,除对该桥面进行凿毛处

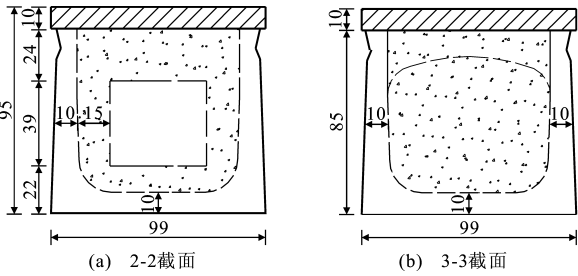


图3 墩顶连续构造(单位:cm)

Fig.3 Continuous Structure Drawing on Pier Top (Unit:cm)

理外,还应设置关键的抗剪连接件。本文改造中抗剪连接件采用槽型钢筋,直径为 20 mm,槽型钢筋沿接缝位置处等间距布置,如图 4 所示。

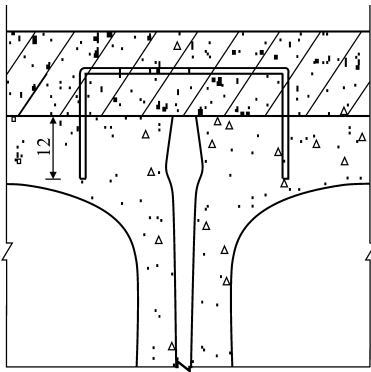


图4 整体化层构造(单位:cm)

Fig.4 Structure of Monolithic Deck (Unit:cm)

4 分析计算

在简支变连续加固整体计算中,根据受力特点和施工步骤可以将结构计算分成 2 个阶段:第 1 阶段按简支梁桥计算,此阶段参与受力的主要有自重和一期恒载;第 2 阶段主要是连续化后的连续梁阶段,此阶段主要受二期恒载和活载作用。

在简支变连续改造效果结构分析中,利用 MIDAS/Civil 2010 建立全桥空间模型共 3 261 个单元和 2 384 个节点(图 5)。通过建立的有限元模型计算得出,改造前简支梁桥状态的一阶频率为 5.8 Hz,环境脉动试验实测的一阶频率为 5.37 Hz,两者基本吻合,验证了有限元模型的正确性。

4.1 弯矩效应

在承载能力极限状态设计时,根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)选择对此桥最不利工况:恒载(1.2)+汽车荷载(1.4)+人群(0.98)+温度梯度(0.98)。图 6 为改造前、后弯矩包络曲线。由图 6 可以看出,在最不利工况下,改造后跨中弯矩

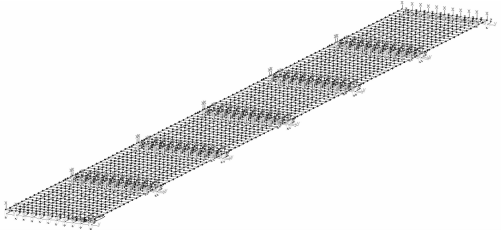


图5 有限元计算模型

Fig.5 Finite Element Computational Model

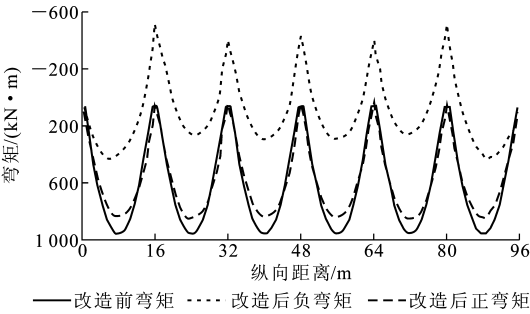


图6 改造前、后弯矩包络曲线

Fig.6 Moment Envelope Curves Before and After Transformation

有明显的改善,跨中弯矩最大降低 13.8%,能够使全桥整体更好受力,提高了活载承载能力。

4.2 剪力效应

旧简支空心板梁桥连续化改造后分析其支点截面处最不利剪力的变化,荷载工况同第 4.1 节。空心板梁桥简支连续化改造前、后的剪力包络曲线见图 7。旧简支空心板梁桥连续化改造后,增大了桥梁纵向、横向刚度,改善了桥梁的整体受力性能。由图 7 可以看出:连续化改造后边跨外侧的支点最大剪力降低了 7.6%;中跨剪力荷载组合值有所增加,增加幅度为 5.6%~8.4%。

4.3 挠度变化

简支空心板梁桥连续化改造前、后正常使用状态下主梁挠度对比见图 8,挠度下降主要是由于体系转变引起的。从图 8 可以看出:由于连续化纵向、横向刚度增加,正常使用状态时的挠度均有所降低,中跨改善程度大于边跨。边跨挠度降低比例为 24%,而中跨挠度降低比例最大为 42%。

4.4 连续化后新、旧混凝土收缩徐变的受力影响

旧简支梁桥在连续化改造前为简支受力状态,在墩顶连续段施加荷载前为静定结构,收缩徐变等荷载作用不会产生附加内力。简支梁桥连续化改造时,通常旧简支梁桥已运营多年,主梁的收缩徐变已基本完成,因此在连续化改造后可以忽略主梁的收缩徐变效应,只需分析墩顶连续段新浇混凝土与主

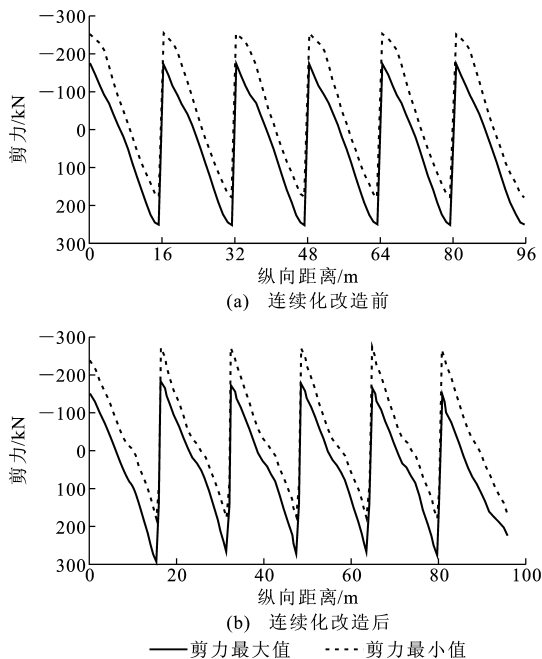


图 7 改造前、后剪力包络曲线

Fig. 7 Shear Force Envelope Curves Before and After Transformation

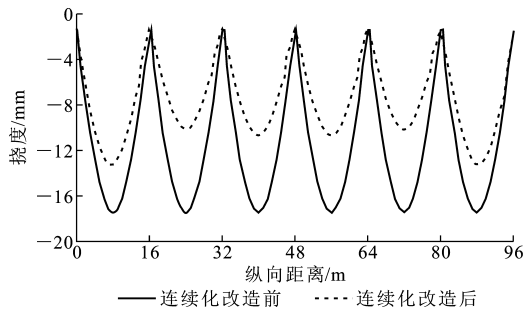


图 8 连续化改造前、后正常使用状态挠度对比

Fig. 8 Comparisons of Deflection in Normal Service State Before and After Continuous Transformation

梁旧混凝土之间因新、旧混凝土龄期差引起的收缩徐变效应。

收缩徐变问题较复杂,计算时采用不同的收缩徐变模型会产生一定的差异,并且不同的参数取值也会影响计算结果。本文计算分析分别采用美国规范 ACI 的计算模型、欧洲规范 CEB-FIP 的计算模型和中国《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)(以下简称中国规范)的计算模型。

图 9(a)为后浇墩顶连续段混凝土在收缩徐变作用下产生的弯矩,对比了 3 种计算模型下新浇混凝土 60 d 龄期的收缩徐变大小。图 9(b)为 3 种计算模型下 3 年龄期新浇混凝土收缩徐变引起全桥受力的弯矩大小。由图 9 可知,中国规范计算模型的

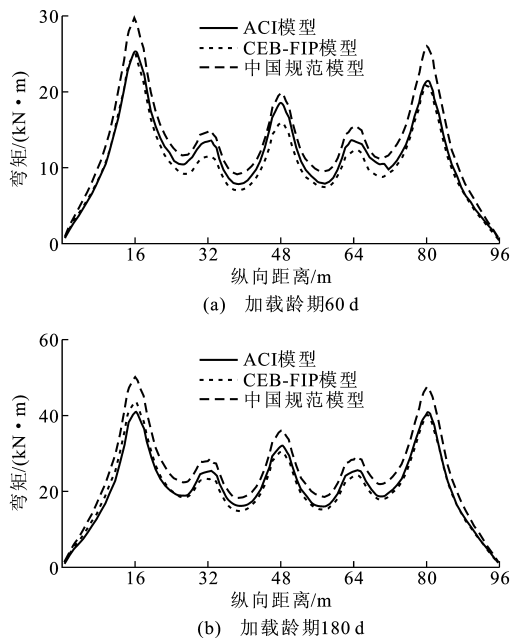


图 9 不同计算模型收缩徐变作用下产生的弯矩

Fig. 9 Bending Moment of Different Computational Models Under Shrinkage and Creep

计算结果比其他 2 种计算模型的要稍大。在 3 种收缩徐变计算模型下,全桥 3 年后收缩徐变引起的全桥弯矩在边跨墩顶达到最大值,中国规范计算模型预测值比 ACI 计算模型预测值增加 11%,比 CEB-FIP 计算模型预测值增加 8%。

后连续端湿接缝新、旧混凝土在不同龄期时的收缩徐变引起的弯矩如图 10 所示。收缩徐变模型采用中国规范中规定的计算模型。图 11 为考虑和不考虑收缩徐变影响全桥承载力受力分析的对比。由图 10,11 可知:收缩徐变是由后浇墩顶连续段混凝土引起的,因此每跨墩顶位置的受力均比相邻的跨中弯矩要大,边跨的墩顶弯矩最大;新、旧混凝土龄期差引起的收缩徐变正弯矩对简支连续化改造后的跨中截面受力不利。次边跨考虑墩顶连续段混凝土龄期差时,跨中弯矩最大增幅为 3.9%;同时一定程度上缓和了墩顶负弯矩区的负弯矩,边跨墩顶负弯矩区考虑收缩徐变作用时,负弯矩最大降幅为 4.3%。

## 5 结 语

(1)通过有限元分析计算表明,简支旧空心板梁桥通过连续化改造后,无论是恒载效应还是活载效应,改造后弯矩和挠度均比改造前有所降低。在最不利承载能力工况下跨中最大弯矩下降了 13.8%;正常运营状况下,边跨外侧的支点最大剪力降低 7.6%;中跨剪力荷载组合值有所增加,增加幅度为

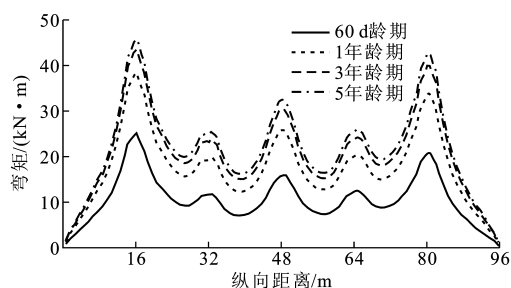


图 10 全桥收缩徐变作用下的弯矩

Fig. 10 Bending Moments of Whole Bridge Under Shrinkage and Creep

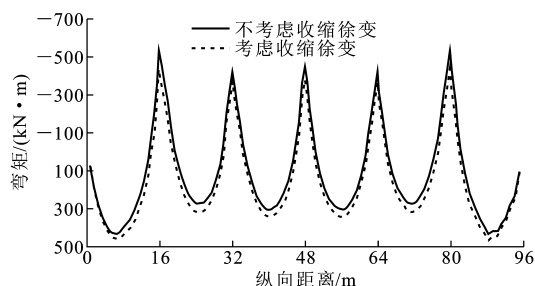


图 11 全桥最不利工况弯矩对比

Fig. 11 Comparisons of Bending Moment Under the Most Unfavorable Condition of Whole Bridge

5.6%~8.4%;连续化改造后全桥挠度均有所下降,边跨挠度最大减小24%,中跨挠度最大减小42%。

(2)后浇墩顶连续段混凝土在180 d龄期时完成了10年收缩徐变量的50%,3年完成了90%,此后几年的收缩徐变和变化幅度均很小;新、旧混凝土龄期差引起的收缩徐变弯矩为正弯矩。简支连续化改造后对跨中截面受力不利,次边跨跨中弯矩最大增幅为3.9%;墩顶负弯矩有所下降,边跨墩顶负弯矩最大降幅为4.3%,影响均不显著。

## 参考文献:

## References:

- [1] 陈宝春. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,2009.  
CHEN Bao-chun. Bridge Engineering [M]. Beijing: China Communications Press,2009.
- [2] 陈宝春,庄一舟, BRISEGHIELLA B. 无伸缩缝桥梁[M]. 北京:人民交通出版社,2013.  
CHEN Bao-chun, ZHUANG Yi-zhou, BRISEGHIELLA B. Jointless Bridges [M]. Beijing: China Communications Press,2013.
- [3] 凌伟. 装配式空心板桥铰缝受力性能研究[D]. 福州:福州大学,2012.  
LING Wei. Study on Mechanical Behavior of Hinge Joints for Fabricated Hollow Slab Bridges [D]. Fuzhou: Fuzhou University,2012.

- [4] 项贻强,邢 骋,邵林海,等. 横向加固空心板梁桥荷载横向分布计算方法与试验研究[J]. 中国公路学报, 2013,26(2):63-68,76.  
XIANG Yi-qiang, XING Cheng, SHAO Lin-hai, et al. Calculating Method and Experimental Research on Lateral Load Distribution of Transversely Strengthened Hollow Slab Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013,26(2):63-68,76.
- [5] 王春生,付炳宁,张 芹,等. 正交异性钢桥面板足尺疲劳试验[J]. 中国公路学报,2013,26(2):69-76.  
WANG Chun-sheng, FU Bing-ning, ZHANG Qin, et al. Fatigue Test on Full-scale Orthotropic Steel Bridge Deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013,26(2):69-76.
- [6] 夏樟华,宗周红,李嘉维,等. 基于健康监测系统的大跨度连续刚构桥移动荷载识别[J]. 中国公路学报, 2012,25(5):95-104.  
XIA Zhang-hua, ZONG Zhou-hong, LI Jia-wei, et al. Moving Load Identification of Long Span Continuous Rigid Frame Bridges Based on Health Monitoring System [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012,25(5):95-104.
- [7] 李 岩,吕大刚,盛洪飞. 考虑随机车载-风载联合作用的斜拉桥拉索疲劳可靠性分析[J]. 中国公路学报, 2012,25(2):60-66.  
LI Yan, LU Da-gang, SHENG Hong-fei. Fatigue Reliability Analysis on Cable of Cable-stayed Bridge Under Random Vehicle Load and Wind Load [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012,25(2):60-66.
- [8] 詹海英. 无伸缩缝桥梁的设计与应用[J]. 广东科技, 2009(10):255-256.  
ZHAN Hai-ying. Design and Application of Jointless Bridges [J]. Guangdong Science & Technology, 2009 (10):255-256.
- [9] 成宇飞. 先简支后连续梁的结构特性与施工工艺研究 [J]. 城市建设,2010(15):140-141.  
CHENG Yu-fei. Research on Structural Property and Construction Technology of Simply Supported-continuous Beams [J]. City Construction, 2010 (15): 140-141.
- [10] 彭大文,林志平,洪锦祥. 无伸缩缝桥梁的研究与实践 [J]. 公路,2006(8):53-62.  
PENG Da-wen, LIN Zhi-ping, HONG Jin-xiang. Research and Practice for Jointless Bridges [J]. Highway, 2006(8):53-62.
- [11] 郭 帅. 浅析简支变连续桥梁在旧桥加固上的应用 [J]. 技术与市场,2012,19(2):9-10.

- GUO Shuai. Analysis of Simply Supported Bridge Turn Continuous Reinforcement of the Old Bridge Application[J]. Technology and Market, 2012, 19(2): 9-10.
- [12] 朱劲松, 闫广鹏. 钢筋混凝土桥面板疲劳数值分析方法[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 59-66.  
ZHU Jin-song, YAN Guang-peng. Method of Numerical Simulation for Reinforced Concrete Bridge Slabs Under Fatigue Load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 59-66.
- [13] 吕彭民, 李大涛. 正交异性钢桥面板顶板疲劳性能研究[J]. 中国公路学报, 2014, 27(2): 84-89, 97.  
LU Peng-min, LI Da-tao. Fatigue Research on Bridge Deck-plate of Orthotropic Steel Bridge Deck[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(2): 84-89, 97.
- [14] 王春生, 吴全友, 缪文辉. 钢筋混凝土桥面板疲劳寿命评估[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33(2): 50-55, 62.  
WANG Chun-sheng, WU Quan-you, MIAO Wen-hui. Fatigue Life Estimation for Reinforced Concrete Bridge Deck[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(2): 50-55, 62.
- [15] 陈一馨, 吕彭民, 郭成军, 等. 钢桥面板 U 肋与盖板焊缝构造细节疲劳性能评估[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34(1): 49-55.  
CHEN Yi-xin, LU Peng-min, GUO Cheng-jun, et al. Study on Fatigue Performance of Orthotropic Steel Bridge Deck U-rib and Cover Weld Structure[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(1): 49-55.
- [16] 张劲泉, 王文涛. 桥梁检测与加固手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.  
ZHANG Jin-quan, WANG Wen-tao. Bridge Detection and Reinforcement Manual[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [17] 孙晓燕, 董伟伟, 王海龙, 等. 侵蚀性环境下桥梁加固后 CFRP/BFRP 的长期性能试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(2): 77-84.  
SUN Xiao-yan, DONG Wei-wei, WANG Hai-long, et al. Experiment for Long-term Performance of Bridge Girders Strengthened with CFRP/BFRP Sheets and Subjected to Erosion Environment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(2): 77-84.
- [18] SOLTANI A A, KUKRETI A R. Performance Evaluation of Integral Abutment Bridges[J]. Transportation Research Record, 1992, 1371: 17-25.
- [19] KUNIN J, ALAMPALLI S. Integral Abutment Bridges; Current Practice in United States and Canada[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2000, 14(3): 104-111.
- [20] MARURI R F, PETRO S H. Integral Abutments and Jointless Bridges (IAJB) 2004 Survey Summary[C]// West Virginia University, West Virginia Department of Transportation, Federal Highway Administration. Integral Abutments and Jointless Bridges (IAJB 2005). Washington DC: Federal Highway Administration, 2005: 12-29.
- [21] BRISEGHIELLA B, ZORDAN T. Integral Abutment Bridge Concept Applied to the Rehabilitation of a Simply Supported Prestressed Conventional Concrete Superstructure[J]. Structural Concrete, 2006, 8(1): 25-33.
- [22] AROCKIASAMY M, BUTRIENG N, SIVAKUMAR M. State-of-the-art of Integral Abutment Bridges; Design and Practice[J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(5): 497-506.
- [23] 邓 辉. 浅析连续简支梁的接缝问题[J]. 交通标准化, 2007(12): 122-126.  
DENG Hui. Discussion on Joint Problems of Continuous Simple-supported Beam [J]. Communications Standardization, 2007(12): 122-126.
- [24] JTG/T H21—2011, 公路桥梁技术状况评定标准[S]. JTG/T H21—2011, Standards for Technical Condition Evaluation of Highway Bridges[S].
- [25] JTG/T J21—2011, 公路桥梁承载能力检测评定规程[S]. JTG/T J21—2011, Specification for Inspection and Evaluation of Load-bearing Capacity of Highway Bridges[S].