

文章编号: 1002-0268 (2008) 08-0061-06

既有 PC 斜拉桥合龙段拆除的施工控制

李宏江¹, 李万恒¹, 张劲泉¹, 王江², 王荣石²

(1. 交通部公路科学研究院, 北京 100088; 2. 天津市政公路管理局, 天津 300170)

摘要: 以永和斜拉桥合龙段维修工程为背景, 介绍了合龙段拆除的施工方法, 依据合龙段拆除引起的结构性能变化的计算分析, 提出了合龙段拆除的施工控制目标和结构安全防护措施, 阐述了施工监测的主要内容。施工监测结果表明, 合龙段拆除过程中的施工控制达到了预期目标, 保证了结构的安全, 为既有 PC 斜拉桥合龙段的维修加固提供了切实可行的技术途径。

关键词: 桥梁工程; PC 斜拉桥; 置换加固; 合龙段; 拆除; 施工控制

中图分类号: U448.27

文献标识码: A

Construction Control for Removal of the Closure Segment in an Existing Prestressed Concrete Cable-stayed Bridge

LI Hong-jiang¹, LI Wan-heng¹, ZHANG Jin-quan¹, WANG Jiang², WANG Rong-shi²

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Communications, Beijing 100088, China;

2. Tianjin Municipal and Highway Administration Bureau, Tianjin 300170, China)

Abstract: Based upon Yonghe Cable-stayed Bridge, the construction of removal of old closure segment was presented. According to the computational analysis of structural behavior changes induced by removal of old closure segment, construction control targets, safety measures and monitoring instruments were presented. Construction monitoring results show that the established construction control targets are satisfied and structural safety measures during removal of old closure segment are reasonable. This strengthening method provides a new way for the maintenance of existing prestressed concrete cable-stayed bridge.

Key words: bridge engineering; prestressed concrete cable-stayed bridge; replacement and reinforcement; closure segment; removal; construction control

0 引言

PC (预应力混凝土) 斜拉桥中, 合龙段是起着连结作用的关键部位, 一旦损坏, 它对桥跨的连接作用就会减弱, 造成结构线形和内力偏离设计状态过多, 成为结构安全的隐患。为恢复合龙段的刚度和其与桥跨的连接作用, 通常可选的措施是局部施加体外预应力^[1~3]。但对于损坏严重甚至失效的合龙段, 该加固措施只能说是临时性的, 不能从根本上消除结构安全隐患。为此, 合龙段置换加固技术首次被提出

来, 其主要技术措施就是拆除原合龙段, 然后重新浇注新合龙段及恢复合龙段预应力, 并采用体外预应力予以加强, 以改善新合龙段混凝土的应力状态。原合龙段的拆除是新合龙段恢复并加固的前提条件。本文结合永和大桥合龙段维修加固工程, 阐述合龙段拆除过程的施工控制方法, 以供今后 PC 斜拉桥合龙段的维修加固参考。

1 工程概况

永和大桥为 5 孔一联、主孔跨径 260 m、双塔双

收稿日期: 2008-01-18

基金项目: 交通部西部交通建设科技资助项目 (200731822340)

作者简介: 李宏江 (1973-), 男, 河北迁安人, 博士, 副研究员, 从事大跨度桥梁结构理论与设计方法研究。(hj.li@rioh.cn)

索面、塔墩固结、连续呈漂浮体系的 PC 斜拉桥 (图 1)。桥梁全长 512.4 m, 主梁梁高 2.0 m, 包括风嘴总宽 14.5 m, 塔高 55.5 m, 主墩为沉井基础, 其余墩台为管桩基础, 边墩设拉力摆索支座。拉索为扇形布置, 全桥共 44 对, 其编号如图 1 所示, 每个索号上下游各 2 根索束 (如图 2 所示)。原桥于 1987 年 12 月建成通车, 施工时以塔柱为中心, 对称向两侧逐对悬

拼并挂索, 主梁预制块件之间用环氧树脂胶接, 并接长和张拉纵向预应力筋 (冷拉低合金钢 级粗钢筋, 32), 两个半桥均挂完 11 对索后解除所有临时约束, 结构体系处于漂浮状态下进行中跨合龙。中跨合龙段纵向预应力钢筋采用交叉锚固方式布置, 如图 3 所示。合龙段预应力钢筋与相邻预制节段的预应力钢筋通过连接器连接, 锚固端采用轧丝锚体系。

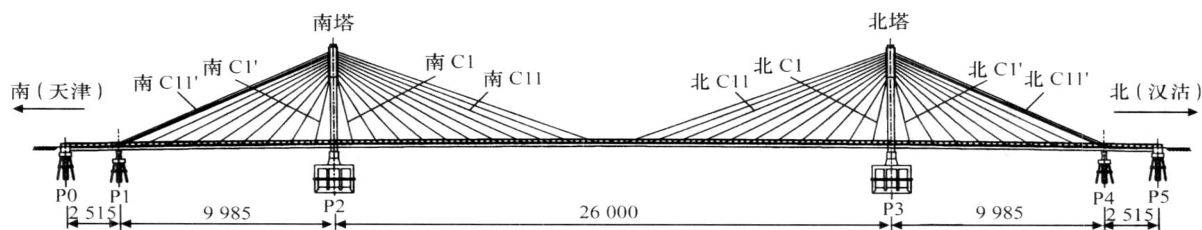


图 1 永和大桥立面布置示意 (单位: cm)

Fig. 1 Sectional elevation of Yonghe Bridge in Tianjin (unit: cm)

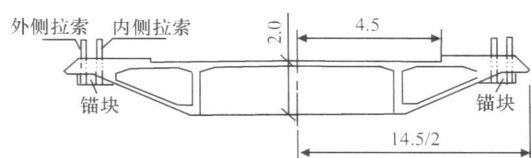


图 2 主梁横断面示意 (单位: m)

Fig. 2 Transverse section of main girder (unit: m)

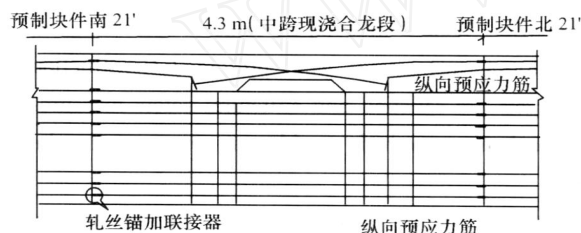


图 3 合龙段纵向预应力交叉锚固示意

Fig. 3 Crossing anchorage of longitudinal prestressing at the closure segment

2005 年检测时发现, 中跨合龙段与相邻预制块件之间的拼接缝开裂严重, 最大缝宽达 10 cm, 并在车辆通过时呈现出明显的活动性, 接缝处部分普通钢筋和预应力筋已断裂, 合龙段接近失效状态。为彻底消除安全隐患, 决定对合龙段进行置换并加固。首先要拆除原合龙段, 形成两半桥, 即回到原桥合龙前状态。而对于运营近 20 年的旧桥, 其结构内力状态非常不明确, 合龙段的拆除有可能是一个应力释放的过程, 为确保安全必须采取有效的施工控制方法和措施。

2 合龙段拆除的施工方法

合龙段拆除拟采用浮箱换重法, 拆除施工工序如

图 4 所示。拆除工序大体上为: 首先释放和解除合龙束的预应力, 然后凿除合龙段混凝土, 最后拆除普通钢筋骨架。合龙段混凝土凿除前应预先分段, 拆除施工分块进行, 基本顺序为斜腹板处的顶板 → 斜腹板 → 其余的顶板 → 横隔板 → 直腹板。

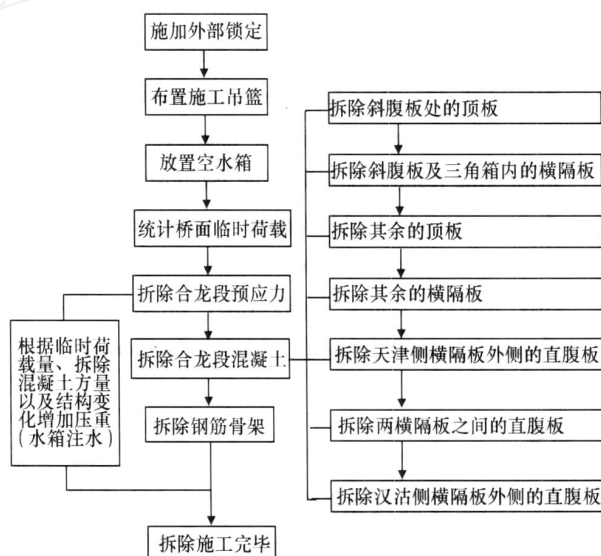


图 4 合龙段拆除施工工序

Fig. 4 Removal construction scheme of the old closure segment

拟在拆除前对合龙段施加外部锁定 (劲性骨架), 由于合龙段预应力采用交叉锚固方式布置 (图 3), 对合龙段本身而言是一对自相平衡的内力, 拆除施工中释放掉的合龙段预应力不会转移到劲性骨架上, 而由混凝土弹性压缩变形传递到劲性骨架上的力经计算很小, 可忽略不计。合龙段拆除后, 劲性骨架替代合

龙段连接两半桥, 使主梁连成一体, 并承受由主梁传来的内力, 同时也受到拆除施工过程中各种温度荷载的作用, 这就要求它是一种既能受拉又能受压的构件^[4~6]。劲性骨架采用 A3 钢, 并由槽钢拼接成工字钢, 工字钢之间用槽钢平联 (图 5 所示), 以增强劲性骨架的横向刚度和稳定性。工字钢合计 4 根 (箱梁顶缘和底缘各 2 根)。工字钢与主梁节段 (南 21 和北 21) 上的预埋钢板焊接, 并在劲性骨架与主梁预埋钢板焊接处植入锚杆予以加强。

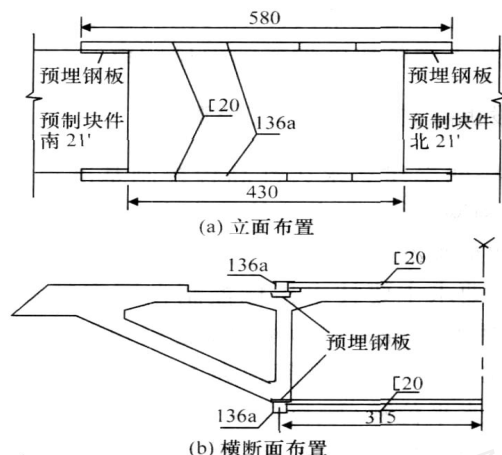


图 5 合龙段外部锁定装置示意 (单位: cm)

Fig. 5 Outside blockage for the closure segment (unit: cm)

便于拆除作业, 合龙段附近设置施工吊篮, 施工吊篮 (总重 146.6 kN) 通过锚杆分别锚固在主梁南 21 和北 21 预制节段上。临时压重采用的水箱放置在合龙段两侧各 17.4 m 范围内, 全桥水箱自重合计 254.388 kN。合龙段拆除过程中通过不断向水箱内注水来调节悬臂端的竖向位移以及合龙口的高差。

3 合龙段拆除后的结构性能变化预测分析

尽管合龙段拆除采用浮箱换重法, 结构恒载变化不大, 但因结构体系转换、刚度变化等原因, 合龙段拆除后结构性能必然发生相应的变化, 这些变化是确定施工控制目标的主要依据。

3.1 计算模型简介

结构计算采用平面杆系分析程序, 首先模拟原桥施工阶段, 得到设计成桥状态, 然后根据合龙段拆除前的实测索力修正计算模型, 使其尽可能接近合龙段拆除前结构的实际受力状态, 最后模拟合龙段的拆除过程, 即先拆除合龙束, 释放合龙段预应力, 再在两悬臂端施加集中荷载以替代合龙段混凝土单元的重量, 形成两半桥的同时, 施加劲性骨架 (钢构件单元) 连接两半桥, 拆除过程模拟如图 6 所示。

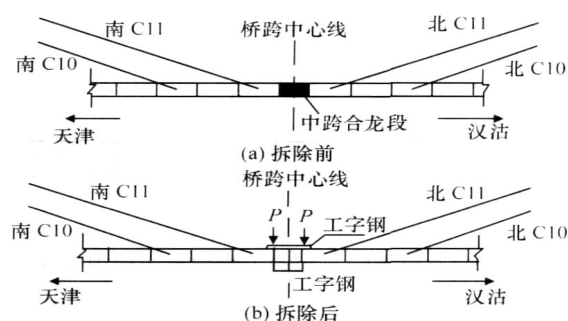


图 6 合龙段拆除前后计算模式的变化

Fig. 6 Calculation mode change before and after removal of the closure segment

3.2 计算结果分析

图 7~图 9 分别示出了合龙段拆除前、后桥面线形、主梁混凝土应力、索力的变化。由图 7~图 9 可看出, 合龙段拆除引起了中跨跨中附近区段上抬, 半桥悬臂端上抬量最大, 达 6.3 cm, 而相邻区段的主梁发生轻微的下挠, 下挠量不超过 1 cm, 其他区段的主梁竖向位移变化不明显。与桥面线形变化相对应, 合龙段拆除主要引起两侧悬臂各 50 m 区段的主梁混凝土应力变化显著, 拉应力最大增量为 7.6 MPa (C11 索点附近截面上缘), 压应力最大增量为 3.2 MPa (C11 索点附近截面上缘)。另外, 合龙段拆除主要引起紧邻合龙段的长索索力的变化, 河侧 C11 号索索力约减小 400 kN (此处的索力系指同断面 4 根索束的总索力), 而其他索号的索力变化不明显, 合龙段拆除引起的索力变化是局部的。

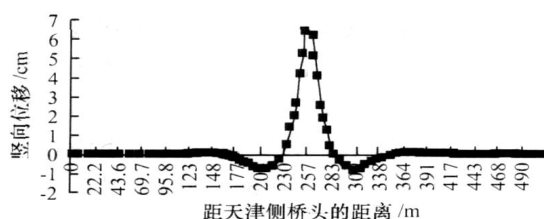


图 7 合龙段拆除引起的桥面线形变化

Fig. 7 Deck deflection change induced by removal of the old closure segment

另外, 合龙段拆除引起劲性骨架的总轴力变化 163.4 kN (受压), 弯矩和剪力很小。若以合龙段拆除后的结构状态为计算模式, 计算因体系温差 (按原桥设计采用值 16)、索梁温差 (± 10)、索塔两侧日照温差 (± 5)、主梁温度梯度等温度模式所引起的劲性骨架内力^[7,8], 按最不利情况组合, 劲性骨架因温度作用而产生的最大压力为 264.5 kN (升温), 最大拉力为 264.5 kN (降温), 弯矩和剪力较

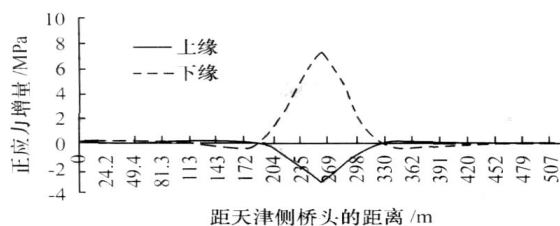


图8 合龙段拆除引起的主梁混凝土应力变化

Fig. 8 Concrete stress change of main girder induced by removal of the old closure segment

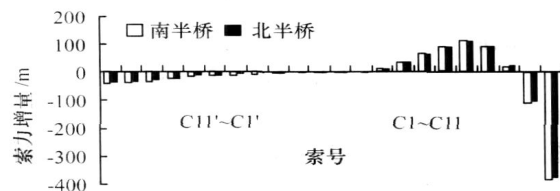


图9 合龙段拆除引起的全桥索力变化

Fig. 9 Cable force change induced by removal of the old closure segment

小。将合龙段拆除引起的内力与上述温度效应进行叠加,得到劲性骨架钢构件所受最大的轴力为427.9 kN(压)。经验算,劲性骨架所选用的材料和几何尺寸均满足强度要求,具有足够的安全系数。

计算结果还显示,合龙段拆除引起的塔顶纵向水平位移变化不显著(塔顶均向岸侧倾斜0.5 cm)。

4 合龙段拆除的施工控制目标及施工控制措施

4.1 合龙段拆除的施工控制目标

根据前述计算结果,提出合龙段拆除过程的控制以桥面线形和主梁混凝土应力双控的原则,兼顾索力、索塔塔顶水平位移以及劲性骨架的内力变化。根据计算结果,主梁悬臂区段的混凝土上下缘在合龙段拆除前的最小压应力储备为6.2 MPa,因此确定合龙段拆除过程中主梁混凝土下缘拉应力增量以不超过3.0 MPa为控制目标。同时,桥面线形变化幅度以悬臂端上抬量不超过前述计算的6.3 cm为限值。

4.2 合龙段拆除的安全防控措施

拆除施工宜缓慢进行,并及时跟踪监测结构主要力学指标的变化。理论计算中采用在悬臂端施加集中荷载来近似模拟浮箱换重方式,但实际加载是通过向放置在桥面一定长度范围的水箱内注水来实现的,实际压重形式与计算模拟的集中荷载存在一定差异,这就需要在预先估计水箱注水量的基础上,根据桥面高程的变化实时动态地调整注水量,使结构的变化始终处于施工控制范围之内。

该斜拉桥为全漂浮体系,合龙段拆除施工中结构体系可能受到外界环境(风、雨、温度、施工荷载等)的作用,为避免主梁发生沿桥纵向的非正常漂移,拟采用在两侧桥台与主梁梁端之间预设可调水平千斤顶对主梁的纵向变位加以限制。每桥台处各设2个,每个千斤顶总吨位不小于100 t。该预防措施是否启动应根据主梁纵向桥向变形的观测结果而定,正常情况下千斤顶与主梁没有接触,允许结构在温度作用下的正常变形。

为保证拆除过程结构体系的横向稳定性,索塔与主梁之间塞入橡胶块施加横向限位约束。

5 合龙段拆除过程中的施工监测

在大桥两岸建立永久性高程控制基准点,构成精密高程控制网,并按国家二等精密水准纲要,使用精密水准仪、铟瓦水准尺施测。考虑大跨度斜拉桥温变和风载问题,要求主要技术指标控制在国家三等水准测量精度。桥面高程测点为桥面上已经设置的永久性测点,如图10所示,其测点间距为1 241.5 ~ 1 638.4 cm不等,塔顶水平位移(顺桥向变位)采用全站仪进行测量。为避免日照温差的影响,桥面高程和塔位的测量时间选择在早晨6 00 ~ 7 00进行。为观测主梁的纵向变形,每天分早、中、晚3个时段对梁端与桥台之间的距离进行测量。索力测试采用振动频率法^[9]。

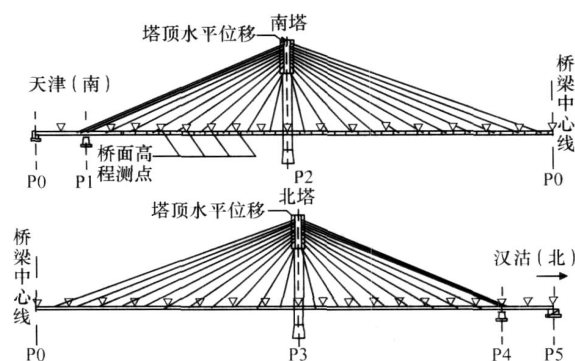


图10 桥面高程测点和塔顶水平位移测点布置

Fig. 10 Arrangement of measuring points at deck and the top of tower

主梁混凝土应力测试断面包括南半桥边跨跨中、南塔塔根、南半桥河侧C9 ~ C10索点之间的中点、中跨跨中、北半桥中跨L/4、北塔塔根、北半桥边跨跨中7个断面^[10],应力测点布置如图11所示。

合龙段劲性骨架上预设钢应变传感器,实时监测劲性骨架的应力变化,其应力测点布置如图12所示,劲性骨架的轴力系根据实测应力推算而得。

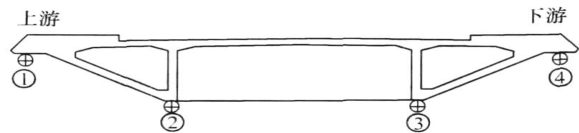


图 11 主梁混凝土应力测点布置

Fig. 11 Measuring points of concrete stress in transverse sections of main girder

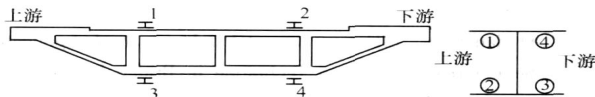


图 12 劲性骨架钢构件应力测点布置

Fig. 12 Measuring points of stress in stiff steel frame

6 合龙段拆除的施工监测结果分析

6.1 桥面线形

合龙段拆除前后桥面线形变化如图 13 所示，合龙段拆除主要引起了悬臂附近区段发生较大的上抬位移，实测悬臂端最大上抬量为 5.3 cm，边跨有轻微下挠，下挠量不足 1.5 cm。因此，桥面线形的总体变化趋势与计算结果相符，最大上抬量小于控制目标值 (6.3 cm)，表明桥面线形得到了有效控制。

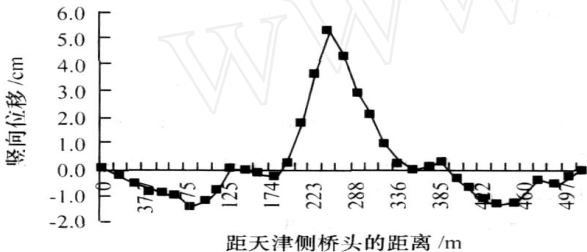


图 13 合龙段拆除前后桥面线形变化

Fig. 13 Deck deflection change before and after removal of the closure segment

6.2 主梁混凝土应力

合龙段拆除过程中，对主梁混凝土的外观进行检查，至拆除完毕时均未见有裂缝产生。实测合龙段拆除引起的混凝土应力增量如表 1 所列。由表 1 看出，主梁各个监测断面中，实测下缘混凝土拉应力增量最大为 1.56 MPa，小于施工控制目标值 (3.0 MPa)，说明施工控制措施有效地控制了主梁混凝土的应力变化幅度，保证了主梁混凝土的安全。

6.3 索塔塔顶位移

合龙段拆除后，实测索塔塔顶纵向水平位移为南塔 0.5 cm (向河侧)，北塔 0.1 cm (向河侧)。与理论计算的位移变化趋势相反，主要是由于临时压重总量

表 5 合龙段拆除前后主梁混凝土应力增量

Tab. 5 Concrete stress increment of main girder before and after removal of the old closure segment

主梁监测断面	测点位置	点号	应力增量/MPa
南塔边跨中	顶板下缘	①	- 0.11
		②	- 0.56
	底板下缘	③	0.67
		④	0.07
南塔塔根	顶板下缘	①	- 0.26
		②	- 1.33
	底板下缘	③	- 1.12
		④	- 1.21
南塔中跨 C9 ~ C10	顶板下缘	①	0.74
		②	0.61
	底板下缘	③	1.16
		④	1.56
北塔中跨 L/4	顶板下缘	①	- 0.25
		②	- 0.39
	底板下缘	③	0.51
		④	0.60
北塔塔根	顶板下缘	①	- 1.51
		②	- 1.26
	底板下缘	③	- 0.84
		④	- 0.60
北塔边跨中	顶板下缘	①	- 0.35
		②	- 0.35
	底板下缘	③	- 0.56
		④	- 0.44

注：应力以受拉为正。

超过了原桥合龙段重量 (根据统计，临时压重比合龙段重量多 300 kN) 所致，而这是出于对桥面线形和主梁混凝土应力控制的要求。鉴于索塔塔顶水平位移量较小，合龙段拆除并未引起索塔发生过的变位。

6.4 索力

合龙段拆除前后实测全桥索力增量分布如图 14 所示。由图 14 可看出，实测最大索力增量为 388 kN (南半桥河侧 C11 号索)。从增量分布规律来看，与计算增量分布趋势基本一致，个别索号出现差异主要是由于合龙段拆除引起的索力增量分布相对较小，每个索号包括 4 根索束，使每根索束的增量就变得更小，这样就容易在索力测试精度有限的情况下出现偏差。但总的来看，全桥索力变化除紧邻合龙段的长索外，其他索号的索力变化不明显，与计算预测趋势相符，索力变化在施工控制范围内。

6.5 合劲性骨架钢构件的轴力

在整个拆除过程中，劲性骨架的最大轴力为 477.6 kN (压力)，与施工控制目标值 (427.9 kN) 接近，未超过材料强度的限值，整个施工过程中也未见劲性骨架发生明显的变形或与主梁节段发生脱焊分离的情况。

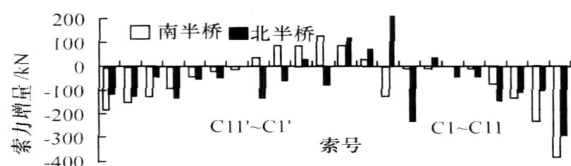


图14 合龙段拆除后实测全桥索力增量

Fig. 14 Measured cable force increment after removal of the old closure segment

6.6 主梁纵向变形

合龙段拆除过程中主梁未见明显的纵向变位。

7 结论

(1) 从合龙段拆除前后的主要力学指标的实际变化来看, 由于拆除施工采用了浮箱换重方式, 使得合龙段拆除后与拆除前相比, 索力变化很小, 桥面线形起伏变化不大, 主梁混凝土拉应力增量较小, 塔位变化不明显, 合龙段拆除过程均在施工控制范围之内, 保证了结构的安全。

(2) 理论计算值与实测值出现的偏差主要是由于主梁实际的整体刚度与计算值之间的差异造成的, 同时出于控制桥面高程的考虑, 避免主梁混凝土产生过大的拉应力增量, 实际压重比合龙段重量高出了 300 kN, 这也是造成理论值与监测值之间差异的原因。

(3) 合龙段采用外部锁定的施工措施是合理的, 拆除过程中劲性骨架并未发生强度、刚度以及稳定性问题, 合龙段预应力拆除过程中, 工字钢应力变化不大, 说明合龙段预应力并未明显地转移到锁定装置上, 实践证明, 针对永和斜拉桥合龙段的这种交叉锚固预应力体系的特点, 外部锁定方式及施加外部锁定的时机是可行的。

(4) 永和大桥中跨合龙段的拆除为其后面的新合龙段恢复与加固奠定了基础, 也是国内首次采用置换合龙段方式对桥梁进行维修加固的成功典范, 为 PC 斜拉桥的病害处治开辟了新的技术途径。

参考文献:

References:

- [1] 朱正伟, 刘东燕, 彭文轩. 体外预应力技术在桥梁加固中应用的思考 [J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27 (2): 46 - 50.
ZHU Zheng-wei, LIU Dong-yan, PENG Wen-xuan. Consideration of External Prestressing Technique Applied to Bridge Reinforcement [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2005, 27 (2): 46 - 50.
- [2] 艾军, 史丽远. 公路桥梁体外预应力加固设计与施工方法研究 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2002, 32 (5): 771 - 774.
AI Jun, SHI Li-yuan. Discussion of Design and Construction Method on Extraneous Prestressed Strengthening Technique for Bridge [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2002, 32 (5): 771 - 774.
- [3] 郭建通, 刘建焱, 郭辉, 等. 体外预应力技术在桥梁加固中的应用 [J]. 工业建筑, 2002, 32 (9): 69 - 70.
GUO Jian-tong, LIU Jian-yan, GUO Hui, et al. Application of the External Prestressed Technique in Bridge Retrofit Engineering [J]. Industrial Construction, 2002, 32 (9): 69 - 70.
- [4] 杜蓬娟, 黄才良, 张哲. 公和斜拉桥的合龙技术 [J]. 公路, 2003 (9): 18 - 20.
DU Peng-juan, HUANG Cai-liang, ZHANG Zhe. Closure Technology of Gonghe Cable-stayed Bridge [J]. Highway, 2003 (9): 18 - 20.
- [5] 邵长宇, 谢红兵, 卢士鹏. 武汉长江二桥斜拉桥的边跨与中跨合龙 [J]. 桥梁建设, 1995, 25 (3): 54 - 57.
SHAO Chang-yu, XIE Hong-bing, LU Shi-peng. Construction of Closure Parts in Cable-stayed Side and Main Spans of the Second Changjiang River Bridge in Wuhan [J]. Bridge Construction, 1995, 25 (3): 54 - 57.
- [6] 喻璐, 王翊波. 重庆马桑溪长江大桥合龙方案设计 [J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22 (2): 10 - 14.
YU Lu, WANG Yi-bo. Closure Scheme Design of Masangxi Yangtze River Bridge in Chongqing [J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 2003, 22 (2): 10 - 14.
- [7] JTJ 027-96, 公路斜拉桥设计规范 (试行) [S].
JTJ 027-96, Design Specifications of Highway Cable-stayed Bridge (on trial) [S].
- [8] 郭棋武, 方志, 裴炳志, 等. 混凝土斜拉桥的温度效应分析 [J]. 中国公路学报, 2002, 15 (2): 48 - 51.
GUO Qi-wu, FANG Zhi, PEI Bing-zhi, et al. Temperature Effect Analysis of Concrete Cable-stayed Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15 (2): 48 - 51.
- [9] 檀兴华. 斜拉桥索力监测技术研究与应 [J]. 公路, 2006 (3): 146 - 153.
TAN Xing-hua. A Study and Application of Monitoring and Measurement Technology for Cable-stayed Bridge [J]. Highway, 2006 (3): 146 - 153.
- [10] 刘世同, 许汉铮, 陈晔. 五河口斜拉桥合龙施工与控制技术 [J]. 现代交通技术, 2006, 3 (3): 42 - 45.
LIU Shi-tong, XU Han-zheng, CHEN Ye. The Construction Control of Wuhekou Cable-stayed Bridge [J]. Modern Transportation Technology, 2006, 3 (3): 42 - 45.