

预应力混凝土斜拉桥合龙段置换加固施工过程分析

李宏江

(交通运输部公路科学研究院,北京 100088)

摘要:预应力混凝土斜拉桥合龙段置换加固技术是为解决合龙段与相邻主梁节段之间的湿接缝失效问题而提出的。为分析这种加固技术的受力特点,介绍了这种加固技术的实现途径和施工要点,建立了典型的预应力混凝土斜拉桥的结构计算模型,系统地给出了施工阶段分析的方法,包括合龙段置换的结构基准计算模型的建立和合龙段置换施工过程的模拟,依据计算结果,分析了合龙段置换过程中桥面线形、索力以及塔顶偏位等结构状态参数的变化。研究表明,采用该方法能够反映斜拉桥结构状态的实际变化历程和现状检测结果,模拟计算结果与合龙段置换施工监测结果较为吻合,从而揭示了合龙段置换施工过程结构的变化特点,可为预应力混凝土斜拉桥合龙段置换加固的设计计算和施工控制提供依据。

关键词:预应力混凝土;斜拉桥;加固;置换;施工过程

中图分类号:U445.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)01-0047-07

Construction Stage Analysis on Replacement of Closure Segment in Prestressed Concrete Cable-stayed Bridges

LI Hong-jiang

(Research Institute of Highway, The Ministry of Communications, Beijing 100088, P. R. China)

Abstract: To deal with failure of wet joint between a closure segment and its neighboring segments of main girder in an existing prestressed concrete cable-stayed bridge, the technology on replacement of closure segment was presented. In order to analyze structural characteristics of this technology, its technical approaches and construction key points were introduced. Then a FEM model for a typical prestressed concrete cable-stayed bridge was established, and a construction stage analysis method was given in detail, including establishing a structural basement calculation model for replacement of closure segment and simulating its construction procedures. Based upon calculation results, variations of some structural state parameters with construction stages, such as deck deflection of main girder, longitudinal horizontal displacement at the top of pylons, cable forces, were analyzed. The results showed, this method could reflect actual change process of structural state and existing inspected results of cable-stayed bridge, and FEM results could well meet with construction monitoring results during replacement of closure segment. Thus variations of structural characteristics with construction stages could actually be revealed. This method could provide references for design and construction control of replacement of closure segment in existing prestressed concrete cable-stayed bridges.

Key words: prestressed concrete; cable-stayed bridges; strengthening; replacement; construction stages

收稿日期:2011-05-08

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(200731822340)

作者简介:李宏江(1973-),男,博士,副研究员,主要从事大跨桥梁加固理论与设计方法研究,(E-mail)hj.li@rioh.cn。

合龙是大跨度预应力混凝土斜拉桥(以下简称“PC 斜拉桥”)成桥连梁的关键环节,合龙段通常为现浇混凝土块件,故它与相邻主梁节段之间的连接一般为湿接缝形式。受到节段间混凝土龄期和收缩性能差异的影响,湿接缝混凝土的抗拉强度往往比节段内混凝土降低很多^[1-4]。若接缝混凝土压应力储备不足或接缝构造存在缺陷,在长期反复荷载作用下容易发生开裂,随运营时间的累积,裂缝宽度和深度逐渐增大,进而造成接缝处钢筋断裂,最终形成结构安全隐患,天津永和大桥便是如此。针对这种病害,常规的加固方式难以根除隐患,于是合龙段置换加固技术便应运而生了。天津永和大桥主跨合龙段的构造、预应力的布置形式及合龙方式等均决定并提供了置换的可行性,使得它率先在这项加固技术上做出了探索与实践^[5]。尽管合龙段置换加固技术有着它的使用范围或适用条件,但其加固计算方法对今后旧桥加固设计理论及施工控制技术的发展却具有重大而深远的参考与借鉴意义。本文结合该桥的维修加固工程,给出其主跨合龙段置换施工过程的仿

真计算方法,诠释施工过程中主要结构状态参数的变化规律,以揭示合龙段置换加固技术的特点。

1 永和大桥简介

天津永和大桥为 5 孔一联、主孔跨径 260 m、双塔双索面、塔墩固结、连续呈漂浮体系的 PC 斜拉桥,如图 1 所示。该桥主梁梁高 2.0 m,包括风嘴总宽 14.5 m,由 2 个三角形边箱组成半封闭式断面,如图 2 所示,主梁的架设方法是以塔柱为中心,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,挂完 7 对索后,与岸跨现浇段合龙,并解除梁端临时水平约束,形成半桥状态,此时进行一次全面调索,其目的是调整半桥悬臂端标高,同时进一步减小索力误差。半桥调索后继续悬拼挂索施工,待 2 个半桥均挂完 11 对索后进行中跨合龙。中桥合龙后,再进行一次全面调索。最后,进行桥面二期恒载施工。主跨合龙段的设计长度为 4.3 m,其纵向预应力钢筋采用交叉锚固方式布置,如图 3 所示。

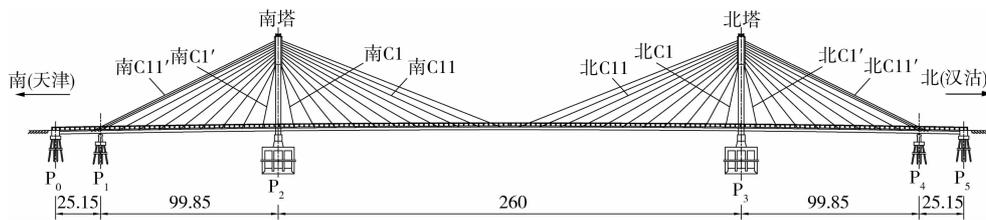


图 1 天津永和大桥总体布置 (单位:m)

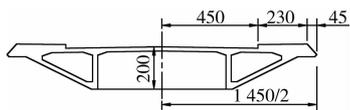


图 2 主跨合龙段横断面 (单位:cm)

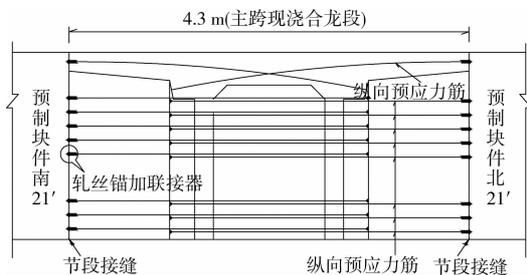


图 3 合龙段纵向预应力交叉锚固方式

该桥建成于 1987 年,运营 18 a 后,主跨合龙段与南侧 21'预制节段之间的湿接缝开裂,裂缝上窄下宽,下缘开裂宽度达 10 cm,车辆过桥时裂缝宽度具有明显的活动性,现场实测活动幅度达 9 mm。另外,接缝处存在部分普通钢筋及预应力钢筋断裂的现象,造成接缝接近失效状态。后来,为彻底消除安

全隐患,该桥首次进行了主跨合龙段置换加固工程^[6]。

2 合龙段置换加固技术

与建筑结构中的置换混凝土加固方法相似,合龙段置换加固技术的实现途径包括原合龙段的拆除、新合龙段的恢复以及新合龙段的加强。原合龙段的安全拆除是实现置换的先决条件。新合龙段的恢复,其施工工艺有些类似新桥合龙的过程,新老混凝土的结合是关键。新合龙段的加强,是采用有效措施建立新合龙段自身的合理应力状态,加强新合龙段附近梁段的局部刚度及其与原结构主梁的连接。下面结合天津永和大桥,介绍该技术的关键环节。

2.1 劲性骨架

为保证原合龙段拆除后桥跨结构仍处于连梁状态,需要在原合龙段拆除前对其进行体外锁定,同时,为保证新合龙段混凝土的浇筑质量,也需要两半桥悬臂端的相对位置固定。这样,劲性骨架在合龙段置换中扮演着至关重要的作用,其自身的强度、稳

定性及其与主梁悬臂端连接的可靠性均决定着施工的成败。劲性骨架的设计可参考原桥合龙时采用的构造,并根据现场情况予以适当的加强。劲性骨架通常选择在夜间气温较低且稳定的时段安装,要求焊接迅速完成并形成刚接^[7]。

2.2 压重调节

参照现有大跨度桥梁的合龙工艺,原合龙段的拆除、新合龙段的浇筑总体上均遵循浮箱换重的原则,即桥面设置压重水箱,通过调节水箱的重量来保持桥跨荷载的均衡。当然,出于施工控制的要求,桥面压重也可依据结构的实际反应适当加以调整。

2.3 施工吊篮

为便于合龙段拆除与重新浇筑施工,需要在合龙段下方设置施工吊篮,用以提供工作平台。施工吊篮锚固在与合龙段相邻的主梁节段上,可采用钢构件拼装而成,桥面临时荷载统计时需计入其重量。

2.4 新老混凝土结合面处理

新老混凝土结合面的处理方式通常包括凿毛和植筋。原合龙段拆除后,对新老混凝土结合面应严格凿毛,并按照文献[8]规定的构造要求进行植筋。在结合面处,永和大桥原设计含筋率仅 0.5%,合龙段拆除后的现场统计计算表明,实际含筋率更低,远未达到原设计要求。按照宁波招宝山大桥的加固经验^[9],本次合龙段置换使其含筋率不低于 1%,植筋抗拔力由现场工艺试验确定。

2.5 新合龙段混凝土的浇筑

新合龙段混凝土材料应具有高流动性、高强、无收缩、与原结构混凝土粘结强度高等特点^[10],同时为保证其浇筑质量,应在浇筑时机、养生措施等方面加强控制。

2.6 新合龙段的加强

可联合采用扩大截面法与体外预应力法。永和大桥新合龙段置换中,采用了增厚新合龙段附近局部梁段的直腹板并在其内布设并张拉无粘结体外预应力的加强措施,加强范围为主跨合龙段两侧各 9.3 m 长的梁段,直腹板平均增厚 54 cm。如图 4 所示,同时设置 10 束 5Φ15.24 mm 的环氧喷涂无粘结钢绞线(运营中可补张拉或更换),交错分散地锚固在主梁的横隔板上,如图 5 所示。

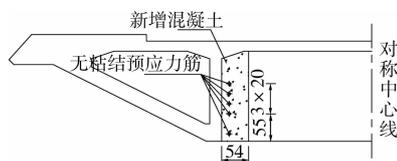


图 4 新合龙段扩大截面加强(单位:cm)

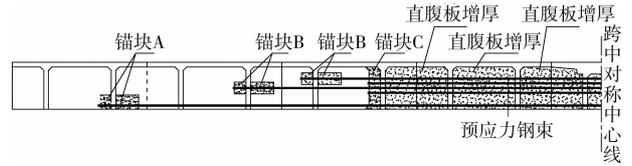


图 5 新合龙段体外预应力加强

3 置换过程的仿真计算

3.1 计算模型简介

合龙段置换施工过程的仿真计算采用平面杆系分析程序(Dr. Bridge),以原桥竣工时的实测线形、主梁重心轴与拉索索点的对应关系确定主梁节点和拉索梁端锚固点的坐标,计算模型如图 6 所示。其中,主梁为预应力混凝土单元,索塔为钢筋混凝土梁单元,拉索采用索单元模拟。全桥划分主梁单元 160 个,索塔单元 34 个,索单元 44 个(同一索号的 4 根索束合并成一根),桥台及辅助墩处约束主梁竖向位移,塔墩底部固结。



图 6 永和大桥计算模型

3.2 结构现状模拟^[11]

所谓结构现状,是指合龙段置换前的结构状态。经过近 20 a 的运营,永和大桥的病害突出表现在主跨合龙段的失效,除此之外,还存在着索力变化以及由此而引起的桥跨局部下挠。当然,主梁纵向预应力也会存在损失,况且该桥主梁的架设采用了预制拼装方法,预应力筋为精轧螺纹粗钢筋,预应力筋有效程度短,通常损失会很大。结构现状模拟的目的就是建立合龙段置换的结构基准模型,是合龙段置换施工过程模拟的起点,该基准模型须反映合龙段置换前大桥的现状检测结果,如桥面线形、索力以及塔顶偏位等。

首先,按照原桥实际施工过程进行施工阶段分析,并依据原桥主要施工阶段的实测桥面线形、索力以及塔位等分阶段地修正模型的结构参数^[12],使计算成桥状态最终逼近原竣工成桥时的实测状态,同时也兼顾原施工过程关键阶段的受力,如边跨合龙、半桥状态、主跨合龙等,以此作为后面分析的初始计算模型。

对比分析合龙段拆除前的结构现状检测结果与原竣工的技术状态之间差异,确定结构现状模拟的逼近目标,在前述初始计算模型基础上,考虑运营期主要因素的影响,增加如下几个施工阶段:

1) 混凝土收缩徐变 18 a, 收缩徐变效应按文献[13]计算。

2) 主跨合龙段与南 21' 预制节段之间的接缝退化为铰, 在接缝处释放合龙段单元的转动约束, 使合龙段单元的弯矩得以释放, 通过这一简化来近似模拟湿接缝失效。

3) 根据计算索力与检测索力之间的误差, 通过索力张拉或放松的方式进行迭代计算, 以逼近检测状态^[14]。

尽管经过多年的运营, 大桥主梁的预应力通常会存在较大损失, 但对于混凝土斜拉桥的主梁而言, 主梁的内力、应力受拉索的水平分力影响较大, 主梁内部设置的纵向预应力主要用来抵抗使用阶段荷载的作用, 如活载等。基于此, 本文忽略了预应力损失对主梁应力状态的影响, 而是在施工中将主梁关键截面的混凝土应力增量变化作为主要监测对象, 以弥补模拟计算误差的影响, 并通过计算应力增量与实测值进行比对, 以对模拟计算的有效性进行评判。这里所说的“增量”系指施工动作所引起的主梁混凝土应力变化, 而混凝土应力的实际状态很难通过监测或检测手段来获得。

经上述模拟后, 桥跨结构的计算状态在桥面线形、索力、塔顶偏位等指标方面均接近了检测状态, 可用作合龙段置换的结构基准模型。当然, 该模型中主梁的整体刚度取值是否合理可采用温度效应进行检验, 检验的方法可参照文献[15], 这里不再赘述。

3.3 合龙段置换过程模拟

结合天津永和大桥, 合龙段置换过程大致分为如下 6 个基本的施工工序:

- 1) CS1: 铲除合龙段桥面铺装, 安装施工吊篮, 焊接劲性骨架以锁定原合龙段。
- 2) CS2: 桥面压重条件下拆除原合龙段。
- 3) CS3: 绑扎钢筋骨架, 布设新合龙段预应力钢筋, 浇筑新合龙段混凝土, 撤除桥面压重。
- 4) CS4: 张拉新合龙段预应力钢筋, 并解除劲性骨架, 拆除施工吊篮。
- 5) CS5: 主梁扩大截面加强新合龙段。
- 6) CS6: 张拉体外预应力加强新合龙段。

在前述结构基准模型建立的基础上, 按照上述工序增加相应的施工阶段来模拟合龙段置换过程, 单元及荷载的模拟方法如下:

劲性骨架: 考虑到它是由工字钢拼接而成的主要以承受轴力为主的构件, 按照其实际位置建立钢构件单元, 顶缘和底缘的上、下游 2 根工字钢分别合并成 1 个, 不考虑工字钢之间的横向联系。由于工

字钢于主梁之间采用焊接方式连接, 故耦合钢构件单元的节点与主梁悬臂端节点之间的所有平动及转动位移, 即将其视为固结处理。

临时荷载: 施工吊篮的重量以集中荷载形式施加在悬臂端。压重水箱按施工拟定的位置以均布荷载形式施加在南、北半桥悬臂各 17.4 m 范围的梁段上, 压重量按实际情况考虑。

合龙段单元的拆除与安装: 在合龙段位置预先建立 2 套单元, 分别用来模拟原合龙段的拆除与新合龙段的安装, 新合龙段的扩大截面部分以程序中的附加截面方式模拟, 并在不同施工阶段分别激活其重量和刚度。合龙段预应力的解除与恢复也是采用类似的方式, 即建立 2 套预应力。由于在 Dr. Bridge 中, 体内预应力钢筋一旦灌浆便无法拆除, 故事先在保证主梁断面预应力管道挖空面积不变的前提下, 将原合龙段预应力筋近似模拟为体外预应力。这样, 直接拆除体外预应力即可实现原合龙段预应力的释放效果, 而新合龙段的预应力钢筋不存在此问题。另外, 新合龙段加强部分的无粘结预应力筋需要额外单独地以体外束的方式赋给程序。

根据上述施工过程, 合龙段置换的关键受力状态如图 7 所示。从原桥架设至合龙段置换完毕, 仿真计算模型的施工阶段总计 127 个, 其中原桥施工过程模拟 103 个, 结构现状模拟 14 个, 合龙段置换过程模拟 10 个。

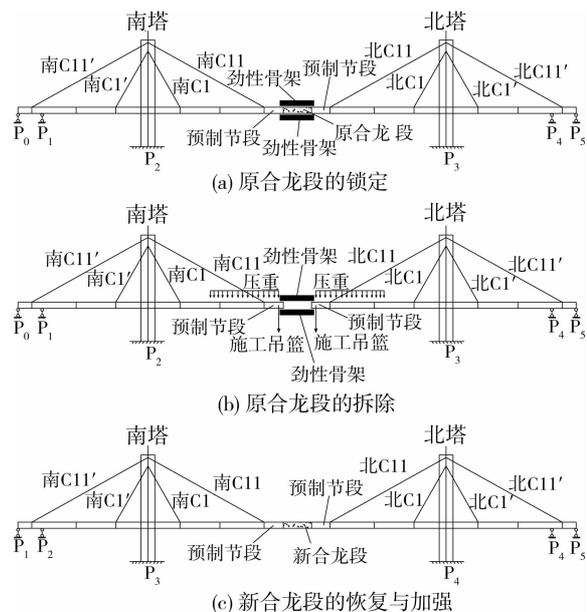


图 7 合龙段置换关键受力状态

4 结构状态参数分析

从图 7 可以看到, 合龙段置换过程的关键阶段

为原合龙段拆除后和合龙段置换后(包括新合龙段恢复及其加强)。对于 PC 斜拉桥而言,主要的结构状态参数包括桥面线形、索力以及塔顶偏位等。下面以原合龙段拆除前的状态为基准,分析这些状态参数的仿真计算结果,并与置换施工过程中的监测结果进行比较。

4.1 桥面线形

通过测量桥面线形高程,可以反映主梁挠度的变化。合龙段置换施工中对主要受力状态的桥面线形进行了跟踪观测。系统温差桥面线形影响相对较小^[15],况且合龙段置换工程历时 46 d,期间环境温度波动较缓,故系统温差的影响可忽略不计。同时,为避免日照温差的影响,桥面线形测量均选择在早晨进行。

与合龙段置换前相比,原合龙段拆除后及合龙段置换完成后的桥面线形变化如图 8 所示。从图 8 可以看到,原合龙段的拆除后,主梁悬臂端发生上抬,待新合龙段恢复并加强后,主梁线形又基本得以恢复,计算位移与施工监测结果较为吻合。合龙段置换后,实测主梁跨中附近产生轻微的下挠,其原因是由于新合龙段混凝土超方 15% 所致^[6]。

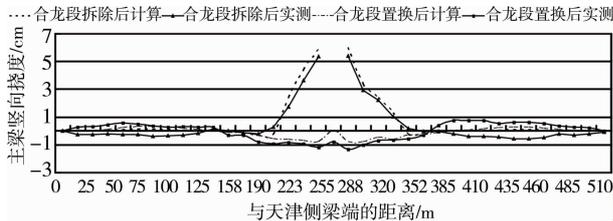


图 8 合龙段置换过程的桥面线形变化

4.2 索力

合龙段置换施工中对主要受力状态进行了索力跟踪监测,索力测试采用振动法。图 9 示出了合龙段置换过程的全桥索力变化分布,图中的索力系指同一索号的 4 根索束的合计值。由图 9 可以看到,合龙段置换过程中长索的索力变化相对明显,计算索力增量与施工监测结果相比,相当数量索号的索力增量误差还是较大的,分析其原因是合龙段置换过程基本上遵循了浮箱换重原理,桥跨恒载变化不大,因而索力变化有限,即索力变化的绝对值较小,这是造成计算索力增量与实测值误差较大的主要原因,但从图 9 可看到,二者的变化趋势是基本一致的,经计算,所出现的误差不足合龙段置换前实测索力的 3%。

4.3 塔顶偏位

合龙段置换施工中对主要受力状态的塔顶偏位进行了跟踪测量,采用高精度经纬仪进行索塔垂直

度测量,进而测出塔顶沿纵桥向的偏位。由于系统温差对塔顶偏位影响较大^[15],根据测量时的大气温度与合龙段置换前的初始测量温度之间的差异,对主要受力状态的塔顶偏位进行系统温差修正。同时,为避免日照温差的影响,塔顶偏位测量时间亦选择在早晨。表 1 列出了合龙段置换过程的塔顶偏位变化。由表 1 可以看出,合龙段拆除后,两索塔塔顶均向岸侧倾斜,合龙段置换完成后又向河侧倾斜,其原因是新合龙段加强及新合龙段混凝土超方造成中跨恒载略有增大,计算结果与施工监测结果较为吻合。

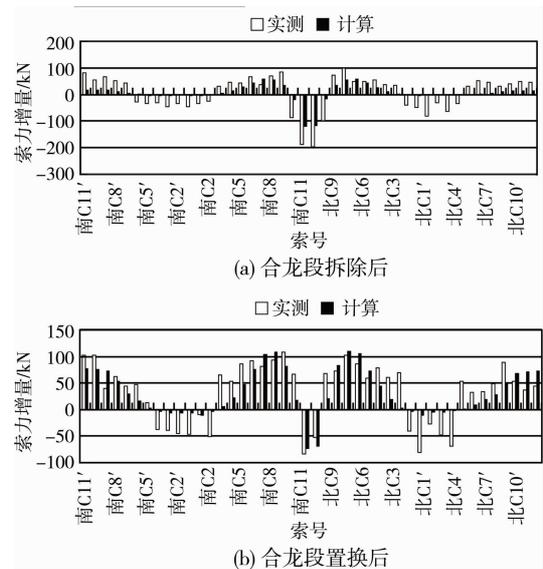


图 9 合龙段置换过程的索力变化

表 1 合龙段置换过程的塔顶偏位变化

塔位	合龙段拆除后/cm		合龙段置换后/cm	
	实测	计算	实测	计算
南塔	-0.10	-0.13	0.90	0.81
北塔	-0.20	-0.17	1.10	0.73

注:塔顶偏位以向河侧倾斜为正。

4.4 混凝土应力变化

利用布置在测点处的外贴式钢弦应变计进行各施工阶段的应力测试。应变测量前,需读取初始读数和环境温度,通过温度补偿对测点数值进行修正。表 2 列出了主梁关键断面应力测试结果及其与相应计算值的比对。

由表 2 可以看到,合龙段拆除引起的应力增量数值相对较大,而合龙段置换后,主梁关键截面的应力增量数值明显的减小,即趋近于合龙段置换前的状态。实测应力增量与计算值基本接近,个别部位误差较大,这一方面是由于实际结构中的混凝土应力受到多种因素的影响,另一方面是由于模拟计算中主要关注了索力、桥面线形以及塔位等结构总体

表 2 合龙段置换过程的主梁关键断面的混凝土应力

主梁监测截面	部位	合龙段拆除后			合龙段置换后		
		计算/MPa	实测/MPa	实测/计算	计算/MPa	实测/MPa	实测/计算
南边跨跨中	顶板下缘	-0.18	-0.23	1.25	-0.30	-0.28	0.94
	截面底缘	0.23	0.37	1.61	0.25	0.24	0.94
南塔塔根	顶板下缘	-1.03	-1.30	1.26	-0.36	-0.34	0.94
	截面底缘	0.55	0.67	1.21	0.27	0.29	1.08
南 C9 索点	顶板下缘	0.50	0.43	0.85	0.16	0.19	1.20
	截面底缘	-1.06	-0.86	0.81	-0.32	-0.36	1.13
北 C9 索点	顶板下缘	0.52	0.36	0.68	0.29	0.28	0.98
	截面底缘	-1.59	-1.39	0.87	-0.38	-0.39	1.05
北塔塔根	顶板下缘	-1.11	-1.39	1.25	-0.42	-0.39	0.93
	截面底缘	0.98	0.72	0.73	0.25	0.26	1.05
北边跨跨中	顶板下缘	-0.30	-0.35	1.17	-0.26	-0.25	0.95
	截面底缘	0.30	0.35	1.17	0.31	0.30	0.96

注:应力以受压为正。

指标的变化,而对于混凝土应力的模拟采取了相对较多的假设和近似,但这并未影响实际工程的施工控制,其计算精度亦能满足工程的要求,至于混凝土应力的精细化分析尚需进一步研究。

5 结论

PC 斜拉桥合龙段置换过程复杂,存在结构受力模式、结构刚度及荷载变化,采用施工阶段分析方法模拟其施工过程,以捕捉结构状态的变化是非常必要的,是旧桥加固设计计算和施工控制的基础和依据。通过对天津永和大桥主跨合龙段置换全过程的模拟计算,可以得到如下结论:

1) 结构基准计算模型是进行合龙段置换过程仿真计算的起点。PC 斜拉桥的设计与施工高度耦合,结构应力状态与施工过程紧密相关,因此,基准模型需要考虑原桥施工过程以及运营期因素的影响,根据施工监测和现状检测结果对理想化的初始计算模型进行修正是非常必要的,这样建立起来的结构基准模型才能反映结构的实际受力状态。

2) 根据合龙段置换技术的实现途径,其施工过程分析的要点包括劲性骨架的模拟、临时荷载的简化以及合龙段单元的拆除与安装等,其中,合龙段单元的拆除与安装是关键。本文是采用建立 2 套单元及 2 套预应力钢筋来实现的,原合龙段的预应力钢筋以体外预应力方式等效模拟。

3) 通过对比仿真计算结果与施工监测结果可以发现,本文对合龙段置换加固施工过程的模拟是有效的。计算桥面线形和塔顶偏位的变化与实际情况较为吻合,尽管计算索力增量与实际变化存在误差,

但其基本趋势是一致的。

4) 合龙段置换的计算结果表明,施工过程中桥跨结构状态变化是有限的,而这恰恰是合龙段置换加固技术的显著特点,这对于运营多年的老桥而言确保合龙段置换过程中结构的安全是非常重要的。新合龙段混凝土超方及新合龙段加强所增加的主梁重量等的消极影响可充分利用斜拉桥拉索的可调性进行适度改善。

参考文献:

- [1] 张开敬. PC、PPC 梁分段施工接缝混凝土抗拉强度降低系数的试验研究[J]. 桥梁建设, 2000, 30(1):6-8.
ZHANG KAI-JING. Experimental investigation of tensile strength reduction factors of concrete at cast-in-place joints on PC, PPC segmental girders[J]. Bridge Construction, 2000, 30(1):6-8.
- [2] BARKAN M KAVLICOGLU, FARAMARZ GORDANINEJAD, MEHDI SAIIDI, et al. Behavior of a graphite/epoxy-concrete bridge girder[J]. Composites Part B:Engineering, 2006, 37(2):171-181.
- [3] ZHOU XIANG-MING, NEIL MICKLEBOROUGH, LI ZONG-JIN. Shear strength of joints in precast segmental bridges[J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(1):3-11.
- [4] TURMO JOSE, RAMOS G, APARICIO A C. Shear strength of dry joints of concrete panels with and without steel fibres application to precast segmental bridges[J]. Engineering Structures, 2006, 28(1):23-33.
- [5] LI HONG-JIANG. Status and development of technologies of maintenance and strengthening for existing PC cable-

- stayed bridges[C]// Proceedings of the 10th International Conference of Chinese Transportation Professionals, ASCE, 2010.
- [6] 李宏江,李万恒,张劲泉,等.天津永和大桥的维修与加固[J].世界桥梁,2009,6(1):53-56.
LI HONG-JIANG, LI WAN-HENG, ZHANG JIN-QUAN, et al. Rehabilitation and strengthening of Yonghe Bridge in Tianjin[J]. World Bridges, 2009, 37(1):53-56.
- [7] 张欣禹,郎宏继,孙庆东,等.沈阳市富民主桥合龙设计[J].桥梁建设,2004,34(S1):11-13.
ZHANG XIN-YU, LANG HONG-JI, SUN QING-DONG, et al. Closure design of main bridge of Fumin Bridge in Shenyang[J]. Bridge Construction, 2004, 34(S1):11-13.
- [8] JTG/T J23—2008 公路桥梁加固施工技术规范[S].北京:人民交通出版社,2008.
- [9] 林国雄,秦顺全,朱华民,等.宁波招宝山大桥加固重建工程设计[J].桥梁建设,2001,31(3):18-21.
LIN GUO-XIONG, QIN SHUN-QUAN, ZHU HUAMIN, et al. Design for the strengthening and rehabilitation of Zhaobaoshan Bridge in Ningbo [J]. Bridge Construction, 2001, 31(3): 18-21.
- [10] 干伟忠,HANS PASCHMANN.超流态免振混凝土配合比的优化设计研究[J].土木工程学报,2004,37(5):39-43.
GAN WEI-ZHONG, HANS PASCHMANN. Optimal mix design for superfluidity self-compacting concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(5):39-43.
- [11] 李宏江,王荣霞,王磊.在役预应力混凝土斜拉桥的结
构状态模拟[J].山东建筑大学学报,2010,25(4):405-409.
LI HONG-JIANG, WANG RONG-XIA, WANG LEI. Simulation on structural state of PC cable-stayed bridges in service [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2010, 25(4):405-409.
- [12] 王浩,王付全,李爱群,等.大跨度缆索支撑桥梁分阶段有限元模型修正[J].工程力学,2009,26(10):111-116.
WANG HAO, WANG FU-QUAN, LI AI-QUN, et al. Multi-phase fe model updating on long-span cable-supported bridges [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(10):39-43.
- [13] JTGD 62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].北京:人民交通出版社,2004.
- [14] 李宏江,张劲泉,李万恒,等.PC斜拉桥辅助墩拉力摆断裂后的状态模拟[J].深圳大学学报:理工版,2010,27(3):280-285.
LI HONG-JIANG, ZHANG JIN-QUAN, LI WAN-HENG, et al. Simulation on the state after fracture of tension rocker bearing cables at auxiliary piers in a PC cable-stayed bridge[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2010, 27(3):280-285.
- [15] 李宏江.用于结构状态判别的PC斜拉桥温度效应[J].土木建筑与环境工程,2009,31(5):81-85.
LI HONG-JIANG. Temperature effect analysis for structural state estimation of PC cable-stayed bridge [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009,31(5):81-85.

(编辑 王秀玲)

(上接第 34 页)

- XU ZHAO-DONG, SHI BEN-QIANG, WU KE-YI, et al. Vertical shaking table tests on the structure with viscoelastic multi-dimensional earthquake isolation and mitigation devices[J]. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 39(10):1709-1715.
- [14] 张英会,刘辉航,王德成.弹簧手册[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [15] 中国国家标准化管理委员会.GB/T 1972—2005 碟形弹簧[S].2005.
- [16] TSAI KEH-CHYUAN, CHEN HUAN-WEI, HONG CHING-PING, et al. Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction[J]. Earthquake Spectra, 1993, 9(3):505-528.
- [17] 李冀龙.结构耗能减振金属阻尼器的阻尼力模型及其应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [18] SHI MING-HSIANG, SUNG WEN-PEI, GO CHEER-GERM. Investigation of newly developed added damping and stiffness device with low yield strength steel[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2004, 5(3):326-334.

(编辑 胡英奎)