

# 转体施工中转动体系有限元分析

杨柳<sup>1</sup>, 张清<sup>2</sup>, 王阳建<sup>2</sup>, 陈得良<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.深圳市路桥建设集团有限公司, 广东 深圳 518024)

**摘要:**以广深沿江高速公路深圳段二期工程深中通道深圳侧接线 H 匝道大曲率钢箱梁转体施工中转动体系为研究对象, 利用 ANSYS 软件分析该转动体系在偏载、摩擦力和牵引力作用下的挠度变形、应力分布状态及转动主体桥梁偏心、总质量对其的影响。结果表明, 该桥转动系统整体受力合理, 结构安全。

**关键词:**桥梁; 转体施工; 转动体系; 大偏心; 接触模拟; 有限元分析

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)01-0090-05

转体施工是在非设计轴线处将主体施工完毕, 再旋转至设计位置的一种施工方法, 分为平转法、竖转法及平竖结合法。对于平转法, 转动体系是核心部分, 通常由下转盘(承台)、球铰、上转盘(承台)及转动牵引系统组成。目前国内关于小半径弯桥平转的转动系统研究较少。该文以广深沿江高速公路深圳段二期工程深中通道深圳侧接线 H 匝道大曲率钢箱梁转体施工为例, 对设置横向预偏心的转体结

构进行分析探讨。

## 1 工程概况

深中通道深圳侧接线 H 匝道桥位于广深沿江高速公路深圳段二期工程 SJ1 合同段, 其中第五联横跨既有一期匝道和广深(广州—深圳)高速公路, 采用转体施工法。为跨径(50+80+50) m 的连续曲线钢箱梁, 曲线半径 150 m。转动体系见图 1。

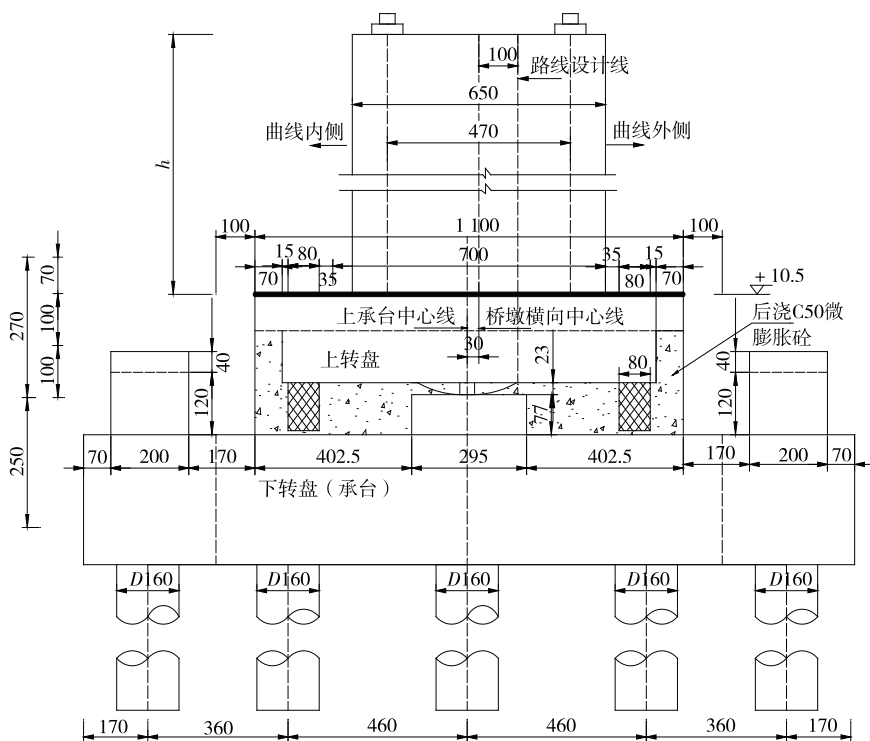


图 1 深中通道深圳侧接线 H 匝道桥转动体系立面图(单位: 标高为 m, 其他为 cm)

因转动主体曲线桥存在很大横向偏心, 桥墩横向中心线设计偏离箱梁轴线(图 1 中路线设计线)

1 m, 而转动体系的中心线(图 1 中上承台中心线)偏离桥墩中心线 0.3 m, 共设置 1.3 m 横向预偏心。

转动体系砗结构采用 C50 砗,钢球铰作为转动体系的关键部位,采用 Q345 钢材,直径 225 cm,厚 4 cm,分上下两片。下转盘上设转动系统的下球铰、保险撑脚环形滑道及转体拽拉千斤顶反力座等。下球铰砗灌注完成后,将直径 24 cm 钢棒放入下转盘预埋套筒中,方便中心轴转动,然后进行下球铰聚四氟乙烯滑动片和上球铰安装。上转盘直径 960 cm,高 100 cm,桥墩与上转盘之间设(1 100×1 100×70) cm 上承台。上转盘布设纵横向预应力钢筋,内预埋转体牵引索,其是转体牵引力直接施加的部位,下设 8 组撑脚,对称分布于纵轴线的两侧。撑脚的下方(即下转盘顶面)布置 90 cm 宽滑道,滑道半径 425 cm,其中撑脚走板与滑道的间隙为 6 mm。

## 2 有限元模型

利用 ANSYS 有限元软件模拟桥墩、上承台、上转盘、撑脚、钢制球铰及转动中心轴,上、下钢球铰及转动中心轴采用 Solid185 单元模拟,砗结构采用 Solid65 单元模拟,各接触面之间采用接触单元模拟,上球铰底部的凸面和转轴表面用 Conta174 单元生成接触单元,上球铰空心处与转轴接触的凹面及下球铰顶部的凹面采用 Target170 单元生成目标单元,摩擦系数为 0.047。有限元模型见图 2。

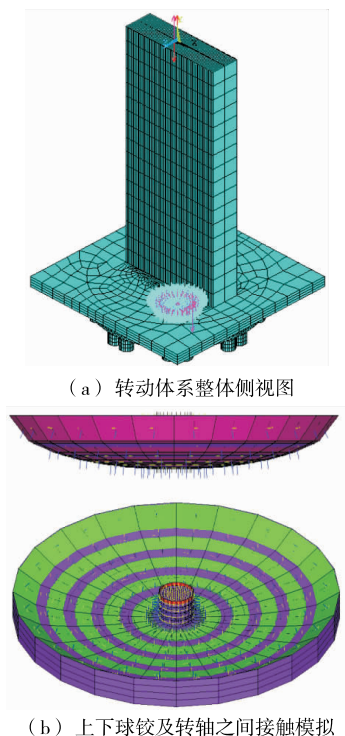


图 2 ANSYS 有限元模型

对下球铰进行固定约束, $x$  轴表示横桥向,正向

为钢箱梁的曲线外侧, $z$  轴表示纵桥向, $yo z$  面与转动体系的中心面重合。为模拟真实荷载,各结构均采用实际尺寸。此外,由于曲线桥存在横向偏心,前期计算出钢箱梁的质量重心向曲线内侧偏离箱梁中心线 1.573 2 m,设计预偏心 1.3 m,故在曲线内侧横向偏离转盘中心线 0.273 2 m 的节点处加载集中荷载来模拟桥梁主体的自重,钢箱梁主体重 738.7 t。

## 3 静力分析

### 3.1 挠度变形分析

撑脚布置见图 3,坐标轴的方向与图 2 有限元模型的坐标轴方向一致, $x$  轴正向为曲线外侧,下文曲线外侧均指  $x$  轴正向。

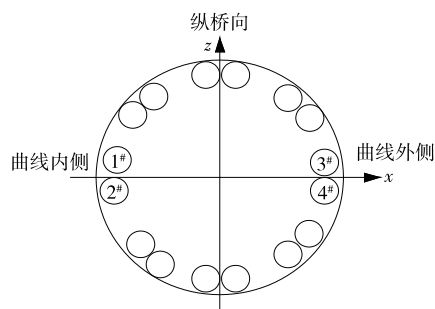


图 3 8 组撑脚的分布

转体系统在钢箱梁主体及桥墩自重的横向偏载作用下的变形见图 4。由图 4 可知:在自重作用下转体体系的变形非常小,不超过 1 mm,且曲线内侧结构变形大于外侧结构变形;曲线内侧的撑脚(图 3 中的 1#、2#)变形最大,曲线外侧的撑脚(3#、4#)变形最小;转体体系中变形位移有正有负(曲线外侧出现下挠),表明对于偏心转体施工,设置预偏心后,当整体结构中心与转动中心不能完全一致时,很小的

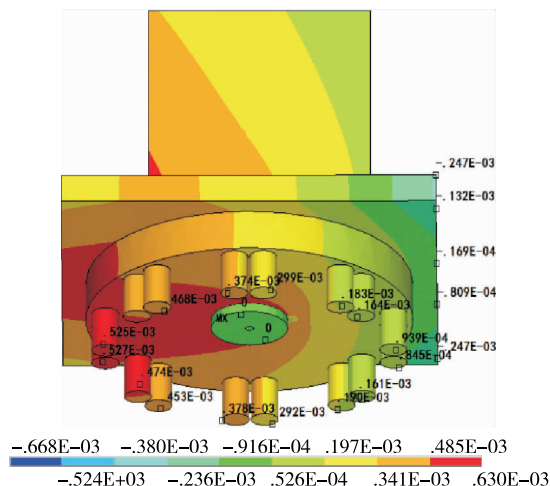


图 4 转动体系静力分析变形(单位:m)

偏心距都会造成转体结构变形,产生局部微小上翘和下挠。因此,对偏心转体施工应严格控制整体偏心距,使整体重心基本与转动中心吻合。

### 3.2 砦结构应力分析

图5为转动体系砦结构的应力云图。

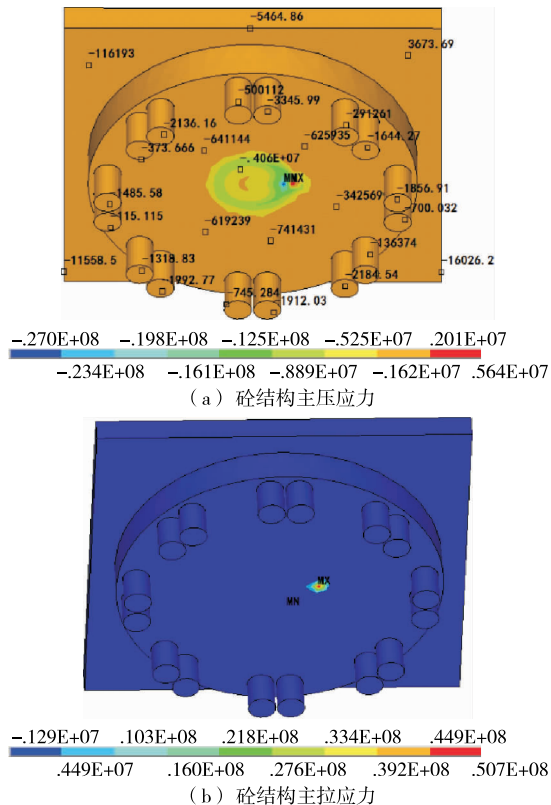


图5 转动体系砦结构应力云图(单位:Pa)

由图5(a)可知:转动体系砦结构整体处于受压状态,上转盘底部与上球铰接触的区域主压应力较大,最大值为 $-27\text{ MPa}$ ,由于上转盘为C50砦结构,上球铰采用Q345钢材,应力状态满足要求;大部分主压应力不超过 $1.62\text{ MPa}$ ,主压应力较小。

由图5(b)可知:在上转盘底部与上球铰接触边的曲线外侧出现主拉应力集中现象,最大主拉应力为 $50.7\text{ MPa}$ 。因为上球铰是Q345钢制结构,可认为上转盘与上球铰接触区域的应力满足要求,但设计时应增加该部位受拉钢筋配置。

### 3.3 球铰应力分析

图6为球铰应力云图。由图6(a)、(b)可知:上球铰整体处于受压状态,主压应力为 $0\sim-144\text{ MPa}$ ,钢球铰采用Q345钢材,最大主压应力符合要求;位于横向轴线曲线外侧位置,越靠近球心压应力越小。在上球铰空心处的曲线外侧及顶部边缘曲线外侧靠近横向轴线处出现主拉应力集中现象,主拉

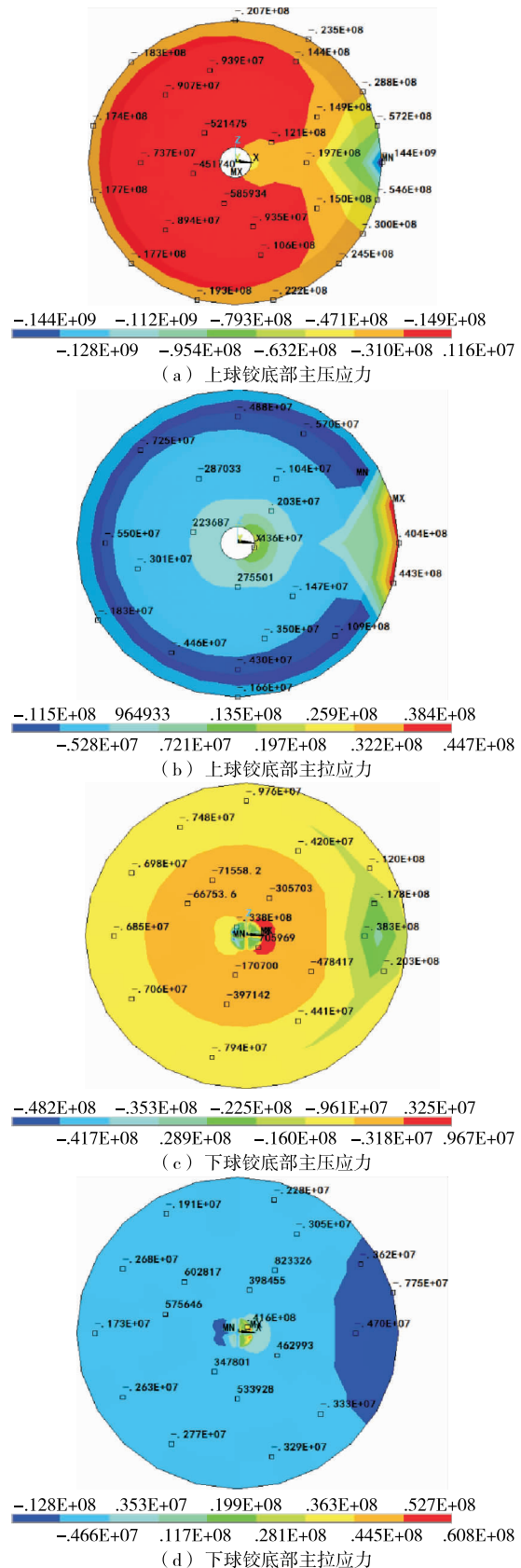


图6 球铰应力云图(单位:Pa)

应力为 $0\sim44.7\text{ MPa}$ ,最大主拉应力出现在上球铰

边缘曲线外侧且靠近横向轴线上部。

由图 6(c)、(d)可知:下球铰整体处于受压状态,下球铰的曲线外侧和转动中心轴的底部主压应力较大,为  $0 \sim -48.2$  MPa,最大主压应力出现在转轴底部的曲线内侧;靠近转轴处的下球铰底部出现较大主拉应力,为  $0 \sim 60.8$  MPa,最大主拉应力位于下球铰底部与转轴相接位置的曲线外侧。

#### 4 牵引力的计算与加载

根据 JTG/T F50—2011《公路桥涵施工技术规范》,中心支撑转体施工所需牵引力为:

$$T = \frac{2fGR}{3D} = \frac{2 \times 0.1 \times 15\,987 \times 1.125}{3 \times 9.6} = 124.89 \text{ kN}$$

式中: $f$  为静摩擦系数,为保证足够的牵引力, $f$  取 0.1; $G$  为转体总重量; $R$  为上球铰半径; $D$  为上转盘直径。

转体施工中牵引力施加在上转盘,则有限元模型对上转盘施加圆周力可进行转动分析,所施加圆周力的大小即为牵引力 124.89 kN,均分到上转盘外圆周面的各节点。

加载牵引力后,挠度变形仍不超过 1 mm 且各部分应力变化不大,表明加载刚刚克服静摩擦力的牵引力,整个结构处于接近平衡状态,转动过程也较平稳。

#### 5 桥梁主体对转动体系的影响

##### 5.1 桥梁主体偏心的影响

转动体系受力见图 7。钢箱梁重心向其轴线内侧偏心 1.573 2 m(图 7 中  $G_1$  所在位置); $G_2$  表示桥墩重心,偏离钢箱梁轴线 1 m,同时转动体系的中心线( $y$  轴)偏离桥墩重心  $G_2$  0.3 m。若有限元模型将表示钢箱梁重力的集中荷载从  $x$  轴 -1 m(图 7 中  $G'_1$ )移动到 +1 m(图 7 中  $G''_1$ ),则可讨论横向偏心轴线内侧 2.3~0.3 m 之间的曲线梁对转动体系的影响,该偏心范围可满足绝大部分曲线梁需求。

提取图 3 中 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup> 撑脚中心处的节点,得到撑脚的变形[见图 8(a)]和转动体系的应力随桥梁主体偏心的变化[见图 8(b)]。

由图 8(a)可知:随着曲线桥逐渐向轴线内侧横向偏心,位于箱梁重力偏载一侧即曲线内侧的撑脚(1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>)不断下挠,曲线外侧撑脚(3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>)则逐渐上挠,表明随着桥梁主体向曲线内侧不断偏心,整体

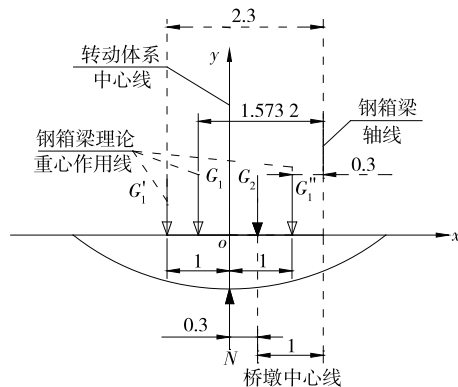
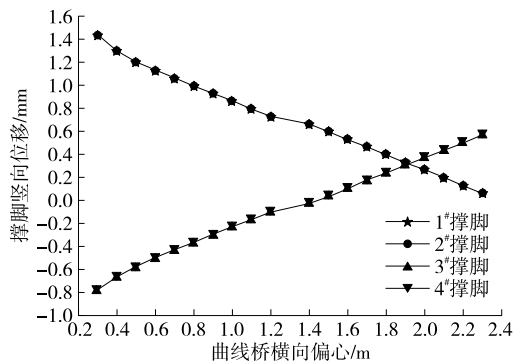
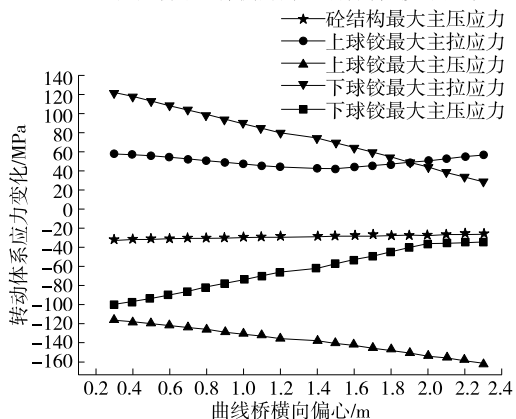


图 7 转动体系受力简图(单位:m)



(a) 桥梁主体横向偏心对撑脚位移的影响



(b) 桥梁主体横向偏心对转动体系应力的影响

图 8 桥梁主体偏心的影响分析

重心会向曲线内侧逐渐偏离;当弯桥的横向偏心小于 1.9 m 时,曲线内侧撑脚的变形量大于曲线外侧,即位于重心一侧的撑脚的下挠值大于非重心一侧的上挠值。

由图 8(b)可知:转体系统砼结构的应力与桥梁主体的偏心没有很大关系,下球铰的最大主拉应力和最大主压应力均随偏心的增大而线性减小。对于上球铰,最大主压应力随桥梁主体横向偏心的增大而线性增长,最大主拉应力呈上抛物线,但变化不大。整体来说,下球铰主拉、主压应力减小速率小于

上球铰主压应力增大速率。

## 5.2 转动主体吨位的影响

曲线桥主体质量对转动体系有很大影响。桥梁主体重量为0~2万t时,撑脚位移变化见图9(a),转体系统各部分应力变化见图9(b)。

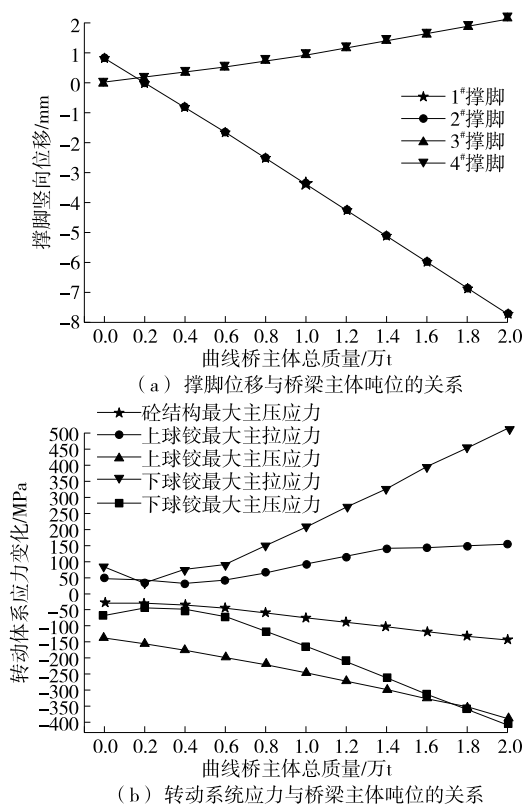


图9 桥梁主体吨位的影响分析

由图9(a)可知:随着曲线桥主体质量的增加,曲线内侧撑脚(1#、2#)下挠越来越明显,曲线外侧撑脚(3#、4#)则不断上挠,整个转体系统变得越来越倾斜。转动主体的总质量达到1.6万t时,在恒载作用下撑脚变形大于6mm,撑脚已与滑道接触,进入抵抗倾覆状态。

由图9(b)可知:曲线梁质量越大,转体结构各部分的主压和主拉应力不断增大;转动主体质量超过0.8万t时,下球铰的主压和主拉应力增长速度最快。对于该转体系统,当主梁总质量超过0.5万t时,砼结构会遭到破坏,而钢球铰可承受转动主体的质量最大为1.6万t。

## 6 结论

通过对设置横向预偏心的转体系统进行仿真模拟与数值分析,得以下结论:

(1) 转体施工曲线桥梁设置预偏心后,整个结

构接近平衡状态,变形和应力均满足要求,其偏心距稍微偏离曲线外侧,无需配重。转体施工前判断合理的预偏心非常重要。

(2) 转动系统整体受压,结构安全。但在上转盘与上球铰、上球铰与下球铰、转动中心轴接触的位置及上球铰底部曲线外侧边缘会出现主拉应力,应重点监控。此外,在上转盘与上球铰的接触区域需增加受拉钢筋数量。

(3) 设计转体系统时应考虑弯桥的横向偏心及总质量。横向偏心对砼结构的应力作用不大,但随着横向偏心的增大,上球铰的主压应力增大,而下球铰主拉、主压应力减小。转动主体质量对下球铰主拉、主压应力的影响最大。对于横向大偏心的转体施工桥,应注意上球铰的抗压能力;大吨位的转体施工桥,应注意下球铰的抗拉、抗压能力。此外,在设计和施工中应注意位于桥梁重心一侧撑脚的变形,因为即使设置预偏心和配重后整体结构的偏心距非常小,对于大吨位转体施工桥,桥梁重心一侧的撑脚变形也会大于撑脚走板与滑道的间隙。

## 参考文献:

- [1] 刘明辉.跨越既有铁路线桥梁平转体施工技术及应用[M].北京:科学出版社,2016.
- [2] 马庆祝.金山铁路钢桁梁平面转体施工技术研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [3] 薄涛.即墨上行联络线跨线连续梁桥转体施工监控技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [4] 刘涛.转体桥梁球铰设计[J].水科学与工程技术,2018(3).
- [5] 张聪聪.转体桥梁球铰稳定与施工模拟分析[D].武汉:武汉理工大学,2016.
- [6] 车晓军.平转法施工桥梁转动球铰受力精细化分析及平衡控制研究[D].武汉:武汉理工大学,2015.
- [7] 田山坡.小半径曲线转体桥调偏心研究[J].城市道桥与防洪,2018(4).
- [8] 袁娜,周志亮.大跨小曲线半径转体桥转体系统设计要点[J].都市轨道交通,2014,27(1).
- [9] 中国华西工程设计建设有限公司.广深沿江高速公路深圳段深中通道深圳侧接线和国际会展中心互通立交第一合同段施工图[Z].成都:中国华西工程设计建设有限公司,2017.
- [10] 宋满荣,葛陈军,冯然,等.基于ANSYS的桥梁转体施工转盘数值分析[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2018,41(10).

(下转第97页)

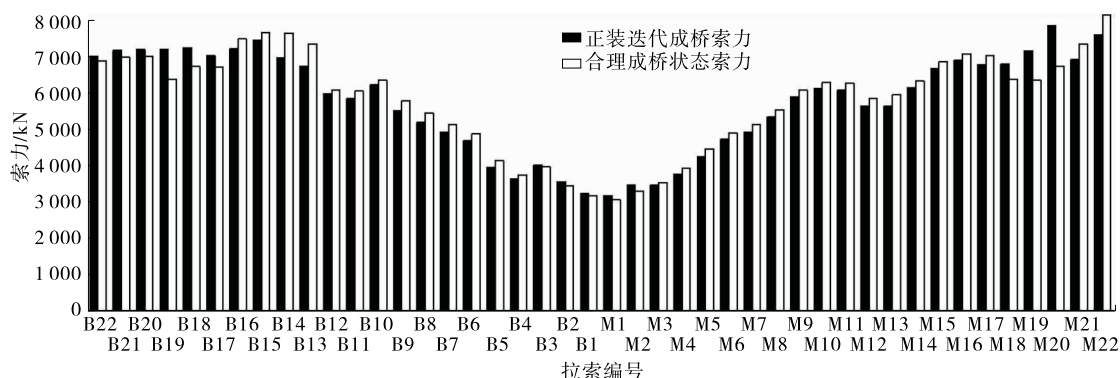


图 5 合理成桥状态与正装成桥索力对比

龙后合龙段配重和体系转换导致尾索索力产生一定变化,但基本符合施工索力误差要求;主梁弯矩吻合较好,仅部分梁段有一定误差,满足施工成桥要求。

#### 4 结论

采用适合于砼斜拉桥的正装迭代法,结合实际情况进行预应力砼斜拉桥施工期索力计算,主要结论如下:

(1) 正装迭代法可方便快捷地计算砼斜拉桥施工阶段的初始张拉力,且能和施工工序同步进行实时调整和修正。

(2) 选取的目标参数不同对计算结果的影响不大,理论上关键内力参数的选取越多越有利于提高计算结果的精确性。

(3) 正装计算后部分索力存在误差,可利用影响矩阵法在合龙后进行局部索力调整。

#### 参考文献:

- [1] 邵旭东.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 林元培.斜拉桥[M].北京:人民交通出版社,1994.
- [3] 秦顺全.无应力状态控制法斜拉桥安装计算的应用[J].

桥梁建设,2008,38(2).

- [4] Chaolin Song, Rucheng Xiao, Bin Sun. Optimization of cable pre-tension forces long-span cable-stayed bridges considering the counterweight [J]. Engineering Structures, 2018, 172.
- [5] 陈明生.大跨度斜拉桥几何非线性变形和受力状态的影响[J].中国公路,2018(12).
- [6] 辛克贵,冯仲.大跨度斜拉桥的施工非线性倒拆分析[J].工程力学,2004,21(5).
- [7] 林驰.基于非线性正装迭代法的三塔结合梁斜拉桥施工索力确定[J].武汉理工大学学报,2012,34(9).
- [8] 黄春亮.正装迭代法求解矮塔斜拉桥初张索力研究[J].公路与汽运,2017(1).
- [9] 王新征,王宗华.正装迭代法在确定斜拉桥成桥状态索力中的应用[J].公路工程,2015,40(2).
- [10] Leandro Arosio. Canonical models for the forward and backward iteration of holomorphic maps [J]. The Journal of Geometric Analysis, 2017, 27(2).
- [11] 车鑫,刘旭.部分斜拉桥动力特性及颤振稳定性分析[J].公路交通科技:应用技术版,2018(10).
- [12] JTG/T F50—2011,公路桥涵施工技术规范[S].

收稿日期:2019-04-07

(上接第 84 页)

学性能及耐久性研究[J].混凝土,2016(8).

- [10] 李中华.寒冷地区道路混凝土抗盐冻剥蚀性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [11] 孙长征,朱凡凡,赵同峰,等.超细矿物掺合料混凝土

抗盐冻性能的试验研究[J].混凝土,2016(10).

- [12] 倡传铭.聚合物改性水泥砼力学性能及耐久性能研究[J].公路与汽运,2018(6).

收稿日期:2019-04-25

(上接第 94 页)

- [11] 左敏,江克斌.转体桥平转球铰转体过程应力计算方法研究[J].铁道标准设计,2015(12).

- [12] JTG/T F50—2011,公路桥涵施工技术规范[S].

- [13] 唐清明.大跨度超宽变截面不平衡配重连续梁转体施工控制[J].施工技术,2017,46(5).

收稿日期:2019-02-26