

# PC 宽幅斜拉桥挂篮变更影响分析

王 帅,李 源

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

**摘 要:**预应力混凝土宽幅斜拉桥被广泛应用于各跨江河路线,其最主要的施工方法为牵索挂篮悬浇或菱形挂篮悬浇施工。通过对预应力混凝土斜拉桥 2 种挂篮施工的整体及局部受力和变形分析,得到同样设计参数下不同挂篮施工下的受力差异,可为同类型桥梁的施工方选择提供借鉴。

**关键词:**斜拉桥;牵索挂篮;菱形挂篮

中图分类号: U 448.27

文献标志码: B

文章编号: 1009-7767(2017)02-0052-04

## Influence Analysis of Suspended Basket Design Change of Wide PC Cable Stayed Bridge

Wang Shuai, Li Yuan

预应力混凝土宽幅斜拉桥被广泛应用于各跨江河路线,其最主要的施工方法为牵索挂篮悬浇或菱形挂篮悬浇施工。牵索挂篮充分利用斜拉索,将待浇节段变为简支梁受力形式,减轻了已有梁段分配到的荷载,从而提高了节段的悬浇长度及承重能力。其不足之处在于悬浇过程中需要分阶段多次调索,工艺复杂。菱形挂篮是利用已有梁段来承受挂篮及待浇梁段的所有施工荷载,施工工艺简单,受力明确,可满足主梁施工一次成形的要求,但其对已有梁段的刚度强度有较高要求,箱梁横隔板要有足够的抗弯剪能力<sup>[1]</sup>。

牵索挂篮施工过程为挂篮就位、斜拉索初张拉并锚固于挂篮、浇筑 1/2 混凝土并进行第 2 次张拉、浇筑剩余混凝土、达到设计强度后张拉预应力、斜拉索转移锚固至新梁段并进行第 3 次张拉。菱形挂篮施工过程为挂篮就位、浇筑混凝土、达到设计强度后张拉预应力、斜拉索张拉并锚固于新梁段。主梁施工选取不同形式挂篮就有不同的施工工序,对主梁受力变形等均会产生不同效应,这些效应对斜拉桥主梁成桥线形及受力安全性有着重要影响<sup>[2]</sup>。实际生产中,因工期或机具受限,施工方或有临时更改施工方案的需求,故笔者对斜拉桥施工过程中挂篮变更的影响予以探讨。

### 1 工程概况

广东省佛山市顺德区某特大桥主桥为 119 m+250 m+119 m 双塔双索面预应力混凝土斜拉桥,结构形式为半漂浮结构,塔上设有横向支座及纵向限位挡块。主梁标

准段采用全预应力混凝土双边箱梁断面结构,横向宽度为 36.5 m,整体式断面,横隔梁按 A 类预应力构件设计。主梁边跨现浇段考虑配重(每延米配 250 kN 铁砂混凝土)的需要,采用预应力混凝土单箱三室断面结构。斜拉索采用双索面扇形布置,主塔两侧各分布 20 对,全桥共 80 对 160 根。斜拉索在主梁和塔上的锚固方式均采用混凝土锚垫块的锚固方式,在塔上单端张拉。梁上索距 6 m,标准节段长 6 m。主梁施工前,施工方要求将牵索挂篮施工变更为菱形挂篮施工,故对其产生的影响进行以下分析。

### 2 线形分析

为使主梁线形在成桥 10 年后达到设计要求的线形,施工时实际立模高程应考虑施工累计下挠、挂篮变形、收缩徐变、温度等作用的影响<sup>[3]</sup>。

采用牵索挂篮施工时,挂篮变形主要为挂篮质量、混凝土质量、斜拉索索力引起的变形,以及混凝土质量引起的主梁刚性转动附加变形、拉索索力引起的主梁刚性转动附加变形。其中,挂篮质量引起的挂篮变形在组装挂篮时已经完成,施工中不需考虑。由于施工过程中斜拉索在挂篮上张拉,混凝土部分质量由斜拉索承担,承担的大小与挂篮拉索协同变形有关,所以有限元分析计算中必须考虑牵索挂篮的刚度,进而才能得到混凝土浇筑引起的挂篮变形。采用菱形挂篮施工时,挂篮变形主要为挂篮质量、混凝土质量引起的变形以及混凝土质量引起的主梁刚性转动附加变形。

斜拉索在梁上张拉锚固,故计算挂篮变形时无需考虑拉索<sup>[4]</sup>。

采用不同的挂篮施工方案,引起的施工累计变形及成桥预拱度也不同。通过不同挂篮施工方案下的计算得出,采用牵索挂篮时最大成桥预拱度为26.4 cm,最大施工累计下挠绝对值为32.1 cm;采用菱形挂篮时最大成桥预拱度为28.0 cm,最大施工累计下挠绝对值为25.2 cm。

3 整体受力分析

3.1 应力分析

由于施工方法由牵索挂篮变为菱形挂篮,两者受力不同。牵索挂篮浇筑混凝土梁时已经挂索并张拉,拉索可以提供一部分压应力,使主梁上缘拉应力不会超限;而菱形挂篮浇筑混凝土梁时,该段梁还没挂索及张拉,该节段在混凝土重力的作用下,使主梁上缘出现较大的拉应力,导致主梁受力不满足条件<sup>[5]</sup>。选取14号块浇筑后(最大双悬臂)、20号块最大单悬臂、二期铺装3个工况进行比较分析(见图1、2)。

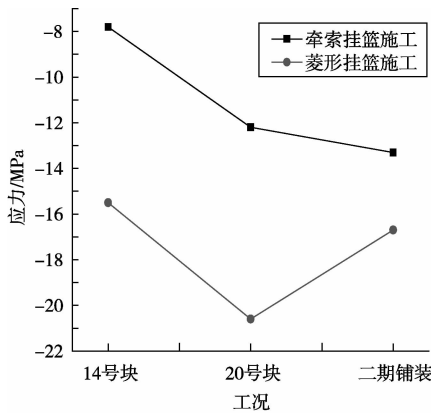


图1 不同工况下主梁上下缘最大压应力

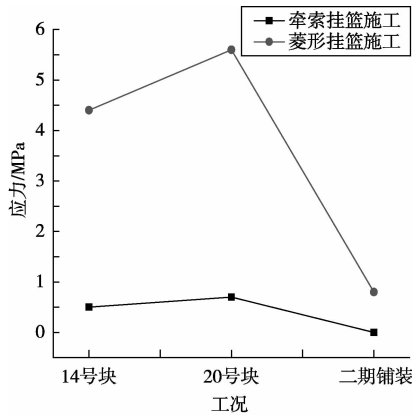


图2 不同工况下主梁上下缘最大拉应力

从图1、2可以看出,若直接变更为菱形挂篮施工,主梁最大拉应力为5.6 MPa,不满足规范要求。

3.2 索力分析

采用牵索挂篮施工时,每个标准段拉索随施工节段分多次张拉至初张拉力;采用菱形挂篮施工时,每个标准段拉索1次张拉至初张拉力。现将2种施工方案采用相同初张拉力值,比较不同施工工艺下成桥索力差别(见表1、2)。

表1 菱形挂篮施工成桥索力

索号	索力/ kN	应力/ MPa	安全 系数	索号	索力/ kN	应力/ MPa	安全 系数
S1	2 720	508.6	3.7	M1	2 736	511.5	3.6
S2	2 721	508.7	3.7	M2	2 780	519.7	3.6
S3	2 867	536.0	3.5	M3	2 988	558.6	3.3
S4	3 451	479.5	3.9	M4	3 369	468.1	4.0
S5	3 529	490.3	3.8	M5	3 609	501.4	3.7
S6	3 701	514.3	3.6	M6	3 777	524.8	3.5
S7	3 965	517.8	3.6	M7	4 044	528.1	3.5
S8	4 028	526.0	3.5	M8	4 127	539.0	3.5
S9	4 087	533.7	3.5	M9	4 306	562.3	3.3
S10	4 546	529.7	3.5	M10	4 597	535.7	3.5
S11	4 640	540.6	3.4	M11	4 713	549.2	3.4
S12	4 692	546.8	3.4	M12	4 831	563.0	3.3
S13	4 703	483.0	3.9	M13	4 892	502.4	3.7
S14	4 882	501.3	3.7	M14	4 940	507.3	3.7
S15	4 855	498.6	3.7	M15	4 940	507.3	3.7
S16	4 893	502.5	3.7	M16	4 946	507.9	3.7
S17	5 161	473.9	3.9	M17	5 100	468.3	4.0
S18	5 313	487.8	3.8	M18	5 249	481.9	3.9
S19	5 483	503.4	3.7	M19	5 339	490.2	3.8
S20	5 624	516.4	3.6	M20	5 426	498.2	3.7

从表1、2可以看出,采用不同挂篮施工对最终成桥索力影响不大,2种施工工艺下最终成桥索力及拉索安全系数接近,均满足规范要求。

4 局部受力分析

该工程斜拉桥主梁施工方案为0~1号块采用支架现浇、其余标准段采用挂篮悬臂现浇。原设计方案采用牵索挂篮施工,现拟采用菱形挂篮施工。由于该桥桥面宽阔,悬臂浇筑时混凝土重力较大,变更为菱形挂篮后对主梁受力较为不利,需要对挂篮作用下桥梁局部受力进行分析。采用大型通用有限元软件ANSYS建立0~1号块局部模型,用solid45实体单元模拟混凝土

表 2 牵索挂篮施工成桥索力

索号	索力/ kN	应力/ MPa	安全 系数	索号	索力/ kN	应力/ MPa	安全 系数
S1	2 678	500.6	3.7	M1	2 739	512.1	3.6
S2	2 645	494.5	3.8	M2	2 755	515.1	3.6
S3	2 762	516.4	3.6	M3	2 928	547.4	3.4
S4	3 309	459.7	4.0	M4	3 264	453.5	4.1
S5	3 406	473.2	3.9	M5	3 499	486.1	3.8
S6	3 605	500.9	3.7	M6	3 672	510.2	3.6
S7	3 897	508.8	3.7	M7	3 947	515.3	3.6
S8	3 986	520.4	3.6	M8	4 043	527.9	3.5
S9	4 058	529.9	3.5	M9	4 229	552.3	3.4
S10	4 529	527.7	3.5	M10	4 528	527.6	3.5
S11	4 632	539.7	3.4	M11	4 664	543.4	3.4
S12	4 686	545.9	3.4	M12	4 802	559.5	3.3
S13	4 700	482.6	3.9	M13	4 888	502.0	3.7
S14	4 868	499.9	3.7	M14	4 964	509.8	3.6
S15	4 843	497.4	3.7	M15	4 991	512.5	3.6
S16	4 871	500.2	3.7	M16	5 006	514.1	3.6
S17	5 138	471.8	3.9	M17	5 169	474.6	3.9
S18	5 294	486.1	3.8	M18	5 310	487.6	3.8
S19	5 469	502.2	3.7	M19	5 382	494.1	3.8
S20	5 625	516.4	3.6	M20	5 428	498.4	3.7

土主梁,link8 单元模型预应力束;ANSYS 局部实体模型单元总数为 92 119 个,节点 83 401 个。选取 1/2 结构建立有限元分析模型,故在主梁 0 号块根部断面施加对称约束;另外,在主梁底部支座及临时固结位置施加相应的支座及临时固定约束。

局部分析模拟 2 号块浇筑时菱形挂篮锚固作用在 0~1 号块上的局部受力情况。随着主梁节段号的增加,斜拉索倾角越来越小,索力水平分力越来越大,拉索对主梁的预压效应也越来越强,也就越能抵抗挂篮产生的拉应力,故 2 号块施工是该桥菱形挂篮施工最为不利的计算工况(见图 3、4)。

计算结果表明,按照原设计方案挂篮由牵索改为菱形后,2 号主梁浇筑时其节段质量全部由 0~1 号节段承担,这无疑增加了 0~1 号主梁的负担,尤其是 0 号块区段主梁,其顶板受力由原先的受压为主变为受拉为主,且出现 6~9 MPa 的拉应力。这说明原设计方案中 0~1 号顶板束的配置已经无法满足菱形挂篮施工的需要。

## 5 优化方案

该桥挂篮施工优化方案是通过调整预应力钢束

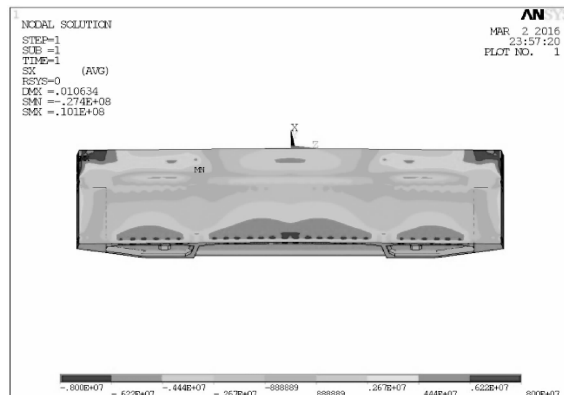


图 3 顶板纵向应力图(MPa)

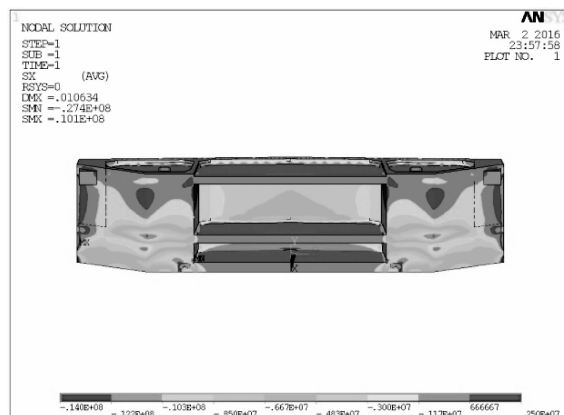


图 4 底板纵向应力图(MPa)

的布置及张拉时间的方法,增加整个顶板截面的压应力储备并使主梁截面受力均匀,以抵抗后段主梁挂篮施工传递给前段主梁的荷载。

挂篮由牵索挂篮改为菱形挂篮,2 号块浇筑时,0~1 号块在挂篮荷载作用下,主梁根部顶板出现较大拉应力,原设计中 0~1 号顶板预应力束的配置已经无法满足菱形挂篮施工的需要,需要调整。主梁腹板范围内自身存在腹板通长预应力束(规格为  $\phi$ s15.2 mm-19 的钢绞线),只是在施工过程中不是逐段张拉,而是每浇筑 4 个标准段张拉 1 次。如能采用逐段张拉,在每个施工阶段可增加主梁内侧腹板及外侧布索区内混凝土的压应力储备。同时,腹板束基本上为上下对称布置,提前张拉只会增加截面的轴力,基本不会产生弯矩,不会影响主梁施工线形。鉴于 0 号块布索区存在较大的拉应力,而腹板束预应力张拉对该区域效果有限,则需要在该区段内增加主梁纵向顶板短束。

优化方案如下:中跨顶板合龙束预应力钢筋规格

(下转第 187 页)

表 4 地铁项目部分风险因素等级划分

风险因素	风险可能性 <i>L</i>	风险后果严重性 <i>S</i>	风险度 <i>R</i>	风险等级
地面沉降不均、塌陷等	4.0	4.7	18.8	2
施工碰撞燃气管线	4.0	4.3	17.2	2
起重机械检修作业未按规定悬挂警示标志	4.0	4.0	16.0	2
地面承载力强度不够或操作失误造成桩机倾覆	4.7	3.3	15.6	2
重点消防部位(活动板房、配电室或仓库等)未配备消防器材	3.0	5.0	15.0	2
起重机安装、拆卸及吊装过程中出现坠落或垮塌	3.0	5.0	15.0	2
开挖支护时无人观察土体、支护状态,地质不良	4.0	3.7	14.8	2
电力架空线路地面沉降不均	3.0	4.7	14.1	3
模板支撑使用材料不合格	4.7	3.0	14.0	3
深基坑周边支护不到位、强度不足	4.7	3.0	14.0	3
脚手架垮塌	4.0	3.3	13.3	3

参考文献:

[1] 孟宪魁. PDCA 风险管理在工程施工中的应用[J]. 铁道工程学报, 2006, 23(4): 101-104.  
[2] 李忠, 魏嘉, 朱彦鹏. 大断面城市隧道施工全过程风险管理模式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2085-2094.  
[3] 翟志刚. 北京地铁施工阶段安全风险技术管理[J]. 施工技术, 2011, 40(24): 86-88.  
[4] 闫朝霞. 北京地铁安全风险体系分析及管理[J]. 西部探矿工

程, 2011, 23(6): 210-213.  
[5] 夏明耀, 曾进伦. 地下工程设计施工手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 1108-1145.  
[6] 朱自强. 城市轨道交通建设项目管理指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 152-167.

收稿日期: 2016-11-08  
作者简介: 谭文超, 男, 工程师, 硕士, 主要从事市政和地铁工程的管理及技术工作。

(上接第 54 页)  
由 3Ø15.2 mm 改为 6Ø15.2 mm; 0 号块布索区主梁顶板每侧增加 10 束预应力短束; 0、1 号块顶板短束由 3Ø15.2 mm 改为 5Ø15.2 mm; 腹板束在原有每侧 4 组的基础上增加至每侧 6 组并由 4 节段张拉 1 次改为每节段张拉 1 次。

优化后主梁成桥预拱度最大值为 28.3 cm, 施工累计下挠绝对值最大值为 37.3 cm; 主梁上下缘最大压应力为 -16.8 MPa (出现在 20 号块浇筑后工况), 上下缘施工中均无拉应力产生, 满足规范要求。

6 结论

1) 施工方变更挂篮施工方案时, 必须经过详细的主梁受力验算分析, 不同挂篮施工工艺使主梁受力差异较大。采用牵索挂篮施工, 施工中主梁最大压应力为 -12.5 MPa, 最大拉应力为 1.0 MPa; 采用菱形挂篮施工, 施工中主梁最大压应力为 -20 MPa, 最大拉应力为 6.0 MPa, 局部甚至出现 6~9 MPa 拉应力。

2) 菱形挂篮施工因施工过程中缺少拉索辅助受力, 对主梁顶板受力不利, 需加强顶板预应力, 增大顶板预应力储备, 防止施工过程中顶板开裂。

3) 变更挂篮施工方案, 主梁变形会相应改变, 牵索挂篮施工累计下挠为 32.1 cm, 菱形挂篮施工累计下挠为 28 cm, 需重新计算主梁施工立模标高等参数, 以便施工中准确立模。

广东省佛山市顺德区某特大桥挂篮施工方案经过方案比选及优化, 已成功变更并顺利开工。MET

参考文献:

[1] 林元培. 斜拉桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 223-234.  
[2] 颜东煌, 刘光栋. 确定斜拉桥合理施工状态的正装迭代法[J]. 中国公路学报, 1999(2): 59-64.  
[3] 程雷. 斜拉桥前支点挂篮变形分析与刚度修正[J]. 公路, 2013(2): 70-74.  
[4] 罗霆. PC 斜拉桥施工过程中挂篮状态调整与施工控制[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.  
[5] 田建港. 不同挂篮及辅助墩对混凝土斜拉桥的影响分析[D]. 西安: 长安大学, 2015.

收稿日期: 2016-10-23  
基金项目: 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助 (310821161012)  
作者简介: 王帅, 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为桥梁工程。