文章编号:1005-0523(2022)06-0018-08

前支后锚式预制拼装盖梁施工力学特征分析

林 冬

(中铁四局集团第一工程有限公司,安徽 合肥 230011)

摘要:预制拼装施工技术因其绿色环保、施工便捷、质量可控等优势,在桥梁建设中的应用越来越广。以329国道智慧快速路项目为工程背景,在原有的预制拼装盖梁后锚式施工方法的基础上,提出了前支后锚式施工新方法,并通过数值分析对比研究了二者施工全过程结构内力的情况。研究表明:前支后锚式施工中,在吊装盖梁与前支撑工况下,盖梁内力分布类似于简支梁,而在撤除吊机工况下,内力分布类似于悬臂梁;前支后锚式施工方法由于前支撑与后锚固的协同作用,其施工全过程盖梁的结构内力值均明显小于后锚式施工,尤其当撤除吊机时,盖梁最大弯矩值降低了73%,说明前支后锚式施工具有更大的安全性;施工全过程的盖梁最大拉应力仅为1.2 MPa,小于混凝土的轴心抗拉强度设计值1.83 MPa,说明盖梁在安装过程中始终是安全可靠的。前支后锚式施工的提出对拼接式桥梁下部结构施工技术的创新与发展具有重要的指导意义。

关键词:预制拼装;盖梁;前支后锚式施工;内力特征;数值分析

中图分类号:TU398.9;[U24] **文献标志码**:A

本文引用格式:林冬. 前支后锚式预制拼装盖梁施工力学特征分析[J]. 华东交通大学学报,2022,39(6):18-25.

Analysis of Mechanical Characteristics of Prefabricated and Assembled Cap Beam with Front Support and Rear Anchorage

Lin Dong

(First Engineering Co., Ltd. of CTCE Group, Hefei 230011, China)

Abstract: Prefabrication and assembly construction technology is more and more widely used in bridge construction because of its advantages of environmental protection, convenient construction and controllable quality. Based on the project of national highway 329 smart expressway, this paper puts forward a new construction method of front supporting and rear anchoring based on the original prefabricated and assembled bent cap construction method, and studies the internal force of the whole construction process of the two methods through numerical analysis and comparison. The research shows that: in the construction of front support and rear anchor, the internal force distribution of the capping beam is similar to that of a simply supported beam under the conditions of lifting the capping beam and front support, while the internal force distribution is similar to that of a cantilever beam under the conditions of removing the crane; the structural internal force of the capping beam during the whole construction process of the front supported and rear anchored construction method is significantly less than the rear anchored construction method due to the synergistic effect of the front supported and the rear anchored. Especially when the crane is removed, the maximum bending moment of the capping beam is reduced by 73%, indicating that the front supported and rear anchored construction method have greater safety; the maximum tensile stress of the bent cap in the whole construction process is only 1.2 MPa, which is less than the design value of the axial tensile strength of the concrete of 1.83 MPa, indicating that the bent cap is always

收稿日期:2022-08-05

基金项目:国家自然科学基金项目(41972291,51564010)

safe and reliable in the installation process. The proposal of front supported and rear anchored construction has important guiding significance for the innovation and development of construction technology of spliced bridge substructure.

Key words: prefabrication and assembly; bent cap; front support and rear anchor construction; internal force characteristics; numerical analysis

Citation format:LIN D. Analysis of mechanical characteristics of prefabricated and assembled cap beam with front support and rear anchorage[J]. Journal of East China Jiaotong University,2022,39(6):18-25.

随着我国基础(桥梁)建设体量的不断增大,传统的支架现浇施工由于其施工周期长、交通干扰严重、模板支架和机械设备投入大、施工效率低、施工精度控制差、对环境破坏严重等问题,逐步被一种新型施工技术——预制拼装技术所替代[1]。节段预制拼装技术实现了桥梁构件的标准化、工厂化,更加的节省施工时间与施工场地,并大幅提高了施工的精度保证。

为了适应经济快速发展,桥梁做的越来越宽,这也使得桥梁下部结构也做的越来越大,针对大悬臂盖梁的节段预制拼装施工技术也越来越多的应用于工程实践。相关学者做了大量相应的研究:杜引光等[2],夏云龙等[3]根据工程项目的实际情况,开展了预制拼装式盖梁的设计关键技术的研究,为相似工程积累了经验[4]。薛冬永等[5],何志春[6]针对预制拼装盖梁的施工技术及施工工艺进行了研究,研究表明盖梁施工过程中做好监工量测,可达到盖梁的设计要求,具有良好的安全性和耐久性[7-8]。朱君卿[9],周强等[10]通过数值模拟及试验的方式开展了节段预制拼装盖梁抗剪性能的研究,研究表明在合理设计剪力键的位置及数量的前提下,可有效满足结构受力的要求[11]。孙明松等[12],李立峰等[13-15]针对普通混凝土盖梁易开裂等问题,开展了 UHPC 预制拼装盖梁的力学性能的研究,研究表明 UHPC 预制拼装盖梁具有优异的结构抗剪性能,设计中可以考虑取消弯起钢筋的设计并提高预应力筋的含量[16]。葛继平等[17]归纳总结了 9 类预制拼装盖梁施工方法,并参考美国 NCHRP 报告标准,从时效性、功能性、操作性 3 方面对预制拼装盖梁施工方案进行评价分析,结果表明我国的盖梁快速施工技术还未能达到最高的 9 级水准,故急需根据工程需要,开展新型盖梁拼装施工技术研究。

基于盖梁节段施工过程中处于一种不平衡的机动体系,故盖梁的常规施工方法[18]是通过搭设落地支架来进行结构受力平衡的。但该方法中采用的落地支架仍然会占用道路,之后又提出了一种盖梁节段预制拼装的无支架反拉平衡施工法[19],然而该方法也存在盖梁安装精度调整范围小等缺点。基于此,本文以 329 国道智慧快速路项目为工程背景,开展了预制节段拼装盖梁新型施工方法的研究,创新推出了盖梁前支后锚式安装技术,通过前支点的千斤顶等支撑措施,可精确调整盖梁线形,提高安装精度。另外对比分析了无支架反拉平衡法与前支后锚式安装施工过程中的盖梁内力变化与分布特征,发现新方法施工时盖梁内力峰值显著降低、内力分布愈加合理,故前支后锚式施工方法的提出对拼接式盖梁的施工具有指导意义。

1　工程概况

本文依托的工程项目为绍兴市 329 国道(湖安路至越兴路)智慧快速路改造工程。主线为双向 6-8 车道“地面+高架+局部地道”相结合的城市快速路,辅道为双向 4-6 车道地面道路形式的城市主干路。主线高架 27 m 标准桥宽小箱梁下部结构采用大挑臂盖梁双柱桥墩形式,即直立双柱+大挑臂盖梁结构。盖梁中心高度为 2.7 m,挑臂端高度渐变为约 1.45 m,纵桥向顶面宽 2.26~2.36 m,底面宽 0~2.1 m,盖梁悬臂长约 9.9 m,全长 26.6 m,采用预制预应力混凝土结构。桥墩采用双立柱,中心间距 4.8 m,立柱尺寸为 2.0 m×2.0 m,角点处采用 0.2 m×0.2 m 的斜倒角;连续钢箱梁主墩柱尺寸为 2.5 m×2.5 m。立柱采用预制拼装工艺,立柱与盖梁及承台采用套筒连接。目前国内大多数预制盖梁的安装主要采用落地支架法,其与传统现浇盖梁施工方法类似,通过搭设满堂支架,来支撑盖梁,传力模式清晰,但会大大占用下部通行空间,与本工程的实际情况相冲

突,故需研发一套基于预制拼装盖梁的新工艺。

1.1 拼接式盖梁后锚式施工工艺

后锚式安装技术也称反拉法拼装技术,是在盖梁尾部设置预留孔,承台对应位置预埋精轧螺纹钢,使用千斤顶反压的原理,使单片盖梁以立柱为支点,形成平衡固定体系。待湿接缝施工完成且盖梁张拉压浆完成后,再拆除精轧螺纹钢锚固体系,实现拼接式盖梁的免落地安装。其安装示意图如图1所示,图中Ⅰ40表示双拼40工字钢。

其优点是预埋的精轧螺纹钢利用了承台来锚固,锚固体系在两根立柱之间,不占用两侧地面空间,适用于水中墩或者高墩等各种环境的安装,且不需要配置支架。另外,精轧螺纹钢可重复使用,极大减小了施工临时设施配置的费用。

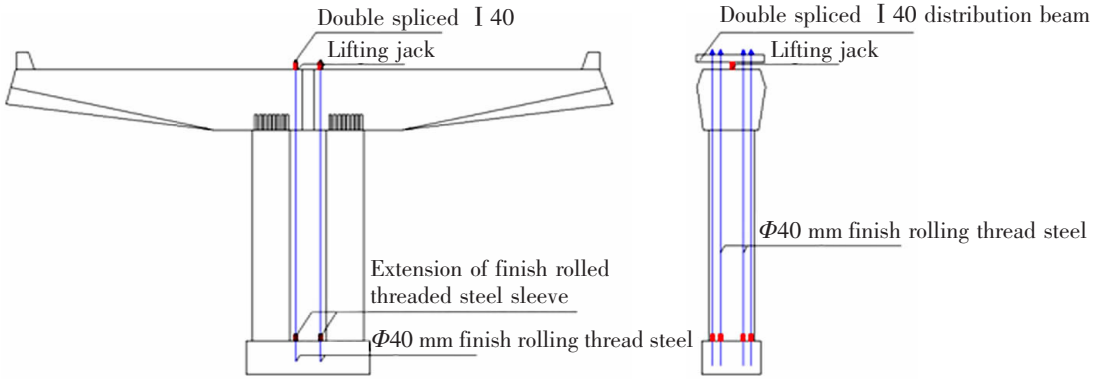


图1 拼接式盖梁后锚式安装图

Fig.1 Installation drawing of splicing bent cap with rear anchor

1.2 拼接式盖梁前支后锚式施工工艺

在盖梁施工过程中,后锚式安装技术也存在以下缺点:盖梁安装精度调整范围小,单片盖梁吊装上立柱后,只能进行后锚的反拉,高程及倾斜度无法进行微调,对盖梁吊装姿态的控制要求更高,一旦吊装姿态没有控制好,容易造成两片盖梁湿接缝部位主筋套筒连接无法逐个对位,增大了主筋连接质量不合格的风险。

故针对“拼接式盖梁后锚式安装技术”无法准确进行盖梁的高程、倾斜度控制的缺点,进而开发了前支后锚式安装技术。即在盖梁后锚的基础上增加了前支点,为盖梁线型调整提供了支撑。此安装技术是在立柱侧面预埋钢棒,利用两侧悬挑双拼贝雷架端部的千斤顶承担盖梁一部分的重量;在盖梁尾部设置预留孔,承台对应位置预埋精轧螺纹钢,使用千斤顶反压的原理,承担盖梁另一部分重量,最终完成盖梁的平衡固定,其安装示意图如图2所示。

由于此安装技术在盖梁前端设置有前支点,可利用前支点的千斤顶等支撑措施,预先按高程设置,保证盖梁就位后,线形能够按照预设标高满足设计要求。在承接“后锚式安装技术”免落地支架的相关优点的前提下,进一步提高了安装精度。

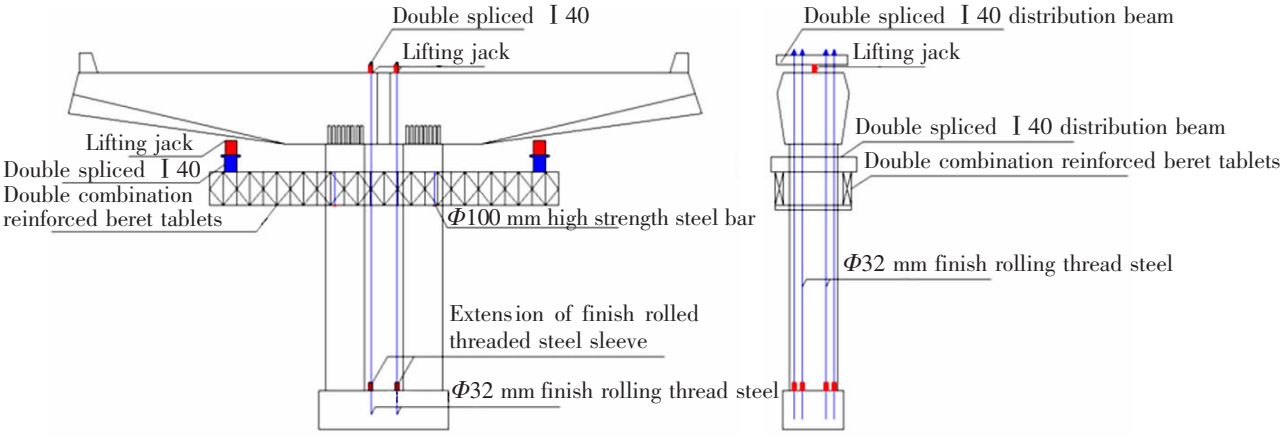


图2 拼接式盖梁前支后锚式安装图

Fig.2 Installation drawing of splicing bent cap with front support and rear anchor

2　不同施工方式下盖梁的结构内力特征计算分析

2.1　数值计算模型的建立

盖梁前支后锚施工显著提升了精度,但还需验证其施工过程中构件内力变化,以防前支撑力过大导致的构件开裂等问题。故为研究安装过程中盖梁内力的变化,采用 Midas Civil 建模,盖梁立柱模型如图 3 所示。

构件特性值如下:盖梁与立柱采用 C50 混凝土,其弹性模量取 $3.45\times e^7$ kN/m^2,泊松比取 0.2;吊索采用公称抗拉强度值大于等于 1 860 MPa 的钢丝绳,其弹性模量取 $1.95\times e^8$ kN/m^2,泊松比取 0.3。立柱截面为 2 m×2 m 的实腹矩形截面,吊索截面为 0.065 m 的实腹圆形截面,盖梁由于两边的大悬臂,构件中存在变截面段,可分为盖梁端–中段、盖梁标准段、盖梁中–端段,其中端部截面为高 1.5 m,宽 2.6 m 的实腹矩形截面,中部截面为高 2.7 m,宽 2.6 m 的实腹矩形截面。

构件单元与边界条件如下:盖梁与立柱采用梁单元,吊装用钢丝绳采用只受拉的索单元;在立柱底部即节点 21,31 处,建立固定端约束,在索单元交点处即节点 19,30 处,只约束两节点的平动自由度 D_x,D_y,D_z,释放转动自由度 R_x,R_y,R_z,以此模拟吊装盖梁时的情况。

结构荷载如下:由于 Midas Civil 中材料特性值 C50 混凝土的容重为 25 kN/m^3,而实际容重为 26 kN/m^3,故将自重系数改为 1.04,使模型中混凝土容重与实际相符;在安装盖梁的施工阶段分析中,前支撑与后锚固处的千斤顶均采用节点荷载模拟,以贴合实际施工过程。

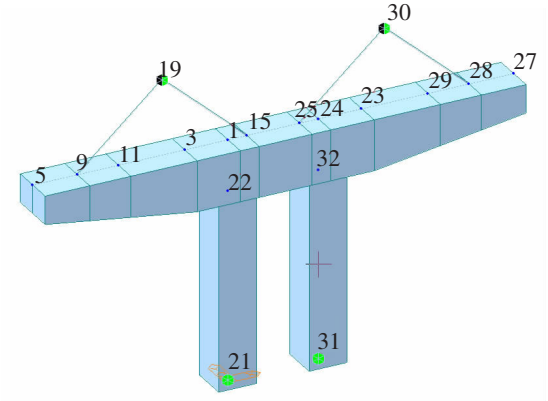


图 3　盖梁立柱模型

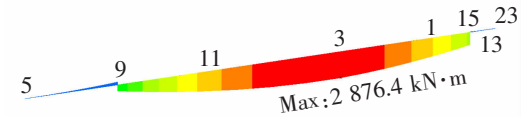
Fig.3　Capping beam and column model

2.2　后锚式拼接盖梁施工过程应力变化特征分析

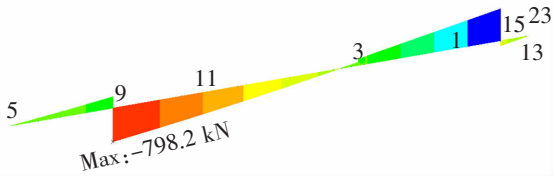
以一片盖梁的安装过程为例,按以下 4 个工况进行模拟,观察盖梁内力变化,以下内力图示中,节点 5 为自由端,节点 9 和 15 为吊点位置,节点 3 为盖梁变截面起始端,节点 1 为立柱支撑处,节点 13 为后锚固处,节点 23 为湿接缝端。

1) 工况 1　安装立柱。在立柱底部施加固端约束,模拟立柱与承台的连接,立柱只受重力作用。

2) 工况 2　吊装盖梁。此时盖梁与立柱未连接,盖梁仅受吊机荷载,其强轴弯矩 M_y 与剪力 F_z 的分布如图 4。吊装时,在自重和吊力的作用下,盖梁的弯矩分布近似于简支梁,在跨中处有最大正弯矩;同理,盖梁的剪力分布也类似于简支梁,在两端吊点处,剪力值最大。



(a) Bending moment M_y distribution diagram under combination condition 2



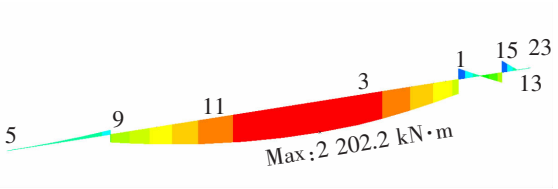
(b) Shear force F_z distribution diagram under combination condition 2

图 4　后锚式安装工况 2 盖梁内力分布图

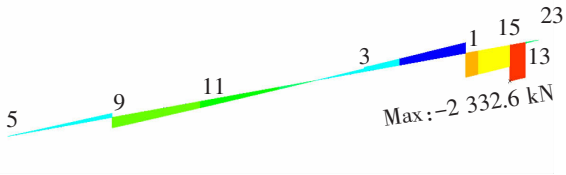
Fig.4　Internal force distribution diagram of cap beam under rear anchor installation condition 2

3) 工况 3　后锚固。在盖梁后锚固点处后锚两根精轧螺纹钢,并张拉至 2 214 kN,其强轴弯矩 M_y 与剪力 F_z 的分布如图 5。在此工况下,盖梁受到吊力、后锚固反压力及自重,其弯矩分布类似于工况 2,同样在跨中处弯矩值最大,但由于吊点外侧的后锚固反压力的存在,相当于是对盖梁有降载的作用,所以工况 3 的最大弯矩值为 2 202.2 kN·m,小于工况 2 的 2 876.4 kN·m。而由于后锚固力的存在,盖梁剪力在后锚固处即节点 13 附近取最大值。

4) 工况 4　撤除吊机。将吊索撤除,同时维持后锚固点处精轧螺纹钢张拉力不变,其强轴弯矩 M_y



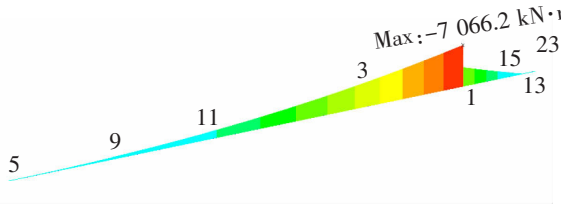
(a) Bending moment M_y distribution diagram under combination condition 3



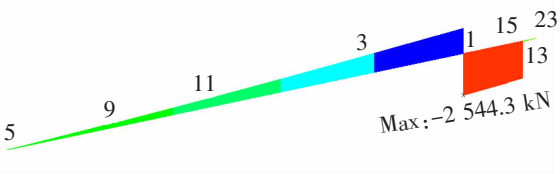
(b) Shear force F_z distribution diagram under combination condition 3

图5 后锚式安装工况3盖梁内力分布图

Fig.5 Internal force distribution diagram of cap beam under rear anchor installation condition 3



(a) Bending moment M_y distribution diagram under combination condition 4



(b) Shear force F_z distribution diagram under combination condition 4

图6 后锚式安装工况4盖梁内力分布图

Fig.6 Internal force distribution diagram of cap beam under rear anchor installation condition 4

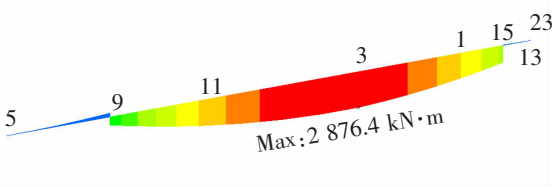
与剪力 F_z 的分布如图6。在此工况下，盖梁只受自重与后锚固反压力的作用，由于盖梁与立柱刚性连接上，故盖梁弯矩分布类似与悬臂梁，在刚性连接处即节点1弯矩值有最大；同理，盖梁剪力值也在节点处取最大。

2.3 拼接式盖梁前支后锚式安装技术

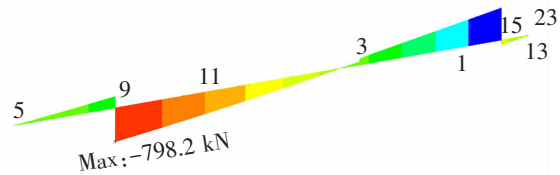
以一片盖梁的安装过程为例，按以下5个工况进行模拟，观察盖梁内力变化，以下内力图示中，节点5为自由端，节点9和15为吊点位置，节点11为前支撑处，节点3为盖梁变截面起始端，节点1为立柱支撑处，节点13为后锚固处，节点23为湿接缝端。

1）工况1 安装立柱。在立柱底部施加固端约束，模拟立柱与承台的连接，此时立柱只受重力作用。

2）工况2 吊装盖梁。此时盖梁与立柱未连接，盖梁仅受吊机荷载，支架体系微受力，其强轴弯矩 M_y 与剪力 F_z 的分布如图7。



(a) Bending moment M_y distribution diagram under combination condition 2



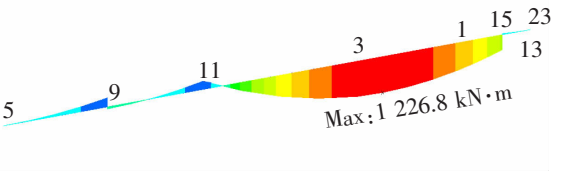
(b) Shear force F_z distribution diagram under combination condition 2

图7 前支后锚式安装工况2盖梁内力分布图

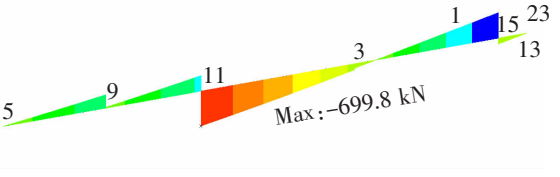
Fig.7 Internal force distribution diagram of cap beam under front support and rear anchor installation condition 2

对比图4与图7，由于本工况盖梁仅受吊机荷载，故盖梁内力分布情况相同。最大正弯矩位于节点3即盖梁跨中截面附近，最大剪力位于节点9和15两个吊点位置。

3）工况3 前支撑。逐步调整吊机索力，同时贝雷架上前支撑点处千斤顶顶升，顶升荷载为1 015 kN，其强轴弯矩 M_y 与剪力 F_z 的分布如图8。



(a) Bending moment M_y distribution diagram under combination condition 3



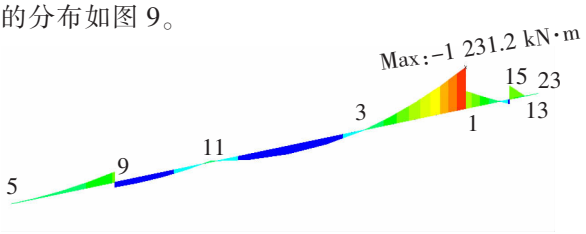
(b) Shear force F_z distribution diagram under combination condition 3

图8 前支后锚式安装工况3盖梁内力分布图

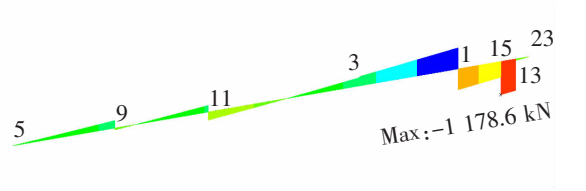
Fig.8 Internal force distribution diagram of cap beam under front support and rear anchor installation condition 3

本工况下，由于前支撑千斤顶的顶升荷载,相当于对盖梁有卸载作用，虽然盖梁最大正弯矩依然位于节点 3 附近，但最大弯矩值由工况 2 中的 2 876.4 kN·m 下降至 1 226.8 kN·m;而最大剪力位置也由工况 2 的节点 9 变为节点 11,最大剪力值由工况 2 中的 798.2 kN 下降至 699.8 kN。

4）工况 4　后锚固。将前支撑点处的顶升荷载调整为 525 kN,同时盖梁后锚固点处后锚两根精轧螺纹钢,并张拉至 1 060 kN,其强轴弯矩 M_y 与剪力 F_z 的分布如图 9。



(a) Bending moment M_y distribution diagram under combination condition 4



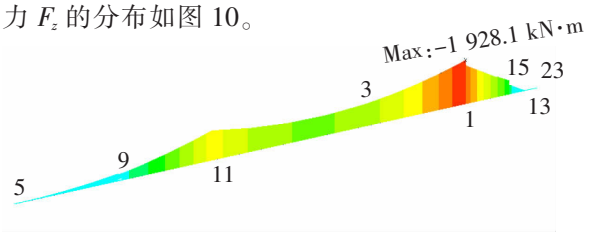
(b) Shear force F_z distribution diagram under combination condition 4

图 9　前支后锚式安装工况 4 盖梁内力分布图

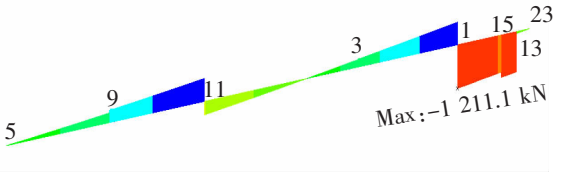
Fig.9　Internal force distribution diagram of cap beam under front support and rear anchor installation condition 4

对比图 5 与图 9，后锚式安装中最大弯矩依然位于盖梁跨中处,但由于后锚固力的施加,使得其相较于吊装时的弯矩降低了 674.2 kN·m。而前支后锚式安装中最大弯矩位于节点 1 即立柱顶部位置处,但最大弯矩值只有 1 231.2 kN·m,远低于后锚式安装工艺中的 2 202.2 kN·m,最大剪力值只有 1 178.6 kN,同样远低于后锚式安装工艺中的 2 332.6 kN。这说明由于前支撑力的存在,大大降低了盖梁弯矩,使得其内力分布更加合理。

5）工况 5　撤除吊机。将吊索撤除,前支撑点处顶升荷载重新调整至 1 015 kN,后锚固点处精轧螺纹钢的张拉力维持 1 060 kN，其强轴弯矩 M_y 与剪力 F_z 的分布如图 10。



(a) Bending moment M_y distribution diagram under combination condition 5



(b) Shear force F_z distribution diagram under combination condition 5

图 10　前支后锚式安装工况 5 盖梁内力分布图

Fig.10　Internal force distribution diagram of cap beam under front support and rear anchor installation condition 5

对比图 6 与图 10,当吊机撤除之后,两种安装方式的弯矩分布情况类似,均在节点 1 即立柱顶部具有最大弯矩值，但前支后锚式的最大弯矩值为 1 928.1 kN·m,远小于后锚式的 7 066.2 kN·m,说明前支撑与后锚固的协同作用对盖梁内力有显著地卸载作用。

2.4　盖梁内力特征对比分析

通过对预制拼装盖梁两种不同施工方法进行模拟后得出内力结果的最大值进行了对比,结果如表 1 所示。

表1　施工全过程中盖梁在两种施工方法下内力最大值

Tab.1　The maximum internal force of bent cap under two construction methods during the whole construction process

Working condition	Rear anchor type		Front supported and rear anchored		Relative difference/%	
	Bending moment/(kN·m)	Shear force/kN	Bending moment/(kN·m)	Shear force/kN	Bending moment	Shear force
Install the column	\	\	\	\	\	\
Hoisting bent cap	2 876.4	798.2	2 876.4	798.2	0	0
Front suppont	\	\	1 226.8	699.8	\	\
Rear anchorage	2 202.2	2 332.6	1 231.2	1 178.6	44	49
Remove the crane	7 066.2	1 530	1 928.1	1 211	73	21

由表1的数据可知,前支后锚式施工全过程盖梁的结构内力值均明显小于后锚式施工过程,后锚固工况下,采用前支后锚式施工的盖梁相较于后锚式施工,其最大弯矩值降低了44%,最大剪力值降低了49%;撤除吊机工况下,盖梁最大弯矩值降低了73%,最大剪力值降低了21%,说明前支后锚式施工在前支撑和后锚固的双重作用下,盖梁内力峰值更小、内力分布更加合理,也具有更大的安全性。

此外,通过对施工全过程的数值分析可知,预制拼装盖梁在吊装盖梁及撤除吊机施工阶段,盖梁的内力相对较大,为了保证施工的安全性,需要做好相应的现场监测。

3 结论

1)前支后锚式施工全过程中,在吊装盖梁与前支撑工况下,盖梁内力分布类似于简支梁,而在撤除吊机工况下,盖梁内力分布类似于悬臂梁。

2)前支后锚式法施工全过程盖梁的结构内力值均明显小于后锚式施工过程,尤其是当吊机撤去时,最大弯矩值降低了73%,说明前支后锚式施工与后锚式施工方法相比,具有更大的安全性。

3)前支后锚式施工中,盖梁最大拉应力仅为1.2 MPa,小于混凝土的轴心抗拉强度设计值1.83 MPa,构件的强度与刚度储备均有较大富余。

参考文献:

[1] 张立青. 节段预制拼装法建造桥梁技术综述[J]. 铁道标准设计,2014,58(12):63-66.
ZHANG L Q. The Summary of technologies for building bridges with assembled precast segments[J]. Railway Standard Design,2014,58(12):63-66.

[2] 杜引光,凌之涵,程坤,等. 常规桥梁立柱盖梁节点区钢筋配置优化研究[J]. 公路,2022,67(7):216-220.
DU Y G,LING Z H,CHENG K,et al. Research on optimization of reinforcement configuration in the joint area of cap beam of conventional bridge column[J]. Highway,2022,67(7):216-220.

[3] 夏云龙,于雪晖,陈国兴. 超大型预制装配式盖梁设计关键技术[J]. 公路,2022,67(1):156-159.
XIA Y L,YU X H,CHEN G X. Key technology of super large prefabricated bent cap design[J]. Highway,2022,67(1):156-159.

[4] KHALEGHI B,SCHULTZ E,SEGUIRANT S,et al. Accelerated bridge construction in Washington State from research to practice[J]. PCI Journal,2012,57(4):34-49.

[5] 薛冬永, 周浩, 强石家. 盖梁节段拼装施工关键技术[J]. 施工技术,2019,48(11):32-36.
XUE D Y,ZHOU H,QIANG S J. Key construction technology of coping segmental assembly[J]. Construction Technology,2019,48(11):32-36.

[6] 何志春. 深中通道陆域桥梁大型盖梁快速化施工技术[J]. 世界桥梁,2020,48(4):25-29.
HE Z C. Rapid construction technology for large cap beam of land bridge in Shenzhen middle channel[J]. World Bridges,2020,48(4):25-29.

[7] 吴奇峰,赵桉. 预制装配墩柱的连接构造与施工工艺[J]. 公路,2018,63(5):165-168.
WU Q F,ZHAO A. Connection structure and construction technology of prefabricated pier column[J]. Highway,2018,63(5):165-168.

[8] 李松林,巩智利,黄康. 全幅整体式大悬臂花瓶墩高质量快速化施工技术探讨[J]. 公路,2021,66(10):142-149.
LI S L,GONG Z L,HUANG K. Discussion on high quality and rapid construction technology of full width integral large cantilever vase pier[J]. Highway,2021,66(10):142-149.

[9] 朱君卿. 轨道交通桥梁预制盖梁结构力学行为研究[J]. 铁道标准设计,2015,59(7):100-104.
ZHU J Q. Research on structural mechanics behavior of prefabricated cap beam of rail transit bridge[J]. Railway Standard Design,2015,59(7):100-104.

[10] 周强,李永君,刘思维,等. 新型预制拼装组合结构盖梁抗剪机理[J]. 建筑钢结构进展,2022,24(4):7-14.
ZHOU Q,LI Y J,LIU S W,et al. Shear mechanism of a novel precast composite pier cap[J]. Progress in Steel Building Structures,2022,24(4):7-14.

[11] 展丙来,郗磊,姚晓飞,等. 节段拼装大悬臂PC盖梁弯剪性能试验研究[J]. 公路,2021,66(12):207-211.
ZHAN B L,XI L,YAO X F,et al. Experimental study on flexural shear performance of segmental assembled large cantilever PC bent cap[J]. Highway,2021,66(12):207-211.

[12] 孙明松,李嘉维,夏坚,等. 半预制UHPC外壳叠合盖梁试设计研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(4):105-110.
SUN M S,LI J W,XIA J,et al. Trial-design of semi-prefabricated UHPC shell composite cap beam[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2020,18(4):105-110.

[13] 李立峰,叶萌,胡方健,等. 预制大悬臂预应力 UHPC 薄壁盖梁抗弯性能的试验研究[J]. 土木工程学报,2020,53(2):92-104.
LI L F,YE M,HU F J,et al. Experimental study on the flexural behavior of a prefabricated large-cantilevered prestressed UHPC thin-walled bent cap[J]. China Civil Engineering Journal,2020,53(2):92-104.

[14] 李立峰,唐金良,胡方健,等. 全预制轻型预应力 UHPC 薄壁盖梁抗剪性能试验[J]. 中国公路学报,2020,33(8):144-158.
LI L F,TANG J L,HU F J,et al. Experimental on shear behavior of prefabricated light weight thin-walled UHPC bent cap[J]. China Journal of Highway and Transport,2020,33(8):144-158.

[15] 李立峰,范昕,石雄伟,等. 大比例预应力 UHPC-T 形梁抗弯性能试验研究[J]. 土木工程学报,2018,51(5):84-94.
LI L F,FAN X,SHI X W,et al. Experimental study on flexural behavior of large-scale prestressed UHPC-T shaped beam[J]. China Civil Engineering Journal,2018,51(5):84-94.

[16] 叶萌,姚志立. 全预制轻型 UHPC 盖梁设计方案及模型试验[J]. 公路工程,2021,46(4):84-90.
YE M,YAO Z L. Experimental study on shear behavior of prestressed UHPC-T beam[J]. Highway Engineering,2021,46(4):84-90.

[17] 葛继平,梅德磊,闫兴非,等. 预制拼装盖梁施工方式对比分析[J]. 应用技术学报,2018,18(1):56-62.
GE J P,MEI D L,YAN X F,et al. Comparison and analysis of construction method of precast pier cap[J]. Journal of Technology,2018,18(1):56-62.

[18] 吴梦. 山岭地区跨路门架墩盖梁施工承重体系设计[J]. 公路,2020,65(12):118-122.
WU M. Design of bearing system for pier cap beam construction of cross road portal frame in mountain area[J]. Highway,2020,65(12):118-122.

[19] 王兵,万星,沈殷. 基于可靠度理论的盖梁无支架反拉法设计[J]. 建筑结构,2021,51(S1):394-399.
WANG B,WAN X,SHEN Y. Design of back-tensioning method without bracket for cap beam based on reliability theory[J]. Building Structure,2021,51(S1):394-399.



第一作者:林冬(1975—),男,高级工程师,研究方向为土木工程,桥梁工程。

(责任编辑:吴海燕　刘棉玲)