

预应力混凝土连续梁桥悬浇施工控制分析

文 / 胡云星 深圳市西伦土木结构有限公司

摘要：预应力混凝土连续梁桥凭借其跨越能力强、结构受力合理等优势，在交通工程建设中应用广泛。悬浇施工作为大跨径预应力混凝土连续梁桥的主要施工方法，其施工控制直接影响桥梁的施工质量与结构安全。本文围绕预应力混凝土连续梁桥悬浇施工控制展开分析，阐述了悬浇施工的特点及施工控制的重要意义，探讨了施工控制的关键技术，包括合龙顺序与体系转换控制、劲性骨架设置与锁定、合龙口混凝土浇筑控制等，并结合实际施工情况提出了相应的控制措施，旨在为同类桥梁工程的施工控制提供参考。

关键词：预应力混凝土；连续梁桥；悬浇施工；施工控制；合龙顺序

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.21.057

引言

随着我国公路与铁路运输需求的增长以及城市道路改造升级的步伐加快，各类大跨度桥梁（特别是上部构造）的需求越来越多。而目前国内外普遍采用的大跨径预应力混凝土连续梁桥具有很好的承载能力及经济效益等特点，广泛应用于各种特殊场合。悬臂浇筑法是目前国内外用于建造大跨度预应力混凝土连续梁桥的主要施工技术之一，主要适合于50~120米的大中型跨径预应力混凝土连续梁桥。这种施工方法不需要设置临时支护和架设大型梁架，仅需根据桥位地形条件布置几个或十几座托架式工作平台（即挂篮），以达到一端锚固另一端自由的方式将梁体逐段向前推进并逐渐合拢成整体的过程；但是由于悬浇施工工序比较繁杂，而且受到许多客观因素的影响，如材料性能、环境温度、施工工艺等，若控制不当，易导致桥梁结构变形、内力分配不均，甚至出现裂缝等质量问题，影响桥梁的安全性和耐久性。因此，对预应力混凝土连续梁桥悬浇施工进行有效控制，确保施工过程符合设计要求，是桥梁建设中的重要环节。

一、悬浇施工特点及施工控制意义

（一）悬浇施工特点

悬浇法是一种适合于大跨度预应力混凝土连续梁桥常用的施工技术，其主要特点是：（1）无须设置临时支墩，可以有效地克服一些无法架设临时支撑而只能采用悬灌法施工的问题（如洪水期需要排洪；航运繁忙时需满足航道宽度及净空的要求；交通要道上需保持车辆通行）；（2）由于整个悬臂施工过程是一个连续的过程，在每一节段浇注完之后就立即张拉预应力束，并且在其后的一段时间里还要不断地增加新的悬臂点，所以对于大型的箱形截面来说，一般情况下每一段的长都比较短，大约只有2~3米；（3）随着施工阶段的变化，结构物自身的空间位置也发生了改变：由开始的悬臂状态逐渐地变为一个连续梁的状态，因此，在施工的过程中也要经常发生结构体系的转换工作；（4）施工受到外界气候条件的影响比较大，例如气温

的变化以及风速大小等因素都会直接影响到梁部的变形和内部产生的各种内力^[1]。

（二）施工控制意义

施工控制是预应力混凝土连续梁桥悬臂法施工中最重要的一环之一，只有做好施工控制工作才能达到如下目的：（1）满足桥梁结构几何线形的要求；减少由于悬臂施工引起的结构非弹性变形过大而影响桥梁正常使用的可能性；（2）使结构内的受力状况控制在设计许可范围之内；防止由于荷载作用下内力分布不合理而导致裂缝甚至断裂等危险情况的发生（3）利用对整个施工过程中各工序进行监测、分析与调节来改善各项施工工艺及施工参数，从而加快施工进度并节约工程投资。（4）为以后对已建桥梁的养护维修以及改建扩建等工作提供可靠的依据，确保桥梁在运营期间的安全性和耐久性。

二、悬浇施工控制关键技术

（一）合龙顺序与体系转换控制

合龙顺序及体系转换的时间安排也是悬臂法施工时必须严格控制的内容之一，它将直接影响到整个桥的受力状况^[2]。合理确定合龙顺序应尽量减小或消除对桥梁结构的影响，一般原则为先边跨合拢再中跨合拢，因此应在桥梁工程施工之前充分考虑到施工可能引起的一切不利因素包括温降徐变、支架卸架、挂篮移动以及施工活荷载等，从而确定合适的合龙顺序及体系转换时间，并且不得随意改变以不影响桥梁的预拱度设置和施工控制成果。

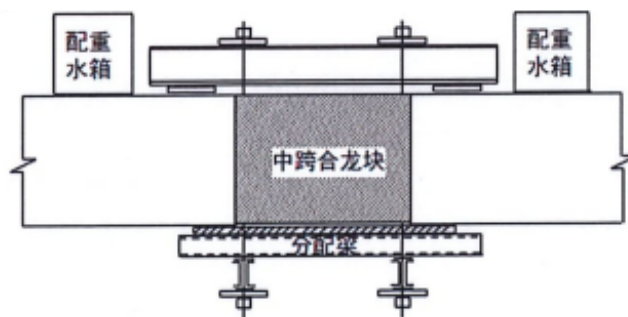


图1 合龙体系

（二）劲性骨架设置与锁定

为了防止由于上述原因造成新浇筑合龙段砼不能正常凝结硬化，或已硬化的合龙段砼产生不均匀变形而导致结构物破坏的现象发生，必须采取有效措施来控制这一过程的发生和发展，并且这种措施就是安装一套符合要求的劲性骨架。因为通过安装该套劲性骨架可将由温度差引起的各种外荷载所产生的弯矩、剪力及轴向压力等作用传至支撑体系上（即悬臂拼装架桥机）中去，从而消除这些不利的因素对仍然处在凝固过程中尚未完全形成的设计强度的新浇筑合龙段砼的影响；另外也使得已经形成的合龙口处的两部分梁体之间不再存在相互制约的关系，以利于它们各自按照自身的特性自由发展。合龙口的锁定应迅速对称地进行，在合龙口锁定后，立即释放一侧的箱梁固定约束，使梁一端在合龙口锁定的连接下能自由伸缩^[3]。这样可以减少因约束限制而产生的附加应力，确保合龙段混凝土在适宜的应力状态下凝固。劲性骨架的材料选择和截面设计应根据合龙段的受力情况确定，确保其具有足够的强度和刚度。

（三）合龙口混凝土浇筑控制

1. 施工前方案确定

桥面系工程施工之前，要充分考虑整个结构物施工期间可能存在的所有不利因素，并预先安排好合龙顺序与体系转出的时间；不能因为合龙施工而随意改变原定的施工计划，在合龙前就改变了原来的方案而导致合龙时无法进行精确地线形控制以及难以准确把握合龙口预留的变形量来调整箱梁顶板预设的预拱度值等问题的发生。因此需要各施工单位针对具体工程项目在开工以前由专业的技术人员认真考察本项目所处区域内的自然环境状况如地形地貌特征、地质构造情况、土质分布特性、地下水位高低、河流水情、气候条件等，再综合考虑本项目的相关资料包括桥梁设计图纸及其说明文件、以往类似结构物的施工经验和相关的规范规程的要求之后提出切实可行的合龙施工方案并在经过严格审查批准后再组织实施。

2. 劲性骨架设置

合龙前需安装好临时支撑系统（即劲性骨架），使之在整个合龙期间均能满足传递由外界作用于桥墩上的所有外荷载以及由于收缩徐变等原因引起的各种内外力的要求，并且不致破坏已浇筑完毕但尚未达到规定龄期及设计强度的合龙段砼；同时为了减少合龙时的温差效应，促使混凝土尽早升温以消除或减小温降所造成的拉应力，则必须保证在混凝土早期固化阶段始终是处在升温 and 受到压缩的状态中^[4]。劲性骨架的设计与布置，应按合龙段的实际受力情况做详细分析并经计算确定其合

理尺寸，使其有足够的强度和刚度来承受上述各项外力的作用而不产生任何有害变形。

3. 劲性骨架锁定

劲性骨架锁定必须及时且可靠，合龙口锁紧应在合龙口内侧同步进行，当合龙口锁紧完成后应及时解除另一侧箱梁的固定约束，使该侧梁的一端在已锁定合龙口处可实现自由伸缩；避免因温降及徐变等原因引起额外的拉力作用于合龙段混凝土上导致其出现有害裂缝。

4. 混凝土浇筑

合龙口混凝土应在一天中的低气温时段进行，并尽可能保证混凝土浇筑后能够逐渐升温至初凝前（即处于受压状态），这有利于防止由于过快降温引起的冷缩效应以及初期脱模等造成的细微裂缝或断裂的发生，所使用的混凝土标号要比同跨桥面铺装设计高一级别，混凝土使用微膨胀早强型材料。混凝土浇筑过程需严格把握好浇筑速率与振捣质量，混凝土浇筑完毕之后做好混凝土的养护措施，使其始终处于潮湿状态，防止混凝土因失水而产生裂缝。

（四）施工监测与数据反馈

施工监控是悬臂法施工过程中的重要环节之一，对全桥梁段的每一节段都设置相应的测点，随时观测梁体的实际位移及内部实际产生的内力、温度变化等情况，并将这些结果输入计算机中，作为施工过程中各项技术指标进行调整的主要依据。施工期间，在每孔箱梁上均设置了必要的测试装置以获取所需的测量信息，同时结合工程实践以及以往经验总结出一些关于测试仪器安装的具体方案。然后利用所获得的数据进行处理并绘制曲线图供施工人员参考使用，从而可以更直观地了解当前施工阶段的各项技术参数^[5]。如果实测数据与理论预测相差过大，则需要及时调整相关的设计或施工参数。例如，当梁体的位移偏差较大时，可通过调整挂篮的位置或张拉预应力筋的数量来纠正；当内力偏差较大时，需检查施工工艺是否符合要求，及时调整施工参数。通过施工监测与数据反馈的闭环控制，确保桥梁施工始终处于受控状态。

三、施工控制实例分析

某预应力混凝土连续梁桥，主跨（60+100+60）m，采用悬臂浇筑法施工，在施工过程中需要考虑施工控制的问题。由于本工程位于一通航河流上，周围环境较为恶劣且工期紧迫，因此对施工控制提出了较高的要求。针对该桥的具体情况以及实际施工条件，在正式开工之前就制定出一套合理的施工控制措施：先边跨合拢再中跨合拢；并依据实际情况对体系转换的时间作了安排与计算，设置劲性骨架，劲性骨架由型钢构成并通过理论分析验算了其承载能力能够满足要求。

在合龙口混凝土浇筑时,选择在凌晨气温最低时进行,采用C50微膨早强混凝土,其强度比标准节提高一个等级。浇筑过程中,对混凝土的坍落度、浇筑速度等进行严格控制,并做好振捣工作。同时,对梁体的位移、内力和温度进行实时监测,监测数据显示,梁体的位移和内力均在设计允许范围内。

在整个体系转换的过程中,是逐段解除对梁端支点处各墩柱施加的各种预压力及其它外荷载作用后实现转孔梁向连续箱梁受力模式的转变,并且由一系列监控数据分析结果可看出:体系转换过程比较平顺、没有发生较大的应力突变现象,最后经过一段时间(约10天)的稳定观察,实现了本工程的顺利合龙。同时根据大桥目前的几何线型与内部力学状况来看,完全满足原设计的要求。最终,该桥顺利完成施工,桥梁的几何线形和结构内力均符合设计要求,验证了施工控制方案的有效性。

四、施工中常见问题及应对措施

(一) 挂篮变形问题

挂篮在安装后,受施工荷载及自重作用会产生一定的变形而引起梁段几何形状的变化(如挠度)以及截面尺寸的变化(如竖向中轴线偏移),因此必须严格限制挂篮的整体变形,否则会影响桥梁上部构造的浇筑质量和外形尺寸^[6]。为避免挂篮整体变形过大,在挂篮拼装完毕后需对其进行加载预压试验,使挂篮承受一定数量的荷载以检测挂篮的实际承载能力及其弹性变形是否满足规范的要求;然后根据加载时测量得到的数据来校正挂篮的初始位置偏差,并采用必要的加强手段增强其刚度。另外还应对挂篮在其工作状态下的变形情况进行观测,当出现较大变形且无法消除的情况时,则需要暂停施工,查明原因后再行恢复施工。

(二) 预应力张拉问题

预应力张拉作为悬臂浇筑的关键工序之一,如果控制不严将造成预应力损失过大或者使梁体内产生较大的内力集中现象。所以在预应力张拉之前应当认真检查所使用的各种张拉设备的性能及准确程度,使其达到技术标准的规定方可使用。同时,要对预应力筋的外观质量、规格尺寸等进行检查,不合格的预应力筋不得使用。在张拉过程中,应严格按照设计要求的张拉顺序和张拉吨位进行操作,实时监测张拉应力和伸长量,确保两者符合设计规定。若发现张拉应力或伸长量异常,应立即停止张拉,查找原因并采取相应的处理措施。

(三) 混凝土裂缝问题

混凝土裂缝问题是预应力连续梁桥悬臂施工中的常见问题之一,其主要原因有:①混凝土自身原因引起的裂缝(主要是由于混凝土收缩变形、徐变变形以及内外

温差等原因所造成的);②结构物自身的内力产生的变形而导致的裂缝;③施工方面的原因造成的裂缝。其中第一类因素往往是造成桥梁开裂的主要原因之一。因此要尽量消除或减弱这类裂缝的发生和发展趋势。针对此类情况可以在混凝土配制阶段就做好相应的预防处理方案。选择合适种类及数量的水泥,并掺入一定比例的外加剂,如减水剂、膨胀剂等等来改善混凝土拌合物的工作性及其力学性质;为降低大体积混凝土的水化热,可以选择水化热低一些的硅酸盐水泥作为原材料来进行使用;利用减水剂来取代部分的粗细集料,这样就可以有效的节约大量的用水量并且提高了混凝土的密实度与强度;在混凝土里面添加膨胀剂来抵消一部分的收缩效应从而达到弥补收缩的目的,进而抑制裂缝的出现。

结语

合理的合龙顺序与体系转换控制、可靠的劲性骨架设置与锁定、科学的合龙口混凝土浇筑控制以及有效的施工监测与数据反馈,是确保施工质量和结构安全的关键。在今后的实际工程中,应针对具体的桥梁结构形式以及不同的施工条件来确定相应的施工控制方案并严格按此执行,同时通过不断的实践积累经验以不断提高自身的施工控制技术水平。随着我国桥梁工程建设规模不断扩大及建造工艺和技术手段的进步,对于大跨径悬臂拼装或悬臂浇筑式预应力混凝土连续梁桥施工控制提出了更高的要求与标准。未来,应进一步加强对施工过程中各种因素的研究,引入先进的监测技术和控制方法,如BIM技术、智能化监测系统等,实现施工控制的精细化和智能化,为预应力混凝土连续梁桥的建设提供更加可靠的技术保障。

参考文献

- [1] 李德胜. 监控技术在预应力混凝土连续刚构桥悬浇施工中的应用[J]. 交通世界, 2025, (16): 162-164.
- [2] 张春林. 桥梁工程中悬浇连续梁施工工艺的应用探析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(03): 212-215.
- [3] 陈爱民. 多跨连续梁桥挂篮悬浇同步施工关键技术及力学性能研究[J]. 建筑机械, 2025, (07): 299-305.
- [4] 吕卫东, 曹亚西. 大跨径预应力混凝土连续梁桥上部结构施工关键技术及受力性能分析[J]. 建筑机械, 2025, (05): 238-244+249.
- [5] 申志胜. 高铁连续梁桥悬浇施工关键技术与控制技术研究[J]. 建筑技术, 2025, (01): 57-60.
- [6] 张晓刚. 基于悬浇法的钢混合连续梁桥施工控制[J]. 中国公路, 2024, (15): 99-101.