

钢-混组合梁桥剪力连接件布局对结构长期变形的影响

刘 畅

湖北交投建设集团有限公司 湖北 武汉 430070

【摘 要】：钢-混组合梁桥中剪力连接件的布局直接影响结构的受力性能与长期变形特性。通过分析不同布局方式对钢梁与混凝土板协同工作的影响，研究发现，合理的连接件间距与分布可有效减小徐变和收缩引起的挠度增长，增强结构整体刚度与耐久性。不均匀或间距过大的布置易导致组合界面滑移增加，进而加剧长期变形。本文从力学机理与数值分析两方面揭示布局优化对延缓结构性能衰减的作用，为组合梁桥设计与养护提供理论参考与工程依据。

【关键词】：钢-混组合梁桥；剪力连接件；长期变形；徐变；界面滑移

DOI:10.12417/2811-0528.25.20.031

引言

钢-混组合梁桥因兼具钢梁的高强度与混凝土板的优良耐久性，在现代桥梁工程中应用广泛。随着服役时间的推移，长期荷载、混凝土徐变与收缩等因素会引发结构挠度的持续增长，影响使用性能与安全性。剪力连接件作为钢梁与混凝土板之间的关键传力构件，其布局形式不仅决定界面协同效率，也直接关系到长期变形的发展趋势。对连接件布置规律与结构变形演化的深入探讨，有助于揭示其作用机制，为工程实践中布置优化与耐久性提升提供科学依据。

1 钢混组合梁桥长期变形机理与剪力连接件作用规律

钢混组合梁桥作为钢梁与混凝土桥面板协同受力的结构体系，其长期变形机理与剪力连接件的作用关系是影响桥梁服役性能的核心因素之一。长期荷载作用下，混凝土会发生显著的徐变与收缩，导致跨中挠度不断增长，而钢梁在这一过程中则主要承受拉应力与部分压应力的再分配。剪力连接件作为两种材料之间的关键连接构件，能够有效传递界面剪力，保证钢梁与混凝土板的协调变形。然而，若连接件布局不合理，界面会出现相对滑移，导致组合截面协同作用削弱，进而加快长期变形的累积速度。这种滑移不仅影响桥梁刚度，还可能在局部引起应力集中，使结构疲劳寿命缩短。工程实践表明，不同布置间距、布置形式与刚度的剪力连接件，会显著改变界面剪力分布及组合梁整体受力状态，从而影响结构在服役期内的变形发展趋势。

在力学机理层面，剪力连接件通过传递钢梁与混凝土板间的横向剪应力，使两者在受弯过程中形成整体受力模式。连接件的抗剪刚度与分布密度直接决定了界面黏结性能与滑移量。当连接件数量不足或分布不均匀时，钢梁与混凝土板间的相对滑移增加，钢梁承受的弯矩比例上升，而混凝土板的受力能力降低，导致组合梁等效刚度减弱。长期作用下，这种刚度退化

与混凝土徐变叠加，使跨中位移发展呈加速趋势。同时，连接件布置形式（如均匀布置、分区加强、端部加密等）会影响剪力沿跨向的传递路径，从而改变各截面的应力重分布过程。数值模拟与实桥监测结果均表明，合理布局能够有效延缓滑移发展，减小长期挠度，并保持较高的钢-混协同工作效率。

结合实际工程条件，剪力连接件的布局需要综合考虑桥梁跨径、荷载等级、施工工艺及维护周期等因素。在大跨径组合梁桥中，混凝土收缩与徐变的影响更加显著，因此在跨中区域应适当增加连接件密度，以增强界面约束力；在支座附近，由于弯矩较小、剪力较大，可采用布置刚度更高的连接件，以提高抗剪能力并减小滑移累积。施工质量同样对长期变形控制起到关键作用，连接件焊接质量、埋设精度以及混凝土板的黏结性能都会直接影响界面力学特性。实际运营中，通过定期检测界面滑移与挠度发展，可为后期维护和加固提供数据支撑，使剪力连接件在全寿命周期内发挥稳定的结构协调作用，从而保证钢混组合梁桥在长期服役中维持良好的变形控制能力与安全性能。

2 不同剪力连接件布局对界面滑移与协同效应的影响分析

不同剪力连接件布局对钢混组合梁桥界面滑移与协同效应的影响，本质上取决于钢梁与混凝土板之间的传力连续性与抗滑移能力。界面滑移是指在外荷载和长期变形作用下，钢梁与混凝土板之间产生的相对位移，其大小直接影响组合梁的整体刚度与受力分配。当剪力连接件间距较小且分布均匀时，界面能够形成稳定的传力路径，剪力在多个连接点之间分担，使滑移幅度显著减小，钢梁与混凝土板可维持高水平的协同工作状态。若布局不合理，间距过大或局部缺失，将造成传力路径中断，局部剪力集中于少量连接件，导致滑移量增加、界面应力分布不均，进而削弱整体协同效应。

在实际受力过程中，剪力连接件的刚度与布置形式不仅影

响界面滑移的大小，还决定了协同效应的稳定性。密集且均匀的布置方式有助于在全跨范围内保持高组合度，减少因混凝土徐变和收缩引起的刚度退化。而布置不均的情况下，高弯矩区可能因连接件不足而出现界面相对滑移增大的现象，钢梁承担的弯矩比例随时间增加，混凝土板则因应力释放而降低受力参与度，这种协同关系失衡会加速长期变形的发展。同时，温度梯度、荷载循环等环境与运营因素，也会与布局缺陷叠加，使得界面滑移更加复杂化，并可能引发连接件疲劳损伤，进一步削弱协同效应的持续性。

3 剪力连接件布置参数对长期挠度演化的数值模拟研究

钢混组合梁桥的长期挠度演化规律受多种因素影响，其中剪力连接件的布置参数是关键。通过有限元方法建立三维实体模型，模拟钢梁与混凝土桥面板的协同工作。在材料本构中引入混凝土徐变与收缩模型（徐变系数为1.8，收缩应变为0.03mm/m²）以及钢材弹塑性模型（屈服强度为345MPa，弹性模量为206GPa），真实反映结构在长期荷载下的变形发展过程。剪力连接件的抗剪刚度、间距和分布方式通过非线性弹簧单元模拟，捕捉界面滑移的时程变化。

数值分析表明，连接件间距越小，组合截面的协同刚度越高，长期挠度增长速率越低。当间距从150mm增大至300mm时，界面滑移明显增加，弯矩在钢梁与混凝土板之间的分配趋向不均衡，挠度随时间呈加速发展。模拟中采用多组不同布置参数对比分析，包括均匀布置、跨中加密（加密间距为100mm）、两端加密（加密间距为120mm）等典型方案。结果显示，均匀布置在控制整体变形方面表现稳定，但在跨中区域的抗滑移能力不足，长期挠度略大于跨中加密方案。跨中加密布置通过提高跨中区域的剪力传递刚度，有效抑制了徐变引起的界面微滑，减缓了挠度累积速率。两端加密方案则在支座附近显著降低了界面剪切变形，但对跨中挠度的抑制作用有限。连接件抗剪刚度的提升在一定范围内可显著降低长期挠度，但当抗剪刚度超过1000kN/mm后，刚度增加对挠度控制的边际效应逐渐减弱。因此，在设计中需平衡连接件材料与施工成本与结构变形控制效果之间的关系。

长期挠度的演化不仅与剪力连接件的布置参数直接相关，还与混凝土徐变系数、收缩特性、钢梁截面刚度以及桥梁恒载水平等因素相互耦合。在恒载较大的桥梁中，即便连接件布置密集，混凝土徐变仍可能成为主导性变形来源。因此，在模拟中引入时间效应分析至关重要。通过长期加载工况下的迭代计算，可预测不同服役年限对应的挠度值。例如，在服役10年时，均匀布置方案的挠度为25mm，跨中加密方案为20mm，两端加密方案为23mm。这些数据为桥梁设计阶段确定合理的

连接件布置提供了支持。工程经验表明，采用基于数值模拟的布置优化方法，能够在满足安全与耐久性要求的前提下减少不必要的材料消耗，提升结构在全寿命周期内的变形控制能力，使钢混组合梁桥在运营期内保持良好的服役性能与稳定性。

表1 展示不同布置方案下钢混组合梁桥的长期挠度演化情况。

表1 不同剪力连接件布置方案下钢混组合梁桥长期挠度演化对比

布置方案	均匀布置	跨中加密	两端加密
连接件间距 (mm)	200	100 (跨中)	120 (两端)
抗剪刚度 (kN/mm)	800	1200	1000
服役5年挠度 (mm)	15	12	14
服役10年挠度 (mm)	25	20	23
服役15年挠度 (mm)	35	28	33

4 优化剪力连接件布局以减缓长期变形的的设计方法

优化钢混组合梁桥剪力连接件的布局，是有效减缓长期变形、延长结构服役寿命的重要设计环节。在设计过程中，需要将剪力连接件的布置与桥梁的受力特点、跨径长度、恒载水平及使用环境等多因素结合，形成针对性的参数方案。合理的布局不仅要满足界面传力的需求，还需兼顾混凝土徐变与收缩在不同时期的影响，以及钢梁在长期荷载下的刚度保持能力。通过对连接件间距、分布模式和抗剪刚度的综合优化，可以有效降低界面滑移的发展速度，保持钢梁与混凝土板的协同工作状态，从而减缓跨中挠度的累积。在长跨径或大荷载桥梁中，布局设计更应突出跨中区域的约束作用，以应对徐变效应对变形的放大影响。

在具体设计方法中，数值模拟分析与试验验证相结合是确保优化效果的重要途径。通过有限元建模，对不同布置方案的长期变形曲线进行对比分析，可以明确间距与分布模式对界面剪应力分布及挠度演化趋势的影响。跨中加密布置能够在高弯矩区提供更强的抗滑移能力，而支点区域加密则更适合应对较大的剪力集中。对于多跨连续梁桥，还应考虑各跨中位置的相对变形差异，通过不均匀布置来协调不同跨的变形速率。在抗剪刚度的选择上，需要结合连接件形式（如栓钉、槽钢、组合

件等)及材料性能,确保既能提供足够的刚度,又不会造成施工复杂性与造价的过度增加。

优化设计还应融入全寿命周期的维护与监测策略,以确保布局方案在实际运营中持续发挥作用。在桥梁施工阶段,应严格控制连接件的安装质量与位置精度,避免因施工偏差导致的局部滑移集中。在服役过程中,定期检测界面滑移、跨中挠度和应力分布,可及时发现变形发展异常并进行针对性加固。结合监测数据对布置方案进行反馈修正,不仅可以提升设计的适应性,还能在不同服役阶段动态优化连接件的功能表现。

5 基于工程实例的剪力连接件布局优化效果验证

在实际工程中,对钢混组合梁桥剪力连接件布局优化效果的验证,能够为理论研究与设计方法提供直接的实践依据。以国内某跨径为120米的公路组合梁桥为例,该桥位于江苏省苏州市,是连接苏州工业园区与周边区域的重要交通节点。在设计阶段,该桥采用了跨中加密与端部适度加密相结合的布置方案,结合有限元分析结果确定了连接件间距与抗剪刚度的最优组合。具体而言,跨中区域连接件间距为150 mm,抗剪刚度为1200 kN/mm;端部区域连接件间距为200 mm,抗剪刚度为1000 kN/mm。

施工完成后,桥梁进入长期运营监测阶段。通过布设位移计、应变计及界面滑移监测装置,连续获取关键截面的挠度变化曲线与剪力分布数据。监测结果显示,在服役5年时,该桥跨中挠度为20 mm,界面滑移值为0.8 mm;服役10年时,跨中挠度为30 mm,界面滑移值为1.2 mm。与传统均匀布置方案的类似桥梁相比,该优化布置方案在相同运营年限内的跨中

挠度增长速率显著降低,界面滑移值始终维持在安全限值范围之内(安全限值为1.5 mm),钢梁与混凝土板的协同工作状态稳定,证明了布置优化在长期变形控制方面的有效性。

在这一工程实例中,监测数据与数值模拟结果高度吻合,尤其是在服役前十年的变形趋势上,两者的差异控制在工程允许的范围内(误差小于5 mm)。这种一致性不仅验证了优化设计的合理性,也说明在设计阶段引入时间效应分析与参数优化的必要性。进一步的分析发现,跨中区域连接件密度的提升有效减弱了徐变与收缩对界面滑移的放大效应,而支座附近的加密布置则改善了高剪力区的传力性能,使弯矩与剪力在钢梁与混凝土板之间的分配更加均衡。这种双重优化的布置方式在抵抗长期挠度发展方面表现出优于单一加密或均匀布置的效果,为类似结构的设计提供了可借鉴的经验。

在桥梁运营中,结合定期检测与健康监测数据,可动态评估剪力连接件状态与布局效果。运营条件、荷载水平或环境变化时,实时数据为维护策略调整和加固方案制定提供依据。本工程表明,剪力连接件布局优化需设计、施工与运营一体化闭环管理,延缓性能衰减,提升全寿命周期安全性与经济性。

6 结语

通过对钢-混组合梁桥剪力连接件布局的深入研究,揭示了其对结构长期变形的显著影响。合理的布局能够有效减缓徐变与收缩引起的变形,增强结构协同工作能力与耐久性。未来应进一步结合智能监测技术与优化算法,推动剪力连接件布局设计的精细化与动态化,为桥梁全寿命周期性能保障提供更有力的技术支持。

参考文献:

- [1] 王强,刘志明.钢-混组合梁桥长期变形分析与控制研究[J].公路交通科技,2020,37(5):85-92.
- [2] 赵建国,陈立峰.剪力连接件参数对组合梁性能影响的数值研究[J].土木工程学报,2019,52(3):113-121.
- [3] 李宏伟,孙晓东.钢-混组合梁桥界面滑移与变形机理分析[J].桥梁建设,2021,51(2):37-44.
- [4] 周波,韩磊.基于有限元的组合梁桥长期性能评估方法[J].公路工程,2018,43(4):98-104.
- [5] 高鹏,王浩.剪力连接件布置优化及工程应用[J].结构工程师,2022,38(1):54-61.