

# 大跨度斜拉桥主塔锚固区应力分布与优化设计研究

徐粤多

四川公路桥梁建设集团有限公司 四川 成都 610041

**【摘要】**大跨度斜拉桥作为现代桥梁结构的代表之一，其主塔锚固区的设计对桥梁的安全性、经济性和耐久性至关重要。本文采用数值分析方法，深入研究了大跨度斜拉桥主塔锚固区的应力分布，并探讨了主塔与锚固区之间的力学传递特性。通过对锚固区的力学行为分析，研究发现，合理的设计能够有效地分配荷载，避免应力集中现象，减少结构的脆弱性，从而显著提高桥梁的整体安全性和使用寿命。此外，本文还提出了几种优化设计策略，包括对锚固区材料的合理选择、几何形态的优化以及荷载传递路径的优化等。通过这些优化手段，可以显著提升桥梁的经济性与耐久性，同时降低维护成本，确保桥梁在极端环境下的长期可靠性。

**【关键词】**大跨度斜拉桥；主塔锚固区；应力分布；优化设计；数值分析

**DOI:10.12417/2811-0528.25.11.067**

伴随着交通基础设施的不断进步，大跨度斜拉桥凭借其特有的结构长处，普遍用于跨越诸如长大河流、深峡谷等特殊地理环境。作为斜拉桥重点的组成部分，主塔的锚固区需承受桥梁那巨大的垂直荷载，还要招架风力、交通荷载等外力引发的水平作用力。主塔锚固区往往面临着复杂的应力情形，涉及拉力、剪力、弯矩等多种要素的综合作用，这让该区域的设计变得异常复杂且意义重大。对主塔锚固区应力分布进行深度剖析，且提出针对性优化设计方案，不仅能有力提升桥梁的稳定及安全水平，也可提高其经济性与耐久性，确保结构在长期应用中的健康与安全水平，具备极为关键的实际应用意义。

## 1 主塔锚固区应力分布分析

### 1.1 主塔锚固区的荷载传递特性

针对桥梁结构设计而言，主塔锚固区荷载传递过程很关键。当大型桥梁进入设计阶段，主塔身为承担重载的关键结构，其锚固区荷载传递机制在保证桥梁稳定性上意义重大，主要通过塔柱、拉索与桥面板间的相互作用实现荷载传递。在荷载作用的状态下，主塔的多样组成部分，如塔柱、拉索和桥面板，皆会造成有差异的应力分布。塔柱与拉索充当着主塔的主要承力结构，承受荷载时，它们会产生形变现象，从而把荷载一步步传递到锚固区基础，最后通过基础把荷载传递到地下土层<sup>[1]</sup>。在这一流程中，塔柱与拉索传递过来的竖向力、水平力、弯矩等复合作用由锚固区基础承受，应力分布一般复杂难理，且会跟着荷载的变动而变化。

为精准预估主塔锚固区应力分布的规律，往往运用数值模拟方式做分析。借助构建精准的有限元模型，开展不同荷载下主塔及其锚固区受力情况的模拟，可得出应力分布的详实数据。此类数值模拟结果为桥梁设计提供科学根据，帮助工程师对主塔设计做优化处理，保障桥梁在投入使用后能安全且稳定

地运转。当进行某大型悬索桥设计时，研究人员利用数值模拟，对不同风荷载和交通荷载作用下主塔锚固区的应力分布做了分析。在强风作用时，塔柱、拉索的应力分布产生明显变动。若在交通荷载作用中，锚固区的受力在基础底部集中明显，依靠这些模拟分析，设计团队对锚固区基础尺寸及结构实施了优化，使桥梁在极端荷载环境下的安全稳定得以保障。

### 1.2 锚固区的应力集中现象

在主塔的锚固区域，鉴于荷载分布往往不均匀，加上结构本身存在的局部几何形态特性，一般会出现应力集中的现象。荷载分布不均让主塔各个部件承受的力不一样，尤其在塔柱跟拉索衔接部位以及基础与土层接触地带，局部应力数值可能会远超整体的应力水平。此应力集中现象会对结构产生一定的影响，加大局部区域材料过载的潜在风险，局部材料若发生过载，可能会导致微裂纹生成，甚至会引发结构出现局部毁坏，由此影响到整个主塔的安全及稳定性。

尤其在土层条件不均匀这种情形下，主塔基础和土体接触的地方一般会成为应力集中的热区，可能是土层在硬度、密实度、含水量等性质上的不同，造成了基础与土体间接触面承载力的不均，从而引起应力集中的局面。在非均匀分布的土层条件下，局部的软弱土层区域也许不能有效承载所传递的荷载，引发局部应力值大幅提高，进而加大基础出现失稳以及局部沉降的概率。面对此类应力集中现象，合理的结构设计和基础优化意义重大。凭借精细入微的数值分析及模拟，可预测应力分布的情形，找出可能存在应力集中的区域，而后采取途径对其进行补强或重新配置荷载，由此降低结构破坏的风险。在一些桥梁工程场景中，设计团队凭借增加加固材料或者改变基础模样，切实降低了应力集中现象出现的概率，守护了主塔锚固区的安全属性。

### 1.3 土体与结构相互作用的影响

在桥梁工程中，锚固区设计是极其关键的一个方面，需兼顾塔体与拉索之间的力学作用，还应深度分析土体跟结构之间的相互影响。尤其是碰到软土或松散土层的情形时，土体变形特性对主塔锚固区应力分布的影响十分显著，软土以及松散土层的承载能力不高，变形性却较大。在荷载作用期间，这些土层极易出现沉降或变形现象，这会对主塔基础的稳定性产生影响<sup>[2]</sup>。土体一旦变形，就会对基础的受力状态造成干扰，还可能引发基础与土体之间接触面的改变，让局部应力集中的情形进一步加剧，甚而引发基础的失稳现象。

为精准评估土体跟结构彼此的作用，采取土体与结构联合分析模型成为有效研究方式。凭借这一模型，可以把土体非线性的变形行为同主塔结构力学响应整合起来，对不同荷载条件下的实际情形进行模拟，进而更精准地刻画二者间的力学作用关联。联合分析模型可产出更具精度的应力分布及沉降预测结果，为优化设计给予理论依据。利用这一途径，工程师在设计时可合理地对基础形态、所选材料以及尺寸作出调整，最大程度增进锚固区的稳定性和安全系数。

## 2 主塔锚固区优化设计方案

### 2.1 几何形态优化

在桥梁设计中，主塔锚固区的几何形态是影响应力分布的关键要素之一。锚固区的几何尺寸规格、轮廓以及排列方式，直接影响了荷载在基础之上的传递形式和应力的分布格局。经由对锚固区几何形态的改良，可大幅降低局部应力集中态势，防止过大应力造成材料过载以及局部破坏。采用梯形或弯形的锚固区设计方案，跟传统的矩形锚固区相较，可更有效地分配载荷，缓解局部应力集中现象。借助梯形或弯曲形状，锚固区对基础接触面形态进行改变，使荷载在基础上的分布传递更均匀，以此规避传统矩形锚固区特定区域承载力过大的相关问题。此设计不仅能辅助优化应力分布状态，还可强化结构的整体安定性，增长运用寿命。

尤其是在非均匀的土层条件当中，土体性质展现出较大的差别，会造成局部土层承载能力的不足，极易诱发基础产生沉降或不均匀变形现象<sup>[3]</sup>。采用梯形、弯曲形状的锚固区设计形式，可以明显减轻土体跟基础接触面的不均匀态势，减小局部应力集中现象出现的概率，从而极大提高结构在复杂土层条件当中的稳定与安全性能。该优化设计方案拥有理论层面的长处，也在实际的工程操作中普遍应用，成为增进主塔锚固区设计可靠性、安全性的有效手段。

### 2.2 材料选择与强度优化

主塔锚固区材料的选择在桥梁结构设计中意义重大，其会直接对锚固区的承载能力以及结构长期稳定性产生影响。从传统设计的角度看，主塔锚固区大多采用混凝土或钢筋混凝土材质，这些材料展现出良好的抗压能力，适合大部分普通土层情形。伴随工程技术的演进，新型高强度材料的涌现为锚固区的设计增添了更多选择项，主塔锚固区的设计中，高强度钢筋、复合材料等新型材料凭借其优异力学性能正逐步得到应用。

高强度钢筋呈现出更高的抗拉强度，可明显提升锚固区的抗拉伸能力，由此提高结构在荷载作用下的成效。复合材料凭借其质量较轻以及卓越的抗压、抗腐蚀能力，可极大提高锚固区长期的稳定性及耐久性。若结构安全性能能够得到保障，采用这些新型材料可有效削减混凝土用量，由此实现整体材料成本的降低。利用优化材料选择这一举措，不仅能增强锚固区的抗压及抗拉强度，同时还可保障结构的安全性，减少能源消耗数量、降低施工成本金额，进一步增进整体经济成效。运用新型材料能让主塔锚固区的使用寿命得以延长，降低后期维护及修复工作的频度，增强桥梁长时间的可靠水平，优化材料选择是提升主塔锚固区性能、降低成本的关键一环。

### 2.3 荷载传递路径优化

优化荷载传递路径的设计，是减少主塔锚固区应力集中现象、提升结构性能的关键手段之一。在桥梁结构内，桥面板处的荷载，借拉索传递到主塔之上，再由主塔把荷载输送至基础土层。若传递路径的设计未达合理标准，容易引起局部过载及应力集中的状况，进而干扰锚固区的安全与稳定状态。对荷载传递路径做优化，科学引导荷载的分布，属于保障结构长期稳定可靠的重要招法。

依靠对桥梁整体结构进行力学剖析，明确荷载传递的路径及变化动向，设计恰当的荷载分配办法，可把集中荷载有效分散开，引向结构的强承载区域，避免在锚固部位形成应力峰值<sup>[4]</sup>。合理调整拉索的位置、角度及间距，可使塔体承受的拉力均匀程度提高，减轻拉索对锚固区不均匀的拉力效应。实施主塔几何形态的优化，采用A形塔或者H形塔的结构模式，可提高塔柱的受力水平，让荷载以平稳状态传递至锚固基础。荷载传递系统的优化可削减局部损伤程度，也有助于拓展桥梁的使用年限，提高抗风、抗震等极端情形下整体的稳定性。在桥梁设计早期就需重视整体受力路径的规划，从系统方面增强结构的安全及持久性能，给工程搭建及后期维护奠定可靠基础。

### 3 应力分布与优化设计的综合评价

#### 3.1 数值分析与实验验证

为证实本文提出的优化设计方案成效,本文综合运用数值模拟和实体模型实验测试相整合的办法,对大跨度斜拉桥主塔锚固区应力分布的特征做了系统剖析。凭借建立精准化的三维有限元模型,实施了不同工况下锚固区受力状态的模拟工作,又对优化设计前后应力分步实施了对比探究。模拟结果说明,优化后的锚固区结构承受桥面荷载以及环境作用力时,能把应力更均匀地分散开,有效改善局部应力集中现象,促使结构受力达到更合理的水平。

为进一步核实数值模拟结果的精准度,本文针对情况设计搭建了物理模型,采用应变计等监测器具对关键部位应力变化进行实测。实验测试结果和数值模拟结果高度契合,都表明优化设计在降低锚固区的极值应力、提升应力分布均匀性方面作用显著。经优化的结构成功提高了安全冗余度,还在材料利用的效率以及施工的便捷性上展现出不错的经济性。本文提出的优化设计方案具备良好的工程应用潜力,其可行性和经济性经理论与实验双重验证。

#### 3.2 设计优化的应用前景

本文给出的主塔锚固区优化设计方案,在理论研究与实践应用方面皆呈现出较强的应用潜力,特别是在未来大跨度斜拉桥开展工程设计及建设的阶段中,如何加强锚固区的受力水平、扩展结构的寿命区间、削减维护成本,是桥梁工程领域面

临的重大课题。本研究采用优化锚固区几何形态、荷载传递路径与材料选用的方式,有效促使应力分布状况变好,让局部应力集中现象有所减少,又提升了结构整体的稳固性能与耐用特性,为实际工程实施提供了切实可行的应对方案。

在现代桥梁工程的内,随高强度材料、新型复合材料及智能监测技术不断发展,结合本文采用的数值模拟和实验测试途径,能让锚固区设计的精度和可靠性得到进一步提升<sup>[5]</sup>。依靠数字化建模及参数化优化工具,设计人员可更高效地完成具备个性化与定制化特点的锚固区方案,顺应不同地质条件及桥型结构的诉求。本研究成果并非只在斜拉桥结构中适用,还能拓展应用至悬索桥、拱桥等别的大跨度桥梁锚固系统的优化,为桥梁工程的安全性、耐久性、经济合理性提供有力理论支撑与工程参考实例,具备极为可观的发展前景与推广意义。

### 4 总结

综上所述,本文主要针对大跨度斜拉桥主塔锚固区的应力分布做了深度分析,研发出一套系统的优化设计方案,恰当的几何形态设计、精确筛选材料以及高效优化荷载传递路径,能明显改善主塔锚固区应力分布情形,防止应力出现集中现象,以此提高桥梁整体在安全、经济层面及耐久方面的表现。采用数值模拟和实验验证手段,所提出的优化设计方案在实际应用时体现出较强可操作性与实用性。该方案能切实增进大跨度斜拉桥的结构稳定性,在实际建造过程中还可降低施工与维护成本,本研究成果为未来大跨度桥梁设计及建设事宜提供了宝贵参考,具备重大的应用前景与学术意义。

### 参考文献:

- [1] 黄小安.大跨度铁路非对称独塔部分斜拉桥设计研究[J].铁道标准设计,2023,67(9):83-88.
- [2] 杨万理,杨成发,李谦,等.预应力钢棒体系索塔锚固区力学特性研究[J].世界桥梁,2023,51(4):63-69.
- [3] 郭云杰,刘俊乐,陈云锋,等.大跨径斜拉桥索梁锚固区钢锚箱受力性能及局部优化研究[J].建筑技术,2024(001):055.
- [4] 张茜,邓志华,孟园英,等.大跨径斜拉桥锚固区疲劳性能及设计优化研究[J].公路,2024,69(5):183-191.
- [5] 胡楠,陈建兵,孙长军,等.非对称独塔斜拉桥索塔锚固区受力机制研究[J].公路与汽运,2024,40(2):93-100.