

# 某斜拉桥索塔裂缝成因分析

许超

同纳检测认证集团股份有限公司 上海 200331

**【摘要】**：本文以浙江瑞安某独塔双索面预应力混凝土斜拉桥索塔为工程实例，通过现场外观普查、裂缝深度检测、混凝土实体采样等手段，针对索塔服役期间出现的纵向裂缝和横向裂缝病害，对裂缝的形态、分布、宽度、深度等进行了系统鉴定。采用 Midas 有限元实体建模，开展不均匀温度场、预应力作用、局部应力集中等多工况模拟计算，结合大体积混凝土结构受力特性，对索塔裂缝产生机理进行定性分析与半定量分析。

**【关键词】**：斜拉桥；混凝土索塔；竖向裂缝；水平裂缝；温度应力；应力集中；有限元模拟；结构耐久性

DOI:10.12417/2811-0536.26.06.019

## 1 引言

作为斜拉桥的核心承重构件，混凝土索塔承担着直接决定桥梁整体安全和寿命的拉索传递的巨大竖向力和水平力。沿海地区大跨度斜拉桥索塔常年暴露在日照辐射、昼夜温差、季节交替和海风侵蚀等复杂环境中，在温度场、预应力、施工和荷载的共同作用下，空心薄壁断面极易出现温度性裂缝和局部性应力裂缝。此类裂缝若持续扩展，会引发钢筋锈蚀、混凝土劣化、承载力下降等连锁病害，严重威胁桥梁结构安全。

目前，我国许多大跨度斜拉桥在运行 3~15 年间，由于集中在温度梯度、应力集中、预应力配置、收缩徐变等方面，出现了以竖向温度裂缝和锚固区水平裂缝为主的不同程度的索塔裂缝问题。现有研究多针对单一裂缝类型开展机理分析，针对空间曲线 H 形索塔、塔梁固结体系下的裂缝综合成因研究仍有待完善。

本文依托瑞安某斜拉桥工程，通过现场检测与数值模拟相结合的方法，系统分析竖向与水平裂缝的分布规律与产生机理，明确主控因素，补充完善裂缝防控措施章节，提升论文完整性与工程应用价值，为同类桥梁索塔裂缝诊断与整治提供技术支撑。

## 2 概况

### 2.1 桥梁总体布置

该桥坐落于浙江省瑞安市，距飞云江入海口约 5km，2008 年建成通车，是连接瑞安城区与江南新区的关键过江通道。大桥全长 2956 米，主桥采用 240 米+170 米+60 米三跨一联独塔双索面预应力混凝土箱梁斜拉桥，结构体系为塔梁固结，桥面总宽度 36.8 米，设计双向六车道，兼具交通功能和城市景观效果。

### 2.2 索塔结构设计

主塔由下塔柱、上塔柱、下横梁、上塔柱横向隔断组成，主塔采用空间 H 型曲线混凝土索塔，承台顶

面以上高度为 164.46 米，塔柱为空心薄壁断面，外侧为圆弧过渡，以增强结构受力性能和外观美感。

下塔柱：为降低基础受力宽度，顺桥至断面宽度，采用向内倾斜的布置方式。0~10.0 米，跨桥向宽 5.5~70m。

上塔柱：曲线形内倾设计，下端与下横梁及下塔柱相交于一点，R174.5 米曲线段为锚索区，采用横向隔断连接，两塔柱间无横梁。

断面尺寸：向长 7.0 米的塔柱顺桥，向全宽 5.5 米的横桥，下横梁高度 6.0m。

塔架结构：3 米高的塔架设置在承台上，使塔柱和基座之间实现平稳的传力过渡。

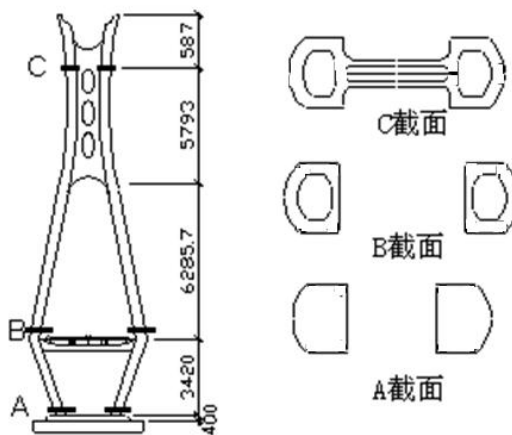


图 2-1 主塔截面示意图（单位：cm）

### 2.3 钢筋与预应力系统

塔柱配筋采用竖向Φ32 受力主筋、水平Φ16 分布筋及拉筋，外壁增设Φ6 带肋钢筋焊接网片，提升表层混凝土抗裂性能。水平面内预应力束配置在上塔柱锚索区、下横梁和横向隔板上，锚索区采用环向 U 型预应力索，相邻索体向反开口，向外侧面锚固在塔柱横桥上，保证索塔局部受力平衡。

### 3 检查结果

#### 3.1 外观检查结果

检测单位采用人工观测、卷尺测量、宽度仪检测等方式,对索塔全断面开展裂缝普查,共发现裂缝 249 条,按方向分为竖向裂缝与水平裂缝,分布特征如下:

(1) 上塔柱内侧竖向裂缝: 共计 83 条, 总长度 314.80m, 最大宽度 1.80mm; 左侧 6#~10#塔段出现连续裂缝, 长度 25.5m; 右侧 6#~9#塔段连续裂缝长度 24.00m。

(2) 上塔柱水平裂缝: 共计 38 条, 总长度 70.70m, 最大长度 8.90m, 最大宽度 2.00mm, 集中分布于近塔顶锚索区。

(3) 上塔柱外侧竖向裂缝: 共计 115 条, 总长度 328.30m, 最大长度 8.00m, 最大宽度 0.55mm, 多为浅表裂缝。

(4) 下塔柱外侧竖向裂缝: 共计 13 条, 呈断续状并带支缝, 总长度约 160m, 最大长度约 26.00m。裂缝优势位置为索塔倒角、圆弧曲面、预应力锚固区及塔壁开孔周边, 与结构应力集中区域高度吻合, 如图 2-1 所示。

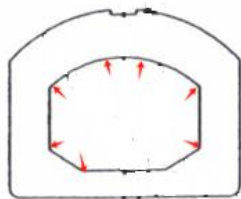


图 3-1 裂缝主要分布位置

#### 3.2 裂缝深度测量结果

本次抽取 7 处典型部位裂缝进行深度检测, 检测采用非金属超声检测仪进行测试, 同时采用钻芯取样进行验证复核。7 处芯样有 6 处裂缝深度均抵达钢筋, 并绕开钢筋向内延伸, 裂缝探明深度为 6.00~66.00cm, 裂缝宽度由塔内壁向塔外侧逐渐变小, 符合温度裂缝与应力裂缝的典型深度特征。



图 3-2 裂缝深度测量

### 4 裂缝成因分析

#### 4.1 竖向裂缝成因分析

根据以往对钢筋混凝土结构的检测经验, 认为温度的周期性变化会造成材料的热胀冷缩, 如果约束条件不当, 可能会导致裂缝, 所以本次模拟主要以节段的升、降温作为模拟工况, 利用 MIDAS 实体有限元模型模拟温度荷载下索塔节段的应力分布情况。模型及断面见图 3-1、图 3-2, 为 18m 索塔标准节段, 材料包括索塔混凝土及箍筋, 上、下端边界条件采取固结, 提取中间 6m 节段作为模拟结果。

模拟工况及结果见表 3.1、表 3.2, 模拟工况应力云图见图 3-3~图 3-10, 其中外侧面升、降温工况为索塔 4 个方向外表面温度, 用以模拟索塔的不均匀温度荷载影响; 整体升, 降温工况为索塔单元整体温度, 用以模拟索塔的均匀温度荷载影响。

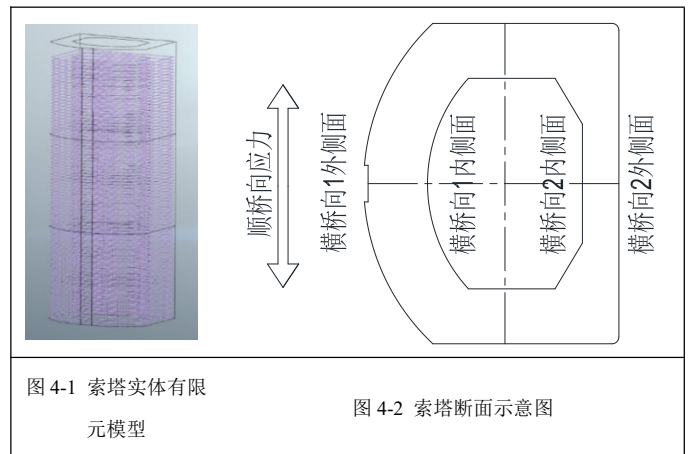


图 4-1 索塔实体有限元模型

图 4-2 索塔断面示意图

表 4.1 索塔有限元内侧身仿真挂果表

序号	工况	横桥向 1 内侧面		横桥向 2 内侧面	
		最大主应力(MPa)	顺桥向最大应力(MPa)	最大主应力(MPa)	顺桥向最大应力(MPa)
1	外侧面 升温 40°	3.81	3.75	5.07	4.98
2	外侧面 降温 -10°	-0.05	-0.92	-0.03	-1.23
3	全截面 升温 40°	0.03	0.03	0.04	0.04
4	全截面 降温 -10°	0.04	0.04	0.06	0.06

备注: 应力正向表示拉紧, 负向表示压紧。

表 4.2 索塔有限元外侧模拟结果表

序号	工况	横桥向 1 外侧面		横桥向 2 外侧面	
		最大主应力(MPa)	顺桥向最大应力(MPa)	最大主应力(MPa)	顺桥向最大应力(MPa)
1	外侧面上升温 40°	-0.31	-9.04	-1.86	-9.39
2	外侧面临降温-10°	3.64	2.87	2.39	2.35
3	全截面上升温 40°	0.02	0.02	0.04	0.04
4	全截面临降温-10°	0.03	0.03	0.05	0.05

备注：应力正向表示拉紧，负向表示压紧。

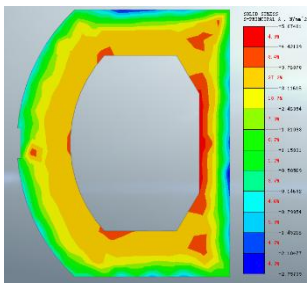


图 4-3 外侧面上升温 40° 最大主应力云图 (MPa)

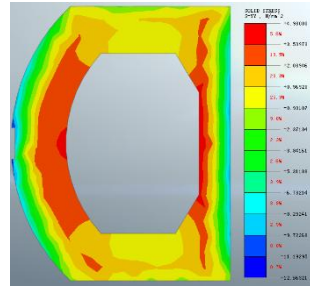


图 4-4 外侧面上升温 40° 顺桥向最大正应力云图 (MPa)

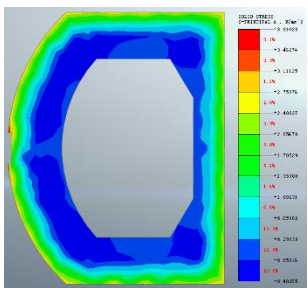


图 4-5 外侧面临降温-10° 最大主应力云图 (MPa)

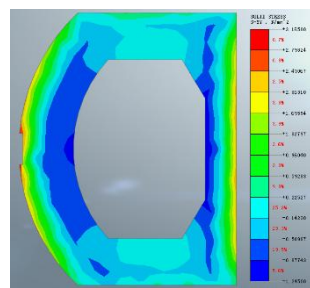


图 4-6 外侧面临降温-10° 顺桥向最大正应力云图 (MPa)

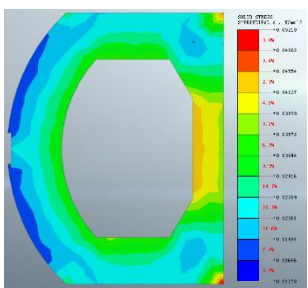


图 4-7 整体升温 40° 最大主应力云图 (MPa)

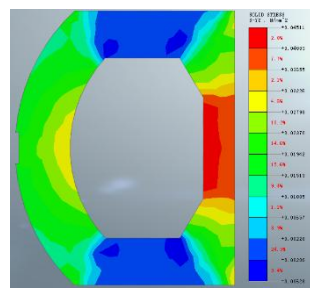


图 4-8 整体升温 40° 顺桥向最大正应力云图 (MPa)

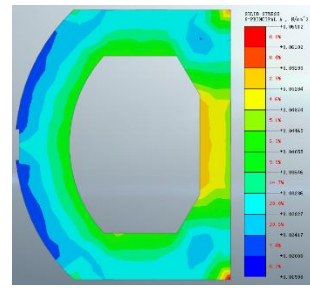


图 4-9 整体降温-10° 最大主应力云图 (MPa)

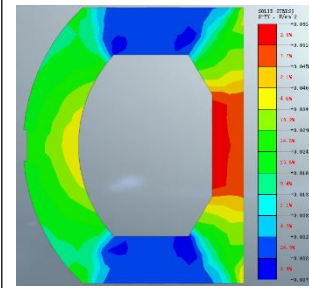


图 4-10 整体降温-10° 顺桥向最大正应力云图 (MPa)

根据上述图表，在温度荷载不均的情况下，索塔节段应力云图中最大应力位置与现场裂缝分布位置基本吻合，即结构将在索塔内外对应位置形成应力集中，快速上升降温过程中促进结构裂缝，考虑到上述模拟结果仅为定性分析。在模拟中施加的温度荷载可能与真实的温度荷载有差异，因此仅作为分析应力的参考，但相应的规律已经可以从中得出。索塔节段在均匀温度荷载下应力值较小，对结构的裂缝产生无影响。

综合外观检查结果和模型应力结果分析，初步判断主塔截面在日照下内外温差产生的不均匀温度应力，是导致主塔内表面出现大量纵向裂缝的主要原因之一，主要是主塔内面竖向裂缝的分布规律与温度荷载不均匀产生的应力方向和分布基本吻合。

### 4.2 水平裂缝成因分析

水平裂缝集中于近塔顶锚索区，由多重因素叠加导致：

- (1) 竖向轴力小：塔顶节段轴力低，对水平方向变形约束不足。
- (2) 剪应力集中：环向预应力交接段水平剪应力大，受力状态不利。
- (3) 开孔应力集中：锚索区塔壁开孔，力流绕射聚拢，局部受力远超过混凝土抗拉强度，因此，开孔应力集中在锚索区的塔壁上。

上述因素共同作用，形成近塔顶水平裂缝，属于典型的局部应力集中裂缝。

## 5 索塔裂缝防控与整治措施

### 5.1 裂缝封闭与灌浆处理

(1) 中幅裂缝 (0.2mm<宽度≤1) 0mm)：注入改性环氧树脂浆液，采用低压注浆工艺，使混凝土恢复完整性。

(2) 宽大深裂缝 (宽度>1.0mm)：开槽嵌缝+压力灌浆联合处理，必要时增设钢筋网片补强。

## 5.2 温度裂缝防控措施

(1) 优化混凝土配比: 选用掺有粉煤灰和矿粉的低热水泥, 使水化热温度降低。

(2) 表面防护处理: 索塔外壁涂刷防晒隔热涂料, 减小日照温差与温度梯度。

(3) 维修加固: 延长施工期间的洒水维修时间, 同时采取保温和保湿措施, 减少内外温差。

## 5.3 局部应力集中控制

(1) 锚索区开孔增设加强钢筋与锚固垫块, 分散孔口应力。

(2) 避免交接段集中剪应力的预应式力束布置优化。

(3) 倒角、圆弧面采用顺滑过渡设计, 减少刚度突变。

## 5.4 长期监测与养护

(1) 安装裂缝宽度感应器和应力感应器, 对裂缝的发展状况进行实时监测。

(2) 定期开展外观检测与混凝土耐久性检测, 及时处理早期裂缝;

(3) 定期涂装防腐, 阻断氯离子侵蚀, 保护钢筋与混凝土。

## 参考文献:

- [1] 王振波,徐道远,朱杰江.大体积混凝土结构温度荷载下的细观损伤分析[J],河海大学学报,2000,(7).
- [2] 肖明,温变效对大体积混凝土结构的损伤开裂分析,本利发电学报[J].1997.(2),8-18.
- [3] 周苏波,混想土损伤定量分析[D].河海大学(硕士论文),1998.
- [4] 杨亮亮,吴春武.某斜拉桥索塔内表面纵向裂缝成因的力学机理分析[J].工程技术研究,2020,5(10):15-17.
- [5] 南军强,杨耀铨,向彤,等.浙江飞云江三桥施工图设计与技术特点[C]//中国公路学会桥梁和结构工程分会 2005年全国桥梁学术会议论文集,2005:562-567.
- [6] 中华人民共和国交通运输部.公路桥梁加固设计规范(JTG/T J22-2019)[S].北京:人民交通出版社,2019.