

# 民建项目中结构缝设置对整体稳定性的影响分析

杨晓刚

中国华冶科工集团有限公司, 重庆 401325

[摘要] 随着现代民用建筑向超长、超高、异形化方向发展, 结构缝的设计已从附属构造升华为维系建筑安全的核心技术要素。在台北 101 大厦、上海中心大厦等地标工程实践中, 结构缝通过应力释放与变形协调的双重机制, 有效化解了超高层建筑的风振效应与软土地基沉降难题。当前建筑形态复杂化与使用功能多样化趋势, 使得传统经验化缝体设计模式面临严峻挑战: 既要满足地震作用下的位移容差需求, 又需协调设备管线穿越等空间矛盾。本研究立足结构力学本质, 系统解析缝体设置与建筑稳定性的耦合作用机理, 旨在建立基于性能化设计的结构缝配置理论, 为突破现行规范局限性提供新的技术路径。

[关键词] 结构缝; 整体稳定性; 变形协调; 抗震性能; 优化设计

DOI: 10.33142/ec.v8i4.16328

中图分类号: TU333

文献标识码: A

## Analysis of the Impact of Structural Joint Setting on Overall Stability in Civil Construction Projects

YANG Xiaogang

China Huaye Group Company Limited, Chongqing, 401325, China

**Abstract:** With the development of modern civil architecture towards ultra long, ultra high, and irregular shapes, the design of structural joints has evolved from auxiliary structures to core technical elements that maintain building safety. In the practice of landmark projects such as Taipei 101 Building and Shanghai center Building, structural joints effectively solve the problem of wind vibration effect and soft soil foundation settlement of super high-rise buildings through the dual mechanism of stress release and deformation coordination. The current trend of complex architectural forms and diversified functional uses poses a serious challenge to the traditional empirical joint design mode: it needs to meet the displacement tolerance requirements under earthquake action, while also coordinating spatial contradictions such as equipment pipeline crossings. This study is based on the essence of structural mechanics and systematically analyzes the coupling mechanism between joint setting and building stability. The aim is to establish a performance-based design theory for structural joint configuration, providing a new technical path for breaking through the limitations of current standards.

**Keywords:** structural joint; overall stability; deformation coordination; seismic performance; optimization design

### 引言

建筑结构缝的演化历程深刻反映了人类应对自然约束的工程智慧。从古希腊神庙的石砌伸缩缝到现代超高层建筑的智能抗震缝, 这一构造始终在平衡结构安全与建筑功能之间寻求突破。20 世纪后期, 随着迪拜哈利法塔、上海环球金融中心等超限建筑的涌现, 传统经验性缝体设计方法在应对千米级高度、十万吨级荷载时显现局限性。地震频发区如日本关东、中国川滇地带的多起震害表明, 不当的缝体设置可能加剧建筑损伤甚至引发连续性倒塌。当前气候变化带来的极端温度波动与海平面上升, 进一步放大了既有结构缝体系的适应性缺陷。这些现实挑战迫使工程界重新审视结构缝的本质功能, 推动其从简单的物理分隔向复杂系统的力学调控装置转型。

### 1 结构缝在建筑稳定性中的关键作用

结构缝作为建筑体系中的主动调控元件, 其核心价值在于通过可控的位移释放机制维持建筑整体稳定性<sup>[1]</sup>。在超长、超高层或复杂体型建筑中, 温度应力、地基沉降及地震作用产生的结构内力, 若无法有效消解, 将导致混凝土

开裂、构件变形甚至整体失稳。以台北 101 大厦为例, 其主体结构通过设置多道抗震缝, 在台风频繁的台湾地区实现了 518m 超高层建筑的稳定运行, 验证了结构缝在消解风振能量方面的关键作用。从力学本质而言, 结构缝通过切断结构连续性形成弱化界面, 既允许相邻单元自由变形, 又通过构造措施维持必要的传力路径。

### 2 结构缝的基本概念与分类

#### 2.1 结构缝的定义与功能

结构缝是建筑设计中人为设置的连续性中断构造, 其本质是通过物理分隔实现内力释放与变形协调的双重目标。在基本作用层面, 结构缝通过允许相邻结构单元的相对位移, 消除混凝土收缩、温度梯度及地基不均匀沉降引发的累积应力。例如迪拜哈利法塔的伸缩缝系统, 通过吸收沙漠地区昼夜 40℃温差引起的变形, 避免核心筒与外围框架的应力集中。与建筑功能的关系则体现在空间划分与使用需求的协同, 如医院建筑中防震缝的布置需统筹考虑设备管线穿越、功能分区隔离等特殊要求, 确保在满足抗震需求的同时不影响医疗设备的正常运行。

## 2.2 结构缝的主要类型

伸缩缝主要应对材料热胀冷缩效应,典型应用见于北京大兴国际机场的屋面网架结构,其缝体构造采用柔性密封与刚性限位相结合的复合设计。沉降缝用于调节地基差异变形,上海中心大厦在地下室与塔楼连接处设置沉降缝,成功化解了 632 米超高层建筑在软土地基上的沉降梯度问题<sup>[2]</sup>。防震缝在地震多发区具有特殊价值,日本东京晴空塔通过三重抗震缝系统,将 634 米塔体划分为多个独立振动单元,显著降低地震作用下的鞭梢效应。施工缝作为临时性构造缝,其处理质量直接影响结构整体性,港珠澳大桥沉管隧道的节段式施工缝采用预应力钢绞线连接技术,实现毫米级接缝精度控制。

## 2.3 结构缝的设计原则与规范要求

国内外规范在结构缝设计理念上存在显著差异:我国《混凝土结构设计规范》强调温度作用的线性叠加计算,而欧洲规范 EN1992 引入混凝土徐变松弛系数进行修正;美国 ACI318 规范特别规定抗震缝宽度需与建筑高度呈正相关,洛杉矶联邦银行大厦的抗震缝宽度按此原则设计达 450mm。基本参数控制方面,我国现行标准规定现浇混凝土结构的伸缩缝间距不宜超过 40m,但对采用补偿收缩混凝土的超长结构允许放宽至 120m,深圳平安金融中心即通过材料创新实现单缝间距突破传统限制。缝宽计算需综合考虑材料特性、环境温度及地震设防等级,上海中心大厦的沉降缝宽度经三维有限元分析确定为 80mm,精确匹配地基沉降预测值。

## 3 结构缝对建筑整体稳定性的影响机理

### 3.1 结构缝对建筑力学性能的影响

结构缝对建筑力学性能的调控本质在于重构内力传递路径与应力分布模式。以迪拜哈利法塔为例,其核心筒与外围支撑结构间设置的温度缝系统,通过释放混凝土因昼夜温差产生的轴向应力,成功将核心筒压应力峰值降低至设计允许范围内。这种力学性能的改善源于缝体对结构连续性的主动中断,使得原本超静定体系转化为多个静定子结构的组合,从而消除冗余约束引发的次生应力。但需警惕不当缝体设计可能导致的负面效应:纽约世贸中心交通枢纽的玻璃幕墙支撑体系曾因抗震缝位置偏差,引发支撑桁架节点区域的弯矩集中,后续通过增设屈曲约束支撑(BRB)完成力学性能修复。

### 3.2 结构缝对建筑变形协调性的影响

建筑变形协调的核心是控制各子系统位移差异在安全阈值内,结构缝在此过程中发挥位移缓冲区与变形引导器的双重作用。广州塔(小蛮腰)的风振控制体系即典型例证,其塔身设置的环形变形缝通过分级释放机制,将 300 米高度处的水平位移差控制在 3mm 以内,确保顶部观景平台设备平稳运行。这种协调性通过三维位移耦合设计实现:水平向采用聚四氟乙烯滑移层吸收剪切变形,竖向设置碟形弹簧组补偿压缩变形,径向布置限位钢索约束分离距离。在软土地基工程中,苏州中心大厦的沉降缝系统创新应用液压调节装置,可实时监测相邻结构单元沉降差

并自动调整支座高度,实现毫米级动态补偿。

### 3.3 结构缝对抗震性能的影响

抗震缝通过解耦结构振动特性改变地震能量传递路径,其效能取决于频率隔离度与耗能机制的协同优化。台北 101 大厦的抗震缝体系将 88 层塔体划分为 5 个独立振动单元,各单元基本周期差异达 0.5 秒以上,有效规避地震波共振风险。日本仙台媒体中心则采用黏滞阻尼器连接的抗震缝构造,其特殊之处在于将缝体宽度与阻尼器行程动态关联,当地震作用超过设定阈值时,阻尼器进入非线性工作状态,可耗散 45% 以上的输入能量。但需关注“伪缝效应”的潜在威胁:墨西哥城某医疗综合体在 2017 年地震中,因施工误差导致抗震缝实际宽度不足设计值的 60%,相邻单元碰撞引发连锁破坏,最终造成局部坍塌。

### 3.4 结构缝对建筑耐久性的影响

结构缝的耐久性缺陷往往成为建筑全生命周期管理的薄弱环节,其破坏机理涉及材料老化、密封失效与环境侵蚀的耦合作用。香港青马大桥的伸缩缝系统采用梯度密封设计:表层氟橡胶耐候层抵御紫外线与盐雾侵蚀,中层聚氨酯弹性体适应动态变形,底层不锈钢导水槽确保排水通畅,这种复合防护体系使其在 25 年服役期内保持 0.1mm/年的平均腐蚀速率。工业建筑中的耐久性挑战更为严峻,青岛某化工厂的耐腐蚀缝体系创新应用碳纤维增强乙烯基酯复合材料,结合阴极保护技术,将氯离子渗透系数控制在  $5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$  量级。维护策略的革新同样重要,伦敦千禧桥建立的全自动清洁系统,通过定期清除伸缩缝内积聚的粉尘与盐结晶,使滑轨磨损速率降低至设计预期水平。

## 4 结构缝设置的关键参数与优化设计

### 4.1 结构缝宽度的确定方法

缝宽设计的核心在于平衡预期位移需求与构造可行性,需综合考虑静态荷载与动态响应的复合影响。深圳平安金融中心的抗震缝宽度设计采用双重控制标准:静态工况下满足最大层间位移角对应的 0.4%H 位移量,动态时程分析中考虑罕遇地震下的 1.2 倍放大系数,最终确定 350mm 的缝宽阈值。温度缝宽度的计算需引入混凝土徐变松弛效应修正,北京大兴机场屋盖结构通过 50 年温度历程模拟与徐变试验数据拟合,将理论计算值 280mm 修正为实际采用的 300mm。对于超高层建筑特有的施工误差累积效应,上海中心大厦在沉降缝宽度计算中额外增加 15% 的施工容差补偿量,确保全生命周期内的位移适应能力。

### 4.2 结构缝间距的影响与控制

缝间距的确定本质是结构连续长度与材料变形能力的动态博弈。南京长江隧道的诱导缝体系采用 28m 等间距布置,通过预设弱化截面引导混凝土裂缝有序开展,将主裂缝宽度控制在 0.2mm 以内。超长混凝土结构的突破性实践可见于郑州国际会展中心,其通过掺加复合膨胀剂与钢纤维,配合后浇带跳仓施工工艺,将伸缩缝间距从传统 40m 扩展至 150m。装配式建筑的缝距控制需考虑模块化施

工特性,雄安市民服务中心采用三维可调连接节点,实现5mm级缝距精度控制<sup>[3]</sup>。但需警惕过密缝距的负面效应:迪拜运河塔项目通过参数化分析发现,当缝距小于30m时,结构整体刚度下降12%,最终优化调整为35m间距方案。

### 4.3 结构缝构造设计的创新方法

新型构造技术正推动结构缝性能的跨越式提升。北京冬奥会速滑馆的低温缝体系采用形状记忆合金密封条,其相变温度点精确设定为-15℃,可在极端低温下保持恒定接触压力。东京奥运会主体育馆的3D打印钛合金连接件,通过拓扑优化设计实现40%的轻量化与25%的承载力提升。生态化构造创新方面,新加坡南洋理工大学的绿色缝体系在缝槽内植入耐旱苔藓群落,通过蒸腾作用降低周边微环境温度3~5℃。智能缝体技术已进入工程实用阶段,深圳某超高层试点应用的压电摩擦阻尼器,可根据实时监测的位移信号自动调节摩擦系数,实现从被动适应到主动控制的转变。

### 4.4 结构缝设置的动态优化策略

基于全生命周期性能动态优化策略正在重构传统设计范式。上海天文馆建立数字孪生模型,通过2000余次虚拟工况测试,优化抗震缝位置与构造细节,将地震能量吸收效率提升18%。伦敦碎片大厦应用4D-BIM技术,模拟不同季节温度荷载下的缝宽变化轨迹,指导维护团队制定差异化巡检方案。机器学习技术的引入显著提升运维效能,香港国际机场通过训练缝体退化预测模型,提前6个月识别出30%的高风险缝体单元。未来发展方向聚焦于智能感知-响应系统,迪拜未来博物馆在缝体内嵌微型压电作动器阵列,可实时感知相邻单元位移并施加反向作用力,实现亚毫米级位移的主动控制。

## 5 施工与维护中的结构缝管理

### 5.1 施工阶段的结构缝质量控制

#### 5.1.1 施工工艺对结构缝性能的影响

施工工艺的精细程度直接决定结构缝的预设功能实现度。港珠澳大桥沉管隧道的节段式施工缝处理中,采用预应力钢绞线张拉与环氧树脂注浆复合工艺,通过控制张拉力梯度与注浆压力时序,实现接缝界面应力均匀分布。成都天府国际机场的抗震缝施工引入激光定位与机器人焊接技术,将缝体轴线偏差控制在±2mm以内,确保地震作用下各结构单元的独立变形能力。混凝土浇筑阶段的工艺控制尤为关键,上海中心大厦在沉降缝区域采用跳仓浇筑与缓凝剂联用策略,有效避免冷缝形成。施工缝的表面处理技术持续革新,雄安新区某重点工程应用高压水射流刻槽法,使新旧混凝土结合面的抗剪强度提升40%,显著降低后期开裂风险。

#### 5.1.2 常见施工缺陷与预防措施

施工缺陷多源于工序失控与细节疏忽,伦敦千禧桥运营初期出现的滑轨异常磨损,追溯发现是伸缩缝槽内残留建筑碎屑导致的应力集中。预防此类问题需建立全流程管控体系:深圳平安金融中心在抗震缝施工中实行“三检制度”,即模板定位后三维扫描复验、钢筋绑扎后探伤检测、混凝土浇筑

后超声波检测。密封材料施工缺陷是另一主要风险源,青岛胶州湾隧道的变形缝采用热熔焊接与冷黏接复合工艺,通过红外热成像监测确保接缝连续无断层。对于超长结构缝的直线度控制,南京长江隧道研发可调式模板支撑系统,利用液压同步顶升技术将30m缝长的平整度误差压缩至3mm以下。

### 5.2 结构缝的长期维护与监测

#### 5.2.1 环境侵蚀与材料老化问题

海洋环境下的结构缝面临氯离子渗透与盐雾腐蚀双重威胁,香港青马大桥针对跨海段伸缩缝开发梯度防护体系:表层喷涂聚脲弹性体抵御紫外线老化,中层设置牺牲阳极保护层,底层铺设导水型膨胀止水带。工业污染区的酸雨侵蚀问题更为复杂,重庆某化工厂的耐腐蚀缝体系采用氟碳涂层与玻璃钢复合防护,经10年跟踪监测显示,其抗硫酸盐侵蚀能力比常规设计提升5倍以上。冻融循环作用下的材料性能退化需特别关注,哈尔滨大剧院在伸缩缝内填充气凝胶保温材料,配合电伴热系统,成功解决-35℃极端低温下的密封脆化问题。

#### 5.2.2 智能化监测技术的应用前景

基于物联网的智能监测系统正重塑结构缝运维模式,雄安新区某市政桥梁在伸缩缝内植入分布式光纤传感器,可实时感知0.01mm级位移变化并自动预警。无人机巡检技术突破人工检查的时空限制,港珠澳大桥采用配备高清热像仪的巡检无人机,每年完成200公里缝体系统的全景扫描。机器学习算法在损伤识别中展现独特优势,深圳某超高层建筑建立缝体声发射信号数据库,通过模式识别技术可提前3个月预测密封失效风险。

## 6 结语

结构缝作为现代建筑稳定性的核心调控装置,其设计理念已从被动防护转向主动适应。台北101大厦的抗震缝体系与迪拜哈利法塔的温度缝系统证明,科学的结构缝配置能显著提升超限建筑的灾害抵御能力。当前技术突破聚焦于智能材料与数字孪生技术的融合,如东京羽田机场测试的自适应缝宽调节系统,展现出从静态设防到动态响应的范式转变。未来研究需攻克多物理场耦合作用下的缝体行为预测难题,发展具有自感知、自修复功能的第四代结构缝体系。

### [参考文献]

- [1]马小明.房屋建筑结构设计问题与优化策略研究[J].工程技术研究,2023,8(10):162-164.
- [2]袁家辉,陈水福,夏俞超,等.设置结构缝的矩形高层建筑风荷载及风致响应研究[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(7):2663-2676.
- [3]郭领兵.大型输水渡槽结构缝渗水处理措施[J].石材,2025(1):94-96.

作者简介:杨晓刚(1984.1—),男,毕业院校:河北理工大学,学历本科,所学专业:土木工程,当前就职单位:中国华冶科工集团有限公司,所在职务的年限5年,职称级别:工程师。