

大跨度型钢混凝土结构的协同工作机制探析

张建 曹琼 伍韬 张想想 谭超
中建五局土木工程有限公司
DOI:10.32629/etd.v7i1.22202

[摘要] 大跨度型钢混凝土结构结合了型钢和混凝土两种材料特点,在高层建筑、大跨度桥梁、工业厂房等众多领域得到应用。型钢与混凝土是否能够良好协同工作直接影响到整个结构安全性和经济性。本文基于材料之间相互作用原理,对型钢混凝土结构协同工作进行研究,着重讨论型钢与混凝土之间粘结滑移机制、抗剪连接件内力分布特点、型钢翼缘对核心区混凝土限制作用以及大跨度构件长期变形协调问题。希望通过本课题研究加深人们对于大跨度型钢混凝土结构协同工作本质理解并为今后相关工作提供借鉴。

[关键词] 大跨度结构; 型钢混凝土; 协同工作; 粘结滑移; 剪力连接

中图分类号: TU398 **文献标识码:** A

Analysis of the Synergistic Working Mechanism of Long-Span Steel-Reinforced Concrete Structures

Jian Zhang Qiong Cao Tao Wu Xiangxiang Zhang Chao Tan
China Construction Fifth Engineering Bureau Civil Engineering Co., Ltd.

[Abstract] Long-span steel-reinforced concrete structures combine the characteristics of steel sections and concrete and have been widely applied in high-rise buildings, long-span bridges, industrial plants, and other fields. Whether the steel sections and concrete can work together effectively directly affects the safety and economic performance of the overall structure. Based on the principles of material interaction, this study investigates the synergistic working behavior of steel-reinforced concrete structures, focusing on the bond-slip mechanism between steel sections and concrete, the characteristics of internal force distribution in shear connectors, the restraining effect of steel flanges on the concrete in the core region, and the coordination of long-term deformation in long-span members. This study aims to deepen the understanding of the essence of synergistic working behavior in long-span steel-reinforced concrete structures and provide a reference for related work in the future.

[Key words] long-span structures; steel-reinforced concrete; synergistic working; bond-slip; shear connectors

引言

随着建筑功能复杂化与跨度增大,单一材料难以兼顾强度、刚度、延性与经济性。型钢混凝土结构结合高强度型钢与良好抗压的混凝土,在大跨度空间结构、转换层中广泛应用。然而,型钢抗拉强、弹模高,混凝土抗压强但抗拉低、徐变大。二者能否全过程协同、避免早期粘结滑移,对结构性能至关重要。近年来国内外提出了多种粘结滑移本构与剪力传递机理,但多针对小尺度或一般构件,对大跨度结构特有的长细比大、弯剪梯度剧烈、长期荷载显著等问题缺乏系统总结。本文从材料、界面到构件三个层面,探讨大跨度型钢混凝土结构协同工作机制,以期该类结构的设计与优化提供参考依据。

1 型钢混凝土结构协同工作的基本机理

1.1 材料性能的互补与复合

型钢混凝土协同作用是由于两种材料优势互补所致。型钢抗拉能力强、弹性模量大(约200GPa)可以弥补混凝土抗拉不足并以其刚性提高构件刚度及稳定性;混凝土抗压能力强(约20~60MPa)、耐火防腐良好并且可以限制型钢局部失稳。两者通过界面传递纵向剪力使得截面应变满足平截面假设。从受力角度分析,在弹性阶段,型钢与混凝土应变一致,应力根据模量比例分配;在弹塑性阶段,混凝土开裂,受拉区不发挥作用,型钢承担主要拉力,受压区二者共同受压;到极限阶段,随着混凝土塑性发展以及型钢强化而使得整个构件仍保持较高承载力^[1]。因此,型钢混凝土结构相比于传统的素混凝土或普通钢筋混凝土结构有较好的延性和耗能性能。

1.2 协同工作的三个基本条件

为了有效的协同工作必须具备以下三点要求: 第一是变形协调, 在型钢周围混凝土之间无相对滑动或者有轻微的相对滑动情况下二者具有相同的曲率以及沿长度方向的应变; 第二是剪力传递连续性, 在构件端部或节点处作用的纵向剪力能够通过粘结力及摩擦力(必要时增加抗剪连接件)从混凝土传递到型钢上, 同时也能从型钢传递给混凝土; 第三是约束稳定性, 型钢翼缘要对核心混凝土施加侧向约束使其处在三向受压状态下从而提高其抗压能力和极限压应变, 在大跨度结构中因为弯矩和剪力值较大而且变化较剧烈所以这三点的要求更高, 需要更加合理的界面设计以及连接构造。

2 型钢与混凝土界面粘结滑移机制

2.1 粘结应力的组成与分布特征

型钢与混凝土之间粘结应力包括化学胶结力、摩擦力以及机械咬合力三项之和。化学胶结力是在加载初期主要影响因素, 在此过程中两者的相对位移较小; 一旦其达到一定程度之后, 即约为0.1~0.3mm时, 化学胶结力消失, 而摩擦力和机械咬合力成为主要影响因素。型钢表面的自然锈蚀、凸起轧制纹或者是人为焊接的栓钉、钢筋头等都会大大增加机械咬合力的比例^[2]。粘结应力并不是在整个梁上都是均匀分布的, 在靠近两端的地方有最大值, 在中间部位则较平坦。对于大跨径梁, 在弯矩和剪力随跨度的变化下, 粘结应力曲线会出现几个高点, 尤其是在有集中力作用处以及支撑位置处。

2.2 粘结滑移本构关系

正确地给出粘结应力 τ 与滑移 s 的关系是协同工作分析的基础, 在常用的本构关系中一般分为三个部分: 上升部分(弹性粘结部分)、平台部分(弹塑性滑移部分)以及下降部分(破坏部分), 可以表示为:

$$\tau = \tau_{\max} \cdot (s/s_0)^{\alpha} (s \leq s_0)$$

$$\tau = \tau_{\max} (s_0 < s \leq s_u)$$

$$\tau = \tau_{\max} - \beta (s - s_u) (s_u < s \leq s_f)$$

其中, $\tau_{\max}$ 为峰值粘结强度, s_0 为对应弹性极限滑移, s_u 为平台段终点滑移, s_f 为残余粘结强度对应的滑移。影响 $\tau_{\max}$ 的主要因素有: 混凝土抗压强度(与 $f_c^{0.5}$ 成正比)、型钢埋置长度(较长的埋置将导致较低的平均粘结强度)、型钢表面情况(存在栓钉可增加约30%-50%)、横向配箍率(加强了对粘结的作用)以及混凝土保护层厚度。大跨度构件由于截面较大, 型钢翼缘较宽, 其表面粘结应力分布不均明显, 应采用分段或者加权平均的方法选取粘结强度。

2.3 滑移对协同工作的削弱效应

滑移发生后不满足完全变形协调条件, 造成截面上应变分布不符合平截面假定。滑移越大, 型钢与混凝土之间内力重新分配越多——即型钢承受更大弯矩, 而混凝土受压区高度随之改变。小滑移 ($s < 0.5\text{mm}$) 对结构承载能力影响可以忽略; 中等滑移 ($0.5 \sim 2\text{mm}$) 会使结构刚度降低, 挠度增加10%-20%; 大滑移 ($> 2\text{mm}$) 可能导致粘结劈裂破坏, 从而使得该结构不能继续承受荷载。大

跨径结构对于滑移更敏感, 在长细比较大的情况下, 由于滑移所造成的附加挠度又会使弯矩增大(二次效应), 形成一个恶性循环。所以大跨径型钢混凝土结构允许的最大滑移比一般情况要小得多, 宜为不大于0.8mm。

3 抗剪连接件与纵向剪力传递机制

3.1 界面纵向剪力的产生与分布

在弯矩作用下, 在截面中性轴附近型钢与混凝土之间有沿轴向相对滑动趋势, 在其接触面上出现纵向剪力分布, 其大小与弯矩梯度(即剪力)成正比, 可以写成公式:

$$v = V \cdot S / I$$

其中 V 为截面剪力, S 为型钢(或混凝土)对换算截面中性轴的面积矩, I 为换算截面惯性矩。对于大跨度构件, 在跨中弯矩较大而剪力较小的情况下, 纵向剪力较小; 在支座附近剪力较大, 纵向剪力达到最大值。所以靠近端部位置需要进行抗剪连接^[3]。如果仅依靠自然粘结不能承受纵向剪力, 则需设置抗剪连接件(例如焊接在型钢翼缘上栓钉、槽钢、弯筋等)。

3.2 抗剪连接件的刚度与承载力

抗剪连接件的荷载-滑移曲线是非线性的。以栓钉为例, 其初始刚度约在100~300 kN/mm之间, 极限承载能力可按以下公式计算:

$$Q_u = 0.43 A_s \sqrt{f_c E_c} \leq A_s f_u$$

其中 A_s 为栓钉杆截面积, f_c 为混凝土圆柱体抗压强度, E_c 为混凝土弹性模量, f_u 为栓钉抗拉强度。对于大跨度结构而言, 由于剪力沿跨度方向变化, 在布置连接件时不应均匀设置, 而应根据剪力流的变化而改变其间距——在靠近支座处密集布置, 在跨中较疏; 此外对连接件的延性也有更高的要求, 因为在大跨度结构中需要较大的变形能力以抵抗过大剪力的作用下连接件易发生早期脆性破坏从而导致大量的界面滑移产生。

3.3 完全组合与部分组合的设计理念

依据界面剪力传递情况, 型钢混凝土分为完全组合构件及部分组合构件。完全组合要求抗剪连接件能够承受全部纵向剪力, 使得剪切变形很小接近于零, 截面应变符合平截面假设, 其承载能力基于整个截面塑性进行计算; 而部分组合允许存在一定量的相对错动, 在设计上要考虑到滑移带来的承载能力降低以及刚度下降, 但是可以减少连接件的数量从而节省成本。对于大跨度建筑而言, 由于剪力较大并且活载所占比例较高, 一般推荐使用完全组合来保证刚性和位移的要求; 而对于非常大的跨度(大于30米)并且主要是恒载作用下的构件, 则可以采用部分组合以节约费用, 在这种情况下需要考虑滑移的影响。

4 型钢翼缘对核心混凝土的约束效应

4.1 约束机理与应力路径

型钢混凝土构件中的型钢一般为工字形或者箱形截面, 在受压区, 型钢腹板两侧的翼缘对核心混凝土产生侧向约束阻止它向外侧膨胀从而使混凝土处于三向受压状态, 这种约束类似

于给混凝土提供了一个附加的被动围压并且随着混凝土沿轴线方向压缩的程度增加而增大,被约束后的混凝土的最大抗压强度可以提高20%-50%,最大压应变也可以增加5-10倍,极大地提高了受压区混凝土的延展性,在大跨度结构中因为受压区域的高度较大(特别是支座负弯矩部位)所以约束的作用更加明显可以推迟混凝土压溃以及降低刚度损失。

4.2 约束效率的影响因素

约束效率主要取决于:型钢翼缘宽厚比(越宽越好,但过宽易导致翼缘局部失稳)、翼缘与腹板连接刚度大小、混凝土强度等级(低强混凝土更有利)、横向箍筋提供的额外约束作用以及保护层厚度等因素。而在实际工程应用中,单纯依靠型钢翼缘所提供的约束作用一般难以满足要求,尤其是距离翼缘较远部位角部混凝土约束较差。因此,在大跨结构中一般需要在外围设置封闭箍筋,即所谓“型钢+箍筋”约束方式,在这种情况下,约束混凝土本构关系可选用Mander模型或者改进后的约束指标方法,将型钢翼缘所起作用等价转换为附加横向配筋率。

4.3 约束对协同工作的反馈影响

而约束的存在又会对型钢和混凝土之间的协同作用产生影响。一方面,约束可以提高混凝土的抗压强度及变形能力,在极限状态下使更多的混凝土参与工作从而推迟受压区混凝土退出服役的时间;另一方面,由于约束产生的水平推力也会作用到型钢翼缘上,增大翼缘板上的平面外弯矩,有可能导致局部失稳。所以在进行大跨度型钢混凝土梁的设计中需要考虑约束带来的好处和局部稳定性问题,一般规定翼缘宽厚比不大于13(Q235钢)或者11(Q345钢)。

5 大跨度结构特有的协同工作问题

5.1 长期荷载下的收缩徐变差异

大跨度构件在长时间承受恒载情况下,混凝土收缩以及徐变引起内力重新分配。由于型钢不会出现收缩徐变,混凝土收缩被型钢限制从而在混凝土内部产生拉应力、型钢内部产生压应力。徐变使得混凝土上应力逐步转移到型钢上,造成型钢上的应力随时间增大。这将降低界面粘结力并加大长期滑移,从而使结构挠度比按弹性方法计算结果大2~3倍。当跨度大于20m时,对于这类型钢混凝土梁,其长期挠度通常是设计要求。而在协同工作分析中需要采用有效模量法或者龄期修正后有效模量的方法来考虑收缩徐变的时间依赖性。

5.2 温度效应与界面应力

大跨径结构更易受温度影响。型钢和混凝土线膨胀系数相近(型钢约为 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,混凝土约为 $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$),温差造

成的应力不大。但是日光温差或突然降温会使构件截面内出现非均匀温度场,在此温度场作用下型钢与混凝土会有不同自由变形而产生附加粘结应力,在负温差(降温)情况下,构件表面混凝土收缩比内部型钢大,界面处于受拉状态,有可能产生粘结裂缝。对于大跨度屋盖结构或露天桥梁应考虑温度应力的影响,在设计时需要考虑温度梯度引起附加滑移。

5.3 整体稳定性与协同屈曲

大跨度型钢混凝土受压构件(如拱肋、桁架上弦杆)不仅需要其材料强度的问题,同时也需要考虑其整体稳定性的问题。由于混凝土对于型钢有约束作用,所以该类构件丧失承载能力的方式一般为弯矩作用下屈曲并且伴随着局部压溃的发生。协同工作程度决定了构件的稳定承载力,当粘结良好时,型钢和混凝土一起工作,经过长细比调整之后的稳定的承载力可以按照组合截面来进行计算;而当粘结滑移较大时,型钢和混凝土之间已经脱离,此时的有效刚度大大减小,其稳定承载力可能会降低30%以上。因此,在设计大跨度受压构件时应当加强抗剪连接件以及增加横向约束以保证二者能够良好协同工作,防止出现“分肢失稳”。

6 结语

大跨度型钢混凝土结构的协同工作是界面力学、材料与结构工程交叉的关键。型钢与混凝土通过粘结滑移、抗剪连接和约束效应实现力流传递与变形协调,三者缺一不可。大跨度条件下,长细比增大、剪力梯度显著、长期效应突出。核心认识:粘结滑移本构需针对大跨度构件修正,端部滑移限值宜 $\leq 0.8\text{ mm}$;抗剪连接件应按剪力流变间距布置,支座附近加密;型钢翼缘约束效应可提升混凝土性能,但需结合箍筋形成双重约束,控制翼缘宽厚比;长期收缩徐变与温度效应应采用时变分析。未来应建立考虑滑移、约束及时变效应的统一分析模型,推动更大跨度、更高性能发展。

[参考文献]

- [1]师宏智.大跨度型钢-混凝土组合结构的设计与应用[J].石材,2025,(6):75-77.
- [2]王雷森.大跨度高空悬挑型钢混凝土组合结构施工技术[J].中国建筑装饰装修,2025,(6):159-161.
- [3]汪家伟.型钢混凝土在大跨度大空间结构中的应用[J].工程建设与设计,2024,(17):180-182.

作者简介:

张建(1987--),男,汉族,湖南人,本科,高级工程师,研究方向:建筑工程。