

# 基于有限元法的钢-砼连续组合梁截面优化设计\*

刘齐茂<sup>1</sup>, 李微<sup>2</sup>

(1. 广西工学院 土木建筑系, 广西柳州 545006; 2. 东南大学 土木学院, 南京 210018)

**摘要:**给出了钢-混凝土连续组合梁截面计算机辅助优化设计的有效方法,以有限元结构分析和优化算法相结合为手段,提出了一种符合实际情况的钢-混凝土组合梁的剪力连接模式,建立钢-混凝土连续组合梁有限元分析模型、优化参数模型、优化数学模型,用 ANSYS 的参数化设计语言编制了分析文件和优化控制文件,经计算获得钢-混凝土连续组合梁的最优截面形式。该方法的优化效果显著,并且效率高,可广泛应用于钢-混凝土连续组合梁截面优化设计工程。

**关键词:**钢-混凝土连续组合梁; 截面优化设计; 有限元

**中图分类号:**TU398 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2005)05-0068-05

## Section Optimization Design of Steel - Concrete Continuous Composite Beams Based on the Finite Element Method

LIU Qi - mao<sup>1</sup>, LI Wei<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Guangxi Institute of Technology, Liuzhou 545006, P. R. China; 2. Department of Civil Engineering, South - east University, Nanjing 210018, P. R. China)

**Abstract:** This paper introduces the efficient computer aided design method to optimize the section of steel - concrete continuous composite beams by combining FEM for structure analysis with optimization arithmetic and an efficient shearing force link model of steel - concrete composite beams. The authors established a finite element analysis model, optimization parameter model, optimization mathematics model of steel - concrete continuous composite beams and programs analysis file and optimization control file by using the ANSYS parameter design language. The optimum of the steel - concrete continuous composite beams section is obtained after computing and the optimization result indicates that this method is efficient in optimizing the section of steel - concrete continuous composite beams. So it could be applied extensively in the steel - concrete continuous composite beams section optimization design.

**Keywords:** steel - concrete continuous composite beams; section optimization design; finite element

钢-混凝土组合结构是在钢结构和钢筋混凝土结构基础上发展起来的一种新型结构。和钢筋混凝土结构相比,可减少自重、减小地震作用、减小构件截面尺寸、增加有效使用空间、降低基础造价、节省支模工序和模板、缩短施工周期、增加构件和结构的延性等。和钢结构相比,可以减少用钢量、增加刚度、增加稳定性和整体性、增加结构抗火性和耐久性等。实践表明,钢-混凝土组合结构兼有钢结构和混凝土结构的优点。钢-混凝土组合梁是组合结构体系中重要的横向承重构件,在多层工业厂房、高层建筑、桥梁结构、结构的加固与修复等领域具有广泛的应用前景。钢-混凝土组合梁的造价比钢筋混凝土梁高30%~40%,比钢梁的造价可降低30%左右。根据国内外的研究和进展情况,目前钢-混凝土组

\* 收稿日期:2005-06-10

基金项目:广西工学院青年科学基金(500204)

作者简介:刘齐茂(1972-),男,硕士,讲师,主要从事结构优化设计的研究。

合梁仍存在许多需要研究和解决的问题,如组合梁在复合受力状态下的性能与设计方法、组合梁的截面优化、大跨组合梁的温度、徐变和收缩效应、新型组合梁的开发、钢-混凝土组合结构体系的整体性能、钢-混凝土组合楼盖的空间作用、组合梁在超高层建筑中的应用问题等<sup>[1,2]</sup>。以有限元结构分析和优化算法相结合为手段,在前人研究的基础上提出了一种符合实际情况的钢-混凝土组合梁的剪力连接模式,建立钢-混凝土连续组合梁有限元分析模型、优化参数模型,优化数学模型,用 ANSYS 的参数化设计语言编制了分析文件和优化控制文件,经计算获得钢-混凝土连续组合梁最优截面形式,给出了钢-混凝土连续组合梁截面计算机辅助优化设计的有效方法。

## 1 剪力连接模式及有限元分析模型

### 1.1 剪力连接模式

钢-混凝土组合梁常用的粘胶单元有双弹簧单元、四节点线性节理单元、滑移面单元等。在文献 [3] 中用空间梁单元来模拟连接件栓钉,但钢与混凝土交接面栓钉连接点外的其它节点没做处理,能很好模拟“滑移”现象,但分析结果有可能产生钢与混凝土材料重叠现象,在文献 [4] 中同样用空间梁单元来模拟连接件栓钉,钢与混凝土交接面栓钉连接点外的其它节点采用主从节点约束,在交接面形成刚性区,无法模拟钢与混凝土组合梁容易出现的“掀起”现象,在此基础上作者提出一种新的剪力连接模式,如图 1 所示,钢梁与混凝土板之间脱离一微小的距离,用空间梁单元来模拟连接件栓钉,钢与混凝土

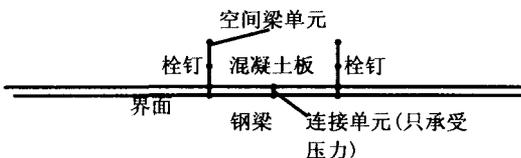


图 1 剪力连接模式

土交接面栓钉连接点外的其它节点用一种只能承受压力而不能承受拉力和剪力的单元连接,排除了可能产生钢与混凝土材料重叠现象,同时又很好模拟钢与混凝土组合梁容易出现的“掀起”现象。

### 1.2 有限元分析模型

混凝土板使用混凝土单元 solid65 离散,考虑裂缝产生引起的非线性现象,当单元产生裂缝后单元应力释放,不再承受荷载,将混凝土板划分为三层单元,由于连续组合梁产生负弯矩,为提高组合梁的承载能力,上层单元配有钢筋,钢筋方向平行于梁的方向,配筋率可给 0.2,如图 3 所示。钢梁使用壳单元 shell143 离散,栓钉使用空间梁单元 beam44 离散,其它连接单元用 link10 来模拟,并设置只承受压力的模式。用直接生成的方法生成全部单元,这样避免了由于优化过程中自由网格划分产生一些不适合非线性分析的单元而导致优化过程的中断。最后生成的有限元分析模型如图 2 所示。

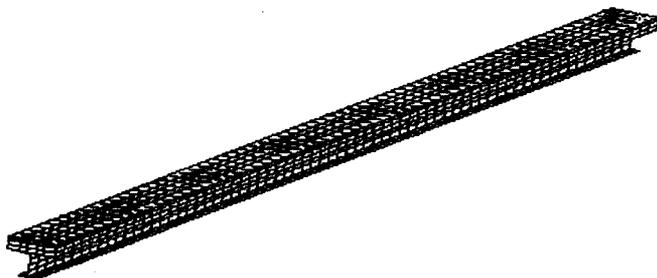


图 2 有限元分析模型

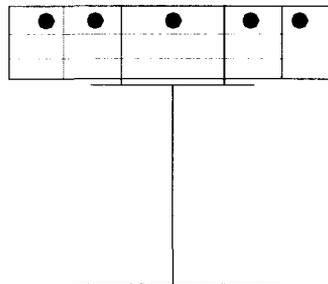


图 3 横截面单元划分

## 2 优化数学模型

### 2.1 优化参数模型

优化参数模型由图 4 所示,钢-混凝土组合梁的截面形式完全由参数  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$  控制,每个剪跨内栓钉的数量及长度一定,为保证栓钉有足够的抗剪能力,栓钉的半径取为设计变量  $x_9$ 。

## 2.2 优化数学模型的建立

### 2.2.1 设计变量

将控制截面形式的参数  $x_1 \sim x_8$  及栓钉半径  $x_9$  写成矢量形式:

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8] \quad (1)$$

### 2.2.2 目标函数

钢-混凝土组合梁的截面优化设计的目的是在满足一切约束的条件下使其造价最小化,故选取造价的高低来评价组合梁的优与劣,目标函数为组合梁的造价,但这里的造价只考虑购买材料的费用,不考虑其它费用。故目标函数可表示如下:

$$C(x) = P_s \cdot m_s(x) + P_c \cdot m_c(x) \quad (2)$$

式中:  $m_s(x)$ 、 $m_c(x)$  为钢梁、钢筋及栓钉的质量、混凝土板质量;  $P_s$ 、 $P_c$  为钢梁价格、混凝土板价格;  $C(x)$  为组合梁的造价。

### 2.2.3 约束条件

#### 1) 变形(挠度)约束条件

根据钢结构设计规范,对于楼盖和工作平台梁,主梁单跨容许挠度为  $\frac{l}{400}$ ,次梁单跨容许挠度为  $\frac{l}{250}$ 。

变形(挠度)约束条件:

$$v(x) \leq [v] \quad (3)$$

其中  $v(x)$  为组合梁挠度,  $[v]$  为容许挠度值。

#### 2) 钢梁约束条件

为保证钢梁的安全,钢梁截面正应力最大值  $\sigma_{s,max}(x)$  要求小于钢材的抗弯强度设计值  $f$ , 即:

$$\sigma_{s,max}(x) \leq f \quad (4)$$

钢梁截面剪应力最大值  $\tau_{s,max}(x)$  要求小于钢材的抗剪强度设计值  $f_v$ , 即:

$$\tau_{s,max}(x) \leq f_v \quad (5)$$

另外,钢板板件组合的受弯构件应符合局部稳定性要求,钢梁上翼缘的宽厚比要求:  $\frac{x_5 - x_3}{2x_6} \leq 15$

$\sqrt{\frac{235}{f_y}}$ , 整理:

$$x_5 - x_3 - 30 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \cdot x_6 \leq 0 \quad (6)$$

钢梁下翼缘的宽厚比要求:  $\frac{x_1 - x_3}{2x_2} \leq 15 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$ , 整理:

$$x_1 - x_3 - 30 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \cdot x_2 \leq 0 \quad (7)$$

钢梁腹板的宽厚比要求:  $\frac{x_4}{x_3} \leq 80 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$ , 整理:

$$x_4 - 80 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \cdot x_3 \leq 0 \quad (8)$$

其中  $f_y$  为钢材的屈服强度,单位 MPa。

#### 3) 混凝土板约束条件

为保证混凝土板的安全,避免混凝土被压溃,混凝土板截面弯曲受压应力最大值  $\sigma_{c,max}(x)$  要求小于混凝土板的抗压强度设计值  $f_{cm}$ , 即:

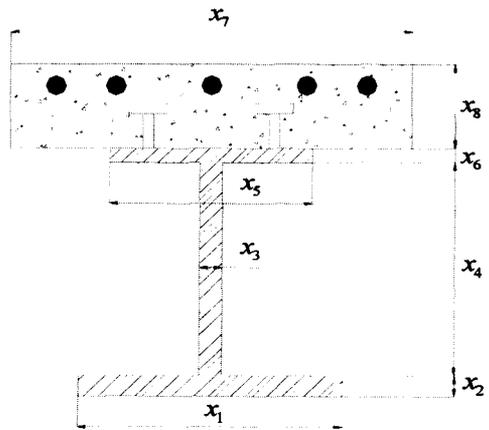


图4 优化参数模型

$$\sigma_{cmax}(x) \leq f_{cm} \quad (9)$$

混凝土板受拉部分可以产生裂缝,但为了保证钢梁与混凝土之间连接的可靠,混凝土板的上层单元和下层单元的混凝土材料所受的最大拉应力  $\sigma_{tmax}(x)$  小于混凝土极限抗拉强度  $f_t$ ,如图3所示,即:

$$\sigma_{tmax}(x) < f_t \quad (10)$$

#### 4) 栓钉约束条件

为了能有效地传递混凝土与钢材之间的剪力,栓钉必须具有一定的抗剪能力,栓钉截面上的最大剪应力  $\tau_{pmax}(x)$  须小于栓钉的抗剪强度设计值  $f_v$ ,即:

$$\tau_{pmax}(x) \leq f_v \quad (11)$$

#### 5) 几何约束条件

组合梁截面高度与其跨度的比值不应大于 1/15,即  $\frac{x_2 + x_4 + x_6 + x_8}{l} \leq \frac{1}{15}$ ,整理:

$$x_2 + x_4 + x_6 + x_8 \leq \frac{l}{15} \quad (12)$$

组合梁截面高度不宜超过钢梁高度的 2.5 倍,即  $x_2 + x_4 + x_6 + x_8 \leq 2.5(x_2 + x_4 + x_6)$ ,整理:

$$-1.5x_2 - 1.5x_4 - 1.5x_6 + x_8 \leq 0 \quad (13)$$

设计变量上下限约束为:

$$x \leq x_{max} \quad (14)$$

$$-x \leq -x_{min} \quad (15)$$

式中:  $x_{min}$  为设计变量的下限;  $x_{max}$  为设计变量的上限。

### 2.2.4 优化数学模型

由式(1)~(15)构造优化数学模型如下:

求  $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9]$

使  $\min C(x) = P_s \cdot m_s(x) + P_c \cdot m_c(x)$

s. t  $v(x) \leq [v]$

$$\sigma_{smax}(x) \leq f$$

$$\tau_{smax}(x) \leq f_v$$

$$x_5 - x_3 - 30 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \cdot x_6 \leq 0$$

$$x_1 - x_3 - 30 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \cdot x_2 \leq 0$$

$$x_4 - 80 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \cdot x_3 \leq 0$$

$$\sigma_{cmax}(x) \leq f_{cm}$$

$$\sigma_{tmax}(x) < f$$

$$\tau_{pmax}(x) \leq f_v$$

$$x_2 + x_4 + x_6 + x_8 \leq \frac{l}{15}$$

$$-1.5x_2 - 1.5x_4 - 1.5x_6 + x_8 \leq 0$$

$$x \leq x_{max}$$

$$-x \leq -x_{min}$$

其中  $v(x)$ 、 $\sigma_{smax}(x)$ 、 $\tau_{smax}(x)$ 、 $\sigma_{cmax}(x)$ 、 $\sigma_{tmax}(x)$ 、 $\tau_{pmax}(x)$  为设计变量  $x$  的隐函数,通过有限元结构分析获得。

### 3 优化算法

采用零阶优化算法。

### 4 算例

一跨长  $l=12\text{ m}$  的钢-混凝土连续组合梁(主梁),受到  $p=10\text{ kN/m}$  均布力作用。求该连续组合梁的最佳截面。钢材:Q235,价格:3000元/t;混凝土:C30,价格:300元/t。混凝土裂缝张开时剪应力传递系数为0.5,裂缝闭合时剪应力传递系数为0.8。

设计空间:  $x_{\min} = [0.12\ 0.005\ 0.005\ 0.03\ 0.12\ 0.005\ 0.3\ 0.08\ 0.004]\text{ m}$

$x_{\max} = [0.4\ 0.016\ 0.016\ 0.015\ 0.25\ 0.016\ 1.0\ 0.2\ 0.011]\text{ m}$

初始设计:  $x_{\text{initial}} = [0.2\ 0.01\ 0.013\ 0.08\ 0.19\ 0.01\ 0.8\ 0.12\ 0.005]\text{ m}$

最优设计:  $x_{\text{optimum}} = [0.120\ 6\ 0.005\ 0\ 0.005\ 9\ 0.131\ 6\ 0.130\ 7\ 0.005\ 0\ 0.301\ 1\ 0.080\ 1\ 0.008\ 0]\text{ m}$

初始设计的目标函数值:  $C(x_{\text{initial}}) = 4392.6$  (元)

最优设计的目标函数值:  $C(x_{\text{optimum}}) = 973.95$  (元)

迭代过程目标函数变化如图5所示,迭代次数为20次,第2、4、8、9、10为不可行设计点,最优设计为20设计点。

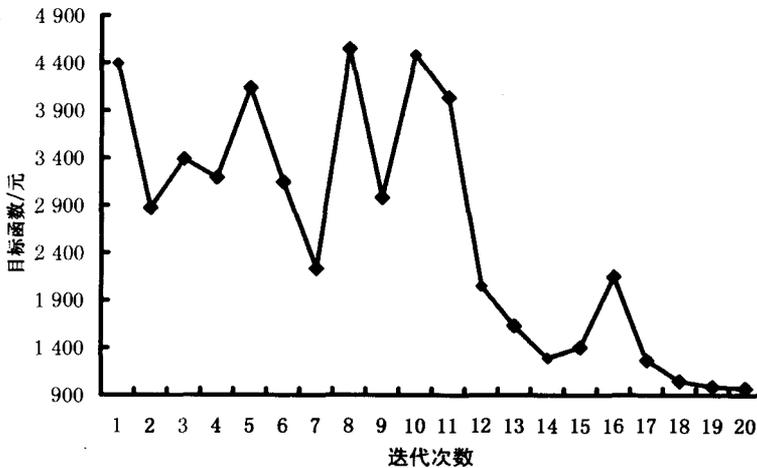


图5 目标函数的变化

### 5 结语

算例的优化过程及结果表明,钢-混凝土连续组合梁的造价由4392.6元降为973.95元,该方法的优化效果显著,并且效率高,将有限元结构分析和优化算法相结合的优化设计方法是钢-混凝土连续组合梁计算机辅助优化设计的有效方法。正确建立钢-混凝土连续组合梁的力学模型、有限元分析模型、优化参数模型、优化数学模型及正确处理钢与混凝土剪力连接模式是获得最优截面形式的关键,该优化设计方法适合于掌握有限元分析技术和优化算法的工程技术人员使用。

### 参考文献:

- [1] 聂建国,余志武. 钢-混凝土组合梁在我国的研究及应用[J]. 土木工程学报,1999,32(2):3-7.
- [2] 聂建国,樊建生. 国内钢-混凝土组合梁的研究及其应用综述[J]. 工程力学(增刊),2001:182-190.
- [3] 周凌宇,余志武,等. 钢-混凝土连续组合梁非线性有限元分析[J]. 长沙铁道学院学报,2003,21(2):9-13.
- [4] 余志武,蒋丽忠,等. 集中荷载作用下钢-混凝土组合梁界面滑移及变形[J]. 土木工程学报,2003,36(8):1-6.