

文章编号: 1000-8608(2013)02-0227-07

SCWCBM 中钢悬臂优化设计

王 骞^{*1}, 邱文亮¹, 张 哲¹, 张雪莉²

(1. 大连理工大学 桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116024;
2. 中国寰球工程公司 土建室, 北京 100028)

摘要: 混凝土箱梁正交异性钢悬臂板拓宽方法(SCWCBM)是一种新型的不增设桥墩的箱梁拓宽方法. 采用该法加宽后整个结构能协同安全工作的重要前提是确保钢悬臂结构与混凝土后浇隔板间的接触面受力合理, 在此前提下, 引入拓扑优化理论以指导钢悬臂梁的外形设计, 并结合施加预应力的钢悬臂结构的受力特点, 推导出保证接触面受力合理的横向体外预应力筋位置的理论范围的解析式. 最终提出基于钢-混凝土接触面受力问题的钢悬臂优化设计思路: 先对钢悬臂的外形进行拓扑优化计算, 再利用推导出的解析式求出横向体外预应力筋位置的理论范围, 随后进行接触面加劲肋的细部设计, 最后验算接触面应力. 按照该思路进行 SCWCBM 中钢悬臂优化设计可以减少不必要的试算次数, 节约计算资源, 为 SCWCBM 的推广提供理论支持.

关键词: 钢筋混凝土箱梁; 正交异性钢悬臂板拓宽方法; 接触面受力; 拓扑理论; 优化设计

中图分类号: U448.213; U448.15; U442.52 **文献标志码:** A

0 引言

混凝土箱梁正交异性钢悬臂板拓宽方法(orthotropic steel cantilever widening concrete box girder method, 简称 SCWCBM)是一种新型的箱梁拓宽方法. 该方法不同于以往的拓宽技术, 它充分利用了原有桥梁结构, 无需外加桥墩, 不占据桥下空间, 并能保证加宽后桥梁的运营可靠性, 非常适用于城市箱梁桥的拓宽^[1-2]. 目前 SCWCBM 已成功应用于大连市东北路立交桥的拓宽改造工程中^[3], 运营状况良好. 实际经验还表明, 该方法还具有施工周期短、施工期对桥下交通干扰小等特点.

SCWCBM 的特征是: 在不增设桥墩的前提下, 通过在混凝土箱梁两侧设置钢悬臂结构以达到拓宽原有桥梁的目的. 钢悬臂结构与原有混凝土箱梁间通过横向预应力筋连成整体. 新增设的钢悬臂横梁在顺桥向每隔一定长度成对地设置在

原有箱梁两侧, 钢悬臂横梁上铺设正交异性钢板作为拓宽的行车桥面. 在混凝土箱室内设置纵向体外预应力筋以增强原有混凝土梁的承载能力.

用钢悬臂梁加宽后的结构是钢-混凝土横向组合的特殊结构. 新结构引出新问题, 新增钢悬臂结构的设计是采用 SCWCBM 加宽的关键问题. 本文引入拓扑优化理论以指导钢悬臂梁的外形设计, 并根据平截面假定推导出横向预应力筋位置理论范围的解析表达式, 最终提出新增钢悬臂结构优化设计思路.

1 SCWCBM 优化设计的理论前提

SCWCBM 加宽后断面形式如图 1 所示.

为了使采用 SCWCBM 加宽后的特殊结构能有效地协同工作, 需协调解决两个关键问题: 第一, 应确保作用在钢悬臂上的荷载能有效地传向接触面; 第二, 确保新增的钢悬臂结构与混凝土箱梁间接触紧密且接触面混凝土不被压坏, 即保证

收稿日期: 2011-12-09; 修回日期: 2013-01-15.

作者简介: 王 骞^{*} (1982-), 女, 博士, 讲师, E-mail: wang_qian_82@163.com; 张 哲 (1944-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhangzhe@dlut.edu.cn.

接触面上不能出现拉应力且压应力不超过接触面混凝土的抗压强度。

在钢悬臂设计过程中,本文结合上述指标,引入拓扑优化理论,结合平截面假定,提出钢悬臂优化设计思路,预先给定满足要求的参数取值建议,以此减少盲目试算次数,进行有效设计。

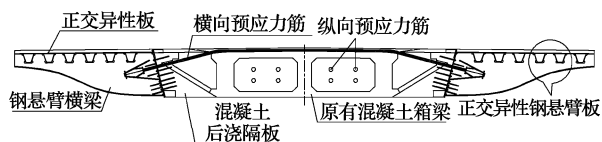


图 1 采用 SCWCBM 加宽后的箱梁断面

Fig. 1 The section of box girder widened by SCWCBM

2 钢悬臂的拓扑优化设计

拓扑优化是以结构拓扑变量为分析变量,在满足已知荷载工况和约束条件的情况下,在给定的设计区域内寻求材料最优分布的过程^[4]。对于试图产生超出设计者经验的新型结构,拓扑优化是一种很有价值的工具^[5-6]。近年来,结构拓扑优化设计正在成为结构优化研究领域的热点。汽车、飞机制造等领域,已经开始应用拓扑优化理论进行整体的布局优化,这股热潮正在国内兴盛起来^[7],但目前应用拓扑优化进行桥梁结构设计的工程实例并不多见。采用本文所述拓宽方法加宽后的箱梁属于非常规的特殊结构,新增钢悬臂结构的拓扑造型缺少可直接利用的工程经验,本文在钢悬臂构造设计过程中引入拓扑优化设计思路,不仅为钢悬臂构造的方案设计提供了有利的指导,而且推广了拓扑优化理论在桥梁设计中的应用。

2.1 数值模型

钢-混凝土接触面为该拓宽方法的受力关键部位,在追求整个钢悬臂横梁轻质、加工便利以及外形美观的优化设计过程中,应以保证作用在钢悬臂上的汽车荷载及恒载能有效地传向接触面为前提。

如图 2 所示,为了保证钢悬臂横梁与原有箱梁的连接质量,在箱梁两侧后浇混凝土隔板与新增钢悬臂横梁相接触。混凝土后浇隔板也需成对设置,其数量、位置与新增钢悬臂横梁的一致^[1,3]。图 2 中,接触面倾斜角度 θ 的取值应是综

合考虑如下因素的结果:横向体外预应力筋的布置应与接触面垂直,体外预应力筋穿过原有箱梁时应尽量少地破坏原有结构,横向体外预应力筋的转弯半径 R 需满足体外预应力筋的最小规定值。综合 θ 取值、钢悬臂的实际加宽幅度及荷载情况建立钢悬臂优化设计的数值模型。

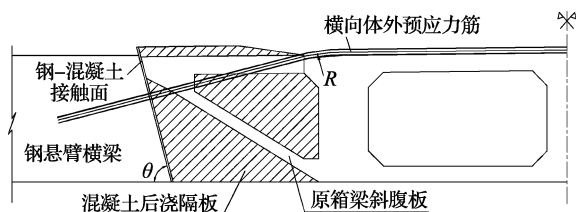


图 2 钢-混凝土接触面构造图

Fig. 2 Diagram of interface between steel and concrete

初始优化区域需视原结构需拓宽的幅度和原结构的梁高而定,初始优化区域的宽度即箱梁结构需要拓宽的宽度,为了保证与原结构行车桥面一致确定优化区域高度,由图 1 可见新增钢悬臂结构与原有箱梁的位置关系。鉴于实际的钢悬臂横梁顶部要设置正交异性桥面板,因此在钢悬臂横梁的顶部要预留安放桥面板的 U 形槽。为了掌握钢悬臂横梁将所受的荷载向接触面传递的最优路径,从模型简化的角度,将钢悬臂横梁接触面的一侧视作固结。

如图 3 所示,预留 U 形槽的单端固结的结构为钢悬臂拓扑优化的基本结构。

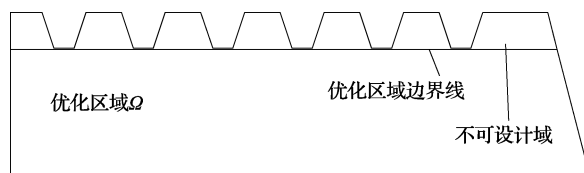


图 3 实际拓扑优化结构

Fig. 3 Actual structure for topological optimization

作用在钢悬臂横梁上的荷载有恒载均布力以及机动车车轮荷载。恒载均布力 q_0 为每个钢悬臂横梁均摊的正交异性桥面板及桥面铺装的恒载外力。车轮荷载按《公路桥涵设计通用规范》^[8] 的规定,进行最不利布载。如图 4 所示,以单侧加宽一个车道为例,钢悬臂加宽范围内至多可以布设两个车轮和一个车轮的局部。按照具体车辆荷载轴重及车轮作用范围可计算车轮均布荷载 q_1 。优化

分析的荷载工况一为恒载均布力 q_0 与实际最不利车轮荷载的综合作用,如图4所示。

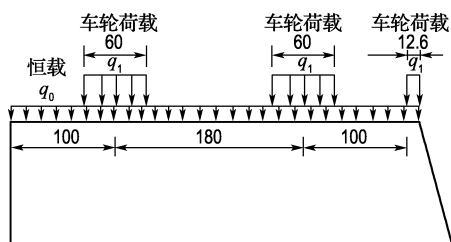


图4 工况一拓扑优化结构图(单位:cm)

Fig. 4 Topological optimization structure under Load Case 1 (unit: cm)

车轮荷载的位置在车轮可能通行的范围内是随机的、不固定的。因此,车轮荷载除了上述最不利布载情况外,还有其他多种布载形式。为了让优化分析的结果能广泛地适用于多种车轮布载情况,这里偏保守地将车轮荷载在其可能出现的范围内满布,图5所示为荷载分析工况二的布载情况。

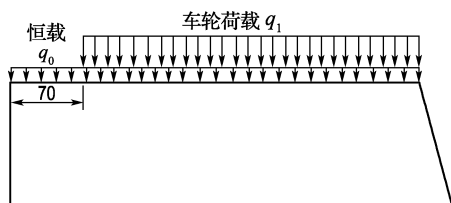


图5 工况二拓扑优化结构图(单位:cm)

Fig. 5 Topological optimization structure under Load Case 2 (unit: cm)

2.2 数学模型

本文将系统的柔度最小作为结构优化的目标函数。同样的设计区域,当边界条件及荷载一定时,系统柔度越小即代表刚度越大^[5,9]。

假定作用于系统的外力为 F ,则系统的应变能可表示为

$$E_s = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}^T(u) \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}(u) d\Omega = \frac{1}{2} \mathbf{F}^T \mathbf{U} \quad (1)$$

式中: Ω 为给定设计区域; $\boldsymbol{\varepsilon}(u)$ 为荷载 F 作用下的应变; u 为设计区域内任意一点在荷载作用下的弹性变形; $\mathbf{D}$ 为弹性矩阵; $\mathbf{F}$ 为节点的荷载向量; $\mathbf{U}$ 为节点的位移向量。

系统的平衡方程如下:

$$\mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{K}$ 表示系统的刚度矩阵,且 $\mathbf{K}^T = \mathbf{K}$,综合式

(1)、(2) 可得

$$E_s = \frac{1}{2} \mathbf{U}^T \mathbf{K}^T \mathbf{U} = \frac{1}{2} \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} \quad (3)$$

系统的柔度可描述为 $C = \mathbf{F}^T \mathbf{U}$,对比式(1),可知系统的柔度最小等价于系统的应变能最小。

建立钢悬臂结构的拓扑优化数学模型如下。

将材料模型表示为

$$\boldsymbol{\rho}(x) = x_i \boldsymbol{\rho}_0, \quad \mathbf{E}(x) = x_i^P \mathbf{E}_0$$

式中: $\boldsymbol{\rho}_0$ 和 $\mathbf{E}_0$ 分别是钢悬臂板剖分后的密度和弹性矩阵; x_i 为单元的相对密度, P 为惩罚因子。则本例中拓扑优化数学问题可被具体描述为

$$\text{Find } \mathbf{X} = (x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad \cdots \quad x_n)^T \quad (4)$$

目标函数为

$$\min c(x) = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} = \sum_{i=1}^n x_i^P \mathbf{U}_e^T \mathbf{K} \mathbf{U}_e \quad (5)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{i=1}^n x_i \leq f \\ \mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{F} \\ 0 < x_{\min} < x_i < 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中:单元相对密度 x_i 为设计变量; f 为体积系数。本例中的数学模型可以描述为寻找各单元的密度分布以使得整个结构的刚度最大。

拓扑优化分析过程中,除了建立合理的优化模型,尚应选择合适的优化算法,本文选用的是收敛速度较快的优化准则法^[10]。

如前文所述,图3所示的实际拓扑结构的主要设计荷载工况有两种。以数学模型中目标函数刚度最大为目标,计算材料的分布情况,优化结果见图6。其中黑色区域(彩图中为蓝色)表示材料密度为0,深灰色区域(彩图中为红色)表示材料密度为1,介于中间的浅灰色区域(彩图中为黄色、绿色)属材料分布中间过渡区,材料密度介于0、1之间,处理时按照0.5处理。

将所得的拓扑结果导入CAD制图软件中,可以根据材料分布情况设计出对结构刚度损害最小的钢悬臂外形,根据工况一和工况二的拓扑结果可以大致确定钢悬臂结构的外形如图6中白色线条所示。

钢悬臂流线外形设计的前提是保证钢悬臂能将荷载有效地传递给接触面,即不破坏设计域内荷载传递路径,保证结构刚度。综合考虑工况一和工况二钢悬臂外形边界,得到钢悬臂外形设计结

果如图 7 所示. 这属于钢悬臂外形的概念设计, 即初步设计.



(a) 工况一



(b) 工况二

图 6 拓扑优化结果

Fig. 6 Topological optimization result

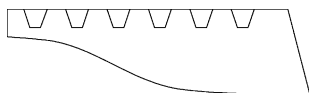


图 7 钢悬臂设计外形

Fig. 7 Appearance design for steel cantilever

3 横向预应力筋位置的理论推导

3.1 基本力学模型的建立

在进行钢悬臂横梁与混凝土后浇隔板之间的界面受力分析时假设钢悬臂横梁没有弹性变形, 只产生刚体移动和转动. 此时混凝土界面的反力呈直线分布, 如图 8、9 所示.

如前文所述, 确保加宽后的特殊结构协同工作的另一关键问题就是要使新增的钢悬臂结构与混凝土箱梁间接触紧密且接触面混凝土不被压坏, 即保证接触面上不能出现拉应力且压应力不超过接触面混凝土的抗压强度容许值.

分析实际工程情况, 从施工阶段到使用阶段, 钢-混凝土接触面的应力分布有两个临界工况. 临

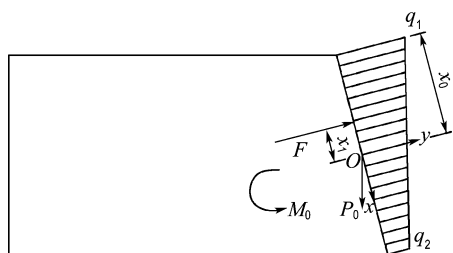


图 8 钢-混凝土接触面力学模型一

Fig. 8 Mechanical model one of steel-concrete interface

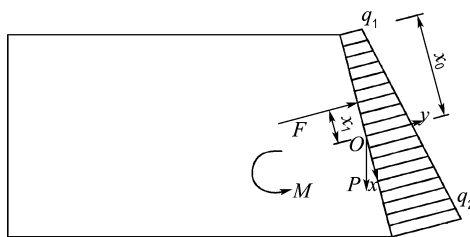


图 9 钢-混凝土接触面力学模型二

Fig. 9 Mechanical model two of steel-concrete interface

界工况一: 当钢悬臂横梁安装就位、横向预应力筋张拉完毕且正交异性桥面板及桥面铺装施工之前, 预应力荷载起主要作用, 该阶段钢-混凝土接触面上缘压应力最大, 下缘应力最小; 临界工况二: 当正交异性桥面板安装完毕, 桥面铺装就位后, 在使用过程中, 当车轮荷载位于横向最不利布载位置时 (参见图 4), 钢-混凝土接触面的上缘应力最小, 而下缘应力最大. 保证这两种临界工况下接触面的上、下缘均不出现拉应力, 且压应力不超过接触面混凝土的抗压强度容许值便可保证其他荷载工况下接触面的应力分布满足要求.

3.2 横向预应力筋作用位置的理论推导

3.2.1 临界工况一受力分析 该工况只有钢悬臂横梁的自重和体外预应力筋作用, 假定 O 为弯曲中心, 将钢悬臂横梁的自重简化为通过弯曲中心的集中力 P_0 和弯矩 M_0 , 横向体外预应力为 F , 其作用位置距离弯曲中心的距离为 x_1 ; 接触面长度为 l , 截面上缘距离弯曲中心的距离为 x_0 , 接触面下缘距离弯曲中心的距离为 $l - x_0$; 接触面上缘的反力为 q_1 , 接触面下缘的反力为 q_2 , 钢材的弹性模量远大于混凝土的弹性模量, 因此文中假定接触面上应力呈线性分布. 临界工况一的力学模型如图 8 所示.

由图 8 有

$$F - P_0 \cos \theta = \int_{-x_0}^{l-x_0} q(x) dx \quad (7)$$

$$Fx_1 + \int_{-x_0}^{l-x_0} q(x) x dx - M_0 = 0 \quad (8)$$

由式(7)有

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{2(F - P_0 \cos \theta)}{l} - q_2 \\ q_2 &= \frac{2(F - P_0 \cos \theta)}{l} - q_1 \end{aligned} \quad (9)$$

为保证钢悬臂横梁与混凝土后浇隔板间良好的界面联系, 应满足接触面下缘不出现拉应力且

上缘的压应力不超过接触面混凝土的抗压强度容许值 $[\sigma]$. 因此需满足 $q_1 \leq [\sigma]t$, t 为截面下缘混凝土后浇隔板的宽度, 同时应满足 $q_2 \geq 0$.

式(9) 结合上述安全要求, 则有

$$q_1 \leq \frac{2(F - P_0 \cos \theta)}{l} \quad (10)$$

$$q_2 \geq \frac{2(F - P_0 \cos \theta)}{l} - [\sigma]t$$

由 $q_1 \leq [\sigma]t$, 且

$$q_1 \leq \frac{2(F - P_0 \cos \theta)}{l} \Rightarrow q_1 \leq a_0 \quad (11)$$

其中 $a_0 = \min \left\{ [\sigma]t, \frac{2(F - P_0 \cos \theta)}{l} \right\}$.

由 $q_2 \geq 0$, 且

$$q_2 \geq \frac{2(F - P_0 \cos \theta)}{l} - [\sigma]t \Rightarrow q_2 \geq b_0 \quad (12)$$

其中

$$b_0 = \max \left\{ 0, \frac{2(F - P_0 \cos \theta)}{l} - [\sigma]t \right\}$$

再由式(8), 取 $x_0 = l/2$, 得到

$$Fx_1 - \frac{1}{2}(q_1 - q_2)l \left[\frac{2l}{3} - \frac{l}{2} \right] - M_0 = 0 \quad (13)$$

将式(9) 代入式(13) 有

$$Fx_1 - \frac{l^2}{6} \left[\frac{F - P_0 \cos \theta}{l} - q_2 \right] = M_0 \quad (14)$$

$$Fx_1 - \frac{l^2}{6} \left[q_1 - \frac{F - P_0 \cos \theta}{l} \right] = M_0 \quad (15)$$

由式(11)、(14) 得 $6(Fx_1 - M_0)/l^2 + (F - P_0 \cos \theta)/l \leq a_0$, 即

$$x_1 \leq \left[\frac{a_0 l^2 - (F - P_0 \cos \theta)l}{6} + M_0 \right] \cdot \frac{1}{F} \quad (16)$$

由式(12)、(15) 得 $(F - P_0 \cos \theta)/l - 6(Fx_1 - M_0)/l^2 \geq b_0$, 即

$$x_1 \leq \left[\frac{(F - P_0 \cos \theta)l - b_0 l^2}{6} + M_0 \right] \cdot \frac{1}{F} \quad (17)$$

综合式(16) 及式(17), x_1 取值有上限:

$$x_1 \leq \min \left\{ \left[\frac{a_0 l^2 - (F - P_0 \cos \theta)l}{6} + M_0 \right] \cdot \frac{1}{F}, \left[\frac{(F - P_0 \cos \theta)l - b_0 l^2}{6} + M_0 \right] \cdot \frac{1}{F} \right\} \quad (18)$$

3.2.2 临界工况二受力分析 将作用于钢悬臂横梁上的恒载及车轮荷载简化为通过接触面弯曲中心 O 的集中力 P 和弯矩 M , 横向体外预应力为

F , 其作用位置距离弯曲中心的距离为 x_1 , 基础面长度为 l , 截面上缘距离弯曲中心的距离为 x_0 , 接触面下缘距离弯曲中心的距离为 $l - x_0$; 接触面上缘的反力为 q_1 , 接触面下缘的反力为 q_2 , 仍假定接触面上应力呈线性分布. 临界工况二的力学模型如图 9 所示.

由图 9 有

$$F - P \cos \theta = \int_{-x_0}^{l-x_0} q(x) dx \quad (19)$$

$$Fx_1 + \int_{-x_0}^{l-x_0} q(x) x dx - M = 0 \quad (20)$$

沿 x 轴方向由摩擦力平衡应有

$$P \sin \theta < \mu \int_{-x_0}^{l-x_0} q(x) dx \quad (21)$$

由式(19)、(21) 有 $P \sin \theta < \mu(F - P \cos \theta)$, 因此体外预应力 F 取值有下限:

$$F > P \left[\frac{\sin \theta}{\mu} + \cos \theta \right] \quad (22)$$

为保证工况二钢悬臂横梁与混凝土后浇隔板间良好的界面联系, 应满足接触面上缘不出现拉应力且下缘的压应力不超过接触面混凝土的抗压强度容许值. 因此需满足 $q_1 \geq 0$, 同时应满足 $q_2 \leq [\sigma]t$, t 为截面下缘混凝土后浇隔板的宽度.

参照临界工况一推导过程, 得 x_1 取值有下限:

$$x_1 \geq \max \left\{ \left[M - \frac{(F - P \cos \theta)l - al^2}{6} \right] \cdot \frac{1}{F}, \left[M - \frac{bl^2 - (F - P \cos \theta)l}{6} \right] \cdot \frac{1}{F} \right\} \quad (23)$$

3.2.3 横向预应力筋作用位置及体外预应力取值 综合式(18)、(23), 横向预应力筋作用位置 x_1 的理论取值范围如下式所示:

$$x_1 \geq \max \left\{ \left[M - \frac{(F - P \cos \theta)l - al^2}{6} \right] \cdot \frac{1}{F}, \left[M - \frac{bl^2 - (F - P \cos \theta)l}{6} \right] \cdot \frac{1}{F} \right\};$$

$$x_1 \leq \min \left\{ \left[\frac{a_0 l^2 - (F - P_0 \cos \theta)l}{6} + M_0 \right] \cdot \frac{1}{F}, \left[\frac{(F - P_0 \cos \theta)l - b_0 l^2}{6} + M_0 \right] \cdot \frac{1}{F} \right\} \quad (24)$$

合理的 F 、 x_1 取值是保证接触面受力满足要求的重要前提. 综上所述, 在进行 SCWCBM 横向体外预应力筋设计时, 需以式(10) 为参照, 根据式(10) 可确定横向体外预应力 F 的取值界限, 在

此范围内设定预应力筋的型号、根数,确定 F 值,再由式(24),计算求得 x_1 的取值范围,即横向体外预应力筋作用位置的理论范围.调节 F 值,至横向预应力筋作用位置合理可行为止.

4 钢悬臂优化设计思路

综合钢悬臂拓扑优化设计及横向预应力筋位置的理论推导结果,提出混凝土箱梁正交异性钢悬臂板拓宽方法中的钢悬臂部分优化设计思路:首先对设定区域进行拓扑优化计算,根据优化结果设计钢悬臂横梁的外形;在此外形的基础上结合实际工程的两种临界工况推导出横向体外预应力筋的取值界限及横向预应力筋合理作用范围;选取合适的 F 值,确保横向体外预应力筋的位置合理可行;随后进行钢悬臂横梁接触面附近加劲肋的细部设计;最后对临界工况下钢-混凝土接触面的接触应力进行有限元精确分析,验证各设计参数的取值是否合理.按照该优化设计思路进行的 SCWCBM 钢悬臂优化设计可以有效减少试算次数,节约计算资源.

5 工程应用

大连市东北路立交桥拓宽改造工程采用该优化设计思路进行钢悬臂设计,确定的钢悬臂横梁外形尺寸及横向预应力筋位置能够确保接触面应力满足要求^[11],并通过足尺模型试验验证了数值模拟结果的正确性^[1],表明该钢悬臂优化设计思路是合理可行的.

6 结 论

(1)在钢悬臂梁构造设计过程中,引入拓扑优化理论,构建钢悬臂结构的数学模型,选定合适的优化算法,优化迭代求得设计区域内合理的材料分布结果.该拓扑结果可为 SCWCBM 钢悬臂梁的外形设计提供理论依据.

(2)进行了钢悬臂横梁与混凝土后浇隔板之间的界面受力分析.为保证任何荷载工况下接触面上不出现拉应力,且压应力不超过后浇隔板混凝土的抗压强度容许值,创建了两种临界荷载工况下的钢悬臂梁的基本力学模型,根据平截面假定推导出横向预应力筋理论作用范围的解析表达式.

(3)给出基于钢-混凝土接触面受力问题的优化设计思路.采用该优化设计思路进行 SCWCBM 钢悬臂优化设计可以减少不必要的试算次数,极大地节约计算资源,达到快速准确设计的目的.该设计思路和方法为 SCWCBM 的推广提供了理论支持.

参考文献:

- [1] WANG Qian, SHI Lei, ZHANG Zhe. A new widening method of reinforced concrete box girder and its experimental research [C] // **Advanced Materials Research**. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd., 2011:3724-3729.
- [2] WANG Qian, ZHANG Zhe. Orthotropic steel cantilever widening method of concrete box girder [J]. **Structural Engineering International**, 2011, 21(2):228-231.
- [3] WANG Qian, SHI Lei, ZHANG Zhe. Application of a new kind of widening method in Dalian Northeast Road overpass improvement project [C] // **Proceedings of the 9th International Conference on Civil and Environmental Engineering**. Beijing:China Architecture & Building Press, 2010.
- [4] 谢 涛,刘 静,刘军考. 结构拓扑优化综述[J]. 机械工程师, 2006(8):22-25.
XIE Tao, LIU Jing, LIU Jun-kao. An overview on the topological optimization of structures [J]. **Mechanical Engineer**, 2006(8):22-25. (in Chinese)
- [5] 杨贵玉. 拓扑优化方法及其在微型柔性机构设计中应用的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2004.
YANG Gui-yu. Research on the method of topology optimization and its application in design of MEMS compliant mechanism[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2004. (in Chinese)
- [6] 邵新妍,逢毓卓. 浅谈结构拓扑优化设计[J]. 科技咨询导报, 2007(3):24-25.
SHAO Xin-yan, FENG Yu-zhuo. Discussion on topological optimization design [J]. **Science and Technology Consulting Herald**, 2007(3):24-25. (in Chinese)
- [7] 穆春燕. 拓扑优化理论及其在拱坝优化设计中的应用[D]. 南京:河海大学, 2006.
MU Chun-yan. Topology optimum design theory

- and its application on optimization design of arch dam [D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese)
- [8] 中交公路规划设计院. JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004. CCC Highway Consultants Co., Ltd.. JTG D60-2004 General Code For Design of Highway Bridges and Culverts [S]. Beijing: China Communication Press, 2004. (in Chinese)
- [9] 朱灯林, 陈俊伟, 俞 洁, 等. 结构拓扑优化设计的研究现状及其应用[J]. 机械制造与自动化, 2005, 36(6): 7-11. ZHU Deng-lin, CHEN Jun-wei, YU Jie, *et al.* Developments of structural topology design and its application in structural design [J]. **Machine Building & Automation**, 2005, 36(6): 7-11. (in Chinese)
- [10] Rozvany G, ZHOU M. The COC algorithm, Part I: Cross-section optimization or sizing [J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 1991, 89(11): 281-308.
- [11] WANG Qian, QIU Wen-liang, LI Fei-ran, *et al.* Contact stress analysis of steel concrete box girder widened by orthotropic steel cantilever [C] // **Proceeding of the 10th International Conference on Civil and Environmental Engineering**. Taiwan: National Central University, 2011.

Optimization design of steel cantilever in SCWCBM

WANG Qian^{*1}, QIU Wen-liang¹, ZHANG Zhe¹, ZHANG Xue-li²

(1. Institute of Bridge Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. China Huanqiu Contracting & Engineering Corporation, Civil Department, Beijing 100028, China)

Abstract: Orthotropic steel cantilever widening concrete box girder method (SCWCBM) is a new box girder widening method without piers. Ensuring the reasonable stress on the interface between the steel cantilever and the concrete post-diaphragm is an important precondition to guarantee the entire structures widened by SCWCBM work together. On this basis, the topological optimization theory is applied to the shape design of steel cantilever beam. The mechanical model for the prestressed steel cantilever is built and the analytical expression of the reasonable acting position of the transverse external tendon on the steel cantilever is deduced. At last, based on the issue of steel-concrete interface contact state, the steel cantilever optimization designing idea is proposed: firstly, designing the optimum topological shape of the steel cantilever, and determining the acting position of the transverse external tendon by the deduced analytical expression; and then, designing the ribs on the steel interface; finally, calculating the stress of the contact surface. According to the optimization design idea, the times of trial calculation can be decreased and the resources of computing are economized effectively. The research results provide theoretical support for the popularization and application of SCWCBM.

Key words: reinforced concrete box girder; orthotropic steel cantilever widening method; interface stress; topological theory; optimization design