

# 轨道交通“双 U+箱形”截面桥梁剪力滞效应 简化计算方法

王珊珊<sup>1</sup>, 陈浩<sup>2</sup>, 程浩<sup>3</sup>, 王俊<sup>3</sup>

(1. 中国建筑第八工程局有限公司, 江苏 南京 210008;  
2. 南京地铁建设有限责任公司, 江苏 南京 211806; 3. 南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 211800)

**摘要:** 针对轨道交通“双 U+箱形”组合梁截面, 通过分析其竖向弯曲时截面上的剪力流分布规律, 引入顶板悬挑段与顶板、底板与顶板剪力流的比来反映截面剪力流对剪切变形的影响, 定义各翼板符合其剪切变形规律的翘曲位移函数, 基于能量变分法推导剪力滞的控制微分方程, 建立连续梁剪力滞效应简化计算方法。以“双 U+箱形”组合连续梁为算例, 将自重和轨检车荷载单独作用下的剪力滞系数解析解与有限元结果进行对比分析, 并讨论梁高和腹板厚度对剪力滞效应的影响。结果表明: 按简化计算方法得到的应力与有限元结果吻合较好, 轨检车荷载作用下的剪力滞效应比均布荷载作用下的更为明显, 且梁高和腹板厚度的变化会减弱截面的剪力滞效应。本文提出的简化计算方法可为复杂截面连续桥梁安全评估提供参考。

**关键词:** 双 U+箱形; 剪力滞; 解析法; 能量变分法; 轨道交通

**中图分类号:** U441+.5; U448.21+4

**文章编号:** 1671-7627(2023)03-0300-08

## Simplified analytical method for shear lag effects of bridges with “double-U-box” cross section in rail transportation

WANG Shanshan<sup>1</sup>, CHEN Hao<sup>2</sup>, CHENG Hao<sup>3</sup>, WANG Jun<sup>3</sup>

(1. China Construction Eighth Engineering Division Co. Ltd., Nanjing 210008, China;  
2. Nanjing Metro Construction Co. Ltd., Nanjing 211806, China;  
3. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China)

**Abstract:** By analyzing the distribution law of shear flow on the “double-U-box” composite girder cross-section in rail transportation, the shear flow ratios of the top plate cantilever section to the top plate and of the bottom plate to the top plate were introduced to reflect the effects of the cross-section shear flow on the shear deformation. The warping displacement function of each flange plate was defined in accordance with its shear deformation. Based on the energy variation method, the shear lag governing differential equation was derived and the simplified analytical method for shear lag effect of continuous beam was established. The analytical solution of shear lag coefficient under the independent action of self weight and rail inspection vehicle load was compared with the finite element results using the “double-U-box” composite

收稿日期: 2021-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(51578283); 江苏省六大人才高峰项目(JZ-024)

作者简介: 王珊珊(1989—), 女, 工程师, E-mail: 695288121@qq.com; 王俊(联系人), 教授, E-mail: wangjun3312@njtech.edu.cn.

引用格式: 王珊珊, 陈浩, 程浩, 等. 轨道交通“双 U+箱形”截面桥梁剪力滞效应简化计算方法[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2023, 45(3): 300-307.

WANG Shanshan, CHEN Hao, CHENG Hao, et al. Simplified analytical method for shear lag effects of bridges with “double-U-box” cross section in rail transportation[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2023, 45(3): 300-307.

continuous girder as an example, and the effects of beam height, web thickness on shear lag effect were discussed. Results showed that the stress obtained by the simplified analytical method was in good agreement with the finite element results. The shear lag effect under the rail inspection vehicle load was more obvious than that under the uniformly distributed load, and the shear lag effect of the section was reduced by the change in beam height and web thickness. The simplified analytical method proposed in this paper can provide a reference for the safety assessment of continuous bridges with complex cross sections.

**Key words:** double-U-box; shear lag; analytical method; energy variation method; rail transportation

“双U+箱形”组合截面梁是箱形梁在城市轨道交通中演化出的一种新型桥梁结构形式,其特征主要体现在:一是U形腹板结构可作为栏板、接触网立柱基础和声屏障等,使附属结构成为桥梁主体结构的一部分<sup>[1]</sup>;二是截面抗弯刚度大;三是腹板较多,腹板与翼板连接处复杂。由于U形和箱形截面梁中均存在剪力滞效应,容易引起翼和腹板连接处局部应力偏大,严重时可导致混凝土开裂。国内外学者对薄壁箱梁剪力滞效应问题进行了大量的试验研究、有限元模拟和理论分析<sup>[2-6]</sup>,但对U形、U形与箱形组合截面的剪力滞效应研究尚未见相关文献报道。

目前,箱梁剪力滞效应解析计算方法主要有比拟杆法<sup>[7-11]</sup>和能量变分法<sup>[12-19]</sup>。赵志峰等<sup>[7]</sup>采用比拟杆法、有限元法和有机玻璃模型试验分析了单箱三室简支梁及连续梁在均布荷载和集中荷载作用下的剪力滞效应,结果表明:比拟杆法的分析误差总体在10%以内。郭增伟等<sup>[8]</sup>推导了变截面箱梁加劲杆等效面积和剪力滞效应的微分方程,研究了悬臂梁梁高和腹板厚度变化对剪力滞效应的影响,结果表明:比拟杆法的计算精度较好。孙志伟等<sup>[9]</sup>提出一种基于反弯点结合比拟杆法和叠加原理的箱梁剪力滞简化计算方法,研究了连续刚构桥的剪力滞效应和有效分布宽度,其剪力滞系数解析解与数值模拟的偏差均在±5%范围内。比拟杆法目前多适用于等截面梁的剪力滞效应问题分析。

采用能量变分法求解剪力滞问题时,计算精度依赖于假定的翘曲位移函数<sup>[12-19]</sup>。目前,应用较多的翘曲位移函数有抛物线函数、三角函数和双曲线函数。翼板、顶板和底板可以选用不同的抛物线位移函数<sup>[12]</sup>,并考虑剪力滞效应引起的附加挠度<sup>[13-14]</sup>。截面中性轴的位置可以通过轴力平衡条件来定位<sup>[15]</sup>。将纵向位移函数定义为剪力滞翘曲位移、初始剪切变形、弯曲、轴向和校正5种变形模式之和<sup>[16]</sup>,并考虑弯曲剪力流对薄壁箱梁弯曲曲率

和顶底板纵向翘曲位移差函数的影响<sup>[17]</sup>,考虑梗腋特性参数对翘曲位移的影响<sup>[18]</sup>,对翼板引入受边界条件影响的修正系数<sup>[19]</sup>。目前,基于能量变分法的计算精度可控制在10%以内,能量变分法可以得到控制微分方程及较高精度的闭合解,既能反映箱梁任意截面上的剪力滞效应分布规律,还能逐一研究各个参数对剪力滞效应的影响。

以南京市宁句线某轨道交通连续U形梁桥为例,通过分析“双U+箱形”组合梁在竖向弯曲时翼板上的剪力流分布规律,引入顶板悬挑段与顶板、底板与顶板剪力流的比来反映截面剪力流对剪切变形的影响,定义各翼板符合其剪切变形规律的翘曲位移函数,利用能量变分法,建立了等截面连续“双U+箱形”梁剪力滞系数计算方法。以一座三跨“双U+箱形”截面连续梁桥为算例,验证自重和轨检车荷载作用下简化计算方法的可靠性,并讨论了梁高和腹板厚度对剪力滞效应的影响。

## 1 “双U+箱形”组合梁剪力滞效应微分方程

### 1.1 组合梁翼板剪力流分布规律

翼板的剪切变形由其内部总剪力流( $q$ )的大小决定<sup>[20]</sup>,对于具有2个箱室的“双U+箱形”闭口截面薄壁梁(图1),计算时须沿母线切开2个切口,此开口截面在剪力作用下的剪力流为 $q_0$ ,在每个切口处会有附加剪力流 $q_i(i=1,2)$ ,假设截面上的剪力流方向如图2所示。图1和2中, $L$ 、 $L_1$ 、 $L_w$ 分别为截面总宽度、顶板(底板)和顶板悬挑段的宽度; $t_u$ 、 $t_b$ 、 $t_w$ 分别为顶板、底板和顶板悬挑段的厚度; $t_f$ 、 $t'_f$ 分别为箱梁部分和U形梁部分边腹板厚度; $t_s$ 、 $t'_s$ 分别为箱梁部分和U形梁部分中腹板厚度; $h_1$ 为截面顶部至顶板中性面的距离; $h_2$ 、 $h_3$ 分别为顶板和底板中性面至截面中性轴的距离; $H$ 为截面高度; $Q_s$ 为计算截面处的剪力; $s$ 为剪力流的计算路径。

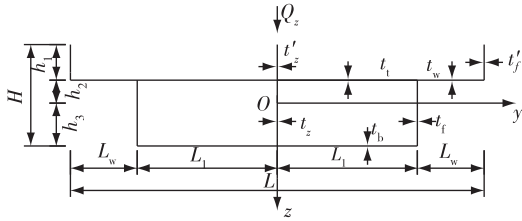


图1 “双U+箱形”截面示意

Fig.1 Schematic of “double-U-box” cross section

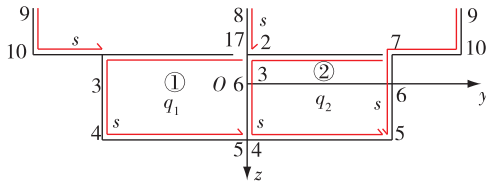


图2 开口截面剪力流方向

Fig.2 Shear flow direction of open cross section

开口截面的剪力流计算公式为<sup>[20]</sup>

$$q_0 = -\frac{Q_z}{I_y} S_y \quad (1)$$

式中:  $I_y$  为截面绕  $y$  轴的惯性矩;  $S_y$  为起始点到计算点的静矩,  $S_y = \int_0^s z t_i ds$ ,  $t_i$  为计算路径上板的厚度,  $s_i$  为计算路径在截面上的位置。

由式(1)可以看出:“双U+箱形”截面  $s_i$  位置处的剪力流大小由该位置处的  $S_y$  决定,剪力流的方向以逆时针为负。经验算,若图2中2号箱室5点处的剪力流满足剪力流平衡原理,则所假设的剪力流路径正确。

对于多室闭口截面薄壁梁,第  $i$  室的位移协调条件为<sup>[20]</sup>

$$\oint_i \frac{q_0}{Gt} ds + q_i \oint_i \frac{ds}{Gt} + \sum_k q_k \int_{i,k} \frac{ds}{Gt} = 0 \quad (2)$$

式中:  $\oint_i ds$  为沿截面第  $i$  室路径进行积分;  $q_k$  为与  $i$  号相邻的  $k$  号箱室的附加剪力流;  $\int_{i,k} ds$  为沿  $i$  号和相邻  $k$  号箱室的公共箱壁路径进行积分;  $t$  为箱室在相应位置的壁厚;  $G$  为剪切模量。

对于图1中简化后的“双U+箱形”截面,在假设的U形部分腹板剪力流路径正确的基础上,令

$$\oint_1 \frac{q_0}{t} ds = \alpha, \oint_2 \frac{q_0}{t} ds = \beta, \oint_{1,2} \frac{1}{t} ds = \varepsilon_1, \oint_{2,1} \frac{1}{t} ds = \varepsilon_2, \oint_1 \frac{1}{t} ds = \delta_1, \oint_2 \frac{1}{t} ds = \delta_2, \text{则针对“双U+箱形”截面}$$

薄壁梁的位移协调条件为

$$\begin{cases} \alpha + q_1 \delta_1 - q_2 \varepsilon_1 = 0 \\ \beta + q_2 \delta_2 - q_1 \varepsilon_2 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

解得

$$q_1 = \frac{\alpha \delta_2 + \beta \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \varepsilon_2 - \delta_1 \delta_2} \quad (4)$$

$$q_2 = \frac{\alpha \varepsilon_2 + \beta \delta_1}{\varepsilon_1 \varepsilon_2 - \delta_1 \delta_2} \quad (5)$$

式中:  $q_1$  为单箱双室截面左室的附加剪力流;  $q_2$  为右室的附加剪力流。

利用叠加原理,可得翼板上各点处的剪力流。

顶板悬挑段和两块腹板支撑部分顶板的剪力流比( $\eta_1$ )可通过其交接位置2点处左右两侧位置处剪力流的比来表示,如式(6)所示。

$$\eta_1 = \frac{q_{2左}}{q_{2右}} = \frac{q_{02左}}{q_{02右} + q_1} \quad (6)$$

式中:  $q_{02左}$  为开口截面2点位置左侧的剪力流;  $q_{02右}$  为开口截面2点位置右侧的剪力流;  $q_{2左}$ 、 $q_{2右}$  分别为闭口截面2点位置左侧和右侧的剪力流。

剪力流是由腹板传递给翼板的,则底板和顶板的剪力流比( $\eta_2$ )可通过边腹板2和4点处剪力流的比来表示,如式(7)所示。

$$\eta_2 = \frac{q_{2下}}{q_{4上}} = \frac{q_{02左} + q_{02右} + q_1}{q_{04上} + q_1} \quad (7)$$

式中:  $q_{04上}$  为开口截面箱形部分中腹板4点位置左侧的剪力流;  $q_{2下}$ 、 $q_{4上}$  分别为闭口截面2点位置下侧和4点位置上侧的剪力流。

## 1.2 翼板剪滞翘曲位移函数

“双U+箱形”组合梁在对称挠曲时,翼板会发生剪切变形,已不满足平截面假定,这时不能仅用竖向挠度  $w(x)$  来描述其挠曲变形,故定义  $w(x)$  为梁的竖向挠度,  $u(x)$  为剪切转角的最大差值,  $u(x, y, z)$  为梁的纵向位移,  $f(y, z)$  为剪滞翘曲位移函数。假定翼板的纵向位移沿横向为三次抛物线分布,基于各翼板剪力流分布规律,分别定义各翼板的剪滞翘曲位移函数。“双U+箱形”截面几何参数如图3所示,其中  $2b_1$ 、 $2b_2$ 、 $2b_3$  分别为顶板、底板和顶板悬挑段的宽度;  $2t_1$ 、 $2t_2$ 、 $2t_3$  分别为顶板、底板和顶板悬挑段的厚度;  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  分别为中腹板、箱梁部分和U形梁部分边腹板厚度;  $b_4 = b_2 + a_1/2$ ;  $b_5 = b_1 + b_3 + a_2$ ;  $b = 2(b_4 + b_5 + a_3)$ 。

此时,梁截面各翼板的纵向位移  $u(x, y, z)$  可表示为

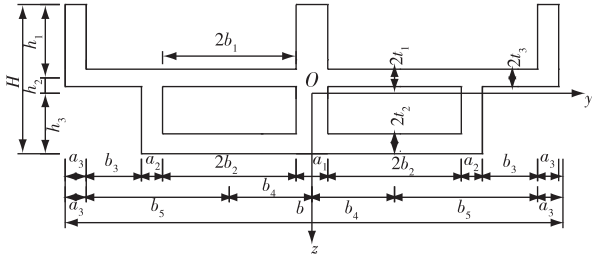


图3 “双U+箱形”截面几何参数

Fig.3 Geometric parameters of “Double-U-box” cross section

$$u(x, y, z) = Z_i \frac{dw}{dx} + f(y, z) u(x) \quad (8)$$

式中:  $Z_i$  为截面形心到顶板、顶板悬挑段或底板的距离。

由于箱形截面的剪切变形与截面上剪力流的分布有关<sup>[20]</sup>, 本文假定翼板的纵向位移沿截面横向为三次抛物线分布, 并考虑截面剪力流对剪切变形的影响, 在基于剪切变形规律的翘曲位移函数中引入顶板悬挑段和顶板的剪力流比( $\eta_1$ ), 底板和顶板的剪力流比( $\eta_2$ )的影响, 如式(9)所示。

$$f(y, z) = \begin{cases} f_1(y, z) = Z_i \left[ 1 - \frac{(y-b_4)^3}{b_2^3} \right] & \text{顶板} \\ f_2(y, z) = Z_i \left[ 1 - \frac{(b_4+b_5-y)^3}{b_3^3} \right] \eta_1 & \text{顶板悬挑段} \\ f_3(y, z) = Z_i \left[ 1 - \frac{(y-b_4)^3}{b_1^3} \right] \eta_2 & \text{底板} \\ 0 & \text{腹板} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $f_1(y, z)$ 、 $f_2(y, z)$ 、 $f_3(y, z)$  分别为顶板、顶板悬挑段和底板的翘曲位移函数。

### 1.3 控制微分方程及闭合解

#### 1.3.1 结构总势能

梁弯曲时的外力势能( $\bar{W}$ )为<sup>[20]</sup>

$$\bar{W} = - \int M(x) \frac{d^2 w}{dx^2} dx \quad (10)$$

式中:  $M(x)$  为梁截面承受弯矩。

梁的应变能( $\bar{V}$ )为

$$\bar{V} = \bar{V}_w + \bar{V}_{st} + \bar{V}_{sb} + \bar{V}_{sp} \quad (11)$$

式中: 腹板应变能  $\bar{V}_w = \frac{1}{2} \int EI_w \left( \frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx$ ; 顶板应变

能  $\bar{V}_{st} = \frac{1}{2} \iint 2t_2 (E\varepsilon_{st}^2 + G\gamma_t^2) dx dy$ ; 底板应变能  $\bar{V}_{sb} =$

$\frac{1}{2} \iint 2t_1 (E\varepsilon_{sb}^2 + G\gamma_b^2) dx dy$ ; 顶板悬挑段应变能  $\bar{V}_{sp} = \frac{1}{2} \iint 2t_3 (E\varepsilon_{sp}^2 + G\gamma_p^2) dx dy$ ;  $E$ 、 $G$  分别为弹性模量和剪切模量。

则体系的总势能( $\Pi$ )为

$$\Pi = \int M(x) \frac{d^2 w}{dx^2} dx + \frac{1}{2} E \int \left[ I_w \left( \frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 + 2I_1 w'' u' + I_2 u'^2 + A \frac{G}{E} u^2 \right] dx \quad (12)$$

式中:  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $A$  为常数,  $I_1 = \frac{3}{4} (I_{st} + \eta_1 I_{sb} + \eta_2 I_{sp})$ ,  $I_2 =$

$\frac{9}{14} (I_{st} + \eta_1^2 I_{sb} + \eta_2^2 I_{sp})$ ,  $A = \frac{9}{5} \left( \frac{I_{st}}{b_1^2} + \frac{\eta_1^2 I_{sb}}{b_2^2} + \frac{\eta_2^2 I_{sp}}{b_3^2} \right)$ ;  $I_{st}$ 、 $I_{sb}$ 、 $I_{sp}$  分别为顶板、底板和顶板悬挑段对截面形心惯性矩。

#### 1.3.2 微分方程与边界条件

基于变分法原理, 对式(12)进行变分运算, 得到微分方程, 如式(13)所示。

$$\begin{cases} EI w'' + EI_1 u' + M(x) = 0 \\ -EI_2 u'' - EI_1 w'' + GA u = 0 \\ (EI_2 u' + EI_1 w'') \delta u \Big|_{x_1}^{x_2} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $I$  为组合截面惯性矩。

整理式(13), 并令

$$\begin{cases} \varphi = \frac{II_1}{I_2 I - I_1^2} \\ k = \sqrt{\frac{GA \varphi}{EI_1}} \end{cases} \quad (14)$$

可得

$$u'' - k^2 u = \frac{Q(x) \varphi}{EI} \quad (15)$$

式中:  $\varphi$ 、 $k$  为常数;  $Q(x)$  为梁截面承受的剪力。

其中,  $u(x)$  可根据梁的荷载情况、边界条件和计算截面位置确定。

#### 1.3.3 截面上的应力与附加弯矩

由式(13)可得, 附加弯矩( $M_F$ )可表示为

$$M_F = EI_1 u'(x) \quad (16)$$

则梁截面上任一点纵向应力( $\sigma_x$ )的表达式为

$$\sigma_x = \pm \left[ \frac{M(x)}{I} Z_i - E \left( f(y, z) - \frac{I_1}{I} Z_i \right) u' \right] \quad (17)$$

代入式(9)可得各翼板的应力表达式。



### 1.4 连续梁桥的剪力滞效应求解

由式(15)可知,简支梁在均布荷载和集中荷载作用下的剪切转角最大差值  $u(x)$  可分别由相应荷载工况下的边界条件和连续条件求得。

对于连续梁,可先取一基本体系(一般取简支梁),然后分别将荷载和解除的超静定反力施加在基本体系上,最后利用叠加原理进行求解<sup>[20]</sup>,如式(18)所示。

$$\lambda = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n \lambda_i M_i \quad (18)$$

式中:  $M$  为连续梁在荷载作用下计算截面处弯矩;  $M_i$  为基本体系在单一荷载作用下计算截面处弯矩;  $\lambda$ 、 $\lambda_i$  分别为连续梁和基本体系在相应荷载作用下计算截面处的剪力滞系数,  $\lambda_i = \sigma_i / \bar{\sigma}_i$ , 其中  $\sigma_i$ 、 $\bar{\sigma}_i$  分

别为基本体系在相应荷载作用下计算截面处的实际应力和按初等梁理论计算所得的应力。

## 2 算例分析

以南京市宁句线某轨道交通一座跨度为 35 m+50 m+35 m 的连续 U 形梁桥截面为例,实际截面尺寸如图 4 所示。为方便计算,简化后的截面形式及计算点位置如图 5 所示,混凝土为 C60,集中荷载以轨检车辆荷载为例,轨检车轴距、轴重及加载位置如图 6 所示,其中最不利荷载位置由跨中截面弯矩影响线求得。由于主梁中跨跨中截面纵向应力变化及剪力滞效应较边跨跨中明显<sup>[21]</sup>,故选取中跨跨中截面作为计算截面。

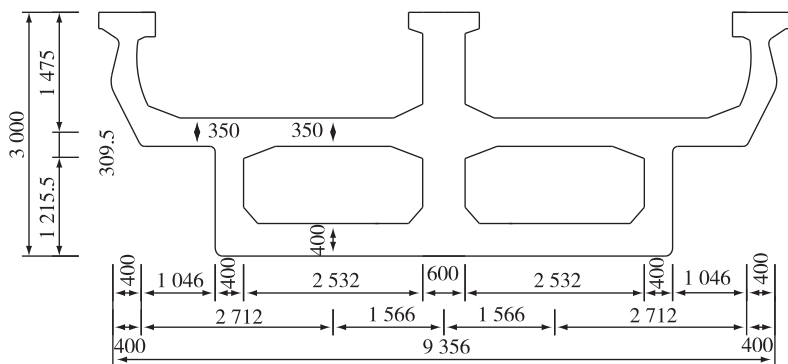


图4 实际工程截面(mm)

Fig.4 Real cross section (mm)

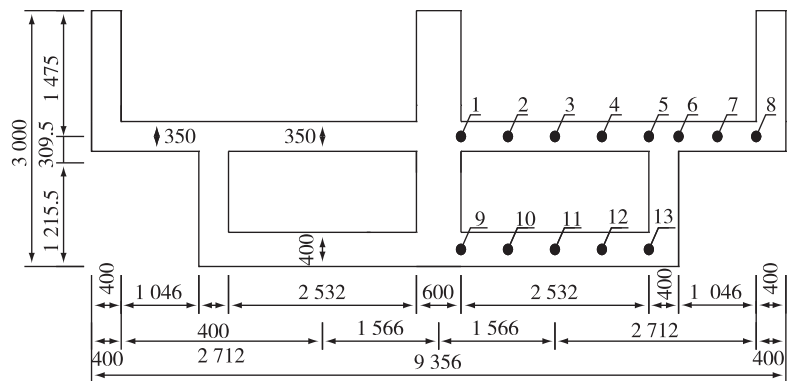


图5 简化后的截面及计算点位置(mm)

Fig.5 Simplified cross section and calculating points (mm)

ABAQUS 模型采用八节点六面体线性减缩积分 (C3D8R) 单元,并划分为六面体网格,边界条件和荷载施加与连续梁算例相同,算例的三维有限元局部模型如图 7 所示。

### 2.1 自重作用下连续梁的剪力滞效应

在实际工程中,自重是桥梁结构的主要荷载形

式。以上述三跨等截面连续梁算例为例,将自重和超静定支座反力单独作用下基本体系的计算截面弯矩  $M(x)$ ,顶板与其悬挑段的翘曲位移函数  $f(y,z)$ ,剪切转角最大差值的一阶导数  $u'(x)$  分别代入式(17),然后根据式(18)计算得中跨跨中截面顶板的剪力滞系数,并与有限元仿真结果进行对比分

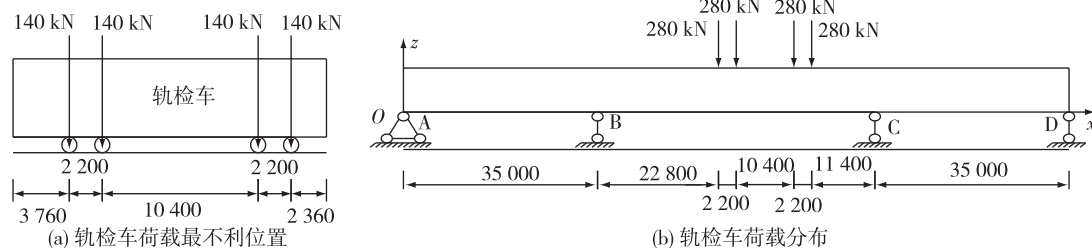


图6 轨检车轴距、轴重和加载位置 (mm)

Fig.6 Track inspection car wheel base, axle load and loading position (mm)

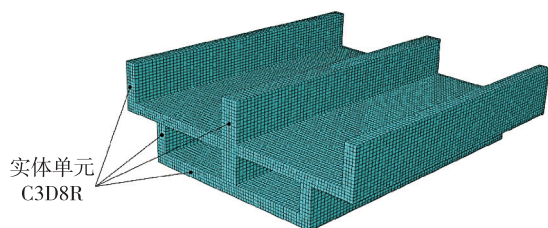


图7 截面有限元模型

Fig.7 Finite element model of the cross section

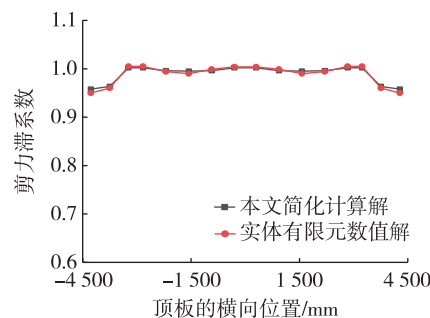


图9 自重作用下顶板剪力滞系数分布对比

Fig.9 Comparison of top flange shear lag coefficients distribution under self-weight action

析。图8和9分别给出了自重作用下中跨跨中截面的应力云图和顶板的剪力滞系数分布。由图8和9可以看出:截面表现出正剪力滞的现象,与腹板的距离越远,顶板剪力滞系数越小,顶板悬挑段的剪力滞系数比腹板支撑部分顶板的小4%。中跨跨中截面处的剪力滞系数简化计算解和有限元数值解的吻合程度较好,最大偏差在1%以内。

图10和11分别给出了轨检车荷载作用下中跨跨中截面的应力云图和顶板的剪力滞系数分布。由图10和11可以看出:轨检车荷载作用下的剪力滞系数变化趋势与自重作用时基本一致,顶板悬挑段的剪力滞系数比腹板支撑部分顶板的小32%,比自重作用下的变化更加明显。轨检车荷载作用下的剪力滞系数简化计算解与有限元数值解的最大偏差在4%以内。

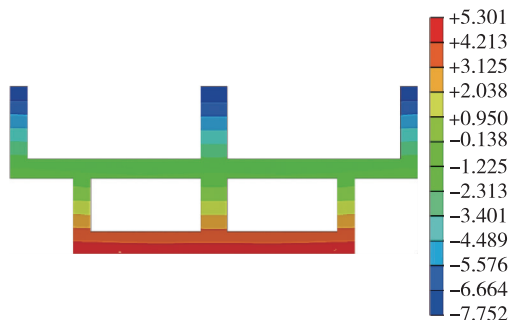


图8 自重作用下跨中截面应力云图 (MPa)

Fig.8 Stress contour of mid-span section under self-weight action (MPa)

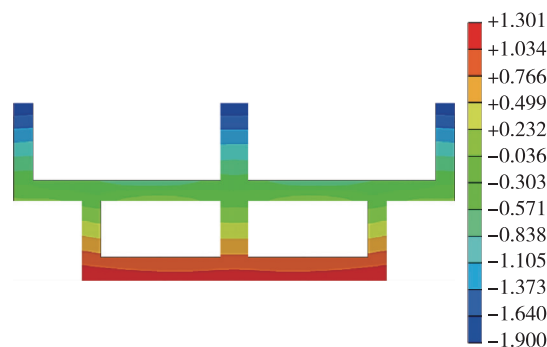


图10 轨检车作用下跨中截面应力云图 (MPa)

Fig.10 Stress contour of mid-span section under rail inspection car load (MPa)

## 2.2 轨检车荷载作用下连续梁的剪力滞效应

在实际工程中,列车荷载是轨道交通桥梁结构承受的主要活荷载。为简化计算,以轨检车荷载为例,将轨检车荷载和超静定支座反力单独作用下基本体系的计算截面弯矩  $M'(x)$ 、 $f'(y,z)$  和  $u''(x)$  分别代入式(17),然后根据式(18)计算得中跨跨中截面顶板的剪力滞系数,并与有限元仿真结果进行对比分析。

## 2.3 梁高和腹板厚度对剪力滞效应的影响

为进一步探究“双U+箱形”截面梁剪力滞效应的影响因素,分别选取梁高、边腹板厚度和中腹板厚

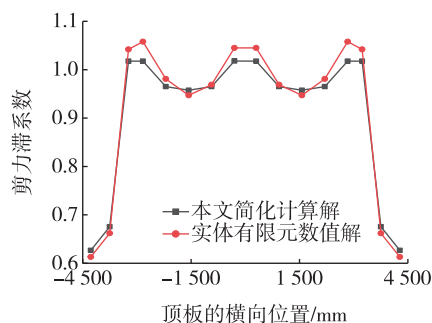
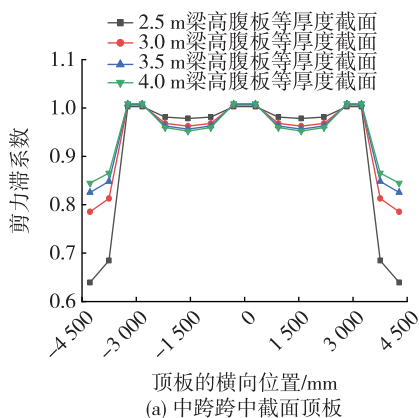


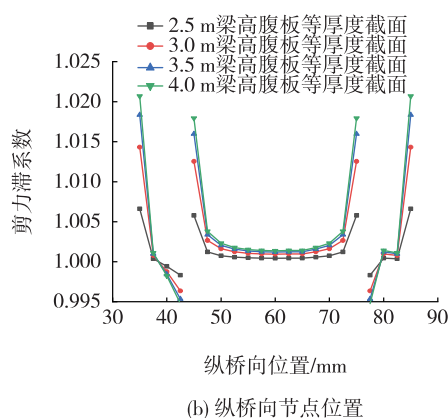
图11 轨检车荷载作用下顶板剪力滞系数分布对比

Fig.11 Comparison of top flange shear lag coefficients distribution under rail inspection car load

度3个参数作为变量,研究单一变量下截面上的剪力滞效应。以上述三跨连续梁算例为模板,在保持U形部分高度和腹板厚度不变的条件下,将梁高分别调整为2.5、3.0、3.5和4.0 m;在保持梁高和中腹板厚度



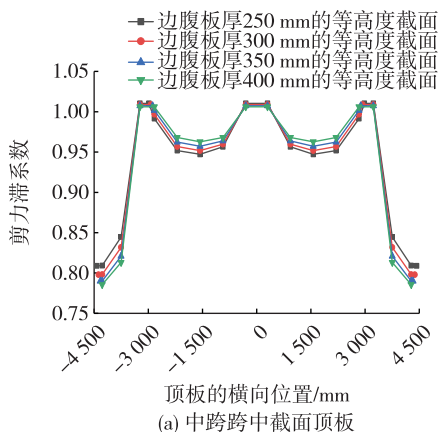
(a) 中跨跨中截面顶板



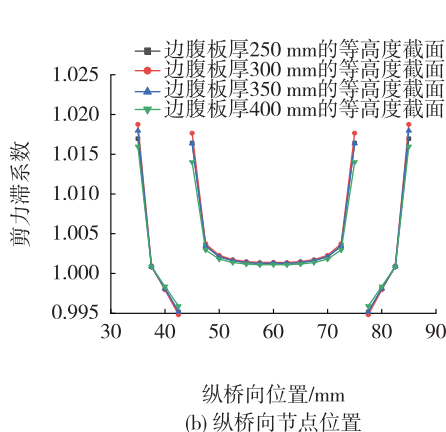
(b) 纵桥向节点位置

图12 梁高对顶板剪力滞系数的影响

Fig.12 Effects of girder height on shear lag coefficient of top plates



(a) 中跨跨中截面顶板



(b) 纵桥向节点位置

图13 边腹板厚度对顶板剪力滞系数的影响

Fig.13 Effects of side web thickness on shear lag coefficient of top plates

不变的条件下,将边腹板厚度分别调整为250、300、350和400 mm;在保持梁高和边腹板厚度不变的条件下,将中腹板厚度分别调整为300、400、500和600 mm,分析单一变量下剪力滞系数的变化情况,探究梁高、边腹板和中腹板厚度对剪力滞效应的影响。

图12、13和14分别给出了梁高、边腹板厚度和中腹板厚度对连续梁中跨跨中截面及主梁中跨各梁截面腹板与顶板交接处剪力滞系数的影响。由图12、13和14可知:在中跨反弯点附近,腹板与顶板交接处的剪力滞系数小于1,出现了负剪力滞现象;在中跨反弯点处弯矩为0,此时剪力滞系数出现奇异现象,出现间断跳跃点;在组合截面U形部分高度不变的条件下,箱形部分与U形部分高度之比为0.5~1.5,随着比值的减小,剪力滞系数逐渐减小;随着边腹板厚度的增大,剪力滞系数逐渐减小;随着中腹板厚度的增大,剪力滞系数逐渐减小,但中腹板的影响程度相对较弱。

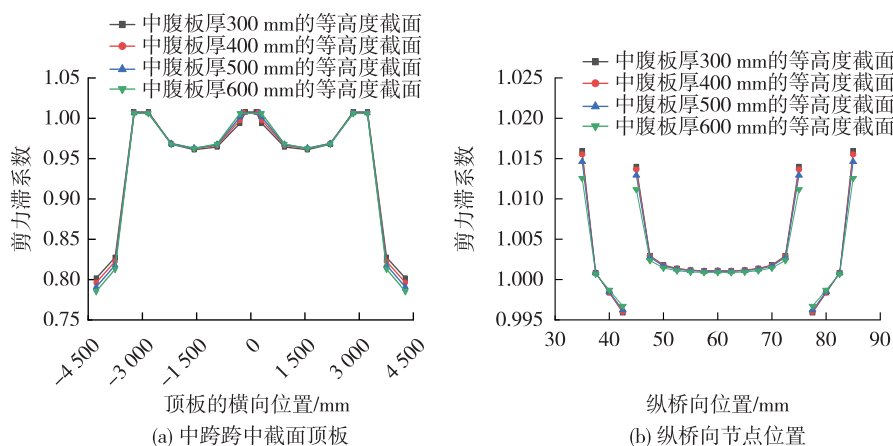


图14 中腹板厚度对顶板剪力滞系数的影响

Fig.14 Effects of center web thickness on shear lag coefficient of top plates

### 3 结论

基于能量变分法建立了“双U+箱形”截面连续梁剪力滞效应简化计算方法,以三跨等截面连续梁为算例,分别验证了在自重和轨检车荷载单独作用下该简化计算方法的可靠性,并讨论了梁高和腹板厚度对剪力滞系数的影响。

1)通过分析截面上剪力流的分布规律,考虑截面剪力流对剪切变形的影响,在基于剪切变形规律的翘曲位移函数中引入顶板悬挑段和顶板的剪力流比、底板和顶板的剪力流比的影响,基于能量变分法推导了等截面连续梁剪力滞系数计算公式。

2)在自重和轨检车荷载作用下,中跨跨中截面的剪力滞系数变化趋势基本一致,但相对于自重作用,轨检车荷载作用下的剪力滞效应更明显。轨检车荷载作用下顶板悬挑段的剪力滞系数比腹板支撑部分顶板的剪力滞系数小32%,而自重作用下顶板剪力滞系数分布比较均匀。剪力滞系数简化计算解与有限元数值解吻合较好。

3)梁高和腹板厚度的变化均会削弱截面的剪力滞效应,但相对于梁高和边腹板厚度,中腹板厚度变化对剪力滞系数的影响程度较弱。因此,在桥梁工程的设计阶段,可通过选择合适的梁高和腹板厚度以削弱剪力滞效应。

### 参考文献:

[1] 杨秀仁.城市轨道交通U形梁高架系统关键技术研究及创新[J].都市轨道交通,2015,28(5):27.

[2] 王根会,樊江,操俊林,等.新型组合箱梁竖向弯曲力学行为的研究[J].铁道工程学报,2019,36(9):23.

[3] 蔺鹏臻,孙理想,杨子江,等.单箱双室简支箱梁的剪力滞效应研究[J].铁道工程学报,2014,31(1):59.

[4] 潘旦光,丁民涛,陈钊.简支薄壁箱梁自由振动的摄动法解析解[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(12):56.

[5] 潘旦光,李冬晴.非线性温度梯度作用下简支箱梁的剪力滞效应[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(2):103.

[6] 潘旦光,付相球,韦杉杉,等.变高度悬臂箱梁剪力滞效应的半解析解[J].工程力学,2018,35(9):207.

[7] 赵志峰,蔺鹏臻,方炜彬.比拟杆法分析研究单箱三室箱梁剪力滞效应[J].铁道科学与工程学报,2016,13(4):697.

[8] 郭增伟,李龙景,张俊波.变截面悬臂箱梁剪力滞效应的比拟杆分析方法[J].土木工程学报,2019,52(8):72.

[9] 孙志伟,刘英,郭晓光,等.连续刚构宽箱梁剪力滞效应分析及有效分布宽度研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(7):1347.

[10] LI S Y, HONG Y, GOU H Y, et al. An improved method for analyzing shear-lag in thin-walled girders with rectangular ribs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 177: 106427.

[11] ZHOU C, LI L F, WANG J Q. Modified bar simulation method for shear lag analysis of non-prismatic composite box girders with corrugated steel webs [J]. Thin-Walled Structures, 2020, 155: 106957.

[12] ZHOU W B, JIANG L Z, LIU Z J, et al. Closed-form solution to thin-walled box girders considering effects of shear deformation and shear lag [J]. Journal of Central South University, 2012, 19(9): 2650.

[13] 赵庆友,张元海,邵江艳.翼板变厚度箱形梁的剪力滞效应分析[J].应用数学和力学,2019,40(6):609.

[14] ZHANG Y H, LIN L X. Shear lag analysis of thin-walled box girders based on a new generalized displacement [J]. Engineering Structures, 2014, 61: 73.

(下转第322页)



- [4] AL-SALLOUM Y A, SIDDQUI N A, ELSANADEDY H M, et al. Textile-reinforced mortar versus FRP as strengthening material for seismically deficient RC beam-column joints [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2011, 15(6): 920.
- [5] 刘宗全, 岳清瑞, 李荣, 等. 碳纤维复材网格锚固长度试验研究[J]. *工业建筑*, 2016, 46(5): 18.
- [6] XU S L, KRÜGER M, REINHARDT H, et al. Bond characteristics of carbon, alkali resistant glass, and aramid textiles in mortar [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2004, 16(4): 356.
- [7] 郭瑞, 蔡联亨, 潘毅, 等. 聚合物水泥砂浆-碳纤维网格加固层与混凝土界面的黏结性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(9): 167.
- [8] LI W C, HUANG W, KANG Y, et al. Fabrication and investigations of G-POSS/cyanate ester resin composites reinforced by silane-treated silica fibers [J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 173: 7.
- [9] 徐世烺, 李赫. 纤维编织网增强混凝土的拉拔计算分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2005, 2(3): 15.
- [10] 李庆华, 徐世烺, 李赫. 提高纤维编织网与砂浆粘结性能的实用方法[J]. *大连理工大学学报*, 2008, 48(5): 685.
- [11] 尹世平, 徐世烺. 提高纤维编织网保护层混凝土抗剥离能力的有效方法[J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(4): 468.
- [12] 尹世平, 徐世烺, 王菲. 纤维编织网在细粒混凝土中的黏结和搭接性能[J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(1): 34.
- [13] ORTLEPP R, CURBACH M. Bonding behavior of textile reinforced concrete strengthening [C] // DI PRISCO M, FELICETTI R, PLIZZARI G A. *International Workshop High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*. [S. l.]: RILEM Publications SARL, 2003: 507.
- [14] ORTLEPP R, ORTLEPP S, CURBACH M. Stress transfer in the bond joint of subsequently applied textile reinforced concrete strengthening [C] // DI PRISCO M, FELICETTI R, PLIZZARI G A. *Proceeding of the 6<sup>th</sup> International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes*. [S. l.]: RILEM Publications SARL, 2004: 1483.
- [15] 邓宗才, 李佳跃, 程传超, 等. CFN 加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. *工程抗震与加固改造*, 2019, 41(6): 73.
- [16] 邓宗才, 程传超, 朱晓楠, 等. 碳纤维网格(CFN)加固 RC 双向板的抗弯性能试验[J]. *工程抗震与加固改造*, 2020, 42(2): 121.
- [17] 邓宗才, 程传超, 朱晓楠, 等. 碳纤维网格加固砌体墙抗震性能试验[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2019, 52(10): 1090.
- [18] 钟正强, 高威. 碳纤维网格加固超载梁抗弯性能试验[J]. *交通科学与工程*, 2021, 37(3): 41.
- [19] 交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [20] 何芳, 武博, 许小海, 等. 碳纤维网格加固混凝土梁制备及其抗折性能研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2020, 53(11): 1197.

(责任编辑 林本兰)

(上接第 307 页)

- [15] HE X Y, XIANG Y Q, CHEN Z Y. Improved method for shear lag analysis of thin-walled box girders considering axial equilibrium and shear deformation [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 151: 106732.
- [16] LI X Y, WAN S, ZHANG Y H, et al. Beam finite element for thin-walled box girders considering shear lag and shear deformation effects [J]. *Engineering Structures*, 2021, 233: 111867.
- [17] 李夏元, 万水, 陈建兵, 等. 基于修正翘曲位移函数的薄壁箱梁剪力滞效应分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(5): 851.
- [18] 张玉元, 余剑搏, 张元海. 考虑梗腋影响的箱形梁剪力滞效应分析[J]. *铁道学报*, 2020, 42(11): 155.
- [19] 姚晓东, 张元海. 基于抽象翘曲位移函数的箱形梁剪力滞效应分析[J]. *应用数学和力学*, 2018, 39(12): 1351.
- [20] 包世华, 周坚. 薄壁杆件结构力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [21] 解增援, 李爱群, 李建慧, 等. 施工阶段自锚式悬索桥超宽混凝土箱梁纵向应力分析[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(1): 104.

(责任编辑 赵燕萍)