

考虑剪力滞效应的钢-ECC组合箱梁数值分析

陈婕妤¹, 许莉¹, 杨明清², 张广达¹, 侯思远³

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福州市城乡建设集团有限公司, 福建 福州 350007;
3. 福州市市政建设开发有限公司, 福建 福州 350004)

摘要: 为解决组合箱梁横向裂缝对结构安全的潜在影响, 利用 ABAQUS 程序建立钢-工程水泥基复合材料 (Engineered Cementitious Composite, 简称 ECC) 组合箱梁的数值模型, 揭示钢-ECC 组合箱梁在受力过程中剪力滞的变化, 并分析剪力滞效应的影响因素。研究结果显示, 随着荷载增大, 钢-ECC 组合箱梁的剪力滞效应逐渐加剧, 但当 ECC 翼缘板应变达到极限状态时, 剪力滞效应开始趋于稳定。通过适当降低翼缘板的宽度与厚度, 或增大箱梁腹板的高度, 可以有效减轻钢-ECC 组合箱梁的剪力滞效应。相较于两点对称荷载, 集中荷载会导致更大的剪力滞效应。

关键词: 结构工程; 钢-ECC 组合箱梁; 剪力滞效应

中图分类号: U448.216

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)03-0204-06

Numerical Analysis of Steel-ECC Composite Box Girder Considering Shear Lag Effect

CHEN Jieyu¹, XU Li¹, YANG Mingqing², ZHANG Guangda¹, HOU Siyuan³

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350108, China;

2. Fuzhou Urban and Rural Construction Group Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350007, China;

3. Fuzhou Municipal Construction and Development Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350004, China)

Abstract: In order to analyze the potential impacts of transverse cracks on structural safety of Composite box girder, Engineered Cementitious Composite (ECC) numerical model was built using ABAQUS program. This paper aims to reveal the change of shear lag of steel-ECC composite box girder and analyze the influencing factors of shear lag effects. The results show that with the increase of load, the shear lag effect of steel-ECC composite box girder gradually increases, but when the strain of ECC flange plate reaches the limit state, the shear lag effect begins to stabilize. In addition, the shear lag effect of steel-ECC composite box girder can be effectively reduced by appropriately reducing the width and thickness of flange plate or increasing the height of box girder web. Meanwhile, compared with two-point symmetric loads, concentrated loads lead to greater shear lag effect. These research results can provide theoretical support for designing safer and more reliable steel-ECC composite box girder.

Keywords: structural engineering; steel-engineered cementitious composite composite box girder; shear lag effect

钢-混凝土组合梁是一种将钢材和混凝土材料相结合的组合结构, 其中混凝土翼缘板通过剪力连接件固定在钢梁上方, 形成一个整体工作的结构系统^[1]。目前钢-混凝土组合箱梁结构在国内外应用广泛, 随着对桥梁跨径和宽度需求的增大, 组合梁结构剪力滞后效应也逐渐明显。

通过对钢-混组合箱梁剪力滞效应相关文献研究可知, 国内外学者对组合箱梁剪力滞效应问题提出了诸多计算方法。郭金琼等^[2]在 Reissner 基础上^[3], 将二次抛物线剪切滞后挠度函数修正为三次函数, 分析了带悬臂矩形箱梁的剪力滞效应。通过模型实验, 验证了三次函数的高精度。同时, 聂建国

等^[4]采用 Gjelsvik^[5] 组合梁滑移模型,导出了简支组合梁在轴向荷载影响下的弹性分析解,并研究了在不同负荷类型下组合梁的有效长度分布变化规律。Lezgy-nazargah 等^[6]建立了考虑剪力滞效应和混凝土板与钢桁梁界面滑移影响的钢-混凝土组合梁桥静力分析的梁模型。对于钢-ECC 组合箱梁,樊健生等^[7]发现在钢-ECC 组合梁中由于板的剪切变形,存在剪力滞效应。但现有对钢-混凝土组合梁剪力滞后效应的研究主要集中于传统材料。对采用水泥基复合材料的新型翼缘板研究较为有限。本文以钢-ECC 组合箱梁为研究对象,深入探讨采用 ECC 新型材料作为组合梁翼板时的剪力滞效应,通过有限元分析其受力性能,并以剪力滞系数为参考值,分析不同因素对剪力滞效应的影响,为这类桥梁的工程应用提供参考。

1 钢-ECC 组合箱梁模型

1.1 模型设计

以某高架桥梁为工程依托,根据刚度等效原理和中性轴相对位移不变的理论进行模型设计^[8]。量纲相似原理^[9]是工程研究中常用的分析方法之一,通过将原尺度系统缩小,以获得与原系统相似的行为和性能。选择 1:5 几何缩尺,钢-ECC 组合箱梁构件的受弯长度均为 4 000 mm,梁端各留 200 mm 安装支座,高度为 420 mm,如图 1 所示。

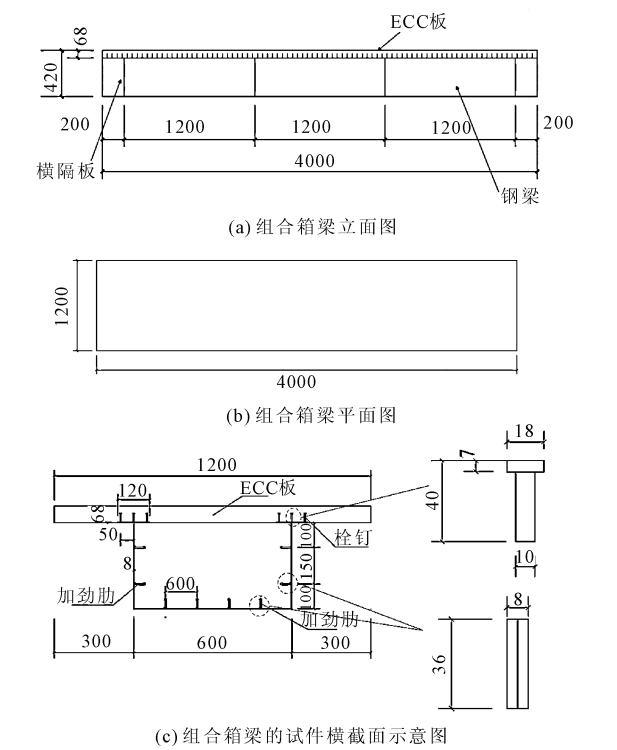


图 1 钢-ECC 组合箱梁试验梁模型

横向钢筋使用间距为 100 mm 的 HRB400 带肋钢筋,配筋率为 1.15%;纵向钢筋位置采用间距为 100 mm 的 HRB400 带肋钢筋,配筋率为 4.2%。本文采用 Q345 钢材。

1.2 材料本构模型

1.2.1 ECC 材料

文中 ECC 的受压应力-应变关系采用徐世烺等^[10]提出的对损伤演化模式的本构模型。并引入 ECC 塑性损伤模型描述 ECC 材料的弹性和塑性行为。ECC 损伤模型的塑性参数详见表 1^[11]。

表 1 ECC 塑性参数				
膨胀角 $\Psi/(^{\circ})$	偏心率	强度比	强度特性	黏聚参数
30	0.1	1.16	0.667	0.005

按下式进行调整计算,应力-应变曲线则如图 2(a)所示。

$$\sigma_e = (1 - d_e)E_e\varepsilon_e \tag{1}$$

式中: σ_e 为压应力; d_e 是 ECC 单轴受压损伤演化参数; E_e 为 ECC 弹性模量; ε_e 为 ECC 的压应变值。

$$d_e = \begin{cases} 1 - \frac{f'_c n'}{E_e \varepsilon_e (n' - 1 + x^n)} & x \leq 1 \\ 1 - \frac{f'_c}{E_e \varepsilon_e [\alpha_e (x - 1)^2 + x]} & x > 1 \end{cases} \tag{2}$$

其中:

$$\begin{cases} x = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon'_e} \\ n' = \frac{E_e \varepsilon_e}{E_e \varepsilon_e - f'_c} \end{cases} \tag{3}$$

式中: f'_c 是 ECC 单轴轴心抗压强度; ε'_e 是与单轴轴心抗压强度 f'_c 相对应的 ECC 峰值压应变; α_e 是 ECC 单轴受压应力-应变曲线下降段参数值。

关于 ECC 的受拉本构而言,本文采用线性硬化-软化^[12]模型表示,其本构关系如下式所示,应力-应变曲线则如图 2(b)所示。

$$\begin{cases} \sigma_1(\varepsilon) = E_e \varepsilon_e & 0 \leq \varepsilon_e < \varepsilon_{er} \\ \sigma_2(\varepsilon) = \sigma_{er} + (\sigma_{tp} - \sigma_{er}) \frac{\varepsilon_e - \varepsilon_{er}}{\varepsilon_{tp} - \varepsilon_{er}} & \varepsilon_{er} \leq \varepsilon_e < \varepsilon_{tp} \\ \sigma_3(\varepsilon) = \sigma_{tp} \frac{\varepsilon_e - \varepsilon_{tp}}{\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tp}} & \varepsilon_{tp} \leq \varepsilon_e < \varepsilon_{tu} \end{cases} \tag{4}$$

式中: σ_{er} 、 ε_{er} 是 ECC 初始裂缝应力和拉应变; σ_{tp} 、 ε_{tp} 是 ECC 峰值应力和拉应变; ε_{tu} 是 ECC 极限拉应变。

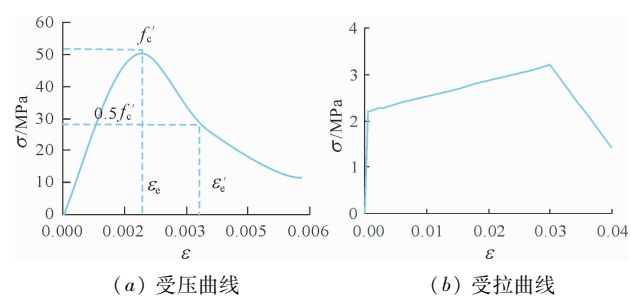


图 2 ECC 材料应力-应变曲线

1.2.2 钢板及普通钢筋

钢筋应力-应变采用双折线的本构模型和强化弹塑性公式表示考虑钢筋的屈服与强化,且钢筋进入强化状态时,弹性模量为 $0.01E_s$ [13]。

$$\begin{cases} \sigma_s = E_s \varepsilon_s & \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ \sigma_s = f_y + 0.01E_s(\varepsilon_s - \varepsilon_y) & \varepsilon_s > \varepsilon_y \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ_s 为钢材应力; E_s 为钢材初始弹性模量; ε_s 为钢材应变值; f_y 是钢材的屈服强度,按表 2 选取; ε_y 是钢材的屈服时的应变值。

将表 2 中材性结果的各待定参数代入公式(4),得到用以本文 ABAQUS 有限元模型中所用的钢材非线性的应力-应变曲线(以直径为 14 mm 的钢筋为例)如图 3 所示。

表 2 钢材基本力学性能

参数	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	弹性模量 E_s/GPa
10 mm 钢筋	420	610	200
14 mm 钢筋	454	635	200
Q345-8 mm 钢板	357	573	200
Q345-10 mm 钢板	346	550	200

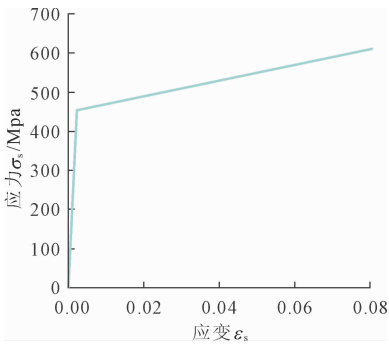


图 3 钢材本构曲线

1.3 模型建立

本文自上而下建模,有效模拟 ECC 材料等部件的受力性能。通过“内置区域”的相互关联功能,控制钢筋网与 ECC 板、栓钉与 ECC 板的连接,模拟两

种材料的状态。连接栓钉和钢梁的顶板采用笛卡尔平移类型接口,创建线条类型为栓钉。钢梁顶板与 ECC 楼板采用表面接触模式,罚摩擦模型模拟切向行为,摩擦力取值为 0.55 [14]。横隔板在钢梁上的模拟引入“绑定”相互作用模式,实现硬接触效果。图 4 展示了对有限元模型荷载和支座点约束作用。利用在加载点间的耦合位移加以仿真,如图 4 所示参考点 RP-1 和参考点 RP-2。为满足锚固长度需求,加载点设置在支座点上,使用固定铰支座和活动铰支座模拟边界条件 [15]。有限元模型的网格划分中,为每个部件设计适合的种子,确定全局尺寸控制值 [16]。例如,钢梁的全局尺寸控制值约为 27 mm,钢筋网为 20 mm,横隔板为 40 mm,ECC 板为 100 mm,栓钉为 10 mm 通过设计种子并对每个部件进行网格划分,可获得精确的结构化网格。

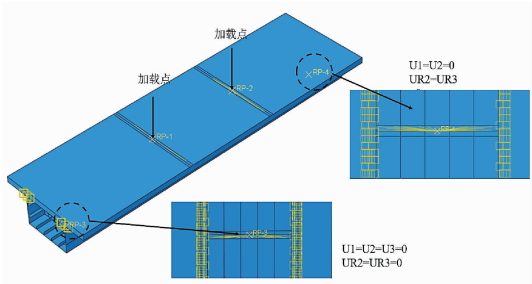


图 4 钢-ECC 组合箱梁有限元模型

2 计算结果与分析

通过 ABAQUS 的有限元模拟,分析钢-ECC 组合箱梁结构受力的全过程,并检验和研究钢-ECC 组合箱梁剪力滞后效应。

2.1 受力情况分析

2.1.1 ECC 翼缘板

为更好分析 ECC 翼缘板的受力状态,达到破坏极限时 ECC 翼缘板的最小主应力分布云图如图 5 所示。

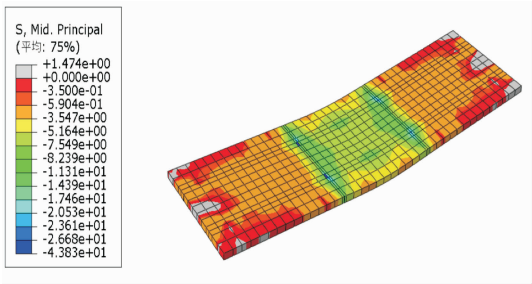


图 5 ECC 翼缘板最小主应力分布云图

从图 5 中可以看出,ECC 翼缘板存在应力不均现象,即存在明显的剪力滞效应,其横向变化规律显示为:从翼缘板中部到钢箱梁与翼缘板连接处,应力逐渐增大,在连接处达到最大值,而后再逐渐减小至翼缘板边缘。

2.1.2 钢箱梁

为了更好地分析钢箱梁的受力状态,达到破坏极限时钢箱梁的 Mises 应力云图如图 6 所示。

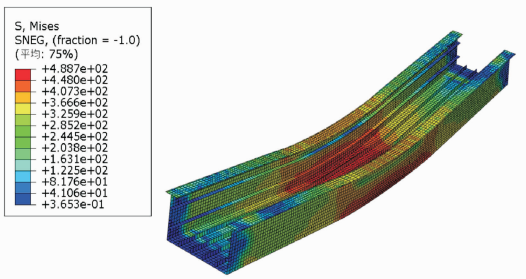


图 6 钢箱梁的 Mises 应力云图

由图 6 可知,钢箱梁的底部基本上全截面达到屈服,在这个阶段,钢箱梁发生塑性变形。钢材的塑性变形将允许钢箱梁在一定程度上吸收能量,并提供延性行为。同时,还可以看出钢箱梁底板存在剪力滞效应,横向应力两边数值最大,并向中间逐渐递减。

2.2 应变曲线

图 7 给出在两点对称荷载作用下,钢-ECC 组合箱梁的翼缘板跨中截面应变沿截面的横向分布曲线。

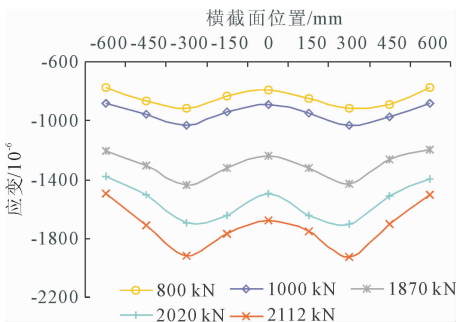


图 7 ECC 板顶面应变横向分布曲线

由图 7 可知,翼缘末端应变比腹板处应变小 10.6% 以上,呈现明显的剪力滞后效应。但随着荷载逐渐增大,钢梁腹板处 ECC 板应变较翼缘处先达到塑性。由于 ECC 为非线性材料,应力不会随着应变的增加而不断增大。当腹板处 ECC 达到塑性应变峰值时,随后 ECC 压应变沿横向也逐渐达到峰值。在此阶段,ECC 板压应变沿横向逐渐趋于均匀,翼缘板剪力滞效应得到改善。

3 设计参数分析

经过大量的试验研究和数值分析发现,剪力滞效应会受到多因素的影响。本节选用六个因素对钢-ECC 组合箱梁剪力滞效应进行模型的优化设计分析。

3.1 剪力滞系数

为了描述钢-ECC 组合箱梁的剪力滞效应,把翼板实际应力值 σ_{xi} 与按初等梁理论求得的翼板应力 σ_0 的比值定义为剪力滞系数 λ ,故采用能量法的剪力滞系数计算公式为:

$$\lambda = \frac{\sigma_{xi}}{\sigma_0} \tag{6}$$

3.2 结构几何影响参数分析

3.2.1 ECC 翼缘板悬翼比

建立 3 个不同 ECC 翼缘板宽度的组合箱梁进行有限元分析,实现悬翼比数值的变化。ECC 翼缘板宽度依次为 1 000 mm、1 200 mm 和 1 600 mm 三种,相应的悬翼比分别为 0.33、0.50 和 1,具体见表 3。

表 3 剪力滞系数随悬翼比变化

悬翼比	剪力滞系数最大值	剪力滞系数最小值
0.33	1.044	0.911
0.50	1.089	0.941
1	1.139	0.985

由表 3 可得,随着钢-ECC 组合箱梁的悬臂宽度增加,剪力滞系数也随之增加。ECC 顶板的剪力滞系数的最大值始终出现在 ECC 翼板与钢腹板交界处。而剪力滞系数的最小值则从截面的中点转移到悬臂板的自由端。此外,随着组合箱梁悬臂板宽度的增加,其挠度也会相应地增加。这种变化的原因是 ECC 桥面板宽度的增大导致其远离桥面板交界处的部分发生变形,从而降低了沿桥面横向的弯曲刚度并增加了剪切变形。

3.2.2 ECC 翼缘板厚度

建立 3 个不同 ECC 翼缘板厚度的钢-ECC 组合箱梁进行有限元分析,具体详见表 4。

表 4 剪力滞系数随 ECC 翼缘板厚度变化

厚度/mm	剪力滞系数最大值	剪力滞系数最小值
50	1.139	0.966
70	1.089	0.941
100	1.057	0.908

如表 4 所示,增加钢-ECC 组合箱梁的翼缘板厚度有助于减小最大剪力滞系数。在相同跨度条件

下,顶板厚度从 50 mm 增加到 100 mm,导致最大剪力滞系数减小 7.20%。翼缘板厚度的增加可能改变破坏模式,从 ECC 主导破坏转变为钢材的塑性变形,降低了剪力滞效应系数。因此,在设计中需考虑翼缘板厚度对剪力滞效应的影响,以提高桥面板刚度和裂缝控制效果。

3.2.3 钢箱梁腹板高度

用 3 个不同钢腹板高度的钢-ECC 组合箱梁进行有限元分析,实现高宽比值的变化。高度依次为 300 mm、350 mm 和 450 mm 三种,相应的高宽比分别为 0.50、0.58 和 0.83,具体详见表 5。

表 5 剪力滞系数随钢箱梁腹板高度变化		
高宽比	剪力滞系数最大值	剪力滞系数最小值
0.50	1.129	0.977
0.58	1.088	0.941
0.83	1.035	0.870

根据表 5 所示,ECC 翼缘板与钢箱腹板交汇处,剪力滞系数到达最大值;而最小值在高宽比为 0.870 时,出现在悬臂板自由端。当高宽比为 0.58 和 0.5 时,出现在 ECC 顶板中点。此外,观察到随着钢箱梁腹板高度减小,ECC 翼缘板剪力滞系数增大。这主要归因于随着钢箱腹板高度增大,钢材的刚度优势显现导致剪力滞效应系数减小。在设计中应充分考虑宽高比的影响,特别关注较小钢箱腹板高度情况下的剪力滞效应。

3.2.4 钢箱梁腹板厚度

用 4 个不同钢箱腹板厚度的钢-ECC 组合箱梁进行有限元分析,剪力滞系数随钢箱梁腹板厚度变化见表 6。

表 6 剪力滞系数随钢箱梁腹板厚度变化		
钢箱梁腹板厚度/mm	剪力滞系数最大值	剪力滞系数最小值
4	1.0913	0.9450
6	1.0912	0.9435
8	1.0888	0.9407
12	1.0905	0.9417

从表 6 中可知,当钢-ECC 组合箱梁腹板厚度从 4 mm 变化到 12 mm 时,混凝土顶板剪滞系数最大值和最小值变化不明显,保持在 1.09 左右和 0.94 左右。这表明腹板厚度的变化对钢-ECC 组合箱梁的剪力滞效应影响较小。剪力滞效应主要由 ECC 核心承担,而钢箱梁腹板的贡献相对较小。由于 ECC 具有良好的延性和自修复性能,在两点对称荷

载作用下,它能够通过其延性特性来耗散能量。相比之下,腹板厚度的变化对剪力滞效应的影响相对较小,剪力滞效应系数通常保持稳定。因此,在设计时可以通过降低腹板宽度来减少成本,而不会显著影响剪力滞效应。

3.2.5 荷载情况影响

不同荷载形式作用下,跨中剪力滞系数如图 8 所示。

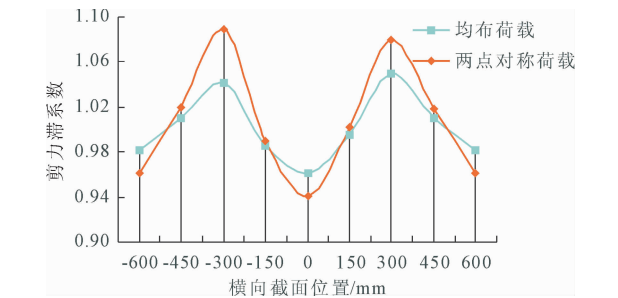


图 8 剪力滞系数随荷载类型变化曲线

从图 8 中可以看出,在不同荷载类型下,跨中两点对称荷载作用下的剪力滞效应较均布荷载作用更为明显。这主要是由于两点对称荷载通常表现为局部的荷载集中,而均布荷载则是均匀地分布在整个跨度上。这种荷载集中效应导致了结构在跨中处的应力、变形、刚度等特性与其他区域有明显的差异,从而增强了剪力滞效应。

3.2.6 翼缘板材料影响

以原始模型作为基本模型,用 5 个不同翼缘板材料的组合箱梁进行有限元分析。剪力滞系数随剪力滞系数随材料变化见表 7。

表 7 剪力滞系数随剪力滞系数随材料变化	
强度等级	剪力滞系数最大值
C30	1.165
C50	1.155
ECC30	1.0925
ECC50	1.0889
ECC80	1.0847

由表 7 可以看出,ECC 与混凝土相比,其剪力滞系数明显减小。这主要归因于 ECC 具有较高的抗裂性能,这可能意味着在加载过程中更难形成大的裂缝,从而推迟裂缝的扩展。导致在组合梁受荷载作用时,其剪切行为相对于普通混凝土更为柔韧,而不是出现剧烈的裂缝。这种柔韧性对剪力滞效应的发展产生影响。剪力滞系数在不同翼缘板材料变化曲线如图 9 所示。

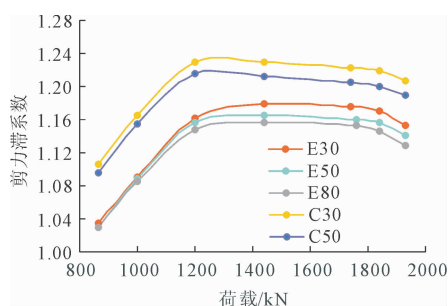


图9 剪力滞系数在不同翼缘板材料变化曲线

由图9可以看出,ECC与混凝土随着荷载增大,剪力滞系数的变化趋势几乎相同。在组合梁处于弹性受力阶段时,材料强度比值对翼缘板剪力滞系数的影响较小。这主要是因为材料的强度主要通过弹性模量的影响表现,而对于剪力滞效应,裂缝的发展和非线性行为通常发生在更大的应变范围内。但是,在组合梁处于塑性受力阶段时,材料强度比值越大,剪力滞系数越小。这主要是因为材料的非线性行为显著发挥作用,材料强度越大,表现出较大的刚度,从而导致较小的变形。

4 结 论

(1) 钢-ECC组合箱梁呈现出明显的剪力滞后效应。前期,荷载与剪力滞效应呈正比例关系,但到了后期,由于ECC为非线性材料,应变不会随着荷载继续增加而增大,ECC板压应变沿横向逐渐趋于均匀,翼缘板的剪力滞效应反而有所降低。

(2) 在两点对称荷载下,ECC翼缘板宽度增大、厚度减少与钢梁腹板高度减少,都会使得剪力滞效应增大,故在设计时需适当的调整。厚度变化对剪力滞效应影响小,在满足设计要求下,可通过减小腹板宽度降低成本。

(3) 由于荷载集中效应,故较均布荷载而言,两点对称荷载更显著地引起剪力滞效应。

(4) ECC相较混凝土具有较高抗裂性,导致剪切行为更为柔韧,剪力滞效应明显减小。随着荷载增大,ECC与混凝土剪力滞系数变化趋势相近。在弹性阶段,材料强度比值对剪力滞系数影响较小;而在塑性阶段,强度比值增大导致剪力滞系数减小,表现出较大刚度和较小变形。

参考文献:

[1] Pedro R L, Demarche J, Miguel L F F, et al. An efficient approach for the optimization of simply supported steel-concrete composite I-girder bridges[J]. *Advances in Engineering Software*, 2017,112:31-45.

[2] 郭金琼,房贞政,郑振. 箱形梁设计理论[M]. 2版.

北京:人民交通出版社,2008.

[3] Relssner E. Analysis of shear lag in box beams by the principle of minimum potential energy[J]. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1946,4(3):268-278.

[4] 李法雄,聂建国. 钢-混凝土组合梁剪力滞效应弹性解析[J]. *工程力学*, 2011,28(9):1-8.

[5] Gjelsvik A. Analog-beam method for determining shear-lag effects[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1991, 117(7):1575-1594.

[6] Lezgy-Nazargah M, Vidal P, Polit O. A sinus shear deformation model for static analysis of composite steel-concrete beams and twin-girder decks including shear lag and interfacial slip effects[J]. *Thin Walled Structures*, 2019,134(JAN.):61-70.

[7] 施正捷,樊健生,陶慕轩. 钢-ECC组合梁负弯矩下基本受力性能研究[C]//全国第十二届混凝土结构基本理论及工程应用学术会议,2012.

[8] Kumar A, Hasan N, Khan K. Equivalent stiffness methods for free vibration and bending of bimodular composite laminated thick curved beam[J]. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2019, 8(11):1802-1810.

[9] Guimarães Mateus C, Pinho Fernando T, da Silva Carlos B. The similarity theory of free turbulent shear flows of viscoelastic fluids[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2024,323:105148.

[10] 徐世烺,李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J]. *土木工程学报*, 2008,41(6):45-60.

[11] Kmiecik P, Kamiński M. Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2011,11(3):623-635.

[12] Han T S, Fe Enstra P H, Billington S L. Simulation of highly ductile fiber-reinforced cement-based composite components under cyclic loading[J]. *Aci Structural Journal*, 2003,100(6):749-757.

[13] Tao Z, Wang Z, Yu Q. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression[J]. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013, 89:121-131.

[14] Zou Y, Di J, Zhou J, et al. Shear behavior of perfbond connectors in the steel-concrete joints of hybrid bridges[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 172:106217.

[15] 朱力,聂建国,季文玉. 钢-混凝土组合箱型梁的滑移和剪力滞效应[J]. *工程力学*, 2016, 33(9):49-58,68.

[16] 王玉镯,傅传国. ABAQUS结构工程分析及实例详解[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.