

负弯矩作用下钢-混凝土组合梁截面受力性能分析

梁显¹, 段树金^{1,2}, 孟丽军^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要:为比较负弯矩区不同形式组合梁截面的受力性能,用全过程分析法对钢-混凝土普通组合梁、双面组合梁和组合与叠合梁截面进行受力分析,以得到梁截面的弯矩-曲率曲线。结合一工程实例,得到了三类4种组合梁截面的弯矩-曲率关系及各阶段的相应刚度,计算比较了在使用荷载下3种梁的最大裂缝宽度。分析结果表明:混凝土顶板开裂后,双面组合梁、普通组合梁(钢底板厚30 mm)和组合与叠合梁截面的弯曲刚度相当;双面组合梁的极限承载力最高;组合与叠合梁的开裂弯矩约为其他形式组合梁的2~3倍;使用荷载作用下,裂缝宽度仅为其他形式组合梁的3%。在连续组合梁负弯矩区宜于采用组合与叠合梁截面。

关键词:双面组合梁;组合与叠合梁;普通组合梁;负弯矩区;弯曲刚度;全过程分析;裂缝宽度

中图分类号: TU398 文献标志码: A 文章编号: 2095-0373(2020)02-0124-06

0 引言

连续钢-混凝土组合梁桥在负弯矩区处于混凝土顶板受拉、钢梁受压的不利受力状态,混凝土受拉开裂后会导致组合梁刚度和耐久性降低,同时钢梁受压易导致局部屈曲的出现。因此,混凝土顶板的开裂和钢梁的屈曲问题始终制约着连续组合梁的发展。20世纪80年代,钢-混凝土双面组合梁(简称双面组合梁,DCB)的出现明显改善了钢梁受压腹板和翼缘的屈曲问题^[1-3],但由于截面中性轴的下降,混凝土顶板仍易受拉开裂^[4]。为了改善混凝土顶板的抗裂性能,段树金等^[5]在双面组合梁的基础上提出了钢-混凝土组合与叠合梁结构(简称组合与叠合梁,CLB),其中混凝土顶板与钢梁上翼缘用抗拔不抗剪连接件^[6]连接形成叠合界面,有效地释放了混凝土板中因收缩徐变、温度效应以及汽车荷载引起的拉应力,并且提高了负弯矩区桥面板纵向预应力的施加效率,实现了纵向的自由滑移,同时保留了竖向的抗掀起作用。组合与叠合梁不同于传统中的叠合梁,抗拔不抗剪连接件使得混凝土板与钢梁在保证竖向变形一致即不发生掀起的前提下能够自有变形。

工程现场实测和有限元分析结果^[7]表明:组合与叠合梁能有效提高连续组合梁负弯矩截面以及结构的刚度、调整结构的内力、改善结构的受力性能^[8]。目前,组合与叠合梁的研究尚处于起步阶段,相关的研究文献也比较少,因此,对组合与叠合梁展开系列研究显得尤为迫切。为比较普通组合梁(CCB)、双面组合梁和组合与叠合梁的受力性能,采用截面全过程分析法对这3种形式的组合梁截面的弯矩曲率关系、各阶段的弯曲刚度进行分析,并对梁的最大裂缝宽度进行计算,以得到这3种组合梁截面不同的受力特性。

1 截面全过程分析

在对钢筋混凝土构件进行受力性能分析时,裂缝的出现、开展,挠度或转角的增长以及弹、塑性极限

收稿日期:2019-01-18 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20190013

基金项目:河北省高校科学技术研究重点项目(ZD2018025);石家庄铁道大学研究生创新资助项目(YC2018001)

作者简介:梁显(1990—),女,博士研究生,研究方向为桥梁工程。E-mail:liangxian0901@163.com

梁显,段树金,孟丽军.负弯矩作用下钢-混凝土组合梁截面受力性能分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(2):124-129.

状态等的分析对结构的应用和研究起着至关重要的作用,而截面的全过程分析法是研究这些问题的基础。图 1 给出了普通组合梁、双面组合梁和组合与叠合梁的截面构造图,本节以普通组合梁为例,对负弯矩作用下截面的受力全过程进行分析。

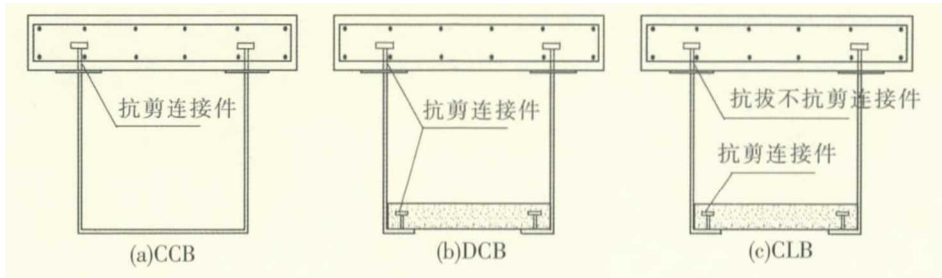


图 1 截面构造图

截面的全过程分析是对截面的内力随着中性轴的变化、曲率的增长,以及受力过程中材料应力(应变)和失效,加之混凝土裂缝的开展等进行分析的方法。在分析过程中,对截面进行条带划分,对受力全过程进行分级、逐步的运算。

1.1 基本假定

- (1)结构从开始受力到破坏整个过程,符合平截面假定。
- (2)构件的变形很小,不考虑变形对计算图形和内力值的影响。
- (3)混凝土应力-应变关系^[9]如图 2(a)所示。

$$\sigma_c = \begin{cases} f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} \right)^n \right] & (\epsilon_c \leq \epsilon_{c0}) \\ f_c & (\epsilon_{c0} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma_t = E_c \epsilon_t \quad (\epsilon_t \leq \epsilon_{tn}) \quad (2)$$

式中, σ_c 、 σ_t 分别为混凝土的压、拉应力; f_c 为混凝土轴心抗压强度; ϵ_{c0} 为混凝土峰值压应变,混凝土强度等级不大于 C50 时,取值 0.002; ϵ_{cu} 为混凝土极限压应变,混凝土强度等级不大于 C50 时,取值 0.0033; n 为系数, $n \leq 2$, 本文取值为 2; ϵ_c 为混凝土拉应变; ϵ_{tn} 为混凝土峰值拉应变。

(4)钢的应力-应变关系采用考虑硬化的弹塑性关系^[9],如图 2(b)所示,其中, f_y 为钢的屈服强度; ϵ_y 为屈服应变, $\epsilon_y = f_y/E_s$; $E_s' = 0.01E_s$ 。

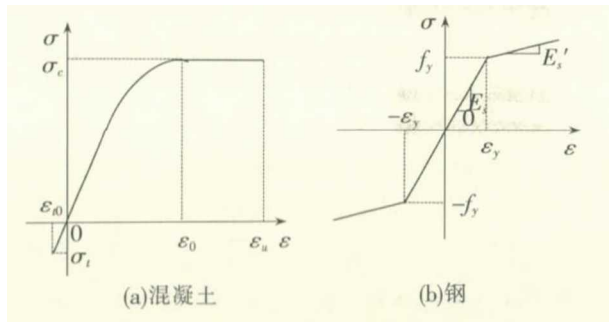


图 2 组合梁截面计算图形

1.2 基本方程

在截面全过程分析中,基于以上基本假定,可以建立 3 类基本方程:几何方程、物理方程和力学(平衡)方程。分析中不考虑开裂受拉混凝土的强度和组合界面滑移的影响。在进行截面条带划分时,对混凝土板、钢筋、钢梁分别进行条带划分,并假定每一条带上的应力、应变均匀分布。组合梁截面的计算图形如图 3 所示。

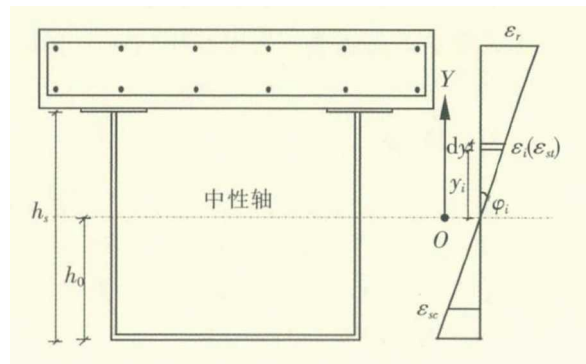


图 3 组合梁截面计算图形

依据平截面假定,当构件受载后,其应变分布如图 3 所示。弹性阶段,随着截面曲率的增长,普通组合梁、双面组合梁和组合与叠合梁截面的中性轴位置保持不变。当普通组合梁的受压钢梁翼缘达到屈服应变 ϵ_y 时,截面进入弹塑性阶段。在双面组合梁和组合与叠合梁中,当钢梁下翼缘受压达到屈服应变 ϵ_y 或混凝土底板压应变达到 ϵ_{c0} 时,截面进入弹塑性阶段。荷载继续增大,当普通组合梁、双面组合梁的受拉钢筋、组

合与叠合梁的钢梁受拉翼缘达到各自的屈服应变 ϵ_y 时,截面进入塑性状态。由于组合与叠合梁的上层混凝土板和下层钢梁分别作用,因此,上层混凝土板的受力全过程分析可参照钢筋混凝土构件进行。

1.2.1 几何方程

沿梁截面轴线单位长度的相对转角 φ (截面曲率)为

$$\varphi = \frac{1}{\rho} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_x}{h_s} \quad (3)$$

式中, ϵ_x 、 ϵ_x 分别为钢梁受拉翼缘和受压翼缘的应变,如图 3 所示; h_s 为钢梁的高度。

距离中性轴 y_i 处的应变为

$$\epsilon_i = \varphi y_i = \frac{\epsilon_x + \epsilon_x}{h_s} y_i \quad (4)$$

$y_i > 0$, ϵ_x 为正; $y_i < 0$, ϵ_x 为负。

1.2.2 物理方程

对受拉或受压的钢筋、钢梁和混凝土采用基本假定中的应力-应变关系。

ϵ_i 为正,材料受拉; ϵ_i 为负,材料受压。

$$\begin{cases} \text{钢梁: } \sigma_x(\epsilon_i), \sigma_x(\epsilon_i) \\ \text{钢筋: } \sigma_n(\epsilon_i), \sigma_n(\epsilon_i) \\ \text{混凝土: } \sigma_c(\epsilon_i), \sigma_c(\epsilon_i) \end{cases} \quad (5)$$

1.2.3 力学(平衡)方程

负弯矩作用下,组合梁的受力平衡条件为

$$\sum N_i = 0, \sum M_i = M \quad (6)$$

1.3 $M-\varphi$ 曲线计算程序

综合以上 3 类基本方程,可以得出式(6)中只有 2 个未知量,即 φ 和 h_0 (中性轴高度)。通过合理选取步长 $\Delta\varphi$,来满足计算精度或节省计算工作量的要求。具体计算程序如下:

(1) $\varphi_{i+1} = \varphi_i + \Delta\varphi, \varphi_1 = 0$;

(2) 根据力学(平衡)方程,得出截面中性轴的高度 h_0 ;

(3) 由中性轴位置 h_0 和相对转角 φ_i 得到每个条带的应变;

(4) 判断每个条带的应变是否达到相应材料的极限应变,若没有则进行以下程序,若已经达到材料的极限应变,停止计算;

(5) 通过材料的应力-应变关系得到每个条带的应力,并通过数值积分得到外荷载 M ;

(6) 由一一对应的 φ 值和 M 值得到 $M-\varphi$ 曲线。

在截面受力全过程分析中,混凝土的开裂、钢梁和钢筋的屈服、极限状态等阶段均应控制步长,以满足分析的准确性。

2 工程算例

为深入研究不同形式钢-混凝土组合梁截面的受力性能,本节以某双面组合梁工程实例为背景,通过截面刚度、 $M-\varphi$ 曲线和梁的最大裂缝宽度,比较双面组合梁(DCB)、无混凝土底板的普通组合梁(CCB1)、钢底板厚 30 mm 的普通组合梁(CCB2)及改变连接形式的组合与叠合梁(CLB)的受力性能差异。该双面组合梁的截面如图 4 所示。

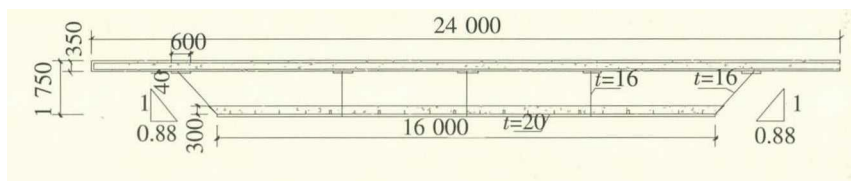


图 4 双面组合梁截面图(单位:mm)

材料参数:钢梁为 Q345qD 钢,屈服强度 $f_y = 345$ MPa,弹性模量 $E_s = 206$ GPa;纵向钢筋为 HPB300 钢筋, $f_r = 300$ MPa,弹性模量 $E_r = 206$ GPa,直径 $\Phi 20$;混凝土顶、底板强度等级为 C40, $f_c = 26.8$ MPa, $f_t = 2.39$ MPa, $E_c = 32.5$ GPa。

2.1 $M-\varphi$ 曲线

对上述 4 种截面进行受力全过程分析,得到相应的 $M-\varphi$ 曲线,如图 5 所示。

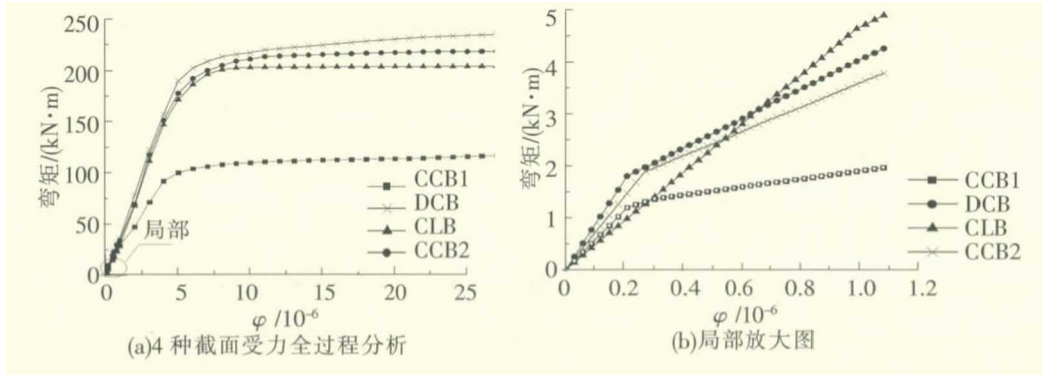


图 5 $M-\varphi$ 曲线

从图 5 中看,DCB、CLB 和 CCB2 的极限弯矩相当,而 CCB1 的极限弯矩只有其他截面的一半左右。从局部放大图中容易得到 4 种组合梁截面开裂弯矩的大小。其中,CCB1 的开裂弯矩最小;DCB 与 CCB2 的开裂弯矩几乎相等且大于 CCB1;CLB 的开裂弯矩最大,为其他截面的 2~3 倍。

2.2 刚度分析

基于换算截面法得到 4 种组合梁截面的初始刚度及混凝土顶板开裂后的刚度^[4,7],如表 1 所示。

表 1 中,DCB 初始刚度比 CCB1 提高了 70% 左右,CLB 的初始刚度约为 DCB 的 33%,CCB2 的初始刚度约为双面组合梁的 85%。混凝土顶板开裂后,CCB1、CCB2、DCB 刚度下降较多,而 CLB 刚度几乎没有降低,开裂后 CCB2、DCB 和 CLB 的刚度相当。

表 1 截面刚度 $MN \cdot m^2$

截面类型	初始刚度	开裂后刚度
CCB1	2.3×10^5	9.0×10^4
CCB2	3.3×10^5	1.1×10^5
DCB	3.9×10^5	1.2×10^5
CLB	1.3×10^5	1.2×10^5

2.3 极限弯矩

由截面全过程分析得出 4 种组合梁截面的开裂弯矩、弹性极限弯矩和塑性极限弯矩,结果如表 2 所示。

表 2 截面极限弯矩 $MN \cdot m$

截面形式	开裂弯矩	弹性极限弯矩	塑性极限弯矩
CCB1	1.7	81.2	120.2
CCB2	1.9	152.3	219.8
DCB	1.8	181.1	248.3
CLB	4.8	169.6	205.5

由表 2,DCB 与 CCB1 的开裂弯矩较低,CCB2 的开裂弯矩有所提高,CLB 的开裂弯矩较其他形式组合梁提高了 1~2 倍,可有效延缓裂缝的开展;CLB 弹性极限弯矩与 DCB 相当,约为 CCB1 的 2 倍,CCB2 弹性极限弯矩略低于 DCB;DCB 的塑性极限弯矩较 CLB 和 CCB2 提高了 10%~20%,约为 CCB1 的 2 倍。

2.4 裂缝宽度分析

钢-混凝土连续组合梁负弯矩区裂缝的开展成为学者们研究的重要课题,因此采取一定的措施减缓裂缝的发展成为连续组合梁研究的重中之重。混凝土顶板与钢梁的连接程度和刚度比都对裂缝的开展有一定的影响。

文献[9]中将裂缝分为受弯、轴心受拉、偏心受拉和偏心受压裂缝,其最大裂缝宽度 ω_{\max} 为

$$\omega_{\max} = \alpha_{\sigma} \psi \frac{\sigma_s}{E_s} \left(1.9C_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \quad (7)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_s} \quad (8)$$

式中, α_{σ} 为构件受力特征系数,普通组合梁与双面组合梁为轴拉型裂缝,取值 2.7;组合与叠合梁为弯曲裂缝,取值 1.9; ψ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数, $0.2 \leq \psi \leq 1.0$; σ_s 为钢筋混凝土构件纵向受力钢筋的等效应力; C_s 为最外层纵向受拉钢筋净保护层厚度; ρ_{te} 为按照受拉钢筋混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋的配筋率, $\rho_{te} = (A_r + A_p) / A_{te}$, A_r 为普通钢筋面积, A_p 为预应力钢筋面积, A_{te} 为有效受拉混凝土截面面积, $\rho_{te} < 0.01$ 时,取 $\rho_{te} = 0.01$; d_{eq} 为受拉区纵向钢筋的等效直径。

根据以上计算公式,得到 CCB2、DCB 和 CLB 3 种截面的组合梁在正常使用荷载下的最大裂缝宽度,如表 3 所示。

截面类型	CCB2	DCB	CLB
最大裂缝宽度	0.548 8	0.488 3	0.017 56

由表 3 可知,正常使用荷载下,CCB2 的裂缝宽度最大,DCB 次之,CLB 的裂缝宽度很小,仅为前两者的 3%。

3 结论

本文用截面全过程分析法研究了钢-混凝土普通组合梁、双面组合梁和组合与叠合梁截面的受力性能和梁最大弯曲裂缝宽度。结论如下:

(1) 混凝土顶板开裂后,普通组合梁(钢底板厚 30 mm)、双面组合梁和组合与叠合梁的弯曲刚度相当。

(2) 组合与叠合梁的开裂弯矩较普通组合梁和双面组合梁提高了 1~2 倍;三者的弹性极限弯矩相差不大;双面组合梁的塑性极限弯矩最大,较普通组合梁(钢底板厚 30 mm)和组合与叠合梁提高了 10%~20%。

(3) 正常使用荷载下,组合与叠合梁的裂缝宽度仅为普通组合梁或双面组合梁的 3%。

参 考 文 献

- [1]Reiner S. Bridges with double composite action [J]. Structural Engineering International, 1996(1):32-36.
- [2]Kim H, Shim C S. Experimental investigation of double composite twin-girder railway bridges [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009,65(6):1355-1365.
- [3]Shim C S, Whang J W, Chung C H, et al. Design of double composite bridges using high strength steel[J]. Procedia Engineering,2011(14):1825-1829.
- [4]段树金,霍军会,安蕊梅. 钢-混凝土双面组合连续梁承载能力研究[J]. 铁道学报,2010,32(5):82-87.
- [5]段树金,牛润明,安蕊梅,等. 钢-混凝土组合与叠合双重作用连续箱梁桥:中国,21090805. 0[P]. 2017-04-19.
- [6]聂建国,陶慕轩,聂鑫,等. 抗拔不抗剪连接新技术及其应用[J]. 土木工程学报,2015,48(4):7-14,58.
- [7]王园园,段树金,牛润明. 钢-混凝土组合与叠合双重作用梁负弯矩区刚度和叠合面滑移研究[J]. 工程力学,2018(S1):265-269.
- [8]聂建国,陶慕轩,吴丽丽,等. 钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展[J]. 土木工程学报,2012,45(6):110-122.
- [9]中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

Analysis of Cross Section Mechanical Properties of Steel-concrete Composite Beam Under Negative Bending Moment

Liang Xian¹, Duan Shujin^{1,2}, Meng Lijun^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to compare the static behaviors of different type of composite beams under negative bending moment, the whole process analysis of stress on cross section for steel-concrete composite beam, double composite beam and composite-laminated beam were carried out to get the moment-curvature curves of the beam section. Combined with an engineering example, the moment-curvature curves of the three types-four species composite beam sections and the corresponding stiffness at each stage were obtained. The maximum crack width of the three types of beams under service load were calculated and compared each other. The analysis results show that: after the top concrete slab cracking, the stiffness of the double composite beam, the common composite beam (with 30 mm thick bottom steel plate) and the composite-laminated beam are almost equivalent; the ultimate bearing capacity of the double composite beam is the highest one in the three type beams. The cracking moment of composite-laminated beam is about 2~3 times that of other two type beams; and its cracking width is only 3% of other types of beams under service load. Therefore, the composite-laminated beam section is more suitable to the negative bending moment region of the continuous composite beam.

Key words: double composite beam; composite-laminated beam; common composite beam; negative bending moment region; bending stiffness; whole process analysis; crack width

(上接第 123 页)

Damage Identification of Stay Cables Based on Wavelet Packet Analysis and Support Vector Machine

Li Yanqiang, Liu Deyun

(Mechanics Engineering Department, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Stay cables are the main force component of cable-stayed bridge. The damage of cables directly threatens the operation safety of cable-stayed bridge. A new damage detection method based on wavelet packet analysis and support vector machine (SVM) was proposed to detect the damage of stay cables in this paper. The acceleration response of the anchorage point of the cable and the girder was decomposed according to the wavelet packet theory, and the energy change rate index of the wavelet packet was constructed. The index was used as the input parameter of SVM, the stiffness reduction of cables was defined as damage factor and used as the output of SVM and the damage of stayed cable as the output of SVM were identified and located. The numerical verification of the single tower cable-stayed bridge in the laboratory was carried out. The results show that the damage identification method based on wavelet packet analysis and SVM can detect the damage of stay cables accurately, and the influence on results by input vector position and the number of input vectors is very little. With the increasing of the damage degree, the average forecast error is gradually reduced. It is shown that this method is robust to noises.

Key words: stay cable; damage identification; wavelet packet analysis; SVM; energy change rate