

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202007058



部分充填混凝土-钢箱连续 组合梁裂缝特征

郑艳^{1,2}, 王泽博¹, 莫时旭^{1,2}, 蒋越¹

(1. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004;
2. 桂林理工大学 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 对 5 根部分充填混凝土-钢箱连续组合梁进行静力加载试验, 研究组合梁在负弯矩作用下的混凝土面板的裂缝开裂和发展特征. 根据试验结果与理论分析, 综合考虑力比、栓钉间距对部分充填混凝土-钢箱连续组合梁裂缝特征的影响, 对比负弯矩区裂缝宽度试验值与各文献计算值. 结果表明: 力比对裂缝最大宽度的影响较大, 栓钉可引起次生裂缝的产生, 故应将力比及栓钉连接件的间距作为部分充填混凝土-钢箱组合梁中支座区最大裂缝宽度计算的重要参数.

关键词: 混凝土-钢箱连续组合梁; 负弯矩区; 裂缝特征; 力比; 栓钉间距

中图分类号: TU 398.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)02-0172-10

Crack Characteristics of Continuous Composite Beams of Partially Filled Concrete-Steel Box

ZHENG Yan^{1,2}, WANG Zebo¹, MO Shixu^{1,2}, JIANG Yue¹

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Rock-soil Mechanic and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Static loading tests were carried out on 5 partially filled concrete-steel continuous composite beams to study the cracking and development characteristics of cracks under the action of composite beams negative bending moment. According to the test results and theoretical analysis, the effects of force ratio and stud spacing on the crack characteristics of partially filled concrete-steel box continuous composite beams were comprehensively considered, and the experimental value of the crack width in the negative bending moment area was compared with the calculated value of various literatures. The results show that the force ratio greatly influences on the maximum cracks width; and studs can cause secondary cracks. The force ratio and the stud spacing should be taken as important parameters for calculating the maximum crack width in the bearing area of partially filled concrete-steel box composite beams.

Keywords: concrete-steel box continuous composite beams; negative bending moment area; crack characteristics; force ratio; stud spacing

混凝土-钢箱连续组合梁桥因其可以发挥钢材与混凝土各自的材料优势, 施工便捷及造价较低等优点, 被广泛应用到中小跨径桥梁的建设中, 但是组合连续梁桥由于支座附近混凝土与钢材皆处于不利的受力状态, 为了增大其跨越能力, 以及提高其结构的力学性能, 一些学者提出了双重组合结构. 通过在中

收稿日期: 2020-07-30

通信作者: 莫时旭(1964-), 男, 教授, 博士, 主要从事钢-混凝土组合结构的研究. E-mail: 478990056@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52068012); 广西自然科学基金资助项目(2019JJA160040)

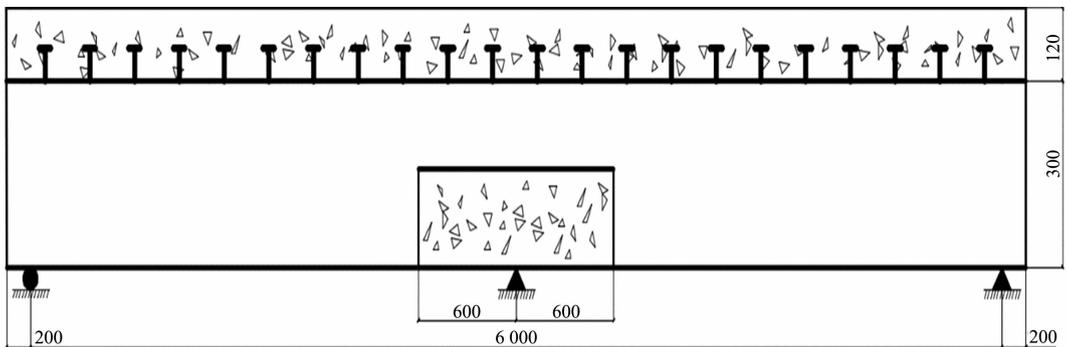
支座附近下缘增设混凝土, 参与受压, 以达到增大跨越能力、降低工程造价、增大结构刚度、调节结构受力分布, 以及减小钢板厚度等目的. 文献[1-3]在中支座附近的钢箱内部填充混凝土以改善负弯矩区的受力性能, 提高结构整体的承载力和刚度. 文献[4-12]研究影响组合梁负弯矩区裂缝发展的因素以有效控制其裂缝发展. 聂建国等^[13]认为综合力比(R)及栓钉间距对组合梁负弯矩区裂缝发展有显著影响, 并推导考虑力比和栓钉间距影响的最大裂缝宽度计算公式. 文献[14-15]在试验基础上, 将横向钢筋间距和力比作为主要影响参数, 给出混凝土桥面板的裂缝间距计算公式, 并对相关规范中的钢筋应变不均匀系数进行修正. 文献[16-18]理论推导组合梁混凝土开裂后截面钢筋的应力计算公式, 但对部分充填混凝土-钢箱连续组合梁的试验数据研究有限.

本文通过对 5 根部分充填混凝土-钢箱连续组合梁进行静力加载试验, 研究不同配筋率及抗剪连接度对负弯矩区开裂特征的影响, 提出开裂弯矩和裂缝宽度计算公式.

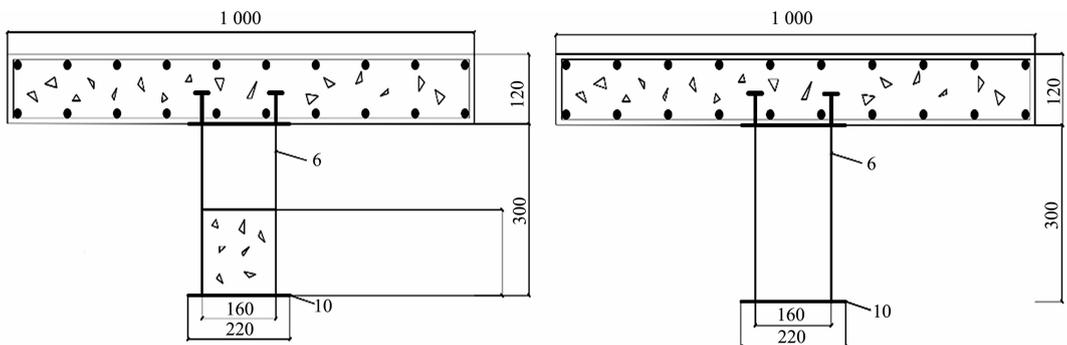
1 试验研究

1.1 试验设计方案

1.1.1 试验梁设计 设计 5 根部分充填混凝土-钢箱连续的组合梁(PFCSB1~PFCSB5), 试件总高度为 420 mm, 全长为 6 400 mm, 两端支座外预留长度为 200 mm. 钢梁选用 Q235 级钢板, 由厚度为 10 mm、宽度为 220 mm 的顶板和底板, 以及厚度为 6 mm、高度为 300 mm 的腹板共同焊接而成, 将厚度为 6 mm 的 Q235 级钢板作为水平隔板, 将试验梁负弯矩区域的钢箱分为上、下箱室, 并在下箱室充填 C40 混凝土, 充填高度为 137 mm. 试验梁构造图, 如图 1 所示.



(a) 纵截面图



(b) 中支座截面图

(c) 跨中截面图

图 1 试验梁构造图(单位:mm)

Fig. 1 Structure of test beam (unit: mm)

剪力连接件采用 $\Phi 12$ 、长 100 mm 的栓钉, 梁翼板采用 HRB400 级纵向钢筋, HPB300 级横向钢筋, 所有试件跨中配筋率均为 1%. 5 个试验梁均为同一批混凝土浇筑. 连续梁试件参数表, 如表 1 所示. 表 1 中: p 为负弯矩区栓钉间距.

钢材材料特性表, 如表 2 所示. 表 2 中: h 为钢板厚度; E_s 为弹性模量; f_s 为极限抗拉强度; f_y 为屈服强度. 翼板采用 C40 混凝土, 截面尺寸为 1 000 mm \times 120 mm, 混凝土材料特性表, 如表 3 所示. 表 3

中: f_{cu} 为标准立方体抗压强度.

表 1 连续梁试件参数表

Tab. 1 Parameters of continuous beam specimen

参数	PFSCB1	PFSCB2	PFSCB3	PFSCB4	PFSCB5
中支区配筋率/%	1.0	1.5	2.0	1.5	1.5
抗剪连接度	1.00	1.00	1.00	0.50	0.75
ρ /mm	91.0	81.0	75.0	166.6	107.0

表 2 钢材材料特性表

Tab. 2 Steel material performances

名称	钢材种类	h /mm	E_s /GPa	f_s /MPa	f_y /MPa
纵向钢筋	HRB400	12	200	607	435
横向钢筋	HPB300	8	200	471	315
钢板 1	Q235	6	206	400	270
钢板 2	Q235	10	206	405	282

表 3 混凝土材料特性表

Tab. 3 Concrete material performances

试验梁	f_{cu} (翼板混凝土)/MPa		f_{cu} (钢箱内填混凝土)/MPa	
	28 d	试验时	28 d	试验时
PFSCB1	43.67	51.29	41.59	44.38
PFSCB2	43.35	52.27	41.69	47.50
PFSCB3	43.56	52.09	43.54	47.39
PFSCB4	44.66	49.62	42.58	44.83
PFSCB5	44.78	50.58	41.29	45.54

1.1.2 试验加载装置及测量系统 两跨连续试验梁中支座采用固定铰支座,边支座采用可调移动铰支座,利用油压千斤顶在试验梁跨中点加载.千斤顶上放置压力传感器,监测每级施加的荷载值,支座安放压力传感器测定支座反力.试件加载装置图,如图 2 所示.试验初裂阶段,每级荷载为 20 kN,待首条贯通裂缝产生后,将每级荷载增大至 40 kN.

用记号笔将混凝土面板划分成间距为 100 mm 的方格网,便于迅速标注裂缝的位置及发展.每级加载结束后,待持荷稳定,记录裂缝发展长度,并用裂缝观测仪读取裂缝宽度.

连续组合梁挠度测定布置图,如图 3 所示.图 3 中:①~⑬为梁不同部位布置的挠度计.试验梁中支座部位、跨中截面翼板顶面、纵筋、钢箱顶底板及腹板粘电阻应变片,采用应变箱采集应变数据.



图 2 试件加载装置图

Fig. 2 Loading device of specimen

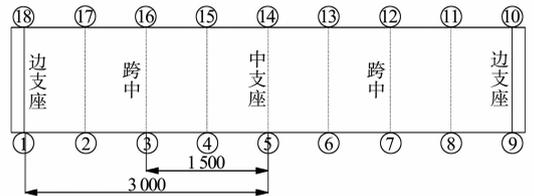


图 3 连续组合梁挠度测定布置图(单位:mm)

Fig. 3 Deflection measurements of continuous composite beams (unit: mm)

混凝土面板及混凝土翼板钢筋应力测点布置图,分别如图 4,5 所示.

1.2 试验梁受力过程

试验梁荷载-挠度图,如图 6 所示.图 6 中: P 为荷载; f 为挠度.

由图 6 可知:试验梁整个受力过程分为 3 个阶段.第 1 阶段为弹性工作阶段,该阶段为试验梁从加

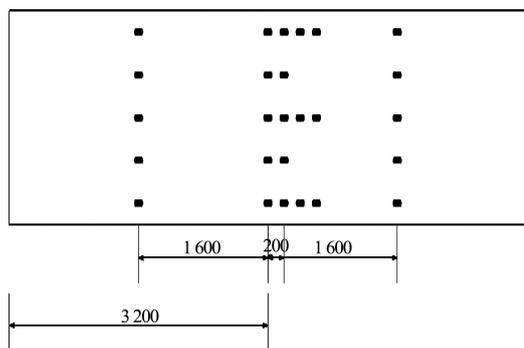


图 4 混凝土面板测点布置图(单位:mm)

Fig. 4 Loading device of specimen concrete panel (unit: mm)

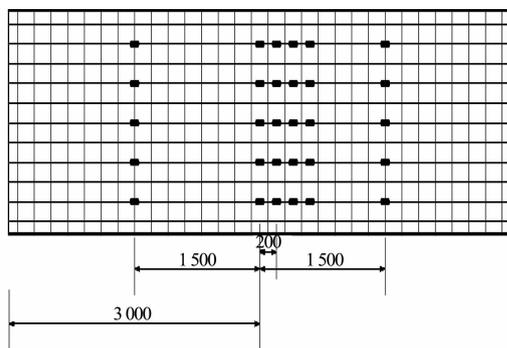


图 5 混凝土翼板钢筋应变测点布置图(单位:mm)

Fig. 5 Arrangement of strain measuring points for reinforcement of concrete flange (unit: mm)

载至钢箱底板屈服前, 荷载-挠度近似直线关系; 第 2 阶段为弹塑性工作阶段, 钢箱底板开始屈服, 组合梁刚度降低, 挠度的增加速率明显高于荷载的增加速率, 跨中截面内力重分布程度加大; 第 3 阶段为塑性破坏阶段, 跨中钢箱腹板逐渐屈服, 组合梁混凝土翼板塑性中和轴高度上升, 混凝土底板、侧板的开裂宽度加深. 在试验梁达到极限承载力前, 正弯矩区的钢箱腹板出现斜向凹凸屈曲波, 破坏时, 承载力则取决于混凝土顶板极限压应力和钢箱底板极限抗拉强度.

1.3 裂缝特征

试验梁各阶段裂缝分布图, 如图 7 所示.

由图 7 可知: 第一条裂缝出现在组合梁中支座附近翼板中间区, 随着荷载的持续增加, 并向翼板边缘延伸, 当荷载为 200 kN 左右时, 在翼板顶面出现横向贯通裂缝; 随着荷载的继续增加, 横向裂缝由中支座向跨中发展, 逐渐形成多条横向贯通的裂缝, 间隔为 80~150 mm; 当荷载超过 600 kN, 在已贯通的裂缝之间出现一些短小的次裂缝; 在近跨中位置, 受加载点局部应力影响常产生 C 字形裂缝; 随着荷载的持续增加, 主裂缝宽度随着受拉钢筋的屈服迅速增大, 配筋率最大的 PFSCB3 与其他梁相比, 裂缝分布更为均匀和密集.

试验梁荷载-裂缝关系图, 如图 8 所示. 图 8 中: ω 为裂缝宽度.

由图 8(c) 可知: PFSCB3 的 3 条主要裂缝宽度发展相对比较均匀, 裂缝宽度增大较缓慢, 最大裂缝宽度达到 0.2 mm 时, 荷载已达到 1 000 kN, 可见配

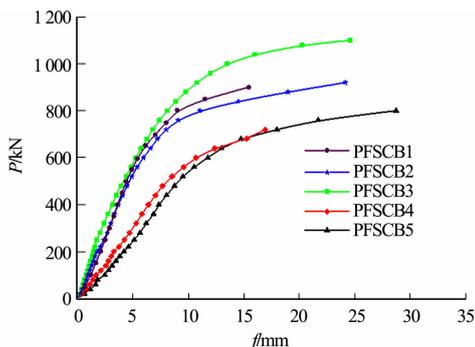
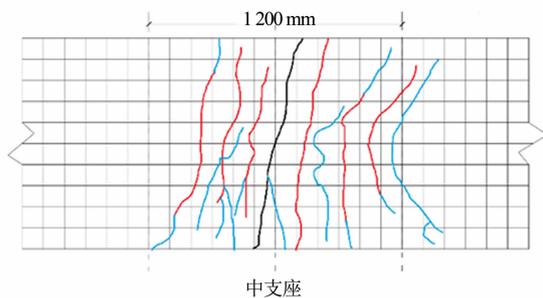
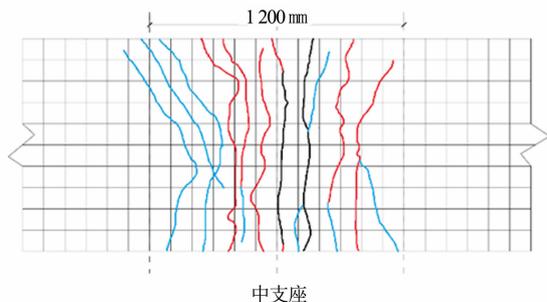


图 6 试验梁荷载-挠度图

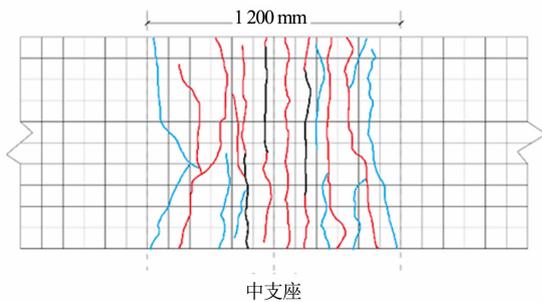
Fig. 6 Load-deflection relationship of test beams



(a) 试件 PFSCB1



(b) 试件 PFSCB2



(c) 试件 PFSCB3

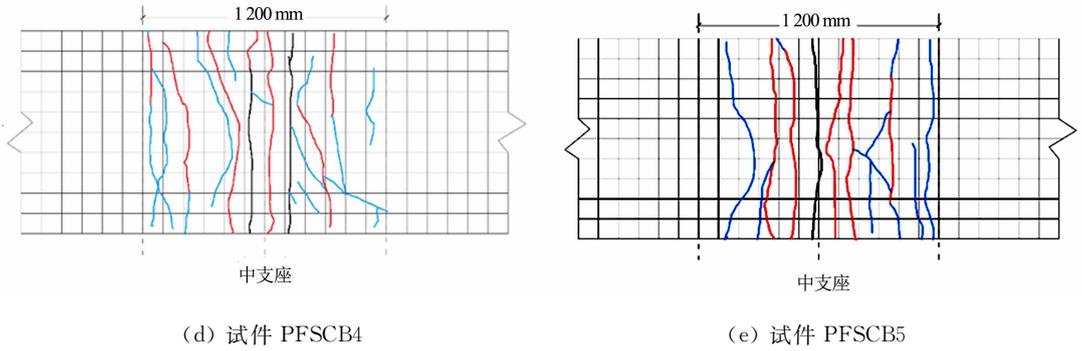


图7 试验梁裂缝分布图

Fig. 7 Crack distributions of test beams

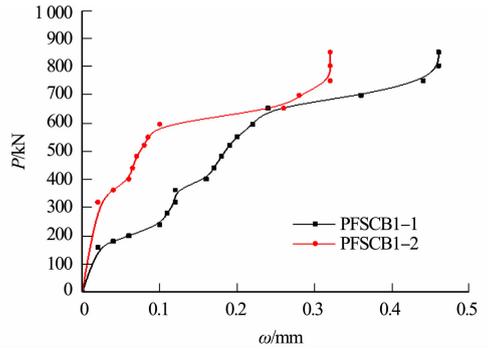
筋率提高可以有效控制裂缝发展。

综合分析,组合梁在全受力过程中负弯矩区翼板裂缝的发展大致呈现4个阶段的特点。

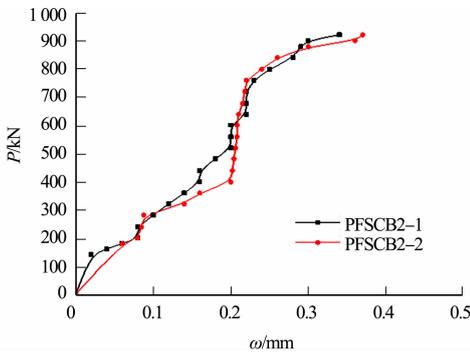
第1阶段为初裂阶段,在到达极限承载力约15%左右时,试验梁均在中支座板中心附近出现第1条裂缝,在到达极限承载力约20%时,第1条裂缝横向贯通。

第2阶段为裂缝均匀增加阶段,荷载在极限承载力的20%~60%阶段,翼板裂缝由中支座向跨中等间距发展,逐渐产生多条横向贯通裂缝。

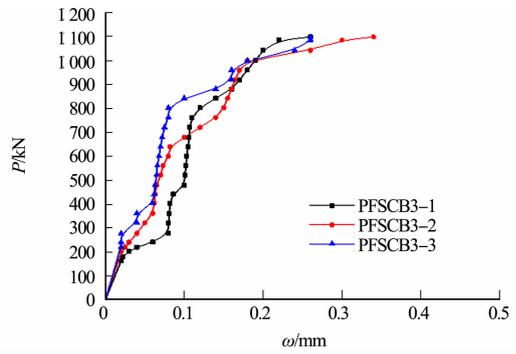
第3阶段为裂缝加密阶段,荷载增加至极限荷载的



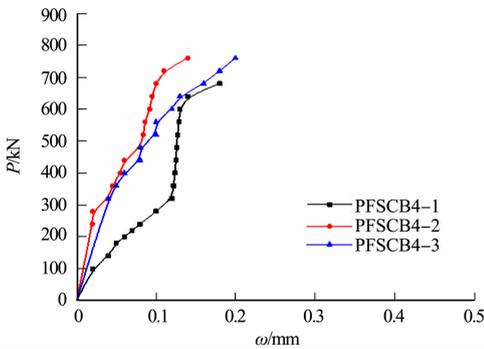
(a) PFSCB1



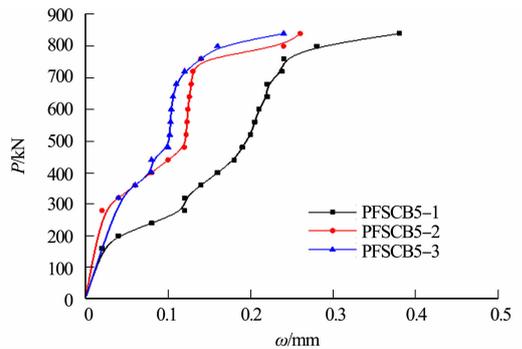
(b) PFSCB2



(c) PFSCB3



(d) PFSCB4



(e) PFSCB5

图8 试验梁荷载-裂缝关系图

Fig. 8 Load-crack relationship of test beams

60%以后,在贯通横向裂缝间产生次级加密裂缝。

第4阶段为裂缝宽度快速增长阶段,此时,组合进入承载力极限状态,梁变形快速增大,翼板不再产生新的裂缝,主要的裂缝宽度开始剧烈扩展,直至组合梁破坏。

2 试验结果分析

2.1 开裂弯矩

通过记录翼板应变片数据随加载等级的变化, 可以准确得出混凝土面板的开裂荷载, 进而计算试验梁中支座截面实测开裂弯矩. 试验梁的中支座混凝土翼板荷载-应变曲线, 如图 9 所示. 图 9 中: ϵ_c 为混凝土面板的应变值.

由图 9 可知: 曲线的首个转折点即为混凝土翼板开裂后, 裂缝两侧混凝土翼板局部卸载, 导致邻近裂缝的应变片记录的应变略有下降; 试验梁 PFSCB1 ~ PFSCB5 的开裂荷载分别为 120, 139, 160, 143, 147 kN 左右, 这与试验过程中裂缝观测记录的试验梁开裂荷载基本吻合.

羊海林等^[19]综合考虑混凝土抗拉强度、收缩应力及截面特征, 推导出的负弯矩区混凝土面板的开裂弯矩计算公式为

$$M_{c,r} = (\gamma_{sc} f_t - \sigma_{cs}) W', \tag{1}$$

$$W' = I_{cs} / y, \tag{2}$$

$$I_{cs} = I'_{si} + I'_{sj} + I'_{sm} + I'_{sk} + I'_s + I'_c, \tag{3}$$

$$\sigma_{cs} = E_c \left[\epsilon_{c0} - \frac{1}{2} (\epsilon_{c1} + \epsilon_{c2}) \right]. \tag{4}$$

式(1)~(4)中: γ_{sc} 为组合梁截面塑性系数, γ_{sc} 为 1.8^[20]; W' 为换算截面后混凝土翼板上表面的弹性抗弯刚度; y 为组合梁形心至混凝土翼板上表面的距离; $I'_{si}, I'_{sj}, I'_{sm}, I'_{sk}, I'_s, I'_c$ 分别为换算截面后底板、顶板、腹板、翼板、纵向钢筋和填充混凝土的惯性矩; I_{cs} 为组合梁截面的弹性抗弯惯性矩; f_t 为混凝土抗拉强度设计值; σ_{cs} 为混凝土的收缩应力; E_c 为混凝土的弹性模量; ϵ_{c0} 为混凝土自由收缩应变; $\epsilon_{c1}, \epsilon_{c2}$ 分别为混凝土上表面的实际收缩应变和界面混凝土实际收缩应变.

各试件的开裂弯矩计算值与试验值, 如表 4 所示. 表 4 中: M'_{cr} 为实验值. 由表 4 可知: 开裂弯矩计算值与试验值基本吻合.

表 4 开裂弯矩计算值与试验值

Tab. 4 Calculated values and experimental results of cracking-moment

试验梁	f_t /MPa	σ_{cs} /MPa	M_{cr} /kN·m	M'_{cr} /kN·m	M_{cr}/M'_{cr}
PFSCB1	2.45	2.918	78.13	73.13	1.07
PFSCB2	2.45	2.927	80.52	78.02	1.03
PFSCB3	2.45	2.947	81.69	81.63	1.00

由于试验梁 PFSCB2, PFSCB4, PFSCB5 的配筋率与其他截面特性相同, 故其开裂弯矩理论值计算结果相同, 在此只用 PFSCB2 进行比较.

2.2 综合力比对裂缝开展的影响

综合考虑配筋率和钢箱的共同作用, 可以更好地了解组合结构的裂缝开展特征. 用综合力比 R 表示组合梁负弯矩区截面的物理性能, 即

$$R = \frac{A_r f_{ry}}{A_s f_y + A_c f_c}. \tag{5}$$

式(5)中: A_r 与 f_{ry} 分别为负弯矩区截面受拉钢筋的截面积与屈服强度; A_s 与 f_y 分别为钢梁的截面积和屈服强度; A_c 与 f_c 为钢梁内填充混凝土的截面积与屈服强度.

各试验梁裂缝特征数值, 如表 5 所示. 表 5 中: l 为平均裂缝间距; ω 为裂缝宽度.

通过混凝土面板应变数据的突变点可以准确得到各试验梁的开裂荷载. PFSCB1 中支座负弯矩区共有 8 条可观测的裂缝, 缝有两条, 宽度分别为 0.46, 0.32 mm. 其中, 贯通裂 PFSCB2 在负弯矩区共产生 9 条可被观测的裂缝, 最大裂缝宽度为 0.38 mm. 相比 PFSCB1, PFSCB2 混凝土面板的裂缝宽度发

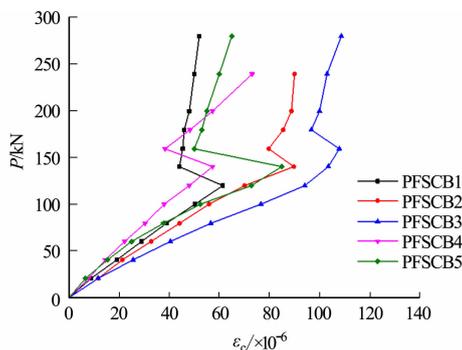


图 9 试验梁中支座混凝土面板荷载-应变图
Fig. 9 Load-strain relationship of bearing concrete slab of test beams

表5 各试验梁裂缝特征数值

Tab. 5 Crack characteristics value of every test beam

试验梁	R	P/kN	l/mm	ω/mm
PFSCB1	0.167	120	104.2	0.46
PFSCB2	0.259	139	96.25	0.44
PFSCB3	0.335	160	98.75	0.34

展较为缓慢。PFSCB1~PFSCB3 荷载-裂缝宽度对比图,如图10所示。

由图10可知:虽然裂缝宽度增长缓慢,但PFSCB2在加载过程中产生了更多微小裂缝,裂缝密度也明显大于PFSCB1;PFSCB3在负弯矩区一共产生了8条可被观测的裂缝,其中的3条贯通裂缝的宽度分别为0.26,0.34,0.26 mm;PFSCB3的裂缝宽度发展速率大致与PFSCB2相近,但是纯弯段的裂缝宽度明显小于PFSCB2,在钢筋受拉的阶段裂缝发展在各试验梁中最为缓慢。

PFSCB1的 R 在所有试件中最小,裂缝发展特征与少筋梁的十分类似。当可观测的裂缝出现时,受拉钢筋随即屈服,裂缝宽度急剧增加,但是很少有细微裂缝产生,因此,其裂缝间距和裂缝宽度都偏大。由于钢梁的共同作用,使全梁的延性提高,导致其并未呈现明显的脆性破坏特征。随着 R 的增加,PFSCB2与PFSCB3的裂缝宽度增加的速度明显小于PFSCB1,且拥有更小的裂缝宽度与更大的裂缝密度。通过对裂缝产生荷载的分析研究,发现PFSCB1在300~400 kN的加载阶段,有6条裂缝出现。 R 相对较大的PFSCB2,PFSCB3梁裂缝的产生基本与加载等级呈现线性关系,即随着荷载的增大裂缝逐条产生,未发现裂缝在某一等级阶段集中出现的现象,可得出 R 较大的试验梁具有更大的刚度。

综上所述,综合 R 对部分充填混凝土-钢箱连续组合梁中支座区混凝土翼板裂缝宽度及开裂荷载均影响较大。适当提高中支座区的配筋率可以在提高开裂弯矩的同时,降低最大裂缝宽度。通过对裂缝密度及裂缝间距的分析,可以看出 R 对裂缝的分布和开展也有一定的影响, R 较大的试验梁拥有更大的开裂荷载、更慢的裂缝发展速度及更小的裂缝间距。

2.3 栓钉间距对裂缝发展的影响

连续梁剪跨区划分图,如图11所示。图11中: M^+ , M^- 分别为连续梁的正弯矩区和负弯矩区; m_1 为正弯矩最大点到边支座区段; m_2 , m_3 为正弯矩最大点到中支座区段。抗剪连接件作为组合梁的重要组成部分之一,在受力过程中的作用是传递剪力。组合梁负弯矩区混凝土受拉易开裂,而混凝土开裂退出工作后,纵向钢筋则承受了大部分拉应力,钢筋的拉应力又通过混凝土传递给栓钉。

由于栓钉的抗剪强度较大,进而抑制混凝土面板裂缝宽度的发展。当采用柔性抗剪连接件时,抗剪连接件的计算应以弯矩绝对值最大点及支座为界限。

当组合梁按完全抗剪连接设计时,每个剪跨区段内需要的连接件总数 n_i 为

$$n_i = V_s / N_{c_v} \quad (6)$$

式(6)中: V_s 为每个剪跨区段内钢梁与混凝土翼板交界面的纵向剪力; N_{c_v} 为单个抗剪连接件的受剪承载力设计值。部分抗剪连接组合梁连接件实配个数不得少于 n_i 的50%,文中PFSCB4与PFSCB5各剪跨区段内实配连接件的个数分别为 $0.5n_i$ 与 $0.75n_i$ 。

通过设计三根配筋率相同但抗剪连接度不同的试验梁分析栓钉间距对中支座负弯矩区裂缝发展的影响。PFSCB2,PFSCB5,PFSCB4试件中支座区栓钉间距分别为81.0,107.0,166.6 mm。栓钉间距对裂

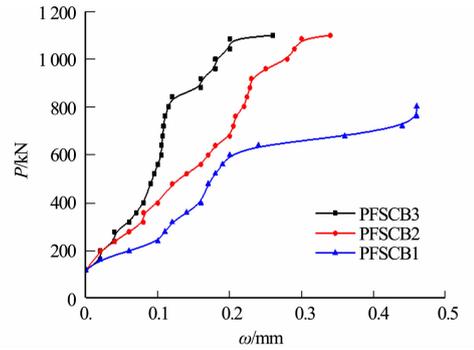


图10 PFSCB1~PFSCB3 荷载-裂缝宽度对比图

Fig. 10 Load-crack width comparison of PFSCB1-PFSCB3

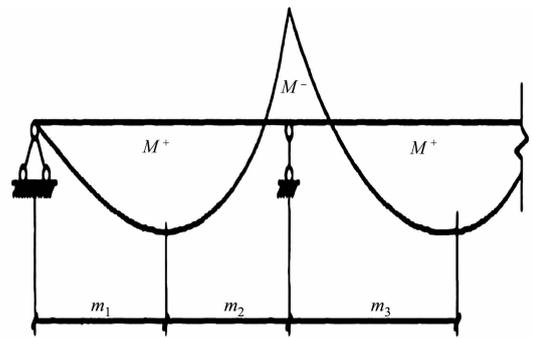


图11 连续梁剪跨区划分图

Fig. 11 Shear-span area of continuous beam

缝分布和平均裂缝间距的影响,如表 6 所示.表 6 中: r_c 为开裂范围.

由表 6 可知:随着栓钉间距的减小,裂缝平均间距及开裂范围也随之减小,且裂缝平均间距与栓钉间距十分相近.在裂缝分布范围内,绝大部分栓钉上都有开裂现象.这是因为开裂截面处,钢筋应变由于栓钉受到限制,钢筋的拉力通过混凝土传给栓钉,引起栓钉上方混凝土处的应力集中,尤其当裂缝开展较大时,连接件的作用更为明显.栓钉间距越小的试验梁产生的裂缝受到的限制越大,越能促进新裂缝的产生.除此之外,随着栓钉间距的减小,组合梁翼板内次生弯矩分布也相对更均匀一些,所以裂缝平均间距和最大裂缝宽度也随之减小.

表 6 栓钉间距对裂缝分布和平均裂缝间距的影响

Tab. 6 Influence of stud spacing on crack distribution and average crack spacing

试验梁	p/mm	r_c/mm	l/mm
PFSCB2	81.0	770.0	96.2
PFSCB5	107.0	900.9	128.7
PFSCB4	166.6	987.0	141.6

3 裂缝宽度计算

文献[13]考虑力比和栓钉间距的影响,建议组合梁最大裂缝的计算式为

$$\omega_{\max} = 1.45\psi\epsilon_r L_{\text{cr}}, \quad (7)$$

$$\psi = 1.1 - \frac{1.5Rf_{\text{tk}}}{\mu_{\text{ct}}\sigma_s}. \quad (8)$$

修正后的裂缝间距 L'_{cr} 为

$$L'_{\text{cr}} = 1.1 \left(2.7C + \frac{0.11}{\mu_{\text{ct}}/d + 0.25R^2/p} \right) v. \quad (9)$$

式(7)~(9)中: ϵ_r 为钢筋拉应变; d 为钢筋直径; p 为栓钉连接件间距; C 为最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离; v 为纵向受拉钢筋表面特征系数,选取 $v=0.7$; $\mu_{\text{ct}} = A_r/(b_c h_c)$, b_c, h_c 分别表示混凝土翼缘有效宽度和厚度.

文献[14]将横向钢筋间距和配筋力比作为重要影响参数,建议的连续组合梁桥面板最大裂缝计算公式为

$$\omega_{\max} = \alpha_{\text{cr}} \left[1.1 - 0.65 \frac{f_{\text{tk}}\sqrt{R}}{\rho_{\text{te}}\sigma_s} \right] \left(\frac{\sigma_s}{E_s} \right) l_a (1 - R^3). \quad (10)$$

式(10)中: l_a 为横向钢筋平均间距.

PFSCB1~PFSCB5 的弹性极限荷载为 P_y ,翼板顶面裂缝贯通后荷载达到 $0.8P_y$ 和 P_y 时,试验梁翼板裂缝宽度,如表 7,8 所示.表 7,8 中: $\omega_{0.8P_y}$ 为荷载等级 $0.8P_y$ 时的最大裂缝宽度实测值; ω_p 为弹性极限状态试验梁最大裂缝宽度实测值; ω_1, ω_2 分别对应式(7),(10)计算所得的最大裂缝宽度.

由表 7,8 可知:文献[14]所得的计算结果与试验值相差较大,而文献[13]由于综合考虑钢箱-混凝土组合梁的 R 、栓钉间距对裂缝宽度的影响,计算结果和试验值更为接近,对裂缝最大宽度的计算具有一定的参考意义.

为研究钢梁内有无填充混凝土对弹性阶段内连续组合梁混凝土翼板裂缝宽度的影响,采用文献[13]的公式计算无填充混凝土-钢箱连续组合梁在弹性阶段内的翼板最大裂缝宽度,并与部分填充混凝土

表 7 $P=0.8P_y$ 时试验梁翼板裂缝宽度

Tab. 7 Crack widths of test beams when $P=0.8P_y$

试验梁	$\omega_{0.8P_y}/\text{mm}$	ω_1/mm	ω_2/mm	$\omega_{0.8P_y}/\omega_1$	$\omega_{0.8P_y}/\omega_2$
PFSCB1	0.18	0.20	0.28	0.90	0.64
PFSCB2	0.20	0.18	0.34	1.11	0.58
PFSCB3	0.10	0.11	0.26	0.91	0.38
PFSCB4	0.10	0.13	0.26	0.78	0.38
PFSCB5	0.18	0.17	0.32	1.06	0.56

表8 $P=0.8P_y$ 时试验梁翼板裂缝宽度Tab.8 Crack widths of test beams when $P=0.8P_y$

试验梁	ω_p /mm	ω_1 /mm	ω_2 /mm	ω_p/ω_1	ω_p/ω_2
PFSCB1	0.24	0.27	0.40	0.89	0.60
PFSCB2	0.22	0.24	0.45	0.92	0.49
PFSCB3	0.14	0.20	0.43	0.70	0.33
PFSCB4	0.12	0.18	0.36	0.67	0.33
PFSCB5	0.20	0.22	0.42	0.91	0.48

土钢箱连续组合梁的最大裂缝宽度进行对比。有、无填充混凝土连续组合梁翼板裂缝宽度对比,如表9所示。表9中: ω_3 与 ω_5 分别为部分填充混凝土连续组合梁在 $0.8P_y$ 与 P_y 荷载等级下的最大裂缝宽度计算值; ω_4 与 ω_6 分别为无填充混凝土连续组合梁在 $0.8P_y$ 与 P_y 荷载等级下的最大裂缝宽度计算值。

表9 有、无填充混凝土连续组合梁翼板裂缝宽度对比

Tab.9 Comparison of flange crack width of continuous composite beam with and without concrete filling

试验梁	$\omega_{0.8P_y}$ /mm	ω_3 /mm	ω_4 /mm	ω_p /mm	ω_5 /mm	ω_6 /mm
PFSCB1	0.18	0.20	0.31	0.24	0.27	0.41
PFSCB2	0.20	0.18	0.26	0.22	0.24	0.34
PFSCB3	0.10	0.11	0.21	0.14	0.20	0.28
PFSCB4	0.10	0.13	0.15	0.12	0.18	0.20
PFSCB5	0.18	0.17	0.19	0.20	0.22	0.25

由表9可知:在弹性阶段内,部分填充混凝土钢箱连续组合梁的最大裂缝宽度计算值小于无填充混凝土连续组合梁的计算值。这主要由于钢梁内填充混凝土提高了中支座负弯矩区截面的抗弯刚度,使得部分填充混凝土钢箱连续梁受拉钢筋的拉应力小于同一荷载等级下无填充混凝土连续梁的受拉钢筋。

4 结论

1) 部分充填混凝土-钢箱连续组合梁负弯矩区配筋率配筋率提高,裂缝密度增大,裂缝宽度增大减缓,当组合梁负弯矩区配筋率为1.0%,1.5%,2.0%时,对应试验梁弹性极限荷载时的裂缝宽度分别为0.24,0.22,0.14 mm,组合梁负弯矩区翼板配筋率对裂缝控制作用明显。

2) 当裂缝开展较大时,栓钉可以有效限制裂缝宽度的进一步增加,转而促进更多次生裂缝的产生。

3) 考虑混凝土收缩应力影响和组合截面塑性系数,计算开裂弯矩与试验结果吻合良好,当组合梁负弯矩区配筋率为1.0%,1.5%,2.0%时,对应试验梁的开裂弯矩分别为78.13,80.52,81.69 kN·m,表明混凝土翼板配筋率提高对开裂弯矩的影响不大。

4) 部分充填混凝土-钢箱组合梁弹性工作阶段混凝土翼板最大裂缝宽度的计算应综合考虑组合梁的配筋率、力比、栓钉间距及钢箱内混凝土填充度的影响。

参考文献:

- [1] 廖俊晟. 部分填充混凝土窄幅钢箱连续组合梁桥双组合作用研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2012.
- [2] 羊海林, 郑艳, 莫时旭. 负弯矩区部分填充混凝土对窄幅钢箱-混凝土组合梁受力性能影响试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(11): 131-139. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0004.
- [3] 班志鹏, 江雪, 郑艳, 等. 滑移对部分填充式钢箱-砼组合梁承载力的影响[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, 37(5): 570-575. DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.2016.05.009.
- [4] WANG Yuhang, YU Jie, LIU Jiepeng, *et al.* Experimental study on assembled monolithic steel-prestressed concrete composite beam in negative moment[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 27: 1313-1328. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.06.004.
- [5] LUO Jun, SHAO Xudong, FAN Wei, *et al.* Flexural cracking behavior and crack width predictions of composite (steel + UHPC) lightweight deck system[J]. Engineering Structures, 2019, 194: 120-137. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.05.018.

- [6] XU Liyan, NIE Xin, TAO Muxuan. Rational modeling for cracking behavior of RC slabs in composite beams subjected to a hogging moment[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 192:357-365. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.163.
- [7] 余志武, 郭凤琪. 部分预应力钢-混凝土连续组合梁负弯矩区裂缝宽度试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2004(4):55-59. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2004.04.009.
- [8] HENRIQUES D, ALVES R G, SOUSA C, *et al.* GBT-based time-dependent analysis of steel-concrete composite beams including shear lag and concrete cracking effects[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 27:1294-1312. DOI:10.1016/j.tws.2020.106706.
- [9] ZHANG Jing, HU Xiamin, FU Weijie, *et al.* Experimental and theoretical study on longitudinal shear behavior of steel-concrete composite beams[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 171:DOI:10.1016/j.jcsr.2020.106144.
- [10] KHORASANI A M M, ESFAHANI M R, SABZIA J. The effect of transverse and flexural reinforcement on deflection and cracking of GFRP bar reinforced concrete beams[J]. *Composites Part B*, 2019, 161:530-546. DOI:10.1016/j.compositesb.2018.12.127.
- [11] 余洁, 王宇航, 刘界鹏, 等. 装配整体式预应力钢-混凝土组合梁负弯矩区开裂刚度研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(增刊1):316-324. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2019.S1.042.
- [12] 伍凯, 徐超, 曹平周, 等. 型钢-钢纤维混凝土组合梁抗弯性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(9):41-52. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2019.09.004.
- [13] 聂建国, 张眉河. 钢-混凝土组合梁负弯矩区板裂缝的研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 1997(6):97-101. DOI:10.16511/j.cnki.qhdxxb.1997.06.025.
- [14] 张彦玲, 樊健生, 李运生. 连续组合梁桥裂缝发展规律分析及裂缝宽度计算[J]. *工程力学*, 2011, 28(7):84-90.
- [15] 樊健生, 聂建国, 张彦玲. 钢-混凝土组合梁抗裂性能的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(2):1-7. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2011.02.007.
- [16] 戴昌源, 苏庆田. 钢-混凝土组合桥面板负弯矩区裂缝宽度计算[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(6):806-813. DOI:10.11908/j.issn.0253-374x.2017.06.003.
- [17] 苏庆田, 李雨, 王巍, 等. 组合梁连接件剪力突变机理及简化计算方法[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(7):54-59. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2014.07.007.
- [18] 苏庆田, 杨国涛, 吴冲. 钢箱组合梁混凝土裂缝特征试验[J]. *中国公路学报*, 2012, 25(5):74-81. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2012.05.012.
- [19] 羊海林, 莫时旭, 郑艳, 等. 部分充填混凝土窄幅钢箱组合梁抗裂性能研究[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2014, 39(6):1441-1447. DOI:10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2014.06.018.
- [20] 胡夏闽. 欧洲规范4-钢-混凝土组合梁设计方法(4):组合梁的受弯承载力[J]. *工业建筑*, 1995(12):42-49. DOI:10.13204/j.gyjz1995.12.011.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)