

预应力钢-混凝土连续组合梁抗弯性能试验

胡少伟, 叶祥飞

(南京水利科学研究院材料结构研究所, 江苏 南京 210024)

摘要:为研究预应力钢-混凝土连续组合梁的抗弯性能和内力重分布情况, 设计了7根简支组合梁、3根连续组合梁以及1根连续纯钢梁进行抗弯性能试验。试验结果表明: 预应力连续组合梁抗弯性能良好, 对负弯矩区的混凝土翼板施加预应力能明显提高组合梁的截面刚度, 减缓连续组合梁的开裂, 同时也降低了截面滑移; 预应力筋内力增量与荷载、挠度均呈现较好的线性关系。

关键词:预应力; 连续组合梁; 负弯矩; 抗弯性能; 内力重分布

中图分类号: TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2014)01-0037-06

Test for flexural behavior of pre-stressed steel concrete continuous composite beams//HU Shaowei, YE Xiangfei
(Materials & Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to study the flexural behaviors and the redistribution of the internal force of pre-stressed steel concrete continuous composite beams, seven simply supported composite beams, three continuous composite beams, and one continuous pure steel beam were designed to test for flexural behavior. The test results show that the flexural behaviors of pre-stressed continuous composite beams are good; the pre-stress added to concrete flange in the area of the hogging moment can improve the rigidity of the composite beam section, slow the crack of continuous composite beams, and reduce the section slip as well; and the internal force increment of pre-stressed rebar has a strong linear relationship with load and deflection.

Key words: pre-stress; continuous composite beam; hogging moment; flexural behavior; redistribution of internal force

钢材与混凝土作为目前土木工程中应用最广泛的两种建筑材料, 具有不同的力学性能特点, 钢-混凝土组合梁结构是基于钢结构和钢筋混凝土结构发展起来的一种新型的横向承重结构, 主要由钢梁与混凝土翼板通过剪力连接件组合形成共同受力的整体, 充分发挥钢材受拉和混凝土受压的力学性能^[1-2]。随着国民经济的快速发展, 对工程设计的要求也越来越高, 逐步出现了预应力钢-混凝土简支组合梁结构和预应力钢-混凝土连续组合梁结构, 预应力技术的出现缓解了普通钢-混凝土组合梁负弯矩区开裂和刚度不足的问题, 但目前对连续组合梁的抗弯性能研究并不充分^[3-4]。本试验设计9根预应力钢-混凝土组合梁(PCB-25~PCB-28、PCB-30、PCB-31、PCCB-32~PCCB-34)进行连续组合梁抗弯性能试验, 通过改变剪力连接程度、预应力施加、荷载加载方式等试验参数和条件分析预应力组合梁受弯时的变形、截面应变、界面滑移及破坏形态; 研究剪力连接程度对正弯矩简支组合梁极限抗弯承载力的影响、翼板施

加预应力的负弯矩组合梁的抗弯性能及预应力钢-混凝土连续组合梁的内力重分布情况, 为实际工程中预应力组合梁的设计提供参考。

1 试验内容

1.1 试验梁设计

试验设计4根正向加载的简支组合梁(PCB-25~PCB-28)、3根反向加载的简支组合梁(CB-29、PCB-30、PCB-31)、3根连续组合梁(PCCB-32~CCB-34), 同时, 为更好地比较连续组合梁与连续纯钢梁受力性能的不同, 还设计1根连续纯钢梁(SB-35)。试验梁均采用 $\varnothing 8@200$ 的箍筋, 翼板面积均为 $800\text{ mm}\times 130\text{ mm}$, 其他基本设计参数如表1所示。

组合梁的混凝土翼板采用强度等级为C60的高强混凝土, 上下均匀配置5根热轧光圆钢筋HPB235, 箍筋采用 $\varnothing 8$ 热轧圆盘条, 剪力连接件采用牌号为ML15AL的 $\varnothing 16\times 100$ 圆柱头栓钉, 普通平焊B1型瓷环, 均沿梁长纵向双排均匀布置, 其中连续组合梁采

表 1 试验梁的基本设计参数

试 件	跨度/mm	纵筋	预应力筋	栓钉	加载方式
PCB-25	4000	10 $\varnothing$ 10	2 $\varnothing$ ¹ 15.2	2 $\varnothing$ 16@140	正向对称加载
PCB-26	4000	10 $\varnothing$ 10	2 $\varnothing$ ¹ 15.2	2 $\varnothing$ 16@140	正向对称加载
PCB-27	4000	10 $\varnothing$ 10	2 $\varnothing$ ¹ 15.2	2 $\varnothing$ 16@280	正向对称加载
PCB-28	4000	10 $\varnothing$ 12	2 $\varnothing$ ¹ 15.2	2 $\varnothing$ 16@280	正向对称加载
CB-29	4000	10 $\varnothing$ 12		2 $\varnothing$ 16@750	反向对称加载
PCB-30	4000	10 $\varnothing$ 12	3 $\varnothing$ ¹ 15.2	2 $\varnothing$ 16@180	反向对称加载
PCB-31	4000	10 $\varnothing$ 12	3 $\varnothing$ ¹ 15.2	2 $\varnothing$ 16@270	反向对称加载
PCCB-32	7750	10 $\varnothing$ 16	2 $\varnothing$ ¹ 15.2	2 $\varnothing$ 16@90	对称加载
PCCB-33	7750	10 $\varnothing$ 16	2 $\varnothing$ ¹ 15.2	2 $\varnothing$ 16@90	对称加载
CCB-34	7750	10 $\varnothing$ 12		2 $\varnothing$ 16@140	对称加载
SB-35	7750				对称加载

用完全剪力连接,栓钉间距为 140 mm,正弯矩简支组合梁 PCB-25、PCB 26 与 PCB-27、PCB 28 的栓钉间距分别为 280 mm、140 mm;负弯矩简支组合梁 CB-29、PCB-30、PCB-31 的栓钉间距分别为 750 mm、180 mm、270 mm,预应力筋采用 $\varnothing$ ¹15.2 的钢绞线。组合梁试件的截面构造详图如图 1 所示,各种材料的力学性能参数由材料力学性能试验获得,见表 2~4。

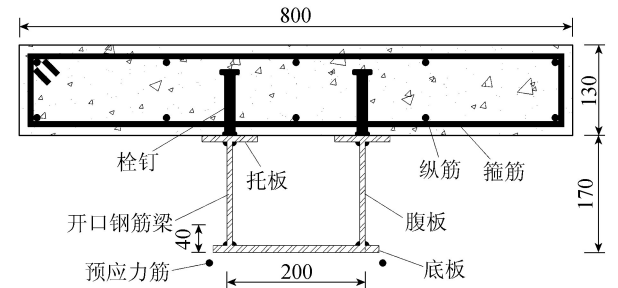


图 1 组合梁截面构造详图(单位:mm)

表 2 钢板力学性能参数

类型	弹性模量/ GPa	屈服应变/ 10 ⁻⁶	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa
腹板	206	1456	300	445
托板与底板	206	1165	240	400

表 3 钢筋、预应力筋力学性能参数

类型	直径/ mm	截面面积/ mm ²	弹性模量/ GPa	屈服应变/ 10 ⁻⁶	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa
纵筋	10	78.50	206	1214	250	385
箍筋	8	50.24	206	1190	245	380
预应力筋	15.2	181.37	195	7153	1395	1860

表 4 混凝土力学性能参数

试 件	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	抗压弹性 模量/GPa	抗拉弹性 模量/GPa
PCB-25	66.67	2.61	46.36	35.9
PCB-26	66.67	2.61	46.36	35.9
PCB-27	66.67	2.61	46.36	35.9
PCB-28	66.67	2.61	46.36	35.9
CB-29	67.52	2.66	48.16	30.6
PCB-30	67.52	2.66	48.16	30.6
PCB-31	67.52	2.66	48.16	30.6
PCCB-32	62.16	4.05	36.10	39.7
PCCB-33	62.16	4.05	36.10	39.7
CCB-34	62.16	4.05	36.10	39.7

钢梁力学性能参数由生产厂家提供。由于试验条件的限制,未对预应力钢绞线进行材料力学性能试验,在设计和计算过程中,根据混凝土结构设计规范其极限强度取标准值 1860 MPa,弹性模量取 195 GPa。

1.2 试验装置及加载方案

试验加载装置采用八通道液压伺服机,结合配套的伺服液压计算机控制系统,使用其中一个通道,通过分油器使得两个 600 kN 的千斤顶出力相等,实现同步加载,试验加载装置如图 2 所示。试验采用分级(每级 8 kN)持续加载,在混凝土出现裂缝、钢梁屈服及破坏阶段则减小荷载等级,以确定组合梁的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载。



图 2 试验加载装置

预应力筋采用体外直线形布置方式,在预应力筋张拉中组合梁会出现“拱效应”,为避免混凝土顶部开裂与破坏后预应力筋不致被拉断,将每根预应力筋张拉至 100 kN。由于预应力钢绞线不能同时被张拉,为避免梁在偏心受力情况下发生开裂,每根预应力钢绞线分 6 级进行张拉。考虑到张拉端锚具的变形、锚具与端板之间的缝隙以及应力松弛等造成的预应力损失,试验进行一定程度的预应力超张拉^[5],张拉值为控制应力值的 1.03 倍。每级张拉后,通过布置在锚固端的压力传感器测量预应力筋的应力大小,确保达到试验所需的张拉应力。

1.3 试验仪器及测量内容

试验测量的主要内容包括典型截面的钢筋、钢梁、混凝土、栓钉及预应力钢绞线等各种材料的应变、跨中挠度、钢与混凝土交界面的相对滑移及支座反力。

a. 对于钢和混凝土两种材料,沿梁长方向在跨中截面、弯剪段中间截面以及距加载点一定距离截面分别布置型号为 BF120-3AA、BF120-80AA 的电阻应变片,通过东华 DH3816 静态应变采集仪测量跨中截面和弯剪段中间截面的混凝土、钢梁及钢筋的应变,以研究各截面的应变分布;同时,沿混凝土翼板宽度方向布置 3 个应变片,测量翼板的正向正应力分布,以验证混凝土翼板的剪力滞效应。

b. 在梁的支座处、加载点及跨中布置电子位移计测量试验梁的挠度。

- c. 沿梁长方向从跨中到端支座均匀布置 7 个导杆引伸仪,引伸仪的两端分别位于混凝土翼板和钢梁上,以测量钢与混凝土交界面在该区段内的相对滑移。
- d. 在梁端的预应力筋锚具上放置应变式压力传感器,以控制预应力张拉值及测量预应力筋内力增量。
- e. 在梁的左右支座处各设置一个滚动铰支座反力测试装置,以测量连续组合梁的内力重分布情况。

2 试验结果与分析

2.1 弯矩-挠度关系

正向、反向加载的简支组合梁弯矩-挠度关系曲线如图 3 所示。从图 3(a)可以看出,完全剪力连接的简支组合梁 PCB-27、PCB-28 的抗弯刚度要大于部分剪力连接的简支组合梁 PCB-25、PCB-26,但刚度与剪力连接程度并不成正比例关系,而且无论是完全剪力连接还是部分剪力连接,预应力简支组合梁的弯矩-挠度特征曲线都大致可划分为 3 个阶段:从开始加载至 $0.6M_u$ (M_u 为极限弯矩),组合梁钢梁底部开始屈服,此阶段抗弯刚度基本保持不变,可称为弹性工作阶段;继续加载弯矩从 $0.6M_u$ 到极限弯

矩 M_u ,组合梁中钢梁的屈服范围逐渐向上延伸,抗弯刚度逐步减小,变形及变形速率逐渐增大,此阶段可称为弹塑性阶段;达到极限荷载后,钢筋已达到屈服,混凝土开始压碎,组合梁刚度迅速减小,跨中挠度迅速增长,组合梁已不能继续承载。考虑到试验的安全因素,故没有换用位移控制加载继续加载,没有测出荷载减小、变形增加的过程,即下降段。

从图 3(b)可以看出,预应力简支组合梁 PCB-30、PCB-31 的弯矩-挠度关系曲线比较一致,尤其是在弹性工作阶段吻合良好;预应力简支组合梁相比普通简支组合梁 CB-29 具有更大的刚度,当荷载加至开裂弯矩 $30\text{ kN}\cdot\text{m}$ 时,普通简支组合梁的抗弯截面刚度逐渐减小,其弯矩-挠度关系曲线的斜率明显开始偏离预应力组合梁的,说明在混凝土翼板上施加预应力,能明显提高简支组合梁的开裂弯矩,增大弹性工作区段。从图 3(b)可以看出,对于承受负弯矩的简支组合梁,无论是否施加预应力,其受力过程也可划分为 3 个阶段,这与文献[6-7]的结论一致。

连续组合梁的弯矩-挠度关系曲线如图 4 所示。PCCB-32、PCCB-33 为两根试验参数完全相同的预应力连续组合梁,但图 4 中二者的弯矩-挠度关系曲线出现了一定的偏离,经过试验数据分析,主要有 3 个原因:一是在加载过程中,前者跨中钢梁先出现屈服,而后者是中支座的钢筋先出现屈服,可能在试件制作过程中 PCCB-32 混凝土浇注不均匀,跨中的刚度相对较小,因此其挠度较 PCCB-33 的大;二是预应力的大小不同, PCCB-32 的初始预应力较 PCCB-33 的小,而试验发现预应力的大小与跨中挠度的相关性较高;三是由于两个千斤顶的出力和位置有误差,导致左跨的端支座反力值偏大,故而跨中钢梁先于中支座钢筋达到屈服,从而两根试验梁的弯矩-挠度曲线都出现了偏差。此外,根据图 4 看出,在弹塑性阶段的后期,PCCB-33 的刚度较其他施加预应力的连续组合梁小,变形更大,这与文献[8-9]的结论一致。从图 4 还可以看出,钢-混凝土连续组合梁的抗弯刚度明显高于连续纯钢梁。

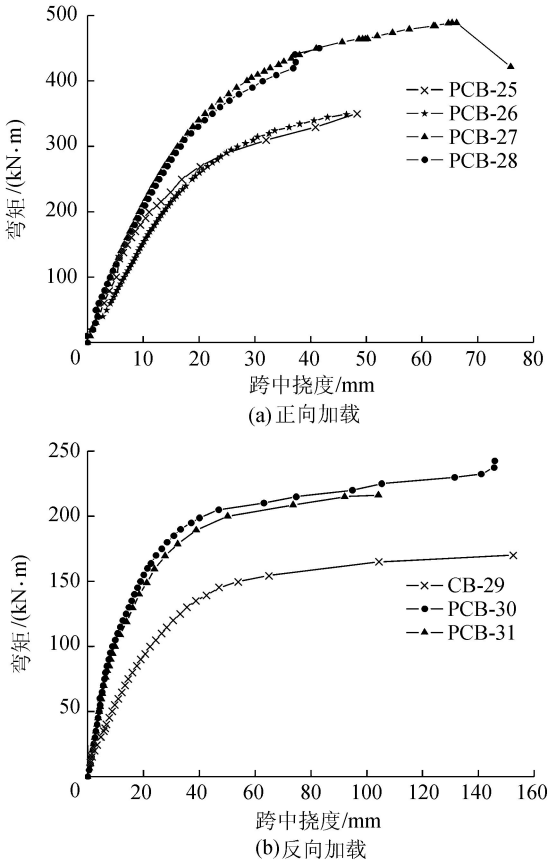


图 3 简支组合梁的弯矩-挠度关系曲线

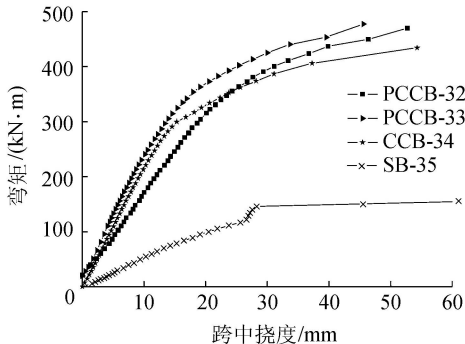


图 4 连续组合梁的弯矩-挠度关系曲线

2.2 混凝土应变

承受正弯矩的简支组合梁及连续组合梁跨中截面的混凝土压应变与弯矩的关系曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出,栓钉间距较大的组合梁与间距小的组合梁相比,前者的混凝土压应变随荷载的增长较快;当组合梁发生受弯破坏时,无论是简支组合梁,还是连续组合梁,且不论是否施加预应力,混凝土的压应变与弯矩的关系曲线均较为一致,且具有较长的线性增长段,其弹塑性工作区段较小,极限压应变均能达到 $2\,400\times 10^{-6}$ 以上,超过了混凝土棱柱体达到极限抗压强度时的应变值 $2\,000\times 10^{-6}$ 。这说明混凝土材料的受压性能比较稳定,在组合梁中不受结构形式的影响,为进行组合梁计算时直接运用小试件所得出的本构关系提供了试验依据。

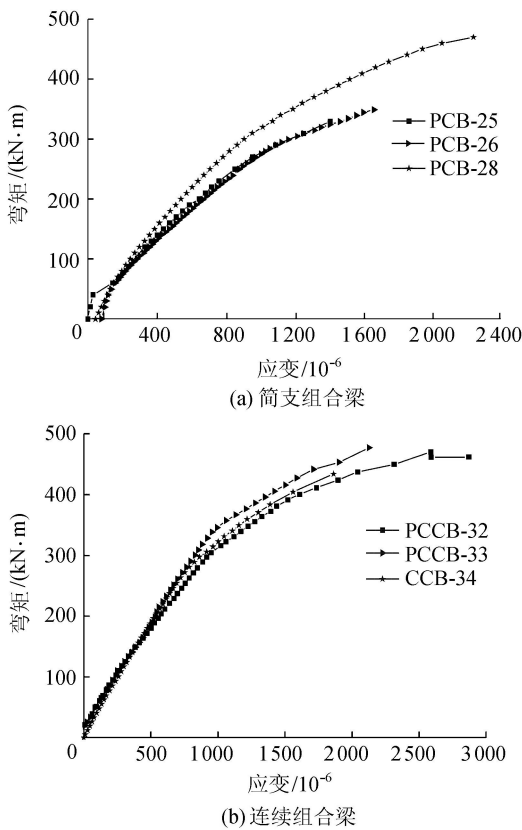


图 5 组合梁混凝土压应变与弯矩的关系曲线

2.3 钢筋应变

试验梁受力过程中钢筋应变与弯矩的关系曲线如图 6 所示,应变值为跨中截面翼板上层布置的纵筋应变。从图 6 可以看出,对于承受负弯矩的组合梁 CB-29、PCB-31,其开裂弯矩分别为 $30\text{ kN}\cdot\text{m}$ 、 $85\text{ kN}\cdot\text{m}$,说明对混凝土翼板施加预应力,可以明显提高开裂弯矩,延长组合梁的弹性工作区段;各组合梁在极限状态时,无论受压还是受拉,钢筋均达到屈服,并发生了一定程度的应力强化。

2.4 弯矩-滑移关系

组合梁的弯矩-滑移关系曲线如图 7 所示。每

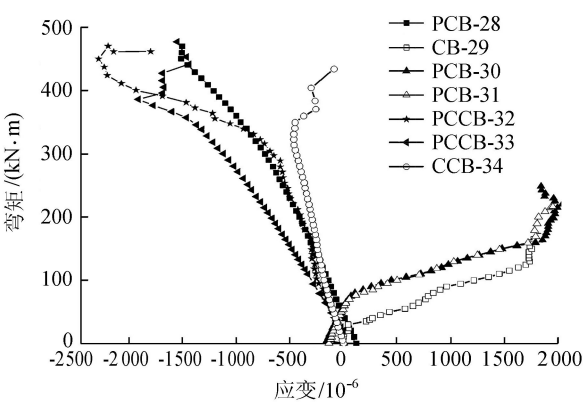


图 6 钢筋应变与弯矩的关系曲线

根组合梁分别给出了多个截面滑移与弯矩的关系曲线,每个截面位置以距跨中的距离表示。从图 7 可以看出,所有组合梁的弯矩-滑移关系曲线均大致可划分为 4 个阶段:在加载初期,钢与混凝土组合良好,滑移量基本为零;随着荷载的增大,钢与混凝土之间的黏结力开始发生破坏,交界面开始产生滑移,此时滑移与弯矩呈线性关系;随后混凝土所承受的压应力逐渐增大,但还没有达到极限抗压强度,混凝土发生压缩变形,滑移量增长开始加快;随着荷载的继续增加,混凝土开始被压碎,栓钉也发生弯曲变形,交界面滑移迅速增加,直至组合梁破坏。上述 4 个阶段的划分与文献[10-11]的结论一致。

2.4 预应力筋内力增量

对组合梁施加预应力,无论预应力筋布置在钢梁上还是混凝土翼板中,预应力筋与组合梁成为一个整体,随着荷载的增加,预应力筋会随着组合梁的变形而变形,从而产生预应力筋内力增量。各组合梁的有效预应力及预应力筋内力增量情况见表 5,其中 P_0 为有效预应力, ΔP_y 为弹性状态时的预应力筋内力增量, ΔP_u 为极限承载力状态时的预应力筋内力增量。预应力筋内力增量与荷载、挠度的关系曲线如图 8、图 9 所示。

表 5 预应力筋内力增量

				kN			
试件	P_0	ΔP_y	ΔP_u	试件	P_0	ΔP_y	ΔP_u
PCB-26	244.34	40.99	111.08	PCB-31	427.31	46.56	165.25
PCB-28	205.10	68.27	191.30	PCCB-32	110.53		31.32
PCB-30	433.70	47.39	211.40	PCCB-33	112.83		29.74

根据表 5 并结合图 8、图 9 可以看出,连续组合梁的预应力筋内力增量最小,这主要是因为连续组合梁的刚度较大,变形相对较小;栓钉间距小的组合梁的预应力筋内力增量较间距大的组合梁大,且在相同荷载下,后者产生的预应力筋内力增量大,说明栓钉间距小的组合梁具有更大的刚度;对于承受负弯矩的组合梁,开裂后混凝土退出工作,组合梁截面刚度减小,主要是纵向钢筋承受拉应力^[12-14],因此,

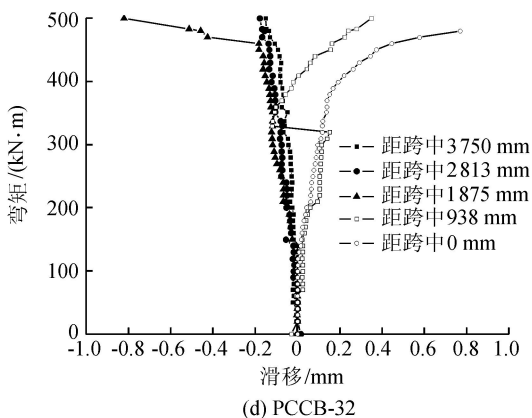
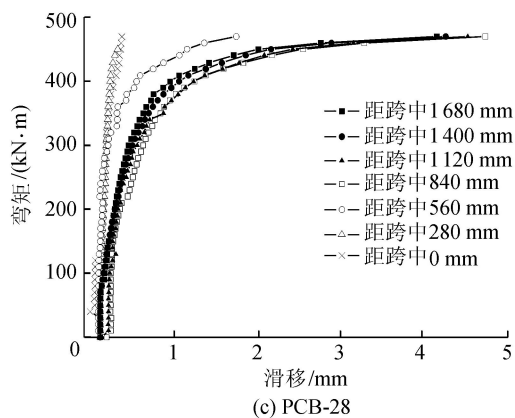
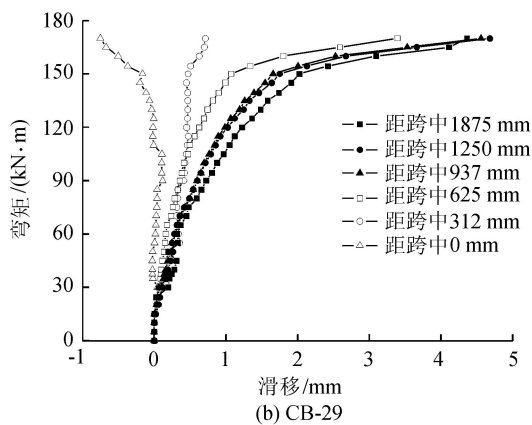
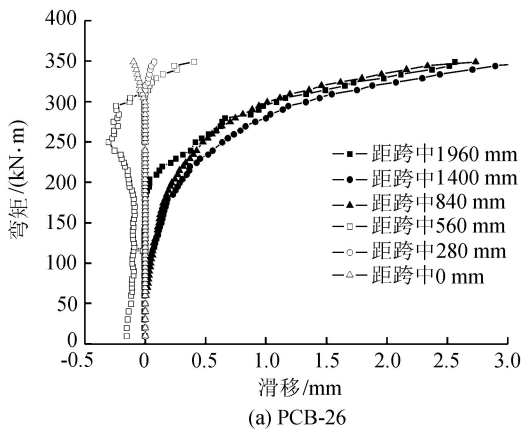


图7 不同截面位置的弯矩-滑移关系曲线

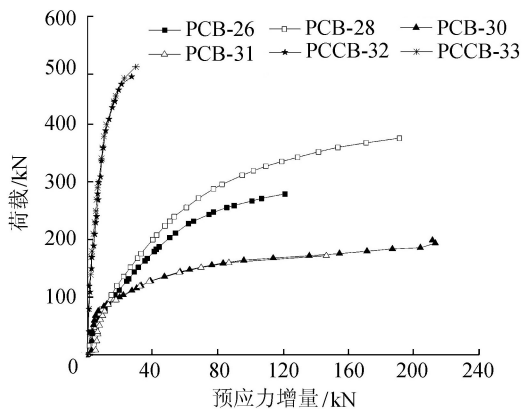


图8 预应力筋内力增量与荷载的关系曲线

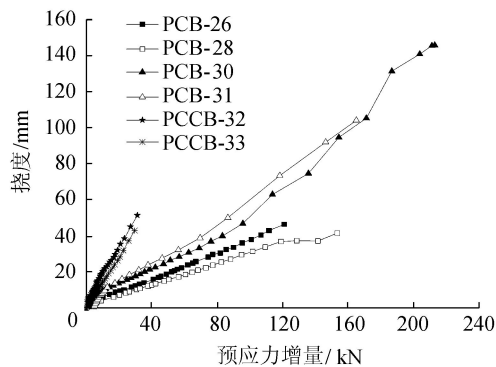


图9 预应力筋内力与挠度的关系曲线

承受负弯矩的组合梁变形较大,从而具有较大的预应力筋内力增量;无论是简支组合梁或是连续组合

梁,跨中挠度均与预应力筋内力增量呈现出较好的线性关系。

2.5 连续组合梁的内力重分布

在加荷的初期阶段,连续组合梁各截面刚度一致,随着荷载的增加,中支座混凝土发生开裂,从而使中支座截面附近刚度降低,致使连续梁沿梁长的抗弯刚度不再相同,此外,随着中支座处纵向钢筋及钢梁的屈服,产生塑性铰,从而使连续组合梁发生内力重分配^[15],中支座反力向端支座转移,使得跨中弯矩增大,中支座弯矩减小,这一现象也称作弯矩调幅。4根连续试验梁的荷载-弯矩关系曲线如图10所示,其中 P_u 为预应力筋极限状态所承受的拉力。

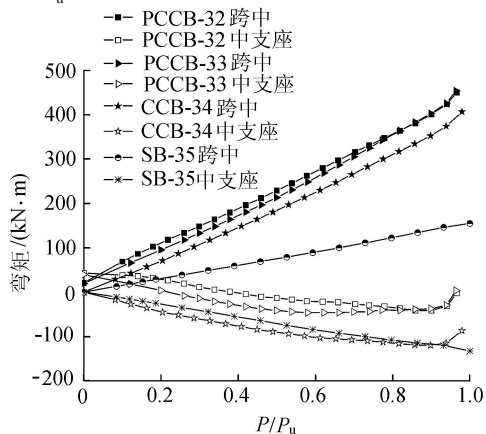


图10 荷载-弯矩关系曲线

从图 10 可以看出,在加载初期,预应力连续组合梁负弯矩区尚未开裂,各区段刚度一致,弯矩随荷载呈线性增长;随着荷载的增加,中支座开始出现裂缝,刚度降低,连续组合梁开始出现内力重分布;当荷载增至 $0.8P_u$ 时,中支座处钢筋、钢梁均发生屈服,产生塑性铰,中支座弯矩逐渐减小,跨中弯矩继续增加,当荷载增大至 $0.9P_u$ 时,中支座也出现塑性铰,连续组合梁达到极限承载力;对于纯钢梁,由于各区段的刚度基本一致,内力重分布现象不明显。

3 结 论

a. 对于承受正弯矩的简支组合梁表现为受弯破坏;对于连续组合梁,中支座及跨中钢梁均有可能先发生屈服,破坏时表现为跨中混凝土被压碎。

b. 完全剪力连接的组合梁的抗弯刚度大于部分剪力连接组合梁,但刚度与剪力连接程度并不成正比比例关系;当剪力连接程度为 0.5 时组合梁的抗弯极限承载力较完全剪力连接组合梁降低 28%。

c. 在混凝土翼板上施加预应力,能明显提高组合梁的开裂荷载,增大弹性工作区段,并且减小界面滑移,增强组合梁的协同工作;连续组合梁预应力筋内力增量较简支组合梁小;在相同荷载下,栓钉间距小的组合梁预应力筋内力增量较间距大的组合梁大;对于承受负弯矩的组合梁,开裂后主要是纵向钢筋承受拉应力组合梁变形较大,从而具有较大的预应力筋内力增量;组合梁跨中挠度均与预应力筋内力增量呈现出较好的线性关系。

参考文献:

- [1] 胡少伟. 组合梁抗扭分析与设计[M]. 北京: 人民交通出版社,2005.
- [2] 聂建国. 钢-混凝土组合梁结构: 试验、理论与应用[M]. 北京: 科学出版社,2005.
- [3] 胡少伟,涂启华. 基于 COLSYS 软件的闭口组合箱梁约束复合弯扭下的非线性分析[J]. 水利水运工程学报, 2009 (1): 1-9. (HU Shaowei, TU Qihua. COLSYS software based on the silent combination box girder under constraint composite bending and twisting the nonlinear analysis[J]. Hydro-Science and Engineering,2009(1):1-9. (in Chinese))
- [4] 胡少伟,聂建国. 箱形钢-混凝土组合梁的复合弯扭试验研究[J]. 建筑结构, 2006, 36 (8): 54-59. (HU Shaowei, NIE Jianguo. Experimental study on composite steel concrete beams with box sections under combined bending and torsion [J]. Building Structures, 2006, 36 (8): 54-59. (in Chinese))
- [5] 胡少伟,胡汉林. 预应力混凝土组合箱梁扭后抗弯性能分析[J]. 水利水运工程学报, 2011 (3): 1-9. (HU

- Shaowei, HU Hanlin. Bending behavior study of prestressed composite steel-concrete box beams damaged by torsion[J]. Hydro-Science and Engineering. 2009, 30 (2): 67-72. (in Chinese))
- [6] 聂建国,崔玉萍,石中柱,等. 部分剪力连接钢-混凝土组合梁受弯极限承载力的计算[J]. 工程力学, 2000, 17 (3): 37-42. (NIE Jianguo, CUI Yuping, SHI Zhongzhu, et al. Ultimate flexural capacity of composite steel-concrete beams with partial shear connection [J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(3): 37-42. (in Chinese))
- [7] BROZZETTI J. Design development of steel-concrete composite bridges in France. [J] Journal of Constructional Steel Research, 2000, 55: 229-243.
- [8] GALAMBOS T V. Recent research and design developments in steel and composite steel-concrete structures in USA [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 55: 289-303.
- [9] 王连广,哈娜,于建军. 基于能量法的 U 型钢与混凝土组合梁变形计算分析[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2009, 30 (3): 4-7. (WANG Lianguang, HA na, YU Jianjun. Deformation analysis of composite concrete girders with cold formed U-bar based on energy theory [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2009, 30(3):4-7. (in Chinese))
- [10] 胡汉林. 预应力组合梁结构抗弯性能试验研究与理论分析[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010.
- [11] 孙文彬. 部分剪力连接钢-混凝土简支组合梁的滑移性能分析[J]. 长沙交通学院学报, 2001, 17 (4): 55-59. (SUN Wenbin. Analysis of the slip property of the simply supported steel-concrete composite beams with partial shear connection [J]. Journal of Changsha Railway University, 2001, 17(4):55-59. (in Chinese))
- [12] CHAPMAN J C, BALAKRISHNAN S. Experiments on composite beams [J]. The Structural Engineer, 1964, 42 (11): 369-383.
- [13] 聂建国,赵洁. 钢板-混凝土组合简支梁的试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41 (12): 28-34. (NEI Jianguo, ZHAO Jie. Experimental study on simply supported steel plate-concrete composite beams[J]. China Civil Engineering Journal. 2008, 41 (12): 28-34. (in Chinese))
- [14] 刘宝东,任红伟,李鹏飞. 考虑波纹钢腹板箱梁特点的挠度分析[J]. 中国铁道科学, 2011, 32 (3): 21-25. (LIU Baodong, REN Hongwei, LI Pengfei. Deflection analysis considering the characteristics of box girder with corrugated steel webs [J]. China Railway Science, 2011, 32(3):21-25. (in Chinese))
- [15] 聂建国,李红有,唐亮. 高强钢-混凝土组合梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30 (2): 67-72. (NIE Jianguo, LI Hongyou, TANG Liang. Experimental study on flexural behavior of HSS-concrete composite beams[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30 (2): 67-72. (in Chinese))

(收稿日期:2013-05-15 编辑:周红梅)