

端部不等高的钢-混凝土组合梁受力性能 试验研究

孙建鹏¹,刘银涛¹,孙文武¹,黄文锋²

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院,陕西 西安 710055;2. 合肥工业大学土木工程学院,安徽 合肥 230009)

摘要 目的 研究端部不等高的钢-混凝土组合梁的整体力学特性,为变截面钢-混凝土的研究提供参考.方法 制作两组1:15的缩比例的端部不等高的钢-混凝土组合梁并对其进行试验研究;分别对两个试件采用跨中单点加载与两点对称加载两种加载模式,测试参数为极限荷载、挠度、滑移以及截面应变等.结果 单点加载的极限承载力和跨中最大位移为669.51 kN和26.45 mm,两点对称加载的极限承载力和跨中最大位移为924.94 kN和15.35 mm.两点对称加载的破坏模式主要为剪切破坏,单点加载的破坏模式为剪切、弯曲与局部承压并存.结论 平截面假定适用于端部不等高的钢-混凝土组合梁的截面应力分析.与传统等截面钢-混凝土组合梁相比,端部变高度的钢-混凝土组合梁具有更大的抗弯刚度和抗剪承载能力.

关键词 钢-混凝土梁;变截面;平截面假定;挠度;极限荷载

中图分类号 TU311.2 文献标志码 A

Experimental Study on Mechanical Behavior of Steel-Concrete Composite Beams with Variable Height at the Ends

SUN Jianpeng¹, LIU Yintao¹, SUN Wenwu¹, HUANG Wenfeng²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, China, 710055; 2. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, China, 230009)

Abstract: The overall mechanical properties of steel-concrete composite beams with variable height at end are studied, which would provided some reference for the research of variable section steel-concrete. Two groups of steel-concrete composite beams with 1:15 ratio and variable height at end are fabricated and tested. The single point loading was adopted for one specimen and the two point symmetrical for another, and the ultimate load, deflection, slip and section strain, etc as the mainly parameters were discussed. The results show that the bearing capacity and maximum displacement

收稿日期:2019-08-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51408453);陕西省自然科学基金基础研究计划基金项目(2016JQ5075);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20136120120022);陕西省教育厅科研计划项目(17JK0463)

作者简介:孙建鹏(1981—),男,副教授,博士,主要从事结构静力、动力及稳定性能等方面研究.

of mid-span of the specimen with single point loading are 669.51 kN and 26.45 mm, while the other of specimen with two-point symmetrical loading is 924.94 kN and 15.35 mm respectively. The failure mode of the specimen with the two-point symmetrical loading is mainly shear failure, while the other of specimen with single point loading is the coexistence of shear, bending and local bearing. The plane section assumption is applicable to the section stress analysis of steel-concrete composite beams with unequal ends. Compared with the traditional steel-concrete composite beams with uniform section, the steel-concrete composite beams with variable height at the end have greater bending rigidity and shear capacity at end.

Key words: steel-concrete beam; variable section; flat section assumption; deflection; ultimate load

钢-混凝土组合梁由于其自重比较轻、整体刚度大、承载力高、截面小等一系列优点,已在房建与桥梁领域中得到越来越广泛的应用,同时又因其与钢梁桥和预应力混凝土梁桥相比有很强的竞争能力,被认为是21世纪推广应用的新型结构型式之一。

国内外有关钢-混凝土组合梁的力学的研究已经取得了较多的成果。A. ZONA等^[1-2]分析了剪力钉尺寸参数以及混凝土强度对抗剪承载力的影响,提出了剪力钉受剪承载力的计算模型,并作为多国家现行规范中有关设计公式的基础。李云辰^[3]和张锐^[4]虽从不同类型的桥梁出发,但归根节底都是从应力角度来探讨钢-混组合梁结构在同一荷载工况下各部位的受力情况,为实际工程提供了理论基础。处于弹性范围内,剪应力^[5]与正应力对于结构来说并不会带来损伤。但越过弹性阶段,钢-混组合梁的层间错动,滑移以及重复荷载下的疲劳性就会被迅速放大。基于此,聂建国等^[6-7]结合试验提出了钢-混凝土连接件滑移滞回模型,推导了不同荷载作用下钢-混凝土组合梁因滑移效应引起的挠度计算公式。在此基础上,聂建国^[8-9]和杨涛^[10]等对钢-混凝土组合梁的疲劳性能进行了深入研究,发现疲劳导致试件的屈服强度提高而极限荷载下降。P. KUMAR等^[11]发明了一种新型的粘合剂,其能有效抵御钢梁与混凝土之间的滑移。周勇超等^[12]也从抗滑移角度入手提出了梁端滑移计算公式,并进行了验证。另外,随着材料

科学的发展,近些年也诞生了从材料角度研究钢-混凝土组合梁的力学性能,例如,R. SHAMASS等^[13]将钢材换为不锈钢,承载能力得到明显提高;N. TONI^[14]将钢材的强度提高;M. PAKNAHAD等^[15]提高了混凝土的标号;万世成等^[16]探讨了预应力CFRP在钢-混凝土组合梁中的运用等等。

综上,目前针对于钢-混凝土组合梁的研究,基本停留在等截面梁的层次,变截面梁以及其他类型和模式的研究偏少。基于此,笔者提出了一种新的钢-混凝土组合梁形式,命名为端部不等高的钢-混组合梁。由于该类组合梁力学特性尚不明确,为了明确该类构件的力学特性、指导该类结构设计,笔者制作了两个端部不等高的钢-混组合梁试件,对其进行试验研究,探讨该类组合梁在现有的加载条件下的力学性能以及破坏模式。研究表明:不同的加载方式对于组合梁的极限承载能力影响很大;单点加载破坏模式为剪切、弯曲与局部承压破坏并存,两点对称加载主要为剪切破坏。与单一工字型钢-混凝土相比,变截面钢-混凝土组合梁从屈服荷载以及极限荷载都得到极大提升;不管加载方式如何,变截面钢-混凝土组合梁剪应力的分析与计算可参考单一工字形钢-混凝土组合梁的受力过程。

1 试验

1.1 试件设计

为研究端部不等高的钢-混组合梁在不同加载方式下的力学性能,设计了2个端部变

高度的钢-混组合梁,编号为A1和A2.该组合梁由等截面钢纵主梁、等截面中小纵梁、变截面横梁组成的钢框架和钢筋混凝土桥面板组成.试件的几何尺寸如图1~图3所示.图1中,①为边纵梁;②为横梁;③为中纵梁. L_c 、 b_c 、 h_c 分别为混凝土板的长、宽、高; b_f 、 b'_f 、 t_w 、 t_f 、 t'_f 、 h_0 、 h_s 分别为边纵梁的上下翼缘宽度、腹板厚度、上下翼缘板厚度、腹板高度、总高度; b_{f1} 、 b'_{f1} 、 t_{w1} 、 t'_{f1} 、 h_{01} 、 h_x 分别为中纵梁的上下翼缘宽度、腹板厚度、上下翼缘板厚度、腹板高度、总高度; b_{f2} 、 b'_{f2} 、 t_{w2} 、 t'_{f2} 、 h_{02} 、 h_s 分别为横梁端部的上下翼缘宽度、腹板厚度、上下翼缘板厚度、腹板高度、总高度; b_{f3} 、 b'_{f3} 、 t_{w3} 、 t'_{f3} 、 h_{03} 、 h_t 分别为横梁中部的上下翼缘宽度、腹板厚度、上下翼缘板厚度、腹板高

度、总高度.钢边纵梁、中小纵梁、钢横梁采用Q345qD桥梁用结构钢,均为焊接工字形截面.桥面板采用C45混凝土,桥面板采用现浇技术.混凝土板中的受力钢筋采用HRB235,直径为8mm,纵横向按照每隔两个剪力钉布置.剪力钉为ML15圆柱头焊钉,公称直径 $d=10$ mm,熔后高度为30mm,间距为100mm,沿梁长均匀分布.试件基本参数如表1、表2所示.

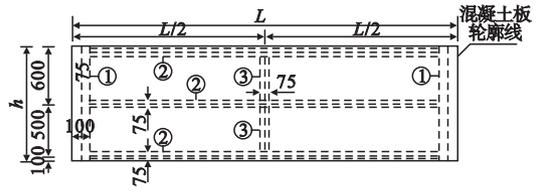


图1 模型平面图

Fig. 1 The model plane

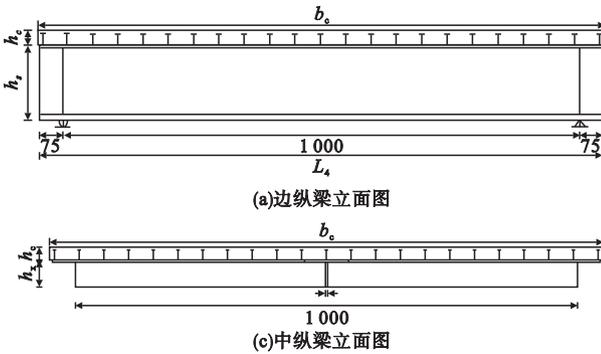


图2 纵梁示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the longitudinal beam

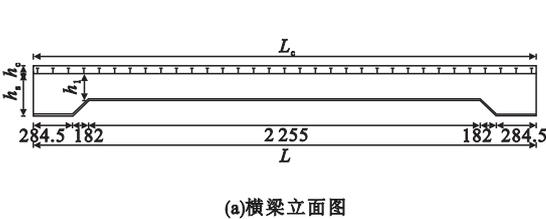
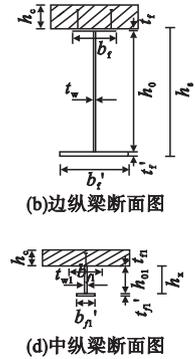


图3 横梁示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the cross beam

表1 加载方式及混凝土板参数表

Table 1 Loading modes and concrete plate parameters

试件编号	加载方式	混凝土板 长×宽×高/mm	配筋率/%		剪力钉 ML15 间距/mm	梁长 L/mm	荷载加载位置	荷载点距 梁端距离/mm
			纵向	横向				
A1	单点加载	3 318 × 1 200 × 40	0.6	0.5	纵:100 横:100	3 318	中横梁跨中	1 594
A2	两点对称加载	3 318 × 1 200 × 40	0.6	0.5	纵:100 横:100	3 318	中横梁 1/4 处	797

表2 钢梁参数表

Table 2 Steel beam parameter mm

钢梁	上翼缘		下翼缘		腹板		总高
	宽	厚	宽	厚	宽	厚	
边纵梁	5	100	10	156	5	337	352
中纵梁	4	75	4	38	3	117	125
横梁端	3	75	6	75	4	343	352
横梁中部	3	75	6	75	4	310	319

1.2 材料特性

试件加载前对试件所选的材料进行了力学性能试验,试验结果如表3、表4所示。

表3 材料的力学性能

Table 3 Mechanical properties of the materials

试件编号	材料类型	f_y /MPa	f_u /MPa	f_t /MPa	f_{cu} /MPa
A1	钢筋	335.8	504.6	—	—
	剪力钉	—	—	236.7	—
	混凝土	—	—	—	50.32
A2	钢筋	335.8	504.6	—	—
	剪力钉	—	—	238.2	—
	混凝土	—	—	—	49.56

注:钢筋材性为直径8 mm的带肋钢筋,剪力钉的外直径 $d=10$ mm;C45为所选的混凝土的型号; f_y 为钢材屈服强度; f_u 为钢材极限强度; f_t 为剪力钉连接件极限抗拉强度; f_{cu} 为混凝土抗压强度。

表4 钢板的力学性能

Table 4 Mechanical properties of steel plates

钢材种类	f_y /MPa	f_u /MPa	E /GPa
3 mm 厚钢板	493.5	586.3	211
4 mm 厚钢板	481.2	596.2	207
5 mm 厚钢板	472.9	605.5	205
6 mm 厚钢板	462.4	610.5	206
10 mm 厚钢板	420.8	630.8	198

注: E 为钢材的弹性模量。

1.3 加载装置

试验在西安建筑科技大学土木工程学院结构工程与抗震实验室液压结构试验机上完成。试件为静定结构。为了达到这一目的,试件左上角采用滚动支座,左下角采用单向活动支座,右上角采用单向活动支座,右下角采用固定铰支座。实验采用单调静力加载,加载装置如图4所示,内部构造如图5所示。

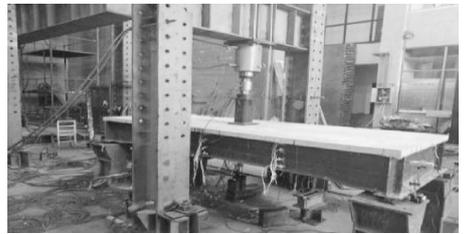


图4 实验加载装置

Fig. 4 Experimental loading device



(a)梁段成型图



(b)剪力钉布置图



(c)钢筋绑扎图

图5 内部构造图

Fig. 5 Internal structure diagram

1.4 加载方案

加载方式分为单点加载和两点对称加载,加载至结构破坏为止。单点加载与两点对称加载均采取逐级加载,试件屈服前每级荷

载增量为30 kN,试件屈服后每级加载力降为10 kN,直至构件破坏。在加载点下面铺设 200×200 mm钢垫板,钢板下用水泥砂浆找平。安装时使用水准仪调整各试件端部底面

标高,确保试件端部底面在同一水平面上.试验装置及加载布置示意图如图6所示.

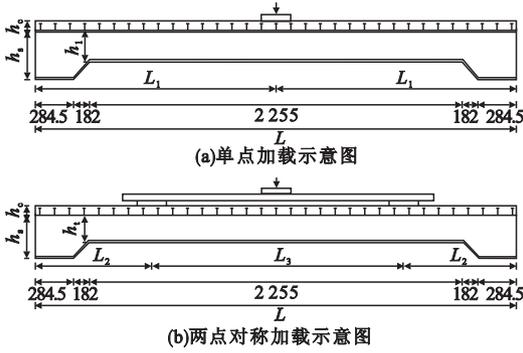


图6 加载示意图

Fig. 6 Loading diagram

1.5 测试内容及测点布置

在两种加载条件下试验主要采集内容包括:①试件的承载能力;②组合梁的最大挠度;③加载点截面应变分布;④混凝土板的裂缝分布;⑤钢梁和混凝土板交界处的相对滑移等.测点布置如图7所示.

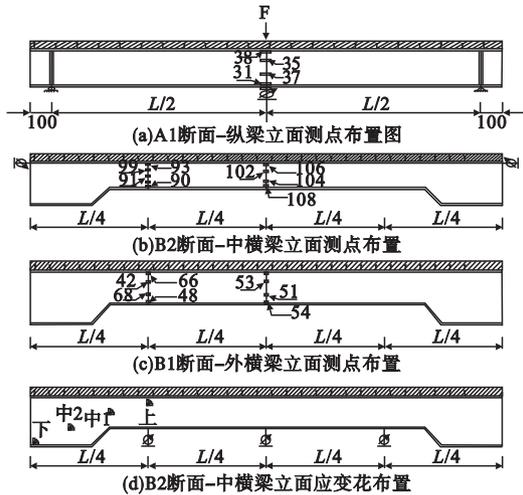


图7 测点布置图

Fig. 7 Measuring points layout

2 试验现象

试件 A1 为跨中单点加载.在荷载加载初期,混凝土及钢梁各部位均完好,当荷载达到 $0.72 P_u$ (极限荷载)时,中横梁跨中钢梁下翼缘进入屈服状态,随着荷载的继续施加,屈服范围逐渐由钢梁下翼缘向上延伸,同时

挠度的变化速率逐渐大于荷载的加载速率.当接近极限荷载时,混凝土板出现咣咣声,加载点下部混凝土被压裂,且裂缝沿加载点周围分布,向外侧延伸,混凝土板顶面出现了平行于组合梁纵梁和横梁的裂缝,如图8所示.

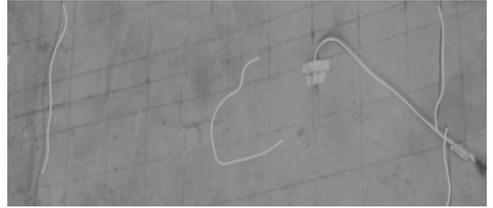
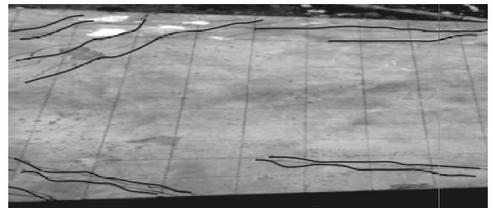


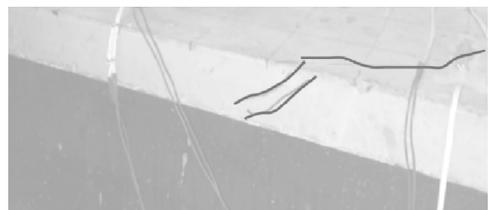
图8 试件 A1 板顶裂缝

Fig. 8 The crack of specimen A1 on the top

试件 A2 为两点对称加载.加载过程中,其受力模式与单点加载相似.当荷载达到 $0.75 P_u$ 时,钢中横梁 $1/4$ 截面下翼缘首先屈服,随着荷载的增加,混凝土板顶面出现横向裂缝并不断增加,裂缝主要集中在支座附近.随着荷载的继续施加,在梁端至加载点之间出现较多的斜向 45° 短裂缝,在端部出现于纵梁平行的一条长裂缝,如图9所示.



(a) 顶裂缝



(b) 侧裂缝

图9 试件 A2 裂缝图

Fig. 9 The cracks of specimen A2

3 试验结果分析

3.1 组合梁承载能力分析

根据试验结果得出各试验梁的屈服荷载和极限荷载如表5所示.

表5 试件承载能力

Table 5 Carrying capacity of the specimens

试件编号	长×宽/mm	所用材料		加载位置	P_y /kN	P_u /kN	P_y/P_u
		钢材	混凝土				
A1	3 318×1 200	Q345	C45	跨中单点	482.05	669.51	0.72
A2	3 318×1 200	Q345	C45	两点对称	693.70	924.93	0.75
A3	3 200×300	Q345	C50	跨中单点	198.00	220.00	0.90
A4	5 000×600	Q345	C60	两点对称	122.50	249.82	0.49

注: P_y 为试件的屈服荷载; P_u 为试件的极限抗拉荷载;A3为文献[18]针对单一工字型钢与混凝土组合梁的跨中单点加载;A4为文献[17]针对单一工字型钢与混凝土组合梁的两点对称加载。

由试验结果可知:在其他条件相同的情况下,与跨中单点加载相比钢-混组合梁在两点对称加载时具有较高的承载能力;在两种加载条件下,从屈服荷载以及极限荷载方面,相比较单一工字型钢-混凝土组合梁,笔者提出的变截面钢-混凝土组合梁均有了极大提高。

3.2 荷载-挠度曲线

各试件中横梁荷载-挠度曲线如图10所示。从试验结果来看,无论单点加载还是两点对称加载,其都经历了3个典型的阶段即弹性、弹塑性以及塑性阶段。

(1)弹性阶段($P \leq P_y$):在此阶段钢-混

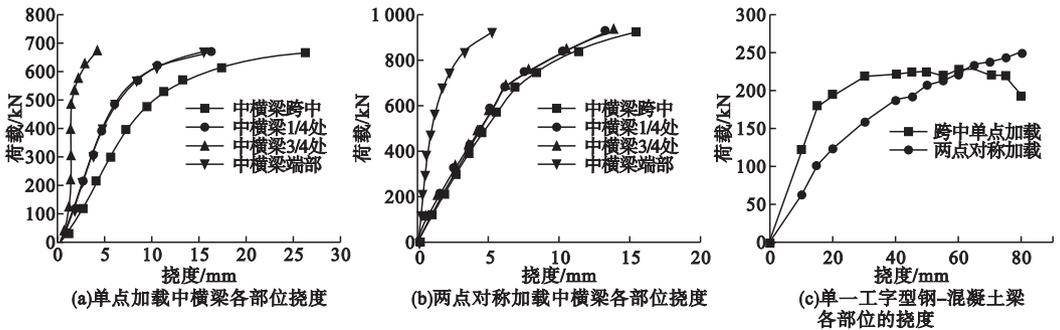


图10 荷载-挠度曲线图

Fig. 10 Load-deflection curves

组合梁整体表现出了良好的弹性性能,荷载-挠度曲线呈线性变化。

(2)弹塑性阶段($P_y < P < P_u$):钢梁的下翼缘某点已经达到屈服状态,钢梁进入弹塑性阶段,随着荷载的施加,塑性区域逐渐由钢梁下翼缘向上翼缘传递,荷载-挠度曲线开始偏离原来的直线,混凝土板部分区域由于达到极限压应变,混凝土板也进入弹塑性阶段,钢梁与混凝土之间开始出现滑移,混凝土板出现裂缝。

(3)塑性阶段($P \geq P_u$):混凝土板被压坏,各试验梁的挠度达到最大值。单点加载混凝土板跨中顶出现沿横梁的横向开裂裂缝以及沿

加载点周围的剪切裂缝,加载点处钢横梁以及钢纵梁大部分截面均进入屈服状态。两点对称加载,由于其破坏为剪切破坏,故裂缝主要集中在加载点至梁端范围内,主要分布为45°斜裂缝以及横向裂缝。在钢梁中横梁1/4处,钢梁大部分截面已经进入屈服状态。

试件变形能力如表6所示。由表6可知,单点加载跨中最大挠度为26.27 mm,两点对称加载最大为跨中15.35 mm,但此时两点加载跨中未达到屈服状态,更未达最大压应变,有进一步变形的能力,试件A2的极限跨中挠度约为试件A1的0.58,表明试件A2的截面内力小于试件A1,同时还可以得知与单一工

字型钢与混凝土组合梁相比,变截面钢-混凝土组合梁不论从屈服挠度还是极限挠度都得到了极大的缩小,在同一条件下,不仅结构的变形能力得到增强,同时具有更高的安全储备系数.针对单一工字型钢与混凝土组合梁,文献[19]与文献[20]分别对应两点对称加载与跨中单点加载,所设条件与文中基本相似,其荷载-挠度曲线图如图10(c)所示,综合来看,变截面钢-混组合梁的变形模式与单一工字型钢-混凝土组合梁类似.

表6 试件变形能力

Table 6 Deformation of the specimens

试件编号	所用材料		δ_y/mm	δ_u/mm	δ_u/δ_y
	钢材	混凝土			
A1	Q345	C45	9.54	26.27	2.75
A2	Q345	C45	7.02	15.35	2.04
A3	Q345	C50	21.00	62.00	2.95
A4	Q345	C60	19.40	78.60	4.05

注: δ_y 为钢梁下翼缘达到屈服荷载时组合梁跨中挠度; δ_u 为达到极限承载能力时组合梁跨中所对应的挠度.

3.3 荷载-滑移曲线

栓钉是保证混凝土板和钢梁共同工作的连接部件,图11为梁端荷载-滑移曲线图.从图中可以看出针对于两种加载方式,在荷载作用初期,梁端(未达到屈服荷载时)的相对滑移变化不大,与其所施加的荷载基本呈现线性关系,当荷载分别达到 $0.87 P_u$ (单点加载)与 $0.89 P_u$ (两点对称加载)时梁端滑移的增加速率大于荷载的增加速率,荷载-滑移非线性关系明显.

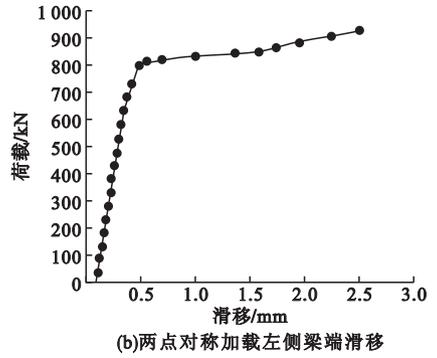


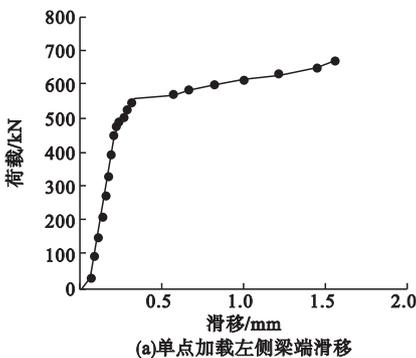
图11 荷载-滑移曲线图

Fig. 11 Load-slip curves

3.4 截面应变分析

图12、图13为两种加载方式时,中横梁以及外横梁上的各部位的应变分布图.从图中可以看出,在弹性阶段,不论是单点加载还是两点对称加载,纵向应变沿梁高近似呈现线性分布,符合平截面假定.在中横梁加载点处,未达到屈服荷载前,钢梁与混凝土均保持弹性状态,两者的变形具有连贯性,拥有相同的变化速率.当加载达到屈服荷载后,随着塑性区域的逐渐延伸,混凝土板的应变变化速率开始低于钢梁的应变变化速率,钢梁与混凝土逐渐呈线两种不同的变化,当达到极限荷载之后,混凝土板破坏,钢梁大部分截面屈服.同时,混凝土板开裂后随着裂缝的扩展,混凝土受压区高度逐渐缩小.

从图12(a)、图13(a)可以看出在弹塑性阶段以及塑性阶段,针对于中横梁钢梁部分,单点加载的最大拉应变比两点对称加载提高11%,由此单点加载的塑性区域发展更为充分.同时,从图12与图13中可以看出,当单点加载在跨中达到极限荷载时,中纵梁与中横梁变形曲线大致相同,在未达到极限荷载时,两者的变形基本一致.表明此种钢梁组合模式效果良好.当荷载通过垫板以及砂浆向下传递时,混凝土板表面出现沿梁长的横向裂缝,加载点下部混凝土板下挠,荷载大部分被上部混凝土板以及跨中钢梁所承受.



两点对称加载也出现类似的情况,达到极限荷载时,加载点处钢梁大部分截面已经屈服,而其余部位仍处于弹性状态,此刻混凝土

土板上部加载点与支撑处出现大面积斜裂缝,其中梁端纵向裂缝已经贯通。

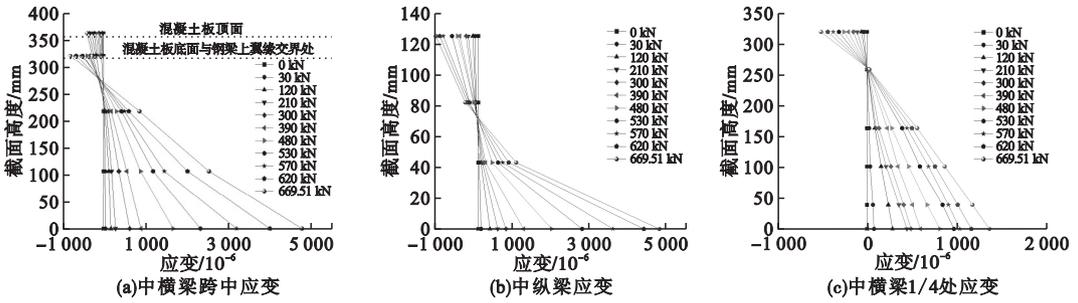


图 12 单点加载应变
Fig. 12 Single point loading strain

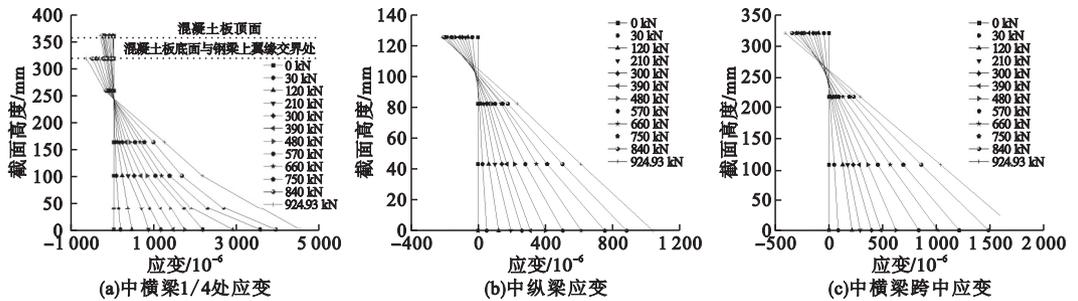


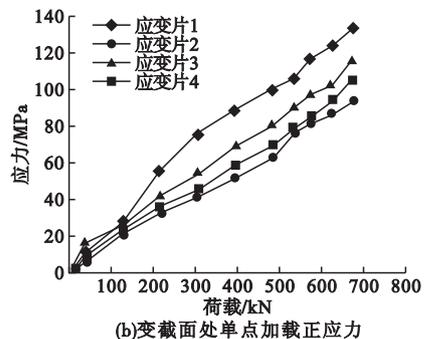
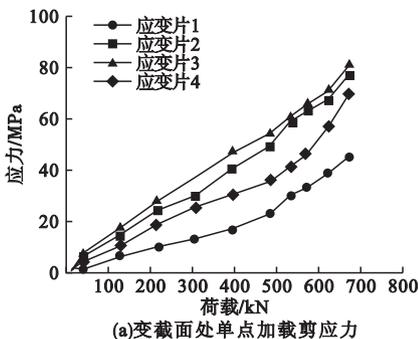
图 13 两点对称加载应变图
Fig. 13 Two-point loading strain

3.5 截面应力分析

为了得到正应力与剪应力在变截面处的传递规律,在中横梁 1/4 处腹板顶部沿斜 45° 方向设有 4 处应变花,如图 7(d) 所示,从右往左依次编号为 1,2,3,4。由文献[19]可知在弹性阶段,根据材料力学的方法可导出材料的两个主应力 σ_1, σ_2 以及主剪应力 τ_{xy} , 计算得到的应力分布情况如图 14 所示。

由图可知,不论是单点加载还是两点对称加载,在测点处从加载开始至结束,荷载-应力关系大致都为线性关系,证明此处组合梁一直处于弹性状态,而且从应变片 1 至应变片 4 两种加载方式所算得的应力均经历了先增大后减小的趋势,具体来看:

(1) 对于单一等截面工字形钢与混凝土组合梁,由文献[20]知组合沿截面正应力与剪应力计算公式为



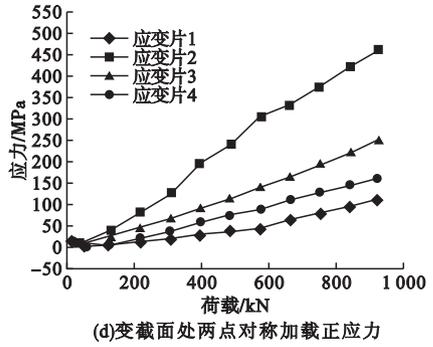
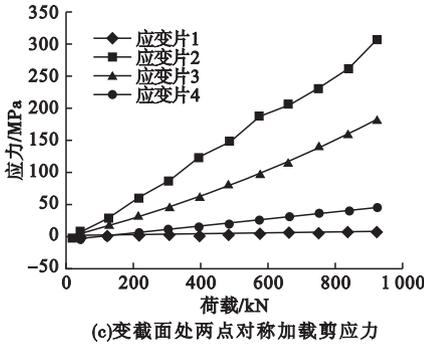


图 14 应变沿梁高分布图

Fig. 14 Strain distribution along the beam height

$$\sigma_z = \frac{My}{I_z} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{Q}{bI_z} \left[\frac{B}{8} (H^2 - h^2) + \frac{b}{2} \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right) \right] \quad (2)$$

式中： M 为外力矩； y 为所求应力点的纵坐标； I_z 为截面对于中性轴的惯性矩； Q 为截面所受的剪力； B 为翼缘宽度； h 为腹板高度； b 为腹板厚度； H 为梁高。

在单点加载时,根据对称性,取左半部分进行分析.经计算各截面所受剪力均为 $P/2$,弯矩 M 从跨中至端部逐渐递减.故可知从跨中至端部截面正应力逐渐减小,而各截面剪应力分布相同,正应力与剪应力沿截面从上至下分布如图 15 所示.在弹性阶段正应力沿截面呈线性分布,剪应力在腹板中部最大.按变截面应变片的布置在组合梁 1/4 处沿工字型钢腹板从上至下斜 45° 方向布置应变片,经计算剪应力也呈现先增加后减小的趋势,其变化趋势与变截面组合梁相同.表明单一等截面简支梁的分析思路,同样适用于变截面组合梁.

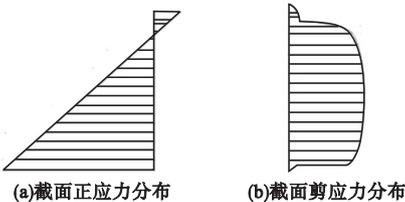


图 15 应力分布图

Fig. 15 Stress distribution

(2) 两点加载时,根据对称性选取左半部分进行分析.根据弯矩叠加原理,可计算得

到剪应力主要集中在加载点至梁端范围内.此处各截面剪应力为 $P/2$,加载点至跨中剪应力为 0.由式(2)可知,加载点至梁端剪应力分布相同;由式(1)可知,两加载点之间截面正应力分布相同,加载点至梁端正应力逐渐减小.研究表明,等截面组合梁与变截面组合梁的剪应力变化趋势相同.

4 结 论

(1)不同的加载方式对于组合梁的极限承载能力影响很大,单点加载极限承载力 669.51 kN,两点对称加载为 924.94 kN.组合梁达到极限荷载时,单点加载跨中最大位移为 26.45 mm,两点对称加载为 15.35 mm.

(2)单点加载为剪切、弯曲与局部承压破坏并存,两点对称加载主要为剪切破坏.与单一工字型钢-混凝土相比,变截面钢-混凝土组合梁从屈服荷载以及极限荷载都得到极大提升.

(3)不管加载方式如何,变截面钢-混凝土组合梁剪应力的分析与计算可参考单一工字形钢-混凝土组合梁的受力过程.

参考文献

[1] ZONA A, RANZI G. Shear connection slip demand in composite steel-concrete beams with solid slabs[J]. Journal of constructional steel research, 2014, 102: 266-281.
 [2] GILSON Q, HERMES C, FRANCISCO R, et al. Estimation of friction contribution in the behavior of steel-concrete composite beams with flexible shear connectors[J]. Rem: revista escola de minas, 2014, 67(3): 253-258.

- [3] 李云辰. 钢-混凝土工字组合梁桥力学性能的数值分析[J]. 公路交通科技, 2018, 158: 183-185.
(LI Yunchen. Numerical analysis of mechanical properties of steel-concrete I-beam composite beam bridge [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2018, 158:183-185.)
- [4] 张锐, 郑凯锋, 杨一维. 钢-混凝土组合梁曲线梁桥应力分析[J]. 四川建筑, 2019, 39: 157-160.
(ZHANG Rui, ZHENG Kaifeng, YANG Yiwei. Stress analysis of curved beam bridge of steel-concrete composite beam [J]. Sichuan architecture, 2019, 39:157-160.)
- [5] 刘超, 吉赫. 超高性能混凝土-混凝土组合梁抗剪承载力计算方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(8):1123-1130.
(LIU Chao, JI He. Shear resistance of ultra-high performance concrete-concrete composite beam [J]. Journal of tongji university (natural science), 2019, 47(8):1123-1130.)
- [6] 聂建国, 李一昕, 陶慕轩. 新型抗拔不抗剪连接件的滑移性能及其滞回模型[J]. 工程力学, 2014, 31(11):46-52.
(NIE Jianguo, LI Yixin, TAO Muxuan. Slip performance and hysteretic model of a new type of anti-pull and non-shear joints [J]. Engineering mechanics, 2014, 31(11):46-52.)
- [7] 周勇超, 李亮亮, 李子青. 钢-混凝土组合梁界面滑移效应变分法求解[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2013(33):39-44.
(ZHOU Yongchao, LI Liangliang, LI Ziqing. Solution of slip effect of steel-concrete composite beam with variational principles [J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2013(33):39-44.)
- [8] 聂建国, 王宇航. 钢-混凝土组合梁疲劳性能研究综述[J]. 工程力学, 2012, 29(6):1-11.
(NIE Jianguo, WANG Yuhang. Research status on fatigue behavior of steel-concrete composite beams [J]. Engineering mechanics, 2012, 29(6):1-11.)
- [9] 卫星, 肖林, 温宗意. 钢-混凝土组合结构PBL剪力键疲劳损伤演化机理分析[J]. 钢结构, 2018, 33(12):48-52.
(WEI Xing, XIAO Lin, WEN Zongyi. Fatigue damage evolution mechanism of PBL shear connector in steel-concrete composite structure [J]. Steel construction, 2018, 33(12):48-52.)
- [10] 杨涛, 林广泰, 赵艳林, 等. 带疲劳损伤的钢-混凝土组合梁受力性能试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(12):128-134.
(YANG Tao, LIN Guangtai, ZHAO Yanlin, et al. Experimental investigation into mechanical performance of steel-concrete composite beams with fatigue damage [J]. Journal of south China university of technology (natural science edition), 2017, 45(12):128-134.)
- [11] KUMAR P, PATNAIKK A, CHAUDHARY S. Effect of bond layer thickness on behaviour of steel-concrete composite connections [J]. Engineering structures, 2018, 177:268-282.
- [12] 周勇超, 李常乐, 孙铁军, 等. 钢-混凝土组合梁界面滑移与剪力滞耦合效应分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 2(30):115-120.
(ZHOU Yongchao, LI Changle, SUN Tiejun, et al. Coupling effect analysis of interface relative slip and shear lag of steel-concrete composite beam [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2013, 2(30):115-120.)
- [13] SHAMASS R, CASHELL K A. Analysis of stainless steel-concrete composite beams [J]. Journal of constructional steel research, 2019, 152:132-142.
- [14] TONI N, ZANON G, PUCINOTTI R, et al. Seismic performance and fragility functions of a 3D steel-concrete composite structure made of high-strength steel [J]. Engineering structures, 2018, 174:373-383.
- [15] PAKNAHAD M, SHARIATI M, SEDGHI Y, et al. Shear capacity equation for channel shear connectors in steel-concrete composite structure [J]. Steel and composite structures, 2018, 28:483-494.
- [16] 万世成, 黄侨, 关键. 预应力 CFRP 板加固钢-混凝土组合梁受弯性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(3):80-87.
(WAN Shicheng, HUANG Qiao, GUAN Jian. Test on flexural behavior of steel-concrete composite beams strengthened with prestressed carbon fiber-reinforced polymer plates [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2019, 51(3):80-87.)
- [17] 牛黎明. 高强钢-混凝土组合梁极限承载力有限元分析[J]. 城市道桥与防洪, 2018, 9(9):135-141.
(NIU Liming. Finite element analysis on ultimate bearing capacity of high-strength steel-concrete composite girders [J]. Urban roads bridges & flood control, 2018, 9(9):135-141.)
- [18] 黄侨, 李文贤, 汪炳. 考虑界面滑移与剪切变形的钢-混凝土组合梁解析方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 2(1):132-137.
(HUANG Qiao, LI Wenxian, WANG Bing. Analytical method of steel-concrete composite beam based on interface slip and shear deformation [J]. Journal of Nanjing university of aeronautics & astronautics, 2018, 2(1):132-137.)
- [19] 吴丽丽, 李佳蔚, 邢瑞娇, 等. 钢板-混凝土组合板抗剪承载性能的试验研究与数值分析[J]. 工程力学, 2016, 10:173-182.
(WU Lili, LI Jiawei, XING Ruijiao, et al. Experimental study and numerical simulation of the shear capacity of steel plate-concrete composite slabs [J]. Engineering mechanics, 2016, 10:173-182.)
- [20] 张良军. 剪应力对组合工字梁跨中截面应力应变的影响[J]. 四川建筑, 2007, 27(2):133-134.
(ZHANG Liangjun. Effect of shear stress on stress and strain of cross-medium section of composite I-beam [J]. Sichuan architecture, 2007, 27(2):133-134.)
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)