

钢-混组合截面外包薄钢组合管梁抗弯性能研究

卢召红^{1, 2}, 刘薇¹, 刘海水²

(1. 东北石油大学, 黑龙江大庆 163318; 2. 黑龙江省防灾减灾工程与防护工程重点实验室, 黑龙江大庆 163318)

摘要: 为了对不同夹层混凝土强度的钢-混组合截面外包薄钢组合管梁抗弯性能进行分析, 通过试验和有限元软件模拟相结合的方法, 选用外层为薄壁不锈钢管, 内层为钢管, 双壁管中间分别喷注混凝土强度等级为 C20、C40、C60 的三种试件, 采用分级加载方式对试件进行加载, 试验结果与有限元软件模拟的结果相吻合。研究表明: 随着混凝土强度的提高, 试件的抗弯承载力提高、延性增大, 能发生较大的塑性变形以吸收能量。得到的试验结果可以为以后的研究提供根据。

关键词: 钢-混组合截面外包薄钢; 组合管梁; 抗弯性能

中图分类号: TU398.9

文献标识码: A

Research on Bending Resistance of Thin-steel Composite Pipe Girder with Steel-mixed Composite Section

LU Zhaohong^{1, 2}, LIU Wei¹, LIU Haishui²

(1. Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Reduction Engineering and Protection Engineering of Heilongjiang Province, Daqing 163318, China)

Abstract: In this paper, the combination of experimental and finite element software simulation is used to analyze the bending resistance of steel-concrete composite cross-section thin steel composite pipe beams with different interlayer concrete strength. The outer layer is made of thin-walled stainless steel pipe, the inner layer is steel pipe, and the three test pieces of concrete strength grades C20, C40 and C60 are respectively sprayed in the middle of the double-walled pipe, and the test pieces are loaded by the grading loading method, and the test results are limited. The results of the meta-software simulation are consistent. The results show that with the increase of concrete strength, the flexural capacity of the specimen and the ductility increase, and large plastic deformation can occur to absorb energy. The test results obtained can provide a basis for future research.

Key words: the steel-mixed composite section covered with thin steel; combined pipe girder; bending resistance

随着结构工程的快速发展, 单一材料很难满足建筑结构在受力性能、耐久性、经济性及施工性能等方面的要求, 因而出现了外包钢-混凝土筒支组合梁。关于它的研究正处在起步阶段, 需要进行大量的试验研究和理论分析, 以探究其受力机理及性能。组合结构的优势在于不同材料优势互补, 但如何合理的应用材料是结构性能发挥的关键^[1]。

目前, 操礼林等^[2]学者研究了高强 U 形外包钢-混凝土组合梁受弯性能, 他们设计制作了 3 根试件,

组合梁内部混凝土与外包钢板之间均按照完全剪力连接设计, 不考虑滑移效应对组合梁性能的影响。任冠宇等^[3]学者研究了高强外包钢-高强混凝土筒支组合梁的受弯性能, 采用单调静力加载对 5 根筒支梁进行跨中两点对称荷载作用下的试验。试件主要变化参数为混凝土强度、钢板强度及组合梁截面尺寸。试验结果表明, 试件均发生弯曲破坏, 高强钢与高强混凝土通过栓钉连接可表现出良好的整体工作性能。卢召红等^[4]借鉴钢-混凝土组合结构构

收稿日期: 2019-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51578120); 国家自然科学基金青年基金资助项目 (11402051)

作者简介: 卢召红 (1977-), 男, 山东临沂人, 副教授, 从事管道安全输送及新型组合结构技术方面的研究。

件的基本假定及材料本构关系,分析 DSTM 正截面受弯承载力性能,利用截面分层法建立纯弯构件承载力计算公式,并采用有限元数值计算方法对截面分层法计算结果进行比较分析,结果表明两种方法所得到的结果基本吻合,所建立的公式可为工程设计提供参考依据。刘学明等^[5]利用试验和数值分析方法,提出 FRP-混凝土-钢双壁空心管受弯承载力简化计算公式,并建立了以弯曲刚度表示双壁空心管截面弯矩-曲率关系,双壁空心管在水中输送管道、海底管道及跨越式管道等油、气液体输送系统构件中具有广泛的应用前景。郭建华^[6]使用试验研究与有限元模拟两种方法,对不锈钢-混凝土-碳素钢中空夹层梁试件的受弯力学性能做了研究。曹明^[7]以不锈钢管-混凝土-钢管中空夹层组合结构的剪跨比和空心率为主要变化参数,开展了其抗弯性能的试验研究,利用数据采集系统记录了受力的荷载、位移、应变随时间的变化关系。试验结果表明:不锈钢管-混凝土-钢管中空组合试件在纯弯荷载作用下表现为延性破坏;试件的剪跨比越大,则受弯承载力越小。Nakamura, Shun-ichi^[8]提出了一种新型的钢-混凝土组合桥梁,进行了弯曲试验,研究了其弯曲性能的三梁模型。结果表明冷态型钢 U 形梁具有足够的抗弯强度和良好的抗弯性能,且具有良好的变形和旋转能力,经济可行。

本文在前人的基础上以混凝土强度为影响因素,对双壁空心管的抗弯性能进行研究。试验制作时选取的混凝土强度不同,其余尺寸参数及力学参数均相同的三种试件进行对比试验。通过分析本文的实验结果,得出混凝土强度对双壁空心管纯弯承载力的影响,并分析其破坏形态。

1 试验概况

1.1 试件截面形式

本文以混凝土强度为主要试验参数进行了两组不锈钢-混凝土-钢双壁纯弯力学性能试验,试件的构造为:外管为薄壁不锈钢管(厚度较薄),内管为钢管,两管之间喷注混凝土填筑,其截面主要参数如图 1:外层不锈钢管壁厚 t_0 ;内层钢管壁厚 t_i ;混凝土夹层厚 h ,内管直径 d ,外管直径 D_0 。

1.2 基本假定

为了简化计算,将双壁空心管简化为两端简支

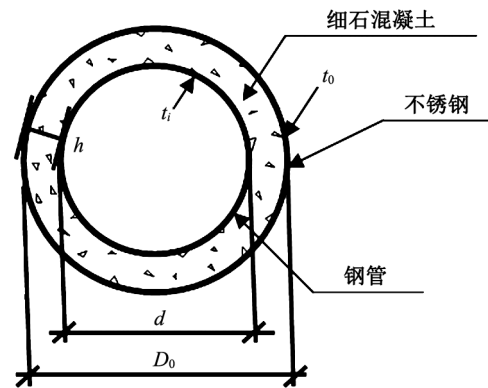


图 1 试件截面形式
Fig.1 Specimen section form

的等直杆,并做如下假定^[4]

- (1) 平截面假定:不考虑剪切变形的影响,构件正截面在弯曲变形后仍保持平面;
- (2) 无滑移假定:认为不考虑钢管、不锈钢层与内填混凝土之间变形协调,不考虑不同材料之间的滑移影响;
- (3) 不考虑受拉侧混凝土的抗拉力影响:由于混凝土受拉性能差,极易开裂,因此忽略受拉侧的混凝土承载力;
- (4) 不考虑受压侧外层不锈钢管的抗压影响:临界状态时,混凝土与外层薄板由于裂缝较多,粘结差,易失稳,故忽略其抗压承载力影响。

1.3 试验设计

以 C20、C40、C60 混凝土强度为主要变化参数,共制作三个纯弯试件,混凝土在喷注过程中分层捣实,随后对构件进行养护,及在保湿环境中养护 7 d,随后在自然中进行养护,使混凝土强度达到 28 d 时的强度,实测三种混凝土的轴心抗压强度分别为 23.41 Mpa、42.07 Mpa、63.43 Mpa。试件设计的具体参数见表 1。

其中 B1、B2、B3 分别对应于混凝土强度等级为 C20、C40、C60 的混凝土,其性能具体参数见表 2。

表 1 试件参数
Tab.1 Sample parameters

试件编号	混凝土度 D_0 /mm	外管壁厚 t_0 /mm	外管直径 d /mm	内管壁厚 t_i /mm	内管直径 f_c /Mpa
B1	138.25	0.25	76	3	23.41
B2	138.25	0.25	76	3	42.07
B3	138.25	0.25	76	3	63.43

表 2 试件材料主要性能参数

Tab.2 Main performance parameters of specimen materials

材料名称	钢材种类	f_y /MPa	f_u /MPa	E_s /MPa	泊松比
外管	不锈钢	288	407	1.77×10^5	0.28
内管	碳素钢	301	442	1.56×10^5	0.30

混凝土	强度等级	抗压强度极限值 f_{cu} /MPa	弹性模量 E_c	泊松比
	C20	23.41	2.55×10^4	0.27
	C40	42.07	3.25×10^4	0.20
	C60	63.43	3.65×10^4	0.17

2 试验概况

2.1 试验装置及加载制度

本试验在四柱压力试验机上进行，图 2 为实验装置示意图。在试验中，试件固定于如图所示夹支座上，通过刚性板将集中荷载分配到距试件左端 450 mm 和 1 050 mm 两点处加载。在试件加载过程中分别记录各点挠度值、荷载值及应变。本实验采用分级加载方式对试验进行加载，通过液压加载装置对距离管端两侧各 1/8 处同时加载，在钢材达到屈服极限之前时采用每级荷载为极限荷载的 1/20 的加载制度，随后钢材达到屈服之后采用每级 1/10 的极限荷载加载制度，最后采用慢速加载直至试件破坏。

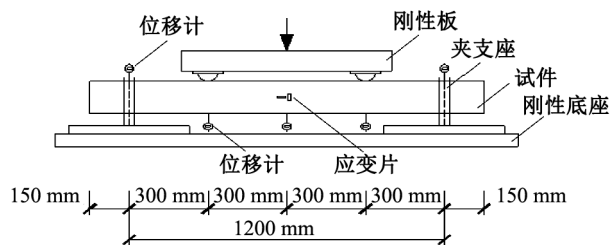


图 2. 试验装置图

Tab.2 Test device diagram

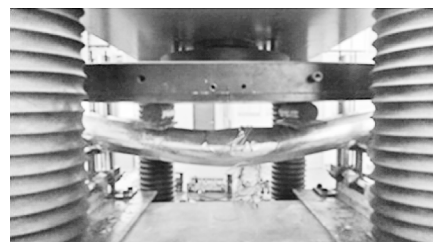
2.2 试验过程及分析

随着荷载的增加，试件 B1、B2、B3 逐渐发生弯曲变形。在外钢管跨中受压侧未发生明显的局部屈曲。B1 在荷载加至 48.68 kN·m，即最大荷载的 77% 时；B2 在荷载加至 33.12 kN·m，即最大荷载的 83% 时；B3 在荷载加至 15.94 kN·m，即最大荷载的 89% 时外钢管受压侧沿纵向开裂，并伴随受压侧混凝土被压碎。继续加载，试件承载力有少部分增大，形成塑性铰，变形显著增加，试件表现为延性破坏。试件 B1 破坏前后状态分别如图 3(a)、(b)、(c) 所示。鼓曲是指混凝土上表面开始出现明显鼓起，随着荷

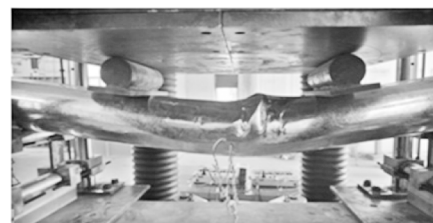
载的增加，故其范围不断扩大，表明时间将达到极限荷载。由试件破坏图片可知，随着混凝土强度等级的增加，试件的鼓曲越来越明显。



(a) B1 试件破坏图片



(b) B2 试件破坏图片



(c) B3 试件破坏图片

图 3 试件装置破坏图片

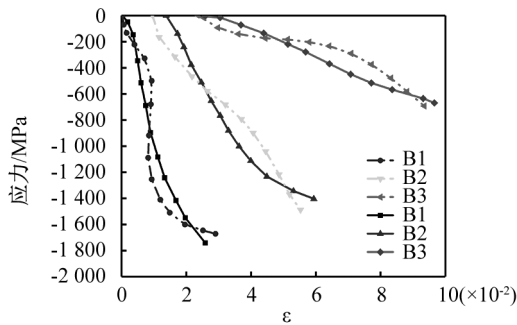
Fig.3 Failure picture of the specimen device

3 结果分析

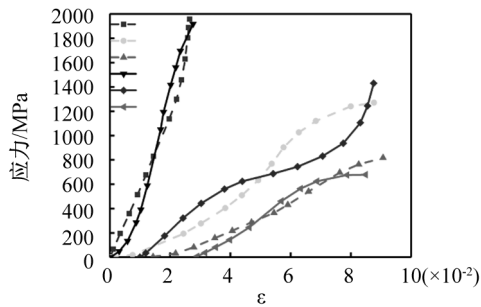
试件在受力过程中其挠度与距离的关系为由两侧向中间递增且在一定程度上呈线性关系。图 4 为试件 B1、B2、B3 各测点挠度沿试件长度的变化情况，横坐标为试件上的不同位置相对于左端支撑处的水平距离，纵坐标为试件在不同荷载情况下的挠度。如图 4 所示，试件挠度变化情况基本符合正弦半波

曲线。且试件在破坏时受压区外部钢管跨中出现外凸现象。B1、B2、B3对比,试件各测点挠度发展趋势及有限元模拟结果相吻合,但B2较B3延性更好。

图4(a)(b)(c)所示分别为试件跨中弯矩实测值与受拉区、受压区最大纵向应变的关系曲线。试件受拉侧与受压侧的跨中弯矩—应变曲线吻合良好。



—试验值 —有限元模拟值
(a) 受压区跨中应力—应变曲线图



—试验值 —有限元模拟值
(b) 受拉区跨中应力—应变曲线图

图4. B1、B2、B3跨中弯矩—应变关系曲线

Fig.4 Moment-strain relation curves of midspan of B1, B2, and B3

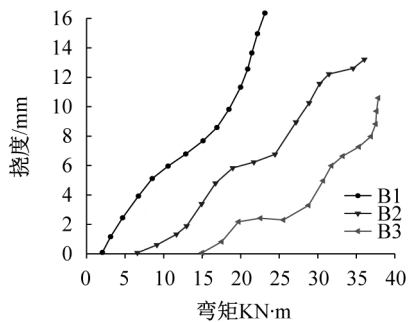


图5. 试验管梁跨中弯矩—挠度关系曲线

Fig.5 Relation curve of mid-span bending moment-deflection of test pipe girder

4 结论

1) 钢-混组合截面外包薄钢组合管梁在纯弯的破坏形态为:在加载初期试件无明显的局部屈曲,随着混凝土强度的增加,薄钢组合管梁承受的跨中弯矩逐渐增大,表现出薄钢组合管梁的挠曲变形越来越明显。也表明试件的抗弯承载力增加,试件会表现出更好的延性,能发生更大的塑性变形以吸收能量。试件破坏类型为延性破坏。破坏发生的缓慢,变形显著。

2) 混凝土C20、C40、C60适用于钢-混组合截面外包薄钢组合管梁,钢-混组合截面外包薄钢组合管梁具有良好的抗弯承载力,组合管梁截面应变满足平截面假定和无滑移假定。受力和变形性能良好,可以按照简化的塑性理论计算受弯抗弯承载力。

3) 钢-混组合截面外包薄钢组合管梁充分发挥两种材料的性能,提高了梁的抗弯承载力,同时具有一般组合梁较好的使用功能。而且由于其内部填充混凝土,大大提高了其整体稳定性能。

参考文献:

- [1] 聂建国. 钢-混凝土组合结构原理与实例 [M]. 北京: 科学出版社, 2003:1-24.
- [2] 操礼林, 石启印, 王震, 等. 高强U形外包钢-混凝土组合梁受弯性能 [J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(1):72-78.
- [3] 任冠宇, 石启印. 高强外包钢-高强混凝土筒支组合梁受弯性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2015, 45(3):39-43.
- [4] 卢召红, 闫亮, 张光明, 等. 截面分层法计算不锈钢-混凝土-钢双壁管受弯承载力 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2015, 32(4):11-14.
- [5] 刘明学, 钱稼茹. FRP-混凝土-钢双壁空心管截面轴力-弯矩关系研究 [J]. 建筑结构, 2008(8):83-86.
- [6] 郭建华. 不锈钢-混凝土-碳素钢中空夹层梁受弯力学性能试验研究及仿真分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [7] 曹明. 不锈钢管-混凝土-钢管中空夹层组合结构抗弯力学性能研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [8] NAKAMURA Shun-ichi, Bending Behavior of Composite Girders with Cold Formed Steel U Section [J], Journal of Structural Engineering, 128(9), 1169-1176

(责任编辑 李新)