

# 钢箱梁竖向波纹腹板剪力与磁记忆场强关系的 试验研究

王 威<sup>1</sup>, 任英子<sup>1</sup>, 苏三庆<sup>1</sup>, 马小平<sup>1</sup>, 牛晓波<sup>2</sup>, 董鹏宁<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 成都基准方中建筑设计有限公司, 四川 成都 610021;

3. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 金属磁记忆检测技术是一种新型的无损检测技术, 其原理是基于铁磁构件表面产生的漏磁场进行检测。通过 Q345qC 波纹腹板钢箱梁的四点受弯试验, 分析了竖向腹板表面的磁记忆信号沿梁高度方向的变化规律, 发现在波纹腹板表面磁记忆信号曲线上, 竖向集中力加载位置出现磁记忆场强“波峰”极值, 且随着荷载的增大, “波峰”幅值越高, 应力集中程度增大; 试件失稳时, 磁记忆信号发生正负突变, 以此可作为试件失稳时的评判特征; 随着检测线离集中力加载位置越远, “波峰”幅值越低; 随着标定高度的增大, 磁记忆信号减小; 沿腹板高度方向区域平均磁记忆信号变化率与腹板高度无关, 而主要与两个因素有关: 其一是纯弯段或弯剪段区域位置, 其二是施加的荷载大小; 弯剪段区域的绝对值随荷载的增加先增大后减小, 磁记忆信号平均变化速率存在阈值。

**关键词:** 桥梁钢结构; 抗剪性能; 磁记忆检测; 钢箱梁; 波纹钢腹板

**中图分类号:** U446.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2019)03-0327-10

## Experimental research on the relationship between shear force and magnetic memory field strength of vertical corrugated webs of steel box girder

WANG Wei<sup>1</sup>, REN Yingzi<sup>1</sup>, SU Sanqing<sup>1</sup>, MA Xiaoping<sup>1</sup>, NIU Xiaobo<sup>2</sup>, DONG Lining<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech. Xi'an 710055, China;

2. Chengdu Benchmark Building Design Co., Ltd., Chengdu 610021, China;

3. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Metal magnetic memory testing is a new nondestructive testing technology based on the magnetic flux leakage field of ferromagnetic components. In the four point bending experiment of Q345qC steel box girder, the variation rule of magnetic recording signal along the beam height direction on the vertical web surface were analyzed. And the relationship curve between magnetic memory signal and loading value were obtained. At the vertical concentrated force loading position, magnetic memory signal curve have a “peak” extreme value, and with the loading increasing, the peak amplitude become bigger, at the same time, the stress concentration increased also. When the steel box girder lose the stability state, magnetic memory signal have a mutations, from positive value change to negative value and vice versa, which may be used as a judgment to diagnose the instability situation for the girder. With the detection line farther away from the concentrated loading position, the wave peak amplitude is decreasing. With the increasing of height calibration, magnetic memory signal decreases. There are two main factors that influence the regional average magnetic memory signal change rate along the height direction of web, one is shear bending or pure bending region and the other is the magnitude of the applied loads, which, but no relate with the height value of web. The absolute value of the change rate of the magnetic memory signal increases initial and then decreases with the increasing of the loading.

**Key words:** bridge steel structure; shear performance; magnetic memory testing; steel box girder; corrugated steel web

目前, 钢结构在大跨桥梁及高层建筑等中广泛应用, 而由于复杂的结构及应力作用, 钢构件在服役过程中, 不可避免地会发生早期损伤<sup>[1]</sup>, 随着早期损伤的积累, 刚度和稳定性的降低将影响

整个结构的正常运行和安全性<sup>[2]</sup>。钢结构中, 应力集中和各种微观缺陷扩展容易引发结构和构件的脆性破坏<sup>[3]</sup>, 发生这类损伤的主要原因是因为没有一种较好的无损检测技术能及时检测出钢结构的

收稿日期: 2018-04-08

修改稿日期: 2019-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878548; 51578449), 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2018JZ5013)

第一作者: 王 威(1972—), 男, 教授, 主要从事结构健康监测及混凝土结构等方面的研究。E-mail: wangwgh1972@163.com

隐性损伤. 结构早期损伤的监测与安全评定技术是土木工程领域所面临的严峻问题. 钢结构的损伤按位置可以分为构件损伤和节点区域损伤. 按照损伤引起的原因及损伤机理可以分为多周期、动力荷载作用下的疲劳损伤(钢箱梁常见的疲劳损伤主要为正交异性钢桥面板的疲劳<sup>[4]</sup>等)及由于环境作用引起的钢材腐蚀的损伤; 不可抗力如地震、火灾、暴风雨、海啸等作用造成钢结构强度退化及塑性变形等损伤<sup>[5]</sup>. 常规的无损检测技术如超声、涡流等检测方法只能检测构件表面的宏观损伤, 无法检测到钢结构构件的微观隐性损伤<sup>[6]</sup>. 虽然微观隐性损伤发展成为宏观显性损伤要有一段过程, 但在这段损伤累积的过程中, 很小的外界作用都可能造成结构突然垮塌. 因此, 及时检测出钢结构断裂前的危险区域, 对钢结构的损伤检测具有极其重要的实际应用价值.

1997 年, 俄罗斯学者 Doubov 在第 50 届国际焊接学术会议上提出金属磁记忆检测技术<sup>[7]</sup>, 该检测技术是一种基于铁磁构件表面漏磁场进行的新颖无损检测技术, 能够诊断出构件以应力集中为主要特征的早期隐性损伤, 甚至可以防止结构突然失效<sup>[8-10]</sup>. 金属磁记忆检测的理论基础主要是磁机械效应, 磁机械效应是指磁化强度  $M$  的变化与应力  $\sigma$  或应变  $\epsilon$  等力学量的变化密切相关的现象. 磁致伸缩效应、压磁效应及磁弹性效应都是磁机械效应的一种<sup>[11]</sup>. 作为一种新型无损检测方法, 磁记忆检测技术已经引起了人们的广泛关注<sup>[12-13]</sup>, 但迄今为止, 关于磁记忆检测技术的研究都是定性化研究, 无法量化分析磁记忆信号与应力之间的关系. 在桥梁钢结构领域, 受力构件大部分为带波纹腹板的钢箱梁及 PC 组合梁, 这种类型的梁在各类公路、铁路、公铁两用及城市人行天桥等工程中得到广泛应用.

本文以桥梁钢材 Q345qC 制成的波纹腹板钢箱梁为研究对象, 通过受弯试验, 分析了波纹腹板受弯过程中, 沿腹板高度方向的磁记忆信号变化, 进而对基于磁记忆检测的波纹腹板抗剪性能表征技术进行了研究, 以期待为磁记忆检测技术运用于桥梁钢结构领域提供试验及理论参考.

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计与制作

本试验设计了 4 根波纹腹板钢箱梁试件, 分为 1 800 mm 和 2 100 mm 两组, 每组两根, 以避免相关的偶然性. 4 根试件的截面尺寸相同, 试件上、

下翼缘板厚 8 mm, 试件的波纹钢腹板由压制而成的 6 mm 厚钢板制成, 且桥钢箱梁试件的波纹与常用 1 000 型波纹腹板尺寸比为 1 : 4, 试件的波纹钢腹板单元尺寸和钢箱梁横截面尺寸分别如图 1 和图 2 所示.

为防止试件在加载过程中发生失稳, 在试件的上、下翼缘处焊接纵向加劲肋, 加劲肋高 40 mm, 厚 6 mm. 波纹腹板桥钢箱梁的三维图及照片分别如图 3 和图 4 所示.

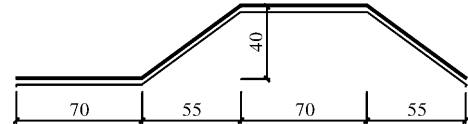


图 1 波纹钢腹板单元尺寸(单位: mm)

Fig. 1 Element dimensions of corrugated steel web(Unit: mm)

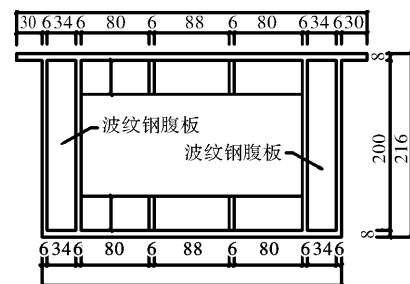


图 2 波纹腹板钢箱梁截面尺寸(单位: mm)

Fig. 2 Cross section size of corrugated web steel box girder(Unit: mm)

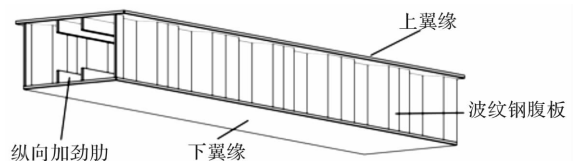


图 3 波纹腹板钢箱梁三维图

Fig. 3 Three-dimensional drawings of corrugated web steel box girder



图 4 焊接成形的波纹腹板钢箱梁

Fig. 4 Welded corrugated steel box girder

### 1.2 试件材性

Q345qC<sup>[14]</sup> 钢由于具有良好的力学性能、焊接性能及低温变形能力, 在桥梁的钢结构焊接构件方面有广泛的应用. 对采用具有代表性的 Q345qC 钢的试件进行基于磁记忆检测的受弯试验研究, 具有重要的理论及工程价值. 材料的力学性能及化

学成分分别见表 1 和表 2.

表 1 Q345qC 钢的主要化学成分(质量分数%)

Tab. 1 The main chemical composite of Q345qC steel (Mass fraction %)

牌号	化学成分						
	C	Si	Mn	S	P	Al	Fe
Q345qC	1.5	3.8	13.6	0.000 3	0.001 2	0.004	余量

表 2 Q345qC 钢的力学性能

Tab. 2 Mechanical behavior of Q345qC steel

弹性模量	屈服强度	抗拉强度	密度
$E/\text{GPa}$	$f_y/\text{MPa}$	$f_t/\text{MPa}$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
201	420	570	7.85

1.3 试件加载和数据测量

波纹腹板钢箱梁四点受弯试验在 YAJ20000 型电液伺服压剪试验机上进行. 在对试件进行加载时, 支座分别设置在距试件的左右两边各 0.15 m 的内侧, 使钢箱梁的跨度分别为 1 800 mm 和 1 500 mm. 在试件上翼缘外伸部分布置第一条检测线, 即检测线 1-1', 在波纹腹板上, 自上而下等间距布置 5 条检测线, 依次为检测线 1-1'、2-2'、3-3'、4-4'和 5-5'; 在靠近画有检测线的腹板一侧下翼缘等间距的选取 4 条检测线, 由外至内依次为检测线 1-1'、2-2'、3-3'和 4-4', 除在 1 800 mm 钢梁上设加密点外, 检测线上各检测点之间的距离均为 50 mm, 加密点之间的间距为 25 mm. 钢箱梁试件表面的磁记忆信号采集设备采用 EMS-2003 智能磁记忆/涡流检测仪. 取  $L=1.5\text{ m}$  试件的检测线分布如图 5 所示, 试验的加载示意如图 6 所示.

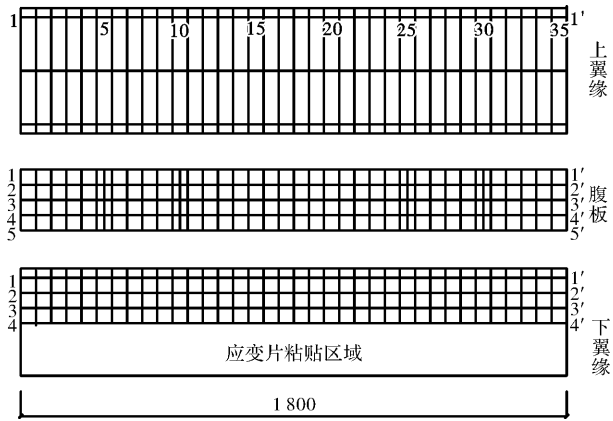


图 5 试件检测线分布图(单位: mm)

Fig. 5 Distribution of test line (Unit: mm)

试验前, 对钢梁及支座进行对中、调平, 对反力支撑支座间距进行精准调节并检查设备的运转, 使构件处于受弯状态. 根据公路钢结构桥梁设

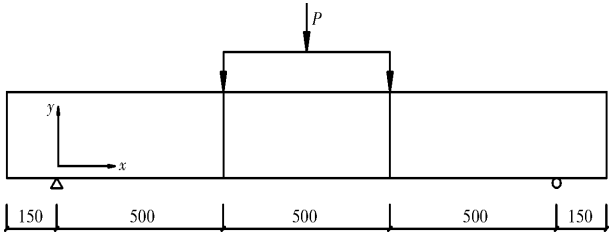


图 6 受弯试验加载示意图(单位: mm)

Fig. 6 Schematic diagram of bending test loading (Unit: mm)

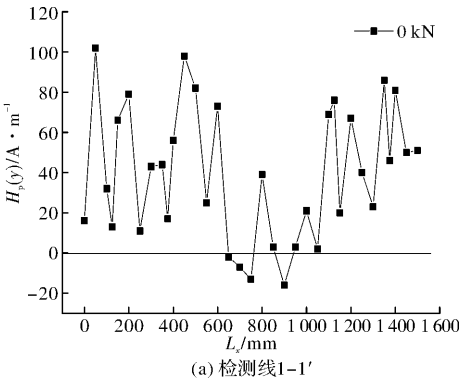
计规范<sup>[15]</sup>和组合折腹板桥梁设计模式指南<sup>[16]</sup>计算得到: 不考虑波纹腹板钢箱梁的塑性发展时, 跨度为 1.8 m 的试件的屈服荷载约为 900 kN; 跨度为 1.5 m 的试件的屈服荷载约为 1 000 kN. 为研究试件在弹性及塑性阶段的磁记忆信号变化情况, 对试件进行分级加载至试件的承载力极限状态, 无法继续加载时, 再进行保载检测. 因此, 对跨度  $L=1.5\text{ m}$  的试件, 加载至 0 kN、200 kN、400 kN、600 kN、800 kN、900 kN、1 000 kN、1 050 kN 及承载极限状态时, 分别对磁记忆信号进行检测; 对跨度  $L=1.8\text{ m}$  的试件, 加载至 0 kN、200 kN、400 kN、600 kN、800 kN、900 kN、1 000 kN、1 050 kN 及承载极限状态时, 分别对磁记忆信号进行检测. 跨度  $L=1.5\text{ m}$  的钢箱梁试件的失稳荷载为 1 123 kN, 跨度  $L=1.8\text{ m}$  的钢箱梁试件的失稳荷载为 1 100 kN. 试验均在相同实验室的环境下进行操作, 同时保持检测方法不变. 每个测点读取三次磁记忆信号数值, 以减少随机误差的影响.

2 试件腹板表面磁记忆信号检测

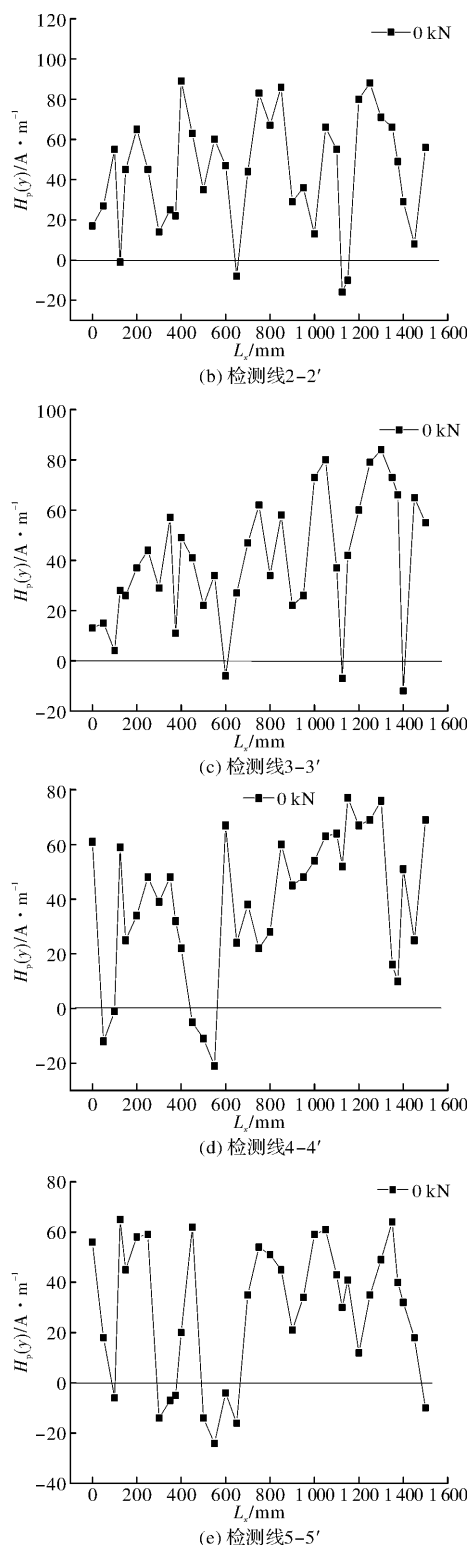
2.1 初始阶段试件腹板表面磁记忆信号

初始阶段, 跨度  $L=1.5\text{ m}$  的钢箱梁试件的腹板表面磁记忆信号曲线如图 7 所示.

由图 7 可知, 试件腹板检测线上的初始磁记忆信号变化杂乱无规律, 磁记忆信号强度基本大于零. 磁记忆信号曲线上存在“过零点”现象, 但由于初始阶段腹板表面不存在应力集中现象, 初始阶



(a) 检测线1-1'

图7 跨度  $L=1.5$  m 试件腹板初始磁记忆信号曲线Fig. 7 Initial magnetic memory signal curve of span  $L=1.5$  m specimen

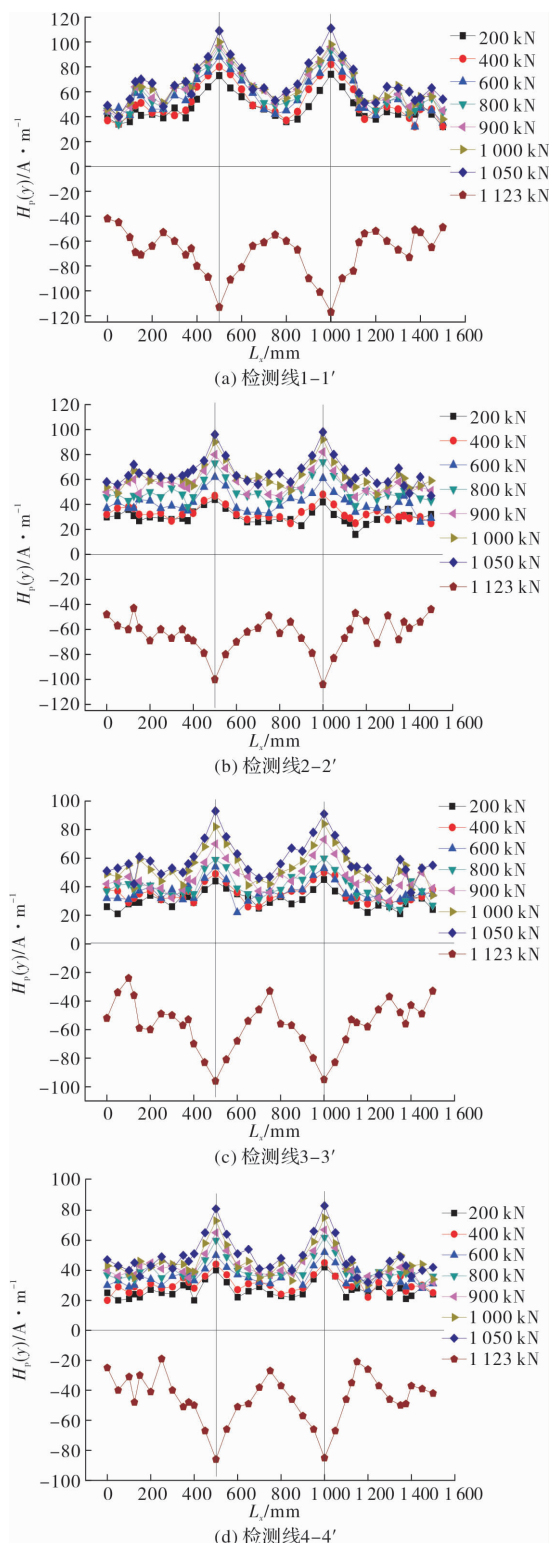
段磁记忆场强正负变化出现的“过零点”现象无实际评判意义。

## 2.2 加载阶段腹板表面磁记忆信号

加载过程中,对试件腹板表面的磁记忆信号进行检测,提取有效的磁记忆信号特征,研究沿腹板高度方向,磁记忆信号在不同检测线上的变

化情况。图8为加载过程中,跨度  $L=1.5$  m 试件腹板表面的磁记忆信号变化情况。

由图8可以看出,不同检测线上的磁记忆信号曲线大体变化趋势相同,但相互之间存在一定的差异性。试件失稳前,检测线1-1'至5-5'的磁记忆信号变化规律表现出相同的变化趋势,检测线上的磁记忆强度都为正值;在竖向集中力加载处( $L=500$  mm和 $L=1000$  mm处)出现“波峰”,即正向极值,且加载处“波峰”幅值随着荷载的增大而





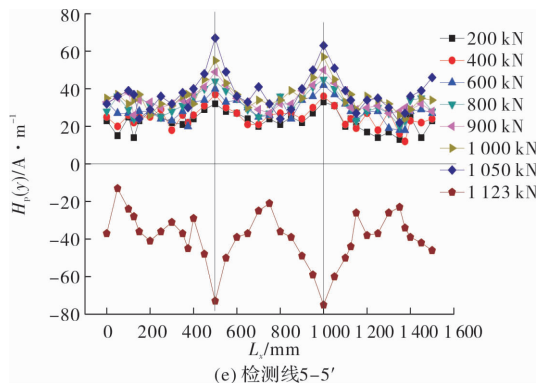


图8 跨度  $L=1.5$  m 试件加载过程中腹板的磁记忆信号曲线

Fig. 8 Magnetic memory signal curve of web of  $L=1.5$  m specimen during different loading value stage

增大,表明该部位应力集中程度增大;主要是由于随着荷载的增大,腹板表面剪应力增强,荷载磁化作用增强,进而磁记忆信号增加;而从检测线 1-1'至检测线 5-5',“波峰”幅值在逐渐降低,磁记忆信号强度大约由  $100 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$  降至  $70 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ ,随着检测线离集中力加载位置距离的增大,集中力的磁化效果减弱,因此,“波峰”部位的磁记忆信号逐渐减弱.加载至试件失稳后,磁记忆信号出现正负突变现象,并且在竖向集中力加载处出现“波谷”,即反向极值,主要原因是由于钢箱梁失稳属于分岔失稳,造成应力应变发生突变,最终导致磁记忆信号相应的发生正负突变<sup>[17]</sup>.

对比图7和图8可知,钢箱梁腹板表面检测线上的磁记忆信号曲线,都是由无序到有序.磁记忆强度值由初始阶段存在“过零点”发展成为加载后的磁记忆信号强度全为正值,或负值,出现上述磁特性主要是由于试件在初始阶段受轻微外力和表面残余应力等因素的作用,而在加载阶段主要受外加荷载的作用.进而说明铁磁材料试件对外加荷载的“感知”更加敏感.

为研究波纹腹板抗剪性能的磁记忆信号,集中力加载位置相对应位置的磁记忆信号并不具有代表性.因此需进一步研究其他位置的磁记忆信号变化.

### 3 基于磁记忆的波纹钢腹板抗剪性能表征

#### 3.1 波纹钢腹板的抗剪性能

波纹钢腹板所受的剪应力分为由箱梁弯曲引起的剪应力、箱梁扭转所引起的剪应力以及腹板自身变形所引起的畸变剪应力等<sup>[18]</sup>.用计算表达式可以表示为

$$\tau = \tau_a + \tau_{t1} + \tau_{t2} \quad (1)$$

式中:  $\tau_a$  为弯曲剪应力,  $\tau_{t1}$  为自由扭转剪应力,  $\tau_{t2}$  为约束扭转剪应力.

钢箱梁波纹钢腹板的纵向正应变在弹性范围内几乎为零;在波纹钢腹板屈曲以前,荷载与剪应变呈线性关系,且剪应力沿梁高几乎恒定,在腹板屈曲以后,应变值快速增大,结构发生脆性破坏<sup>[19-20]</sup>.由于腹板扭转所产生的扭转剪应力的影响因素较为复杂且难以推导,因此,通常不考虑扭转应力的影响,将剪应力理想化为

$$\tau_a = \frac{Q_w}{A_w} = \frac{Q - Q_p}{2th_w} \quad (2)$$

式中:  $Q_w$  为波纹钢腹板的设计剪力,  $A_w$  为波纹钢腹板总断面积,  $Q_p$  为预应力竖向分量,  $Q$  为剪力设计值,  $h_w$  为波形腹板高,  $t$  为波形腹板厚度.沿波高方向的剪应力分布如图9所示.

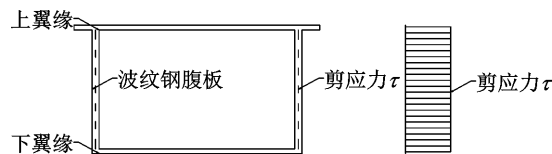


图9 波纹钢腹板沿波高的剪应力分布图

Fig. 9 Shear stress distribution of corrugated steel web along wave height direction

影响波纹钢腹板抗剪屈曲荷载的与自身有关的主要因素有两个,分别是组成材料和尺寸.影响波纹钢腹板抗剪性能的尺寸参数有:直板长度、腹板厚度、斜板倾角变化和梁高.随着直板长度的增加,波纹钢腹板的抗剪屈曲能力会随之降低,其受剪的最大变形在逐渐变小.随着波纹钢腹板的厚度逐渐增加,其抗剪屈曲荷载逐渐增加;随着斜板倾角的逐渐增大,钢腹板屈曲区域逐渐增大,整体屈曲越来越明显,并且屈曲变形逐渐增大;随着梁高的增加,波纹钢腹板的屈曲荷载逐渐减小,破坏时的变形增大<sup>[17]</sup>.

波纹钢腹板的抗剪屈曲破坏主要有:局部屈曲、整体屈曲和合成屈曲.这三种屈曲形式都是沿着腹板高度方向的强度以及抗剪强度校核<sup>[21]</sup>.屈曲破坏形式示意图如图10所示.

受弯试验中,加载至钢箱梁失稳时,波纹钢腹板呈抗剪合成屈曲破坏形式,试件失稳时整个腹板表面均有变形,接近上翼缘位置有轻微的褶皱效应,接近下翼缘位置受拉,呈反向褶皱效应,中间位置向箱内轻微弯折变形<sup>[17]</sup>,如图11所示.

#### 3.2 沿钢箱梁腹板高度方向的磁记忆信号变化

为研究基于磁记忆检测的抗剪性能表征技术,

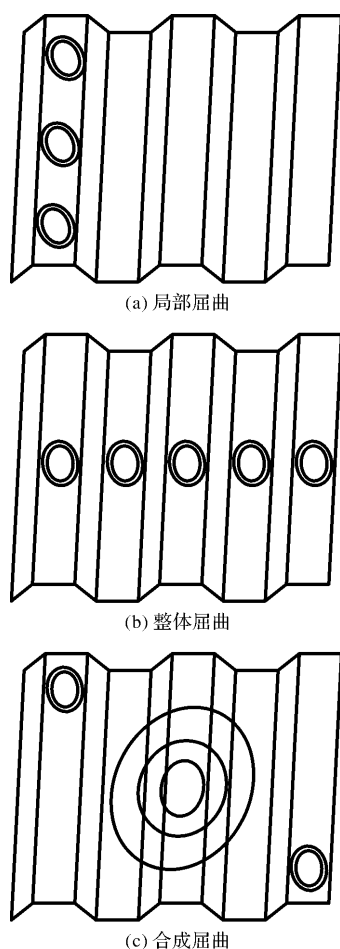


图10 波纹钢腹板屈曲的三种破坏模式

Fig. 10 Three failure modes of corrugated steel webs

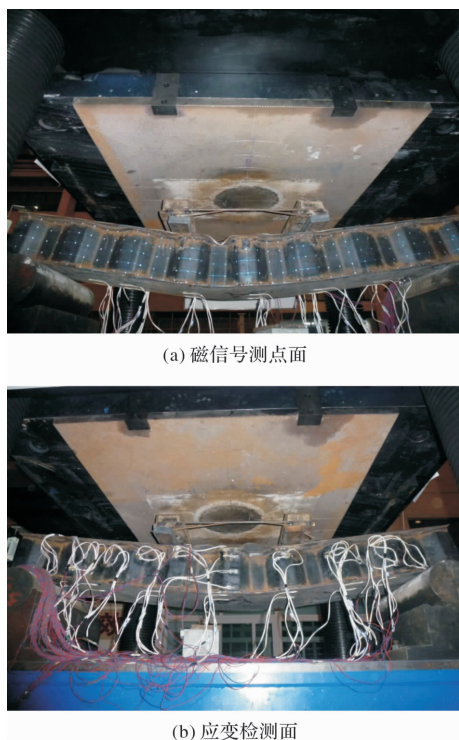


图11 钢箱梁波纹腹板的破坏图

Fig. 11 Failure diagram of corrugated web of steel box girder

需从沿腹板高度方向的磁记忆信号变化开始检测. 为研究沿整个波纹钢腹板高度方向的磁记忆信号变化, 需从钢箱梁受弯时的弯剪段和纯弯段选取代表截面, 取截面处测点和相邻两测点的磁记忆信号的平均值, 转化为研究区域抗剪的磁记忆信号的变化规律. 在跨度  $L=1.5\text{ m}$  的试件上, 选取  $L=250\text{ mm}$ 、 $L=750\text{ mm}$  和  $L=1\,250\text{ mm}$  三个截面处及各自相邻左右两点的磁记忆信号平均值. 将上翼缘集中力加载处梁高标定为零, 故检测线 1-1' 至 5-5' 上测点所在高度分别为  $8\text{ mm}$ 、 $58\text{ mm}$ 、 $108\text{ mm}$ 、 $158\text{ mm}$ 、 $208\text{ mm}$ . 测点高度及截面示意图如图 12 所示. 跨度  $L=1.5\text{ m}$  试件沿梁高方向的磁记忆信号在试验加载过程中的变化如图 13 所示.

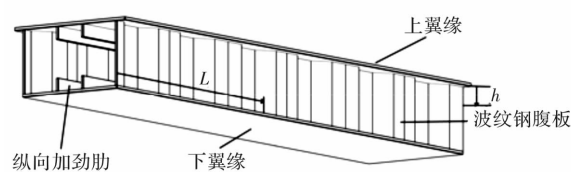


图12 钢箱梁横截面及沿竖向腹板的标定高度

Fig. 12 Sketch of box girder cross section and calibration height along the vertical web

由图 13 可以看出, 钢箱梁试件腹板表面三个区域沿腹板高度方向自上而下的磁记忆信号, 随着标定梁高的增大而逐渐降低, 即离竖向集中力加载点越远, 磁记忆信号强度越弱, 而沿着梁高方向的剪应力均匀不变, 其不影响腹板梁高方向的磁记忆信号变化; 并且随着荷载的增大, 剪应力增大, 截面磁记忆信号强度值也在增加.

### 3.3 磁记忆信号沿梁高方向的变化速率研究

由上述可知, 影响磁记忆信号沿标定梁高方向的变化速率的因素可能主要有如下三个: 弯剪段或纯弯段区域, 标定梁高, 施加的荷载的大小.

建立参数  $K_h$  来表示磁记忆信号沿梁高方向自上而下的变化速率, 以研究标定梁高对磁记忆信号变化速率的影响. 因此, 有

$$K_h = \frac{dH_p(y)}{dh} \quad (3)$$

利用公式(3)计算出磁记忆信号变化速率, 进而建立  $K_h-h_y$  曲线. 图 14 为跨度  $L=1.5\text{ m}$  的钢箱梁试件腹板表面的  $K_h-h_y$  曲线.

根据图 14, 由钢箱梁试件腹板表面  $K_h-h_y$  图的分布无规则可知: 试件腹板表面磁记忆信号变化率与腹板高度无关. 为进一步研究试件腹板表面的磁记忆信号变化速率, 并为排除高度因素的影响,

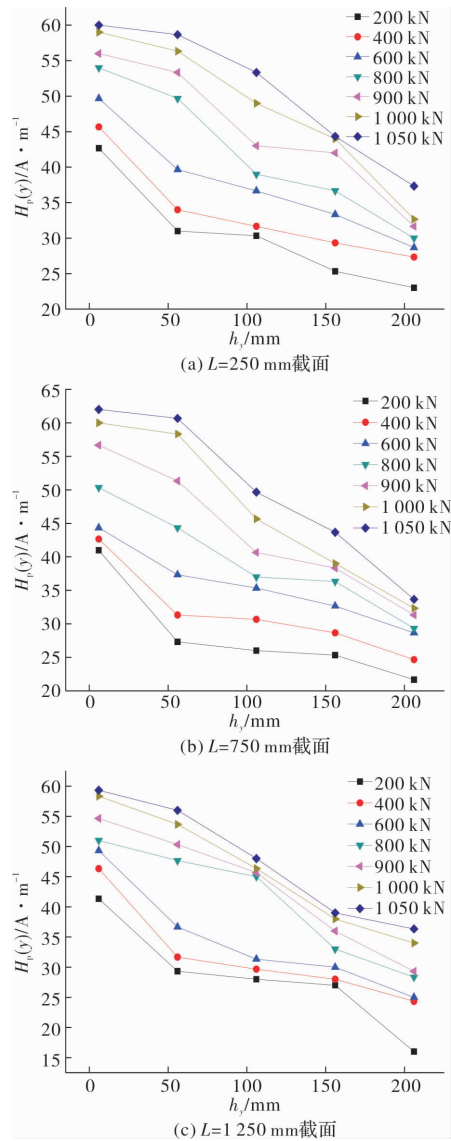


图 13 加载过程中跨度  $L=1.5$  m 试件沿梁高方向的磁记忆信号

Fig. 13 Magnetic memory signals along the height of  $L=1.5$  m girder during loading

建立参数  $K_h^{\text{ave}}$ , 用以表示试件腹板区域磁记忆信号的平均变化速率. 对于跨度  $L=1.5$  m 试件可得公式(4).

$$K_h^{\text{ave}} = \frac{K_h}{4} \quad (4)$$

加载过程中, 跨度  $L=1.5$  m 试件腹板表面的  $K_h^{\text{ave}}-P$  曲线如图 15 所示.

由图 15 可以看出, 加载过程中跨度  $L=1.5$  m 试件腹板表面的  $K_h^{\text{ave}}-P$  曲线有一定的规律. 由图(a)和图(c)可知, 在  $L=250$  mm 和  $L=1\,250$  mm 区域的磁记忆信号变化速率绝对值随着预设荷载的施加先增大后减小,  $K_h^{\text{ave}}-P$  曲线近似呈抛物线分布, 加载至 800 kN 时, 区域磁记忆信号变化率达到最小值. 由图(b)可知, 在  $L=750$  mm 区域的磁记忆信号变化率随着预设荷载的增大, 先增大后

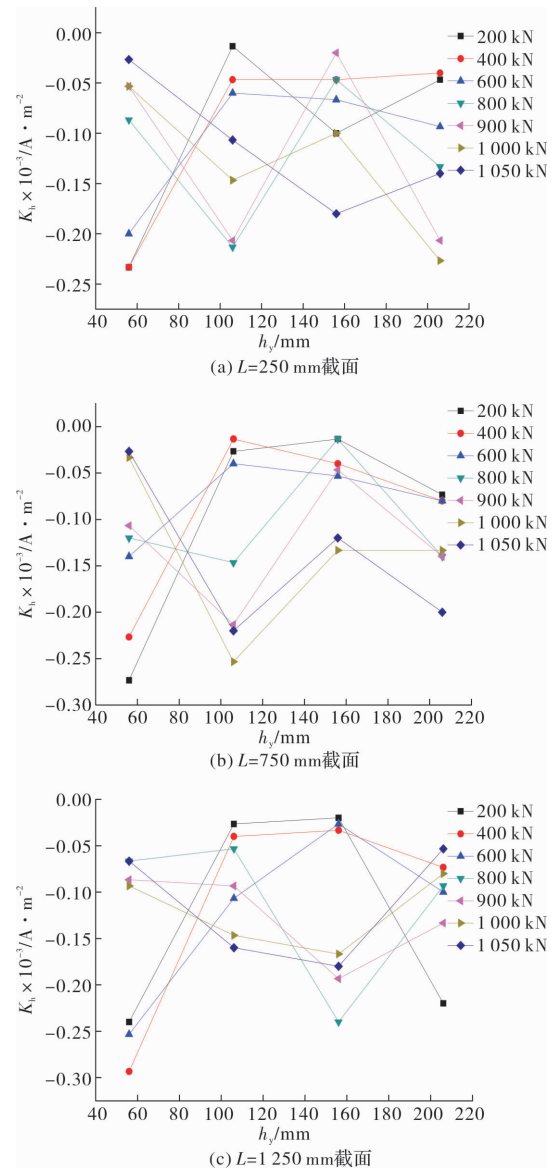


图 14 加载过程中跨度  $L=1.5$  m 试件腹板表面  $K_h-h_y$  图

Fig. 14  $K_h-h_y$  diagram of web surface of span  $L=1.5$  m specimen during loading

减小, 加载至 600 kN 时, 区域磁记忆信号率绝对值达到最小值,  $K_h^{\text{ave}}-P$  曲线峰状分布.

随着荷载的增大, 波纹腹板区域的平均磁记忆信号变化速率绝对值先增加后减小, 这是因为在弹性阶段, 应力能在外力作用下增加, 晶格系统能量增加. 为了使系统重新稳定, 能量要重新分布, 因此磁畴发生转动、移动和畴壁消失降低能量, 使系统达到新的平衡. 磁畴壁的移动和磁矩的转动增强了磁化作用, 磁记忆信号变化率上升. 在塑性阶段, 外应力增长很小, 位错的生成, 产生钉扎效应, 阻碍磁畴壁的移动和磁矩的转动, 同时铁磁构件达到磁饱和状态, 进而磁化作用减弱, 磁记忆信号变化速率降低.

由上述分析可见: 磁记忆信号的变化速率不



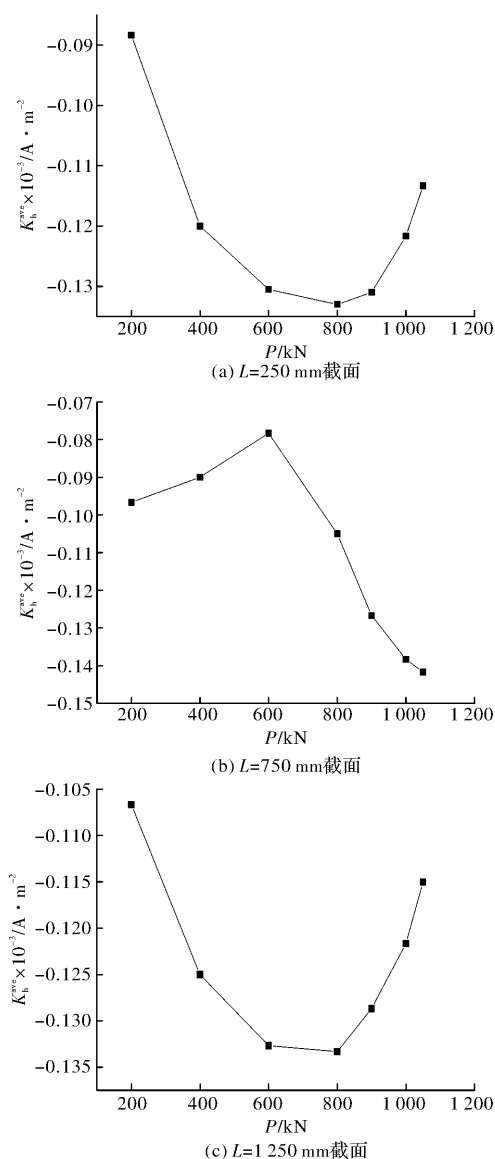


图 15 加载过程中跨度  $L=1.5$  m 试件腹板表面的  $K_h^{ave}$ - $P$  曲线

Fig. 15  $K_h^{ave}$ - $P$  curve of web surface of span  $L=1.5$  m specimen during loading

仅与试件所受力的大小有关,还与区域有一定关系.主要原因是:钢箱梁试件在受弯过程中,几乎所有的剪力都由波纹腹板承担,所有的弯矩由上下翼缘承受<sup>[22]</sup>,且弯剪段承受剪力,纯弯段剪力为零,波纹钢腹板主要承受剪应力,波纹腹板表面沿高度方向的剪力只在弯剪段对 Q345qC 桥钢铁磁材料产生磁化作用,而在腹板纯弯段所受剪力为零,沿高度方向的磁化作用只靠恒定外磁场和残余应力等微弱因素的耦合磁化作用,因此纯弯段区域平均磁记忆信号变化速率与弯剪段的变化规律有所不同.

### 3.4 弯剪段平均磁记忆信号的变化速率和剪力之间的量化关系的建立

为了研究腹板表面弯剪段的磁记忆信号变化

率  $K_h^{ave}$  与剪力  $Q$  的定量关系,需要先研究变化率  $K_h^{ave}$  与预设荷载  $P$  的定量关系,因此对纯弯段的  $K_h^{ave}$ - $P$  曲线进行拟合.由于箱梁纯弯段剪力为零,因此不需要对图 15(b)进行拟合,对图 15(a)、(c)进行拟合,分别得到图 16(a)、(b).

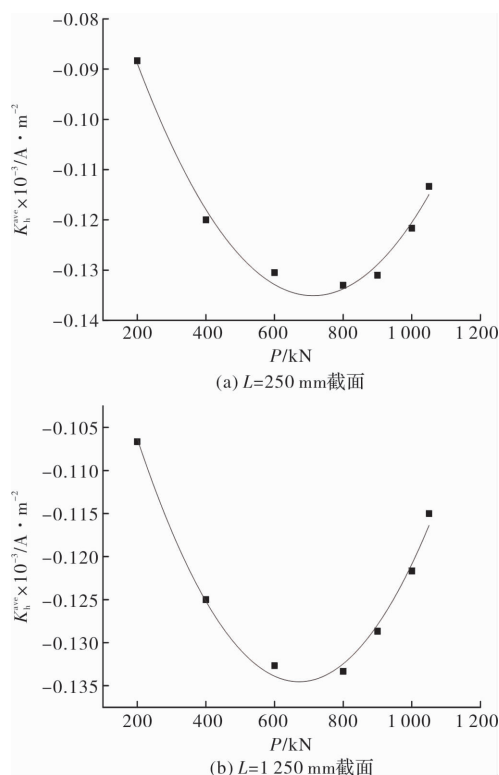


图 16 加载过程中跨度  $L=1.5$  m 试件腹板弯剪段  $K_h^{ave}$ - $P$  曲线拟合图

Fig. 16  $K_h^{ave}$ - $P$  fitting curve of  $L=1.5$  m specimen of web bending section during loading

对加载过程中跨度  $L=1.5$  m 试件腹板弯剪段  $K_h^{ave}$ - $P$  曲线数据进行拟合后,由图 16(a)、(b),分别得到关系式(5)和(6).

$$K_h^{ave} = -0.04577 + (-2.50823 \times 10^{-4})P + (1.76074 \times 10^{-7})P^2 \quad (5)$$

$$K_h^{ave} = -0.07732 + (-1.70393 \times 10^{-4})P + (1.2685 \times 10^{-7})P^2 \quad (6)$$

弯剪段剪力  $Q$  与集中荷载  $P$  的关系为

$$Q = \frac{P}{2} \quad (7)$$

因此,可得  $K_h^{ave}$  与剪力  $Q$  的关系如公式(7)所示,它能反映出腹板剪应力与磁场变化率之间的对应关系.

$$K_h^{ave} = a + bQ + cQ^2 \quad (8)$$

式(8)提出了波纹腹板上区域平均磁记忆信号变化率与剪力之间的量化对应关系.为后续研究奠定了量化分析的基础.在实际桥梁工程中波纹腹板钢箱梁承受的是均布荷载和集中荷载的复合力,



因此,剪力与磁记忆信号之间的关系需做进一步研究.此外,本试验中磁记忆信号变化率为沿高度方向区域平均磁记忆信号变化率,尚未考虑与铁磁材料磁化相关的其他因素的耦合作用,因此,公式具有一定局限性.

## 4 结论

(1)在波纹腹板表面磁记忆信号曲线上,竖向集中力截面位置出现“波峰”极值,且随着荷载的增大,“波峰”幅值越高,应力集中程度越大;试件失稳时,磁记忆信号发生正负突变,以此可作为试件失稳时的评判依据;随着检测线离集中力加载位置越远,“波峰”幅值越低.

(2)在波纹钢腹板上,随着标定高度的增大,材料的磁化作用减小,磁记忆信号降低;并且随着荷载的增大,剪应力也增强,截面区域的磁记忆信号强度随之增加.

(3)影响磁记忆信号沿标定梁高法向的磁记忆信号变化速率的因素主要有两个:弯剪段或纯弯段区域、施加的荷载的大小;试件腹板表面磁记忆信号变化率与腹板高度无关.

(4)波纹钢腹板上弯剪段平均磁记忆信号变化速率与荷载的关系曲线近似呈抛物线分布,且区域平均磁记忆信号变化速率绝对值随荷载的增加先增大后减小;腹板纯弯段的区域平均磁记忆信号变化速率与弯剪段的变化规律有所不同.

## 参考文献 References

- [1] YAO Kai, SHEN Kai, WANG Zhengdao, et al. Three-dimensional finite element analysis of residual magnetic field for ferromagnets under early damage [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2014, 354: 112-118.
- [2] SHUI Guoshuang, LI Changwu, YAO Kai. Non-destructive evaluation of the damage of ferromagnetic steel using metal magnetic memory and nonlinear ultrasonic method[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2015, 47: 1023-1038.
- [3] 王威,樊浩,杨为胜,等. 钢结构隐性损伤的磁记忆识别机理及试验研究[J]. 结构工程师, 2014, 30(5): 139-145.
- WANG Wei, FAN Hao, YANG Weisheng, et al. Identification mechanism and experiment of metal magnetic memory in steel structure implicit damage testing [J]. Structural Engineers, 2014, 30(5): 139-145.
- [4] 陈卓异,李传习,柯璐,等. 某悬索桥箱梁疲劳病害及处治方法研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(3): 91-100.
- CHEN Zhuoyi, LI Chuanxi, KE Lu, et al. Study on damages and retrofit methods of steel box girder in a suspension bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(3): 91-100.
- [5] 姚楠. 在役桥梁钢结构损伤检测与安全评估相关方法的研究[D]. 北京:清华大学, 2009.
- YAO Nan. Research on the methods of damage detection and safety assessment of the bridge steel structure in service[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [6] 苏三庆,王威,曾发荣,等. 基于磁记忆的受弯钢梁应力表征技术研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(4): 463-468, 476.
- SU Sanqing, WANG Wei, ZENG Farong, et al. Research on stress characterization technology of the bent beam based on magnetic memory[J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(4): 463-468, 476.
- [7] DUBOV A A. A study of metal properties using the method of magnetic memory [J]. Metal Science and Heat Treatment, 1997, 39(9): 401-405.
- [8] WILSON John W, TIAN Guiyun, BARRANS S. Residual magnetic field sensing for stress measurement [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 135(2): 381-387.
- [9] SU Hao, CHEN Ming. Magnetic memory signal changes of 45# steel in the process of fatigue[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2016, 52(3-4): 1623-1628.
- [10] 易术春,王威,苏三庆,等. 利用磁记忆信号特征参数表征拉伸应力状态[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(4): 667-672, 836-837.
- YI Shuchun, WANG Wei, SU Sanqing, et al. Using the characteristic parameters of magnetic memory signal to evaluate the tensile stress state[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(4): 667-672, 836-837.
- [11] 万升云. 磁记忆检测技术及其应用技术的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2006.
- WAN Shengyun. Magnetic memory testing technology and application technology research[D]. Wuhan: Huazhong

- University of Science and Technology, 2006.
- [12] ROSKOSZ M, BIENIEK M. Evaluation of residual stress in ferromagnetic steels based on residual magnetic field measurements[J]. *NDT & E International*, 2012, 45(1): 55-62.
- [13] LI Chongchong, DONG Lihong, WANG Haidou, et al. Metal magnetic memory technique used to predict the fatigue crack propagation behavior of 0.45% C steel[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, 405(1): 150-157.
- [14] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国国家标准化委员会. 中华人民共和国国家标准: 桥梁用结构钢: GB/T714-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- The General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of People's Republic of China and the National Standardization Administration Committee of China. National Standards of the People's Republic of China. Bridge Structural Steel: GB/T714-2015[S]. Beijing: China Standard Press, 2015.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 中华人民共和国行业标准. 公路钢结构桥梁设计规范: JTGD64-2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- Ministry of Transport of People's Republic of China. Industrial Standard of the People's Republic of China. Code for design of highway steel structure bridge: JTGD64-2015 [S]. Beijing: People's transportation Press, 2015.
- [16] 刘玉擎, 陈艾荣. 组合折腹板桥梁设计模式指南[B]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- LIU Yuqing, CHEN Airong. Design guide for composite folded web bridge[B]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [17] 牛晓波. 基于波纹腹板钢箱梁受弯试验的磁记忆信号检测研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- NIU Xiaobo. The study of magnetic memory testing signal based on the bending test of the corrugated web steel box girder[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2017.
- [18] 周绪红, 孔祥福, 侯健, 等. 波纹钢腹板组合梁的抗剪受力性能[J]. *中国公路学报*, 2007, 20(2): 77-82.
- ZHOU Xuhong, KONG Xiangfu, HOU Jian, et al. Shear behavior of composite beams with corrugated steel webs[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2007, 20(2): 77-82.
- [19] 王浩瀚, 廖若华, 李启祥. 波纹钢腹板预应力混凝土箱梁抗剪受力性能[J]. *广东建材*, 2002(6): 51-52.
- WANG Haohan, LIAO Ruohua, LI Qixiang. Shear behavior of prestressed concrete box girder with corrugated steel webs[J]. *Guangdong Building Materials*, 2002(6): 51-52.
- [20] 马玲. 波纹钢腹板PSC组合箱梁受力性能有限元分析[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- MA Ling. Finite element analysis of psc composite box girder with corrugated steel webs[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [21] 罗楠. 波纹钢腹板的抗剪屈曲和模态分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
- LUO Nan. Shear buckling and modal analysis of corrugated steel webs[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
- [22] 王芳. 波形钢腹板组合梁力学性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- WANG Fang. Experimental study on mechanical behavior of composite beams with corrugated steel webs[D]. Changsha: Hunan University, 2007.

(编辑 吴海西 沈 波)