

双层钢箱截面组合索塔力学性能试验

曾耀^{1,2}, 吴冲¹, 秦飞¹

(1. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092; 2. 重庆市公路工程质量检测中心, 重庆 400060)

摘要: 设计制作了 5 个具有开孔板连接件和 5 个具有焊钉连接件的双层钢箱截面钢-混凝土组合索塔模型试件, 根据索塔实际受力特性进行轴压和恒定轴力下的往复弯曲荷载试验. 试验展示了使用两类连接件的双层钢箱组合索塔在不同荷载作用下的破坏形态和极限能力, 结果表明: 开孔板和焊钉均能约束受压钢板的屈曲波长, 连接件的类型对试件破坏的具体形态有一定影响; 轴压比是影响试件力学性能的主要因素, 所有试件都根据其大小分为受压破坏和受拉破坏两类; 无轴力和过高的轴力都会明显降低构件在往复荷载下的力学性能. 最后, 将试验结果与按照基于刚塑性原理的规范计算得到的承载能力进行比较.

关键词: 组合索塔; 双层钢箱; 开孔板; 焊钉; 往复荷载; 破坏形态; 承载能力

中图分类号: TU398; U448.38

文献标识码: A

Experimental Investigation on Double-skin Steel-concrete Composite Pylon

ZENG Yao^{1,2}, WU Chong¹, QIN Fei¹

(1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; Highway Engineering Quality Detection Center of Chongqing City, Chongqing 400060, China)

Abstract: Five specimens with perforated ribs and five specimens with studs were constructed to observe the experimental behaviour of double-skin steel-concrete composite pylon under axial load and combined constant axial load with cyclic lateral load respectively. Results of the test demonstrate the ultimate capacity and failure mode of two types of specimens with different connectors. Both perforated ribs and studs can limit the buckling wavelength of plate and to a certain extent influence the detail of failure modes. As a major influence factor, axial load level divides failure modes into two types, compression failure and tension failure. Furthermore, specimens under cyclic load show poor performance when there is high axial load or no axial load at

all. At last, comparison on the bearing capacity is made between the results from experiments and calculations according to the codes, which is based on rigid-plastic principle.

Key words: composite pylon; double-skin; perforated ribs; studs; cyclic loads; failure mode; bearing capacity

以承受轴向荷载为主的缆索承重体系桥梁索塔一般采用钢结构或混凝土结构, 其横截面通常设计为具有较高刚度质量比的中空截面. 钢-混凝土组合索塔是近年来发展迅速的一种新型结构形式, 为缩短索塔复杂的几何外形带来的较长建设时间, 阿拉米罗桥索塔由最初设计的钢筋混凝土结构修改为钢-混凝土组合结构, 其外部钢板不仅作为结构构件承载, 而且兼做混凝土浇注时的施工模板, 同时, 使用焊钉连接件和 T 形加劲肋确保混凝土与钢板共同工作^[1]. 昂船洲大桥的上塔柱部分也采用钢-混凝土组合结构, 为降低后期维护成本和提高结构的耐久性, 钢结构部分采用不锈钢, 与阿拉米罗桥不同, 索塔在钢与混凝土之间仅使用焊钉连接^[2].

连接件是确保钢与混凝土共同工作, 形成钢-混凝土组合结构的重要构件, 也是影响组合结构极限承载力的关键因素之一. 圆柱头焊钉和开孔板是桥梁结构中较为常用的连接件, 它们构造简单, 力学性能明确, 不像钢筋连接件和型钢连接件那样需要根据受力方向进行专门设置. 已有研究^[3-9]表明: 在以承受轴力为主的组合构件中, 连接件不仅确保混凝土与钢结构共同工作, 而且能有效地防止钢板过早屈曲, 提高构件的整体承载能力; 但连接件种类的差异也影响构件的力学性能.

本文通过轴压和恒定轴力下往复弯曲试验, 研究在真实受力状态下的使用焊钉和开孔板两类常用

收稿日期: 2011-08-29

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2007AA11Z105); 国家“十一五”科技支撑计划(2009BAG15B02); 江西省交通科技项目(2010C0015)

第一作者: 曾耀(1981—), 男, 博士生, 主要研究方向为钢与组合结构和桥梁检测. E-mail: bridgezy@gmail.com

连接件的双层钢箱截面组合索塔的力学性能,同时了解不同种类的连接件在组合索塔中的受力特性和破坏形态.

1 试验概况

1.1 模型试件

试验设计制作 5 个具有开孔板连接件和 5 个具有焊钉连接件的双层钢箱组合索塔模型试件,分别命名为 DP 系列试件和 DS 系列试件,分别简称开孔板试件和焊钉试件.所有试件外形尺寸相同,设计如图 1—4 所示.开孔板开孔直径为 30 mm,与钢箱壁板熔透连接;焊钉规格为 $\Phi 13 \times 80$ mm,由螺柱焊焊

接在钢箱壁板上.所有试件连接焊缝全部熔透,端板均开有圆孔以浇筑内部混凝土.

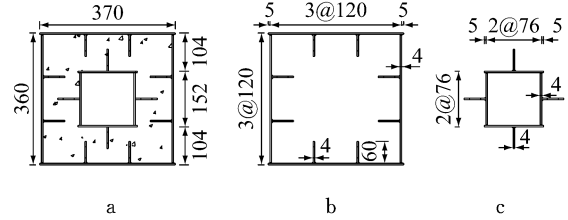


图 1 DP 试件横截面 (a), 外部钢箱 (b) 和内部钢箱 (c) [10] (单位: mm)

Fig. 1 Section of DP series specimen, outer steel box and inner steel box [10] (unit: mm)

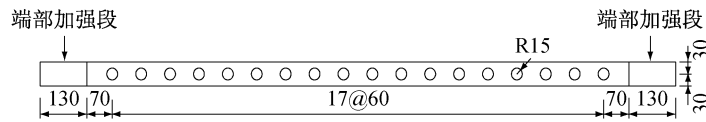


图 2 开孔板 [10] (单位: mm)

Fig. 2. Detail of perforated rib [10] (unit: mm)

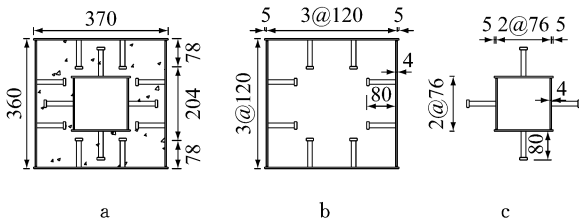


图 3 DS 试件横截面 (a), 外部钢箱 (b) 和内部钢箱 (c) (单位: mm)

Fig. 3 Section of DS series specimen, outer steel box and inner steel box (unit: mm)



图 4 焊钉布置 (单位: mm)

Fig. 4 Arrangement of studs (unit: mm)

1.3 试验设备

试验试件与反力架一端固定,一端铰接,在铰支端使用竖向和横向两套 MTS 电液伺服加载系统加载,用以模拟索塔真实受力状态,试验装置如图 5 所示.

1.4 加载方案

通常,轴压比由构件的理论轴向极限承载能力确定.为获得组合索塔较为真实的压弯性能,往复荷载试验时利用相同试件通过轴压试验得到的实际轴向极限承载能力来定义真实的轴压比.

1.4.1 轴压试验

1.2 材料特性

所有组合索塔模型试件采用同一批材料加工制作,材料特性全部按照中国国家标准进行测试.测得 28 d 龄期标准立方体混凝土抗压强度为 50.7 MPa,弹性模量为 3.34×10^4 MPa;圆柱头焊钉屈服强度为 363 MPa,极限抗拉强度为 452 MPa,弹性模量为 2.01×10^5 MPa;开孔板和内外钢箱所用 4 mm 钢板屈服强度为 342 MPa,极限抗拉强度为 464 MPa,弹性模量为 2.03×10^5 MPa.

轴压试件为 1 个开孔板试件和 1 个焊钉试件,分别命名为 DP-100 和 DS-100,试件名称中数字代表试验时的轴力与轴向极限能力比值的百分数.试验使用两步加载:① 预载:以 $5 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ 荷载速率加载至 1 000 kN,持荷 3 min,然后卸载;② 正式加载:以 $5 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ 荷载速率加至 1 500 kN 后,转换为 $0.01 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 位移增量加载,直至试件破坏.

1.4.2 往复荷载试验

对其余 4 个开孔板试件和 4 个焊钉试件进行恒定轴力下的往复荷载试验.恒定轴力值大约为轴压试验得到的极限承载能力的 20%, 40% 以及 60%,

试件命名规则如同轴压试验. 往复荷载试验与轴压试验在同一设备上进行,分三个步骤加载:① 轴向预载:以 $5 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ 荷载速率加载至 $1\,000 \text{ kN}$,持荷 3 min ,然后卸载;② 轴向加载:以 $5 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ 荷载速率加至指定轴力;③ 水平往复加载:保持轴力恒定,水平往复加载,直至试件破坏.

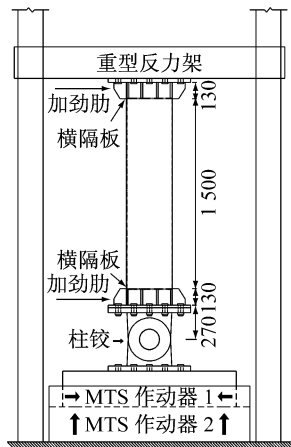


图 5 试验装置(单位:mm)
Fig.5 Test setup(unit: mm)

由于组合索塔试件无明显水平屈服力,往复荷载全部使用位移施加,每级加载位移为 5 mm 的整数倍,每级位移往复循环 3 次,直至试件破坏.

2 试验结果

2.1 轴压试验结果

试件 DP-100 和 DS-100 受压破坏区域均位于铰支端附近,其极限承载能力分别为 $7\,952 \text{ kN}$ ^[10] 和 $7\,812 \text{ kN}$. DP-100 试件破坏区域钢板在开孔板的连续约束作用下,屈曲波长一直被限制在开孔板和钢板壁之间,破坏形态如图 6 所示. 由于焊钉仅能以单点的方式约束钢板的屈曲变形,DS-100 试件的外部钢箱壁板从一开始就出现整体屈曲现象,而不像 DP-100 试件那样发生局部屈曲,屈曲波长在试件轴向略微超过第一排焊钉高度;同时,焊钉焊趾处钢板受拉开裂,破坏形态如图 7 所示.

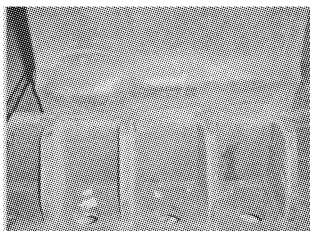


图 6 试件 DP-100 钢板局部屈曲
Fig.6 Steel plate local bucking (DP-100 specimen)

2.2 往复弯曲试验结果

往复弯曲时加载的恒定轴力大约为轴压试验得到的组合索塔试件极限承载能力的 20% , 40% 以及 60% ,试验时实际轴压比见表 1.

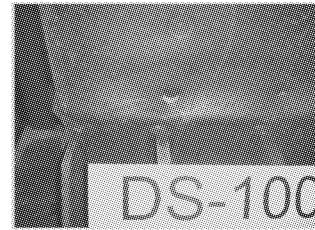


图 7 试件 DS-100 焊钉处钢板开裂
Fig.7 Crack of weld seam (DS-100 specimen)

表 1 试验轴压比

Tab.1 Axial load level

| 恒定轴力值/kN | 试件名称 | 轴压比 ^[10] /% | 试件名称 | 轴压比/% |
|----------|-------|------------------------|-------|-------|
| 0 | DP-0 | 0 | DS-0 | 0 |
| 1 560 | DP-20 | 19.62 | DS-20 | 19.97 |
| 3 120 | DP-40 | 39.24 | DS-40 | 39.94 |
| 4 680 | DP-60 | 58.85 | DS-60 | 59.90 |

2.2.1 破坏形态

往复弯曲试件可根据轴压比的大小分为两种典型的破坏形态:无轴压以及轴压比为 20% 左右的试件展现出的受拉破坏与轴压比为 40% 、 60% 左右的试件展现出的受压破坏.

受拉破坏主要表现为钢板在往复荷载作用下低周疲劳开裂,裂缝从竖向角焊缝处沿试件横截面方向开始发展,随着循环荷载的增加,裂缝不断发展,直至几乎贯穿整块钢板,但具体的破坏形态根据连接件种类的不同有一定的差别. 开孔板仅在钢板纵向有连续约束作用,因此,钢板局部屈曲可沿试件高度方向自由发展,试验开始时受压侧钢板产生的局部屈曲在往复荷载作用下被拉平,破坏时几乎无法见到钢板受压引起的屈曲(图 8). 焊钉连接件仅在试件横截面方向上对钢板局部屈曲形成约束,由于焊钉距横隔板之间距离较短,钢板屈曲引起的鼓曲波峰峰值较大,受压侧钢板局部屈曲引起的鼓曲在试验过程中难以拉平,导致疲劳裂缝沿钢板屈曲波峰发展,同时,在焊钉焊趾处也出现低周疲劳破坏现象(图 9).

受压破坏主要表现为承载方向钢板屈曲,相应位置处内部混凝土压碎. 与受拉破坏相同,连接件不同的约束方式对具体的破坏形态有一定影响. 在开孔板的纵向连续约束作用下,钢板受压局部屈曲的波长被限制在开孔板之间(图 10);而焊钉连接件在

试件横向约束了钢板屈曲的发展,钢板整体屈曲被限制在横隔板与焊钉之间,过小的纵向屈曲波长导致试件角焊缝受压破坏,而焊钉焊趾处在往复荷载作用下出现低周疲劳破坏(图 11)。

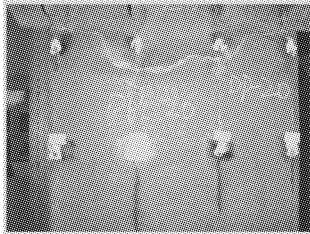


图 8 试件 DP-20 受拉破坏

Fig.8 Cyclic tension failure (DP-20 specimen)

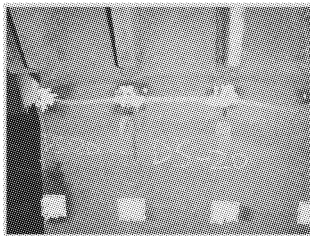


图 9 试件 DS-20 受拉破坏

Fig.9 Cyclic tension failure (DS-20 specimen)

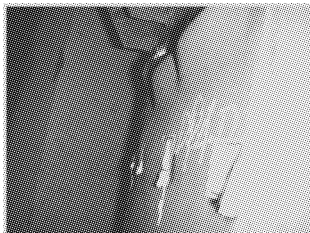


图 10 试件 DP-40 受压破坏

Fig.10 Cyclic compression failure (DP-40 specimen)

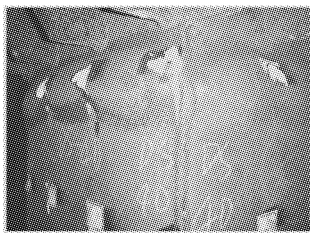


图 11 试件 DS-40 受压破坏

Fig.11 Cyclic compression failure (DS-40 specimen)

2.2.2 荷载一位移曲线

往复荷载作用下组合索塔试件的水平荷载一位移曲线如图 12—13 所示,所有试件在试验结束时均无法维持相应的轴向荷载,几乎完全丧失承载能力。由图可知,无轴力作用试件的水平极限荷载明显要低于有轴力作用的试件,同时,其荷载一位移曲线还有较为明显的捏缩现象出现;轴压比大约为 20%和

40%的 4 个试件均展现出良好的力学性能,它们不仅具有较高的水平承载能力,且具有较好的耗能能力;轴压比大约为 60%的两个试件虽具有最大的水平承载能力,但荷载一位移曲线以近似于线性的关系发展,试件在达到承载能力后迅速破坏,几乎未表现出任何耗能能力和延性性能。

3 受力特性分析

3.1 受拉破坏

无轴力试件在试验初始阶段,受拉区混凝土开裂,荷载由钢板承受;受压区钢板与混凝土共同工作。随着往复水平位移的增加,试件受拉焊缝沿试件横截面方向出现低周疲劳开裂,同时,受压区中的混凝土受拉裂缝难以完全闭合,因此,外部荷载完全转移到未开裂的钢板截面和混凝土部分,横截面开始削弱,试件荷载一位移曲线发生捏缩。随着试验的进行,钢板疲劳裂缝和混凝土受拉裂缝不断发展,横截面继续削弱,直至试件完全丧失承载能力。

对轴压比为 20%左右的试件来说,轴压的存在使受压区钢板屈曲,但由于屈曲波长受连接件的影响而展现出不同的破坏形态。同时,轴压的存在不仅能促进受压区的混凝土受拉裂缝闭合,而且能有效地延迟混凝土截面受拉开裂和钢板低周疲劳开裂引起的横截面削弱。因此,荷载一位移曲线不仅饱满且几乎无捏缩现象发生,试件的水平极限能力也高于无轴力试件;但较低的轴力不足以改变试件的受拉破坏形态。

3.2 受压破坏

在轴压比为 40%左右的试件加载初期,钢板和混凝土共同承载。随着水平位移和循环次数的增加,试件端部受压钢板开始出现屈曲,荷载逐渐由钢板传递到混凝土截面。随着试验的进行,钢板屈曲引起的鼓曲继续增大,并逐渐屈服;开孔板试件钢板的局部屈曲被限制在开孔板之间,焊钉试件钢板的整体屈曲被限制在横隔板和焊钉之间,这与轴压试件相同。随着水平位移的增加,开孔板试件中内部混凝土在往复荷载作用下压碎,对开孔板约束减弱,而开孔板自身又无足够的能力约束钢板的屈曲,因此,钢板在压力作用下发生整体屈曲;焊钉试件钢板的整体屈曲加剧,屈曲波峰变大。试件破坏时的塑性铰区域位于试件承受弯矩的端部,对开孔板试件来说,其长度大约为两开孔板之间距离;对焊钉试件来说,其长度大约为横隔板与最近一排焊钉之间距离。

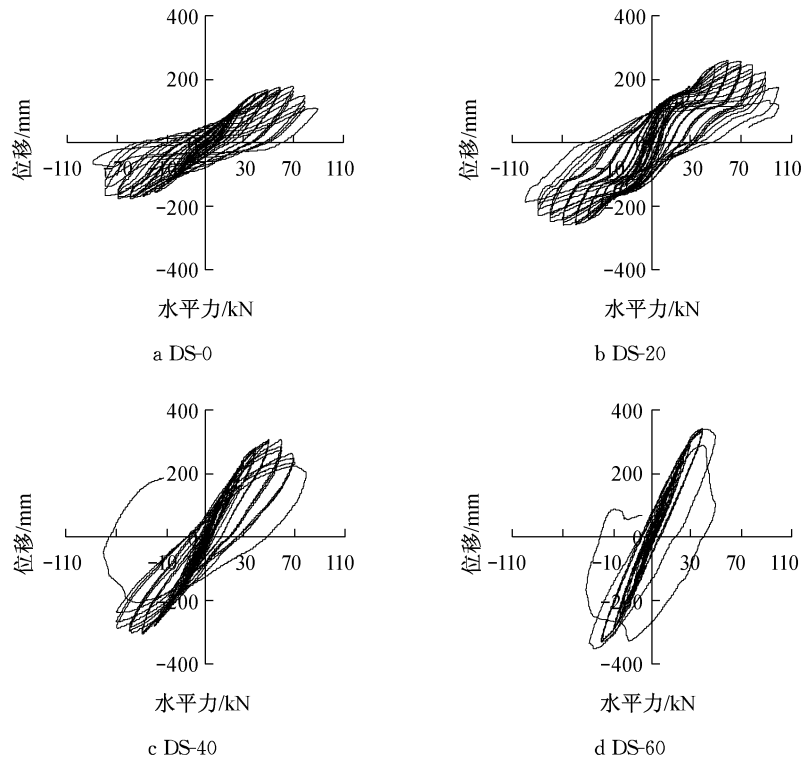


图 12 DS 试件水平荷载—位移曲线

Fig.12 Lateral load–displacement curves (DS specimens)

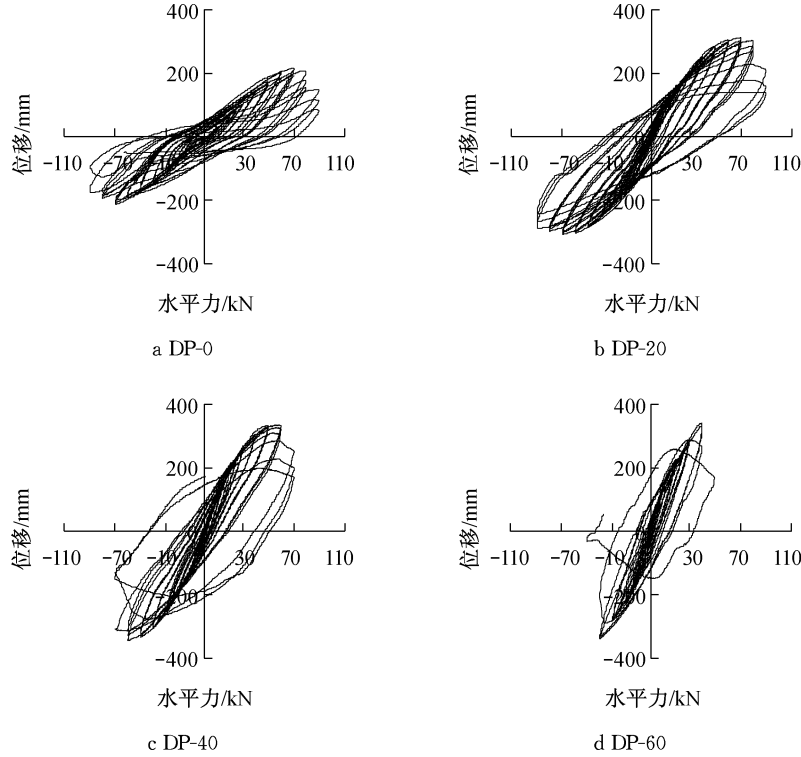


图 13 DP 试件水平荷载—位移曲线^[10]

Fig.13 Lateral load–displacement curves (DP specimens)^[10]

在轴压比为 60%左右的试件的轴力加载过程中,试件端部钢板已经开始屈曲,因此,在水平加载开始时,外部荷载几乎完全由混凝土截面承受,随着

水平荷载的增加,钢板逐渐与混凝土共同承载;在较大的水平荷载和较高的轴力共同作用下,钢板沿试件轴向出现多处屈曲,但屈曲波长仍受连接件限制;

随着水平荷载的增加,试件在达到极限承载能力后立即脆性破坏,承载能力急剧下降.试件受压钢板较早局部屈曲和混凝土双向受力是荷载—位移曲线的饱满程度明显降低的主要因素.

4 试件压弯性能

4.1 规范计算原理

压弯构件的承载能力主要取决于两个方面:构件的横截面能力和长度效应给构件力学性能带来的不利影响.

EuroCode 4 规范^[11]和 AISC 2005 规范^[12]均基于刚塑性原理来分析组合压弯构件的截面行为.这种方法完全基于构件横截面内力的平衡来计算构件的横截面能力,其假设受压截面材料全部屈服且应力分布为矩形,钢材具有无限延性,组合截面极限应变受混凝土最大受压应变控制,并忽略混凝土抗拉强度.这个方法并不关心钢与混凝土的应力应变关系以及构件的受力发展过程,仅考虑材料强度,非常适合设计者用来直接估计构件截面的极限承载能力.

EuroCode 4 规范计算截面轴压强度时采用直接叠加法,即直接取混凝土和钢的塑性承载能力之和.在计算压弯构件时,也考虑钢混凝土组合作用,计算钢混截面的塑性承载能力.同时,使用与钢柱相同的计算方法来考虑构件长度效应带来的不利影响,但与相同截面的钢柱相比,组合柱的承载能力曲

线要高一个等级.而 AISC 2005 规范在计算截面轴压强度时,无论试件长短,都会因为考虑构件的长度效应而被折减,这与 EuroCode 4 规范在长细比小于 0.2 以下时不考虑长度效应对构件的弯曲性能的折减作用有一定区别.由于 AISC 2005 规范计算构件压弯性能时仅折减构件轴向承载能力而不折减构件弯曲承载能力,这导致当构件处于大偏心受压状态时可能出现不安全的计算结果.

4.2 规范计算与试验结果比较

由刚塑性原理可知,按照规范计算时可不考虑焊钉对构件横截面能力的贡献,仅将焊钉作为连接件处理.焊钉试件压弯能力的规范计算值与试验结果比较如图 14 所示.无轴力试件的试验结果小于规范计算值,轴压比为 20% 左右的试件试验结果与规范计算值吻合较好,其他试件试验结果均大于规范计算结果,且极限弯矩随轴压比的增加而增加.

对采用开孔板连接件的试件来说,当不考虑开孔板加劲肋的加强作用,即将加劲肋的横截面面积视作混凝土计算时,其规范计算值和试验值的比较结果如图 15 所示,无轴力时,试验结果和理论预测值吻合较好,随着轴压比的增大,试验结果越来越偏离规范计算值,且极限弯矩随轴压比的增加而增加.当假定开孔板全截面有效时,规范计算值与试验值的比较结果如图 16 所示,在轴压比大约为 20% 时,试验结果和规范计算值吻合较好,其比较结果与焊钉试件相近.

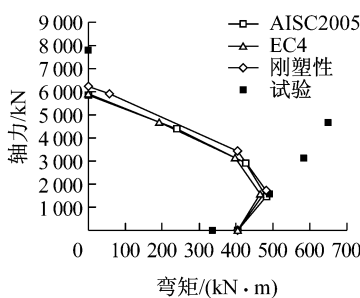


图 14 DS 试件轴力—弯矩曲线

Fig. 14 *N—M* interaction curves of DS series specimen

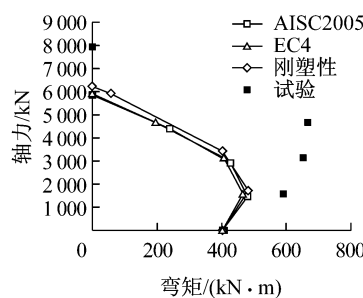


图 15 忽略开孔板作用时的 DP 试件轴力—弯矩曲线

Fig. 15 *N—M* interaction curves of DP series specimen ignoring the effect of perforated ribs

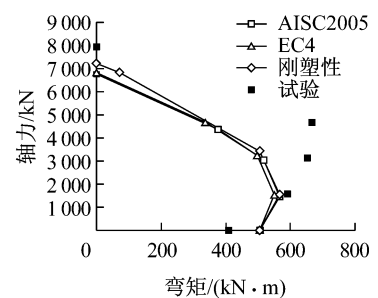


图 16 考虑开孔板作用时的 DP 试件轴力—弯矩曲线

Fig. 16 *N—M* interaction curves of DP series specimen considering the effect of perforated ribs

5 结论

通过往复荷载下的钢混组合索塔压弯性能试验

研究、受力特性分析以及与规范计算结果比较,有如下结论:

(1)开孔板和焊钉均能约束钢板的屈曲波长,提

(下转第 1457 页)