

钢-混凝土组合索塔压弯性能试验研究

曾 耀, 吴 冲, 周家兴

(同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘 要:设计制作了2类共10个带开孔板连接件的钢-混凝土组合索塔模型试件,并进行轴压和恒定轴力下往复荷载试验。试验展示了不同真实轴压比下的2类试件承受往复荷载作用时的极限能力和破坏形态,结果表明:根据轴压比的不同,所有试件破坏形态清楚的分为受压破坏和受拉破坏2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;既作为连接件又作为加劲肋的开孔板能有效地限制受压试件钢板局部屈曲波长。最后,将试验结果与按照规范计算得到的轴力-弯矩关系进行比较。

关键词:组合索塔;开孔板;往复荷载;局部屈曲;开裂;承载能力

中图分类号:TU398;U448.27 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)02-0077-07

Experimental Analysis on Beam-column Behavior of Steel-concrete Composite Pylon

ZENG Yao, WU Chong, ZHOU Jia-xing

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: Ten specimens with perforated ribs, which can be divided into two series, were made to observe the behavior of steel-concrete composite pylon under axial load and cyclic load respectively. The experiment reveals the ultimate capacity and failure mode of two types of specimens under the cyclic load with different actual axial load level. Furthermore, it can be concluded from the results that the failure mode can be divided into two types, that is compression failure and tension failure. And the behavior of those specimens under cyclic load is influenced significantly under high axial load or without axial load at all. In addition, perforated ribs will prevent the plates under compression from overall buckling effectively based on the observation that the wavelength of plate is limited between two neighboring perforated ribs. At last, comparison on the interaction behaviors of the axial load (N) versus moment (M) is made between the results of experiment and calculation according to the criteria.

Key words: composite pylon; perforated ribs; cyclic loads; local buckling; cracking; bearing capacity

钢与混凝土组合结构已经在桥梁工程中广泛使用,但大多应用于以承受弯矩为主的组合梁,以充分发挥钢材抗拉的性能。在日本和台湾地区,有将作为压弯构件的钢和普通钢筋混凝土组合箱型柱作为桥墩应用于桥梁工程^[1],其使用外层钢板或内外双

层钢板来提高结构的整体承载能力^[2-3],这种形式的构件在混凝土浇筑过程中,内外钢板同时也作为施工模板,可节省施工时间和建设费用。为1992年世博会修建的阿拉米罗大桥索塔原先计划为钢筋混凝土构件,由于需要配置的钢筋过多以及索塔的横截

收稿日期:2011-09-12

基金项目:国家863计划项目(2007AA11Z105);国家科技支撑计划项目(2009BAG15B02);江西省交通科技项目(2010C0015)

作者简介:曾耀(1981-),男,博士生,主要从事钢与组合结构桥梁研究,(E-mail)bridgezy@gmail.com。

吴冲(通讯作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)cwu@mail.tongji.edu.cn。

面外形复杂,后修改为具有外层钢板的钢-混凝土组合索塔以减少配筋和方便索塔造型;索塔横截面内设有圆形的空心部分,钢板与混凝土之间采用圆柱头焊钉和加劲肋作连接件。对于高达 298 m 的昂船洲大桥索塔的上塔柱来说,由外层不锈钢板和混凝土以及内部钢锚箱共同承受荷载,形成钢-混凝土组合索塔,不锈钢板与混凝土之间采用圆柱头焊钉连接。

钢板屈曲是矩形截面钢-混凝土组合柱的典型破坏形态之一。为了提高构件整体承载能力,有研究者使用不同的方法来提高矩形截面钢-混凝土组合柱中钢板构件抵抗屈曲的能力,Ge^[4]、Tao^[5-8]、Dabaon^[9]、Zhang^[10]和郭兰慧^[11]使用加劲肋;Tao^[6]使用加劲肋、对拉棒和锚固棒等措施共同作用;Nakanishi^[12]使用圆柱头焊钉;Huang^[13]在钢板四角焊接连接棒;Cai^[14]、Hsu^[15]采用双向对拉棒,其中大多数方法仅仅适用于建筑结构中横截面尺寸相对较小的实心截面组合柱,可能不太合适于缆索支撑桥梁的索塔。

开孔板常作为剪力连接件在桥梁工程中使用,圆形开孔的构造形态使开孔板连接件具有各向同性的受力特征,不像焊钉连接件那样具有不同的抗剪和抗拉拔能力,因此能够更好的在复杂的受力状态下工作。在以受压为主的结构中,开孔板不仅作为连接件使混凝土和钢板共同工作,而且本身可以作为钢板的加劲肋承载,同时延缓钢板屈曲,提高构件的承载能力。本文主要研究具有内外双层钢箱和外层钢箱 2 类使用开孔板连接件的组合索塔压弯行为。通过轴压和恒定轴力下往复荷载作用试验,了解此类结构的极限能力、破坏形态以及开孔板在组合索塔中的性能,并揭示其受力特性与破坏机理。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验共设计制作了 10 个组合索塔模型试件,包括 5 个内外双层钢箱截面试件和 5 个外层钢箱截面试件,分别命名为 DP 系列试件和 SP 系列试件。所有试件均具有相同的外形尺寸,横截面设计如图 1—3 所示。试件的两端设置有加劲肋和横隔板,以保证外部荷载能均匀的传递给模型试件。开孔板开孔直径为 30 mm,在开孔后采用熔透焊焊接在钢箱壁板上,钢箱制作时的焊缝也全部熔透,为加工方便,在水平荷载作用方向上的钢板每边各留 5 mm 的焊接空间,同时,所有试件端板均开有圆孔以浇筑内部混凝土。在双层钢箱试件中,内外钢箱同时作为混凝土浇筑模板。对无内部钢箱的 SP 系列试件

来说,使用普通钢筋混凝土来模拟实际结构构造,在混凝土截面配有一层 8 mm 普通钢筋;浇筑混凝土时,试件中空部分放置木模,浇筑完成 7 d 后拆除,自然养护。

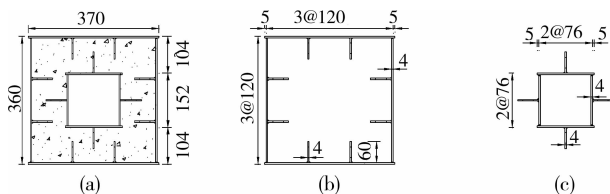


图 1 DP 系列试件横截面设计

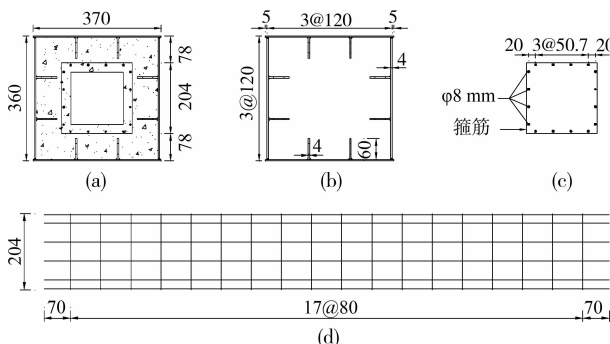


图 2 SP 系列试件横截面设计

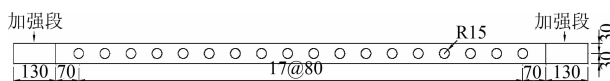


图 3 开孔板

1.2 材料特性

测试所用的试件钢板以及开孔板均来自于同一批产品,测得 4 mm 钢板屈服强度为 342.4 MPa,极限抗拉强度为 463.7 MPa,弹性模量为 2.03×10^5 MPa;8 mm 普通钢筋屈服强度为 335.6 MPa,极限抗拉强度为 489.6 MPa,弹性模量为 1.98×10^5 MPa。试件中填充的混凝土也是同一批产品,均在一天内浇筑完成。在混凝土浇筑完成 28 d 后,测得边长为 150 mm 标准立方体混凝土试块强度为 50.7 MPa,弹性模量为 3.34×10^4 MPa。

1.3 加载设备

试验使用的 MTS 系统具有竖向 20 000 kN 和水平 2 000 kN 的加载能力,两个方向均可使用力或位移控制加载,最大水平加载位移为 50 cm。试件上端与反力架连接,试件下端通过专门设计的柱铰与 MTS 台座连接,用于荷载的施加。试件与柱铰之间,试件与反力架之间全部采用高强螺栓连接,如图 4 所示。

1.4 加载方案

1.4.1 轴压试验 轴压试件为 1 个双层钢箱截面

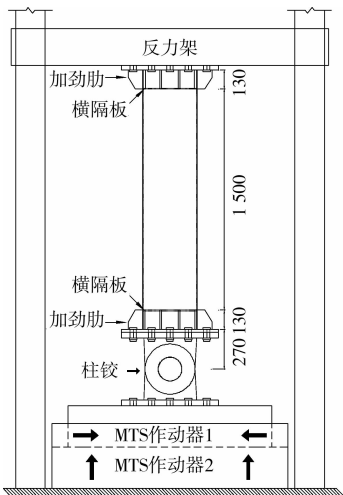


图 4 试验装置

试件和 1 个外层钢箱截面试件,分别命名为 DP-100 和 SP-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。轴压试验使用 2 步加载:

- 1) 轴向预载:以 5 kN/s 的荷载速率加载至 1 000 kN,持荷 3 min,然后卸载;
- 2) 轴向加载:以 5 kN/s 的荷载速率加载至 1 500 kN 后,转换为 0.01 mm/s 的位移增量加载,直至试件破坏。

1.4.2 往复荷载试验 共对 8 个模型试件进行恒定轴力下的往复荷载试验,包括 4 个双层钢箱截面试件和 4 个外层钢箱截面试件。恒定轴力值大约为轴压试验得到的极限承载能力的 0、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,使用 3 步加载:

- 1) 轴向预载:以 5 kN/s 的荷载速率加载至 1 000 kN,持荷 3 min,然后卸载;
- 2) 轴向加载:以 5 kN/s 的荷载速率加载至指定轴力;
- 3) 水平往复加载:保持轴力恒定,水平加载,直至试件破坏。

由于试件无明显水平屈服力,往复荷载全部使用位移加载,加载位移为 5 mm 的整数倍,典型的位移加载历程如图 5 所示:

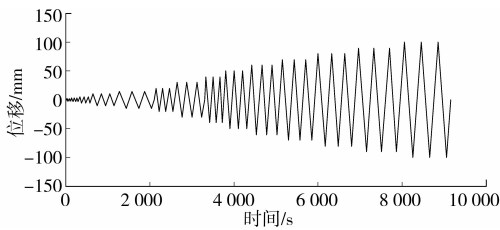


图 5 位移加载历程

2 试验结果

2.1 轴压试验结果

试件 DP-100 和 SP-100 的轴向极限承载能力分别为 7 952 kN 和 7 293 kN。DP-100 试件由于柱铰支承附近钢板局部屈曲后整体屈曲,相应位置处混凝土压碎而无法继续承载,但钢板的局部屈曲波长被限制在开孔板和钢板壁之间,如图 6 所示。SP-100 试件由于混凝土无内部钢箱约束而在试验过程中出现压碎脱落的现象;同时,柱铰支承端附近的钢板也局部屈曲后整体屈曲,相应位置处角焊缝逐渐受压开裂,裂缝的长度随着荷载的增加而增加,如图 7 所示。



图 6 试件 DP-100 钢板局部屈曲



图 7 试件 SP-100 钢板焊缝开裂

2.2 往复荷载试验结果

通常的轴压比由轴向极限承载能力的理论值确定。为获得构件较为真实的弯矩-轴力关系,往复荷载试验时利用相同试件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,如表 1 所示。

表 1 试验轴压比

恒定轴力/kN	试件名称	轴压比/%	试件名称	轴压比/%
0	DP-00	0.00	SP-00	0.00
1 560	DP-20	19.62	SP-20	21.39
3 120	DP-40	39.24	SP-40	42.78
4 680	DP-60	58.85	SP-60	64.17

所有往复荷载试验试件的水平荷载-位移曲线

如图 8 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。轴压比在 20%左右的 2 个试件展现出良好的力学性能,其不仅具有较高的水平承载能力,而且荷载-位移曲线饱满,无明显捏缩现象。图 9 和图 10 展示了 2 种典型破坏形态:受拉破坏和受压破坏。受拉破坏主要表现为焊缝和钢板在往复荷载作用下发生低周疲劳开裂,开裂从角焊缝端部沿试件横截面方向开始发展,

随着荷载和循环次数的增加,直至几乎贯穿整块钢板;同时,内部混凝土也往复受拉开裂破坏。受压破坏主要表现为水平荷载方向钢板局部屈曲,内部混凝土压碎,但局部屈曲波长和轴压试件一样被限制在开孔板和钢板壁之间,无纵向焊缝破坏。轴压比在 60%左右的 2 个试件出现明显的剪切破坏行为,如图 11 所示;尽管它们具有较高的水平承载能力,但几乎未表现出任何耗能能力和延性性能。

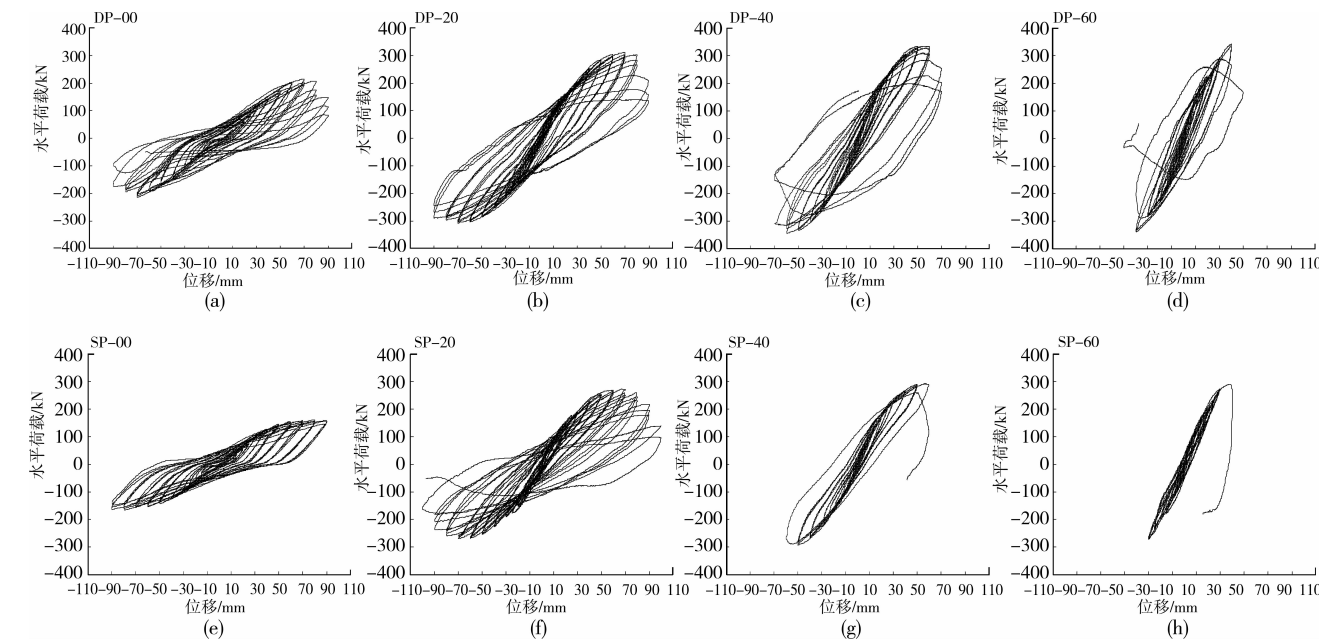


图 8 水平荷载-位移曲线

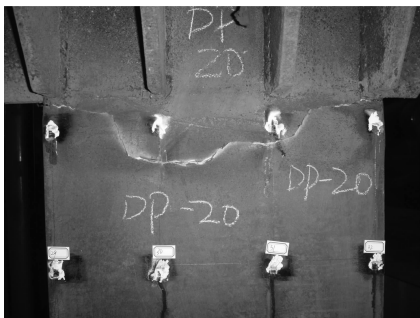


图 9 试件 DP-20 受拉破坏



图 11 试件 SP-60 剪切破坏



图 10 试件 DP-40 局部屈曲

骨架曲线是连接每级循环的荷载最大峰值点所形成的曲线,两类试件的骨架曲线如图 12 所示。在加载初期,荷载-位移关系基本为线性,随着荷载的增加,非线性效应逐渐明显。除无轴力的试件外,轴压比对各类试件的初期刚度影响不大,但后期刚度随着轴压比的增加而增加;而无轴力作用的试件 DP-00 和 SP-00 的刚度和承载能力均低于其他各个试件。

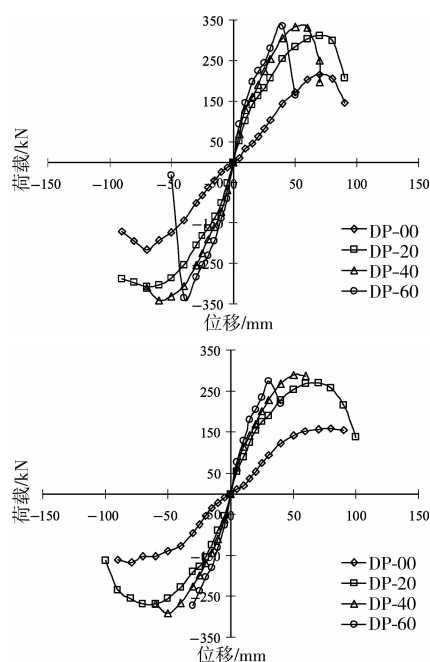


图12 试件骨架曲线

3 受力特性与破坏机理

3.1 受拉破坏试件

混凝土内填于外部钢箱中,水平荷载引起的端部弯矩首先由与荷载方向垂直的试件外部钢板承受,而不像钢筋埋在混凝土中的普通钢筋混凝土构件那样弯矩首先由混凝土承受。对于无轴力试件来说,试件钢板横截面两端焊缝刚度较大,而中间截面刚度相对较小,试件钢板所承受的弯矩主要由纵向焊缝分担,试件初始刚度较小。而对轴压比为20%左右的试件来说,轴压的存在使钢板和混凝土截面共同承载,试件初始刚度要大于无轴力试件。

对无轴力试件来说,在水平往复加载初期,试件截面受拉区域混凝土开裂,受拉区主要由钢板承载,而受压区钢板与混凝土共同工作,因此,受拉区钢板先于受压区钢板屈服。试验过程中,混凝土裂缝在反向加载时,由于钢板和焊缝的塑性伸长而难以完全闭合,张开的裂缝在受压区一直存在,直到受压钢板有较大面积屈服后,裂缝有一定程度的闭合,此时,混凝土才承受一定压力。受压区中难以完全闭合的混凝土张开裂缝的存在是试件荷载-位移曲线出现明显捏缩现象的因素之一。随着水平位移和循环次数的增加,试件焊缝因低周疲劳而沿横截面方向出现开裂,外部荷载完全转移到未开裂的钢板截面和混凝土部分。在外部钢板裂缝不断发展的同时,由于缺少外部钢板的有效约束,较大的水平位移导致试件截面开裂混凝土沿张开裂缝相对滑移和错动,这是引起试件荷载-位移曲线出现明显捏缩现象

的另一重要因素。混凝土截面受拉开裂和钢板低周疲劳开裂明显削弱了试件横截面性能,导致试件水平极限荷载要小于有轴力的试验试件。

轴压的存在不仅能有效延迟混凝土截面受拉开裂和钢板低周疲劳开裂,而且能促进混凝土张开裂缝的闭合,同时阻止开裂混凝土沿张开裂缝相对滑移和错动。因此,轴压比为20%左右的试件荷载-位移曲线不仅饱满且无捏缩现象发生,试件的水平极限能力也高于无轴力试件;但20%左右的轴压比不足以改变试件的受拉破坏形态。

3.2 受压破坏试件

对轴压比为40%左右的试件来说,加载初期,轴向压力的存在使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局部屈曲,荷载逐渐由钢板传递到混凝土截面,在较大的轴力作用下,混凝土截面几乎不承受拉伸荷载。随着水平位移的增加,钢板屈曲引起的鼓曲继续增大,并逐渐屈服,但仍然被限制在开孔板之间;内部混凝土在往复荷载作用下开裂、压碎。由于内部混凝土压碎后对开孔板的约束减弱,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。试件破坏时的塑性铰区域位于试件承受弯矩的端部,长度大约为一个横向局部屈曲波长,即两开孔板之间距离。

而对轴压比为60%左右的试件来说,在轴力的加载过程中,试件端部钢板已经开始出现局部屈曲,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。随着水平循环位移的增加,试件端部钢板局部屈曲更加明显,但同样被限制在开孔板之间。同时,钢板沿试件长度方向出现多处局部屈曲,局部屈曲引起的鼓曲在钢板横截面沿45°角斜直线排列,试件开始出现剪切破坏现象。在到达极限承载能力后,试件在轴压与水平荷载共同作用下突然发生脆性破坏,承载能力急剧下降,且无确定的塑性铰位置。

在较大的轴力作用下,受压钢板的局部屈曲和混凝土的双轴受力特性降低了试件荷载-位移曲线的饱满程度,这种现象在轴压比为60%左右时表现得最为明显。

4 轴力-弯矩关系

为了防止钢板过早屈曲而影响钢-混凝土组合柱承载能力,各主要规范均对钢板的宽厚比进行限制。AISC LRFD 1999 规范^[16]对组合柱的钢板宽厚比限制为:

$$\frac{b}{t} \leq \sqrt{\frac{3E_s}{f_y}} \tag{1}$$

根据 $U_y^{[18]}$ 的研究成果, AISC 2005 规范^[17]对组合柱钢板宽厚比限制放宽为:

$$\frac{b}{t} \leq 2.26 \sqrt{\frac{E_s}{f_y}} \tag{2}$$

EuroCode 4 规范^[19]对组合柱钢板宽厚比限制为:

$$\frac{b}{t} \leq 52 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \tag{3}$$

上述公式中的 E_s 为钢材弹性模量, f_y 为钢材屈服强度。轴压试验和往复荷载试验均表明开孔板具有使钢板和混凝土良好的共同工作, 有效限制钢板局部屈曲的性能, 可作为钢壁板的连续支承边界。因此, 试件钢板宽厚比由 90 降低为 30, 满足 AISC 2005 规范和 EC 4 规范要求, 按照规范计算压弯承载能力时认为钢板截面全截面有效。

由于嵌入混凝土中的开孔板承载能力无明确的计算方法, 在理论分析时分别考虑 2 种情形: 一种是较为保守的不考虑开孔板加劲肋对承载能力的任何贡献, 即计算构件能力时, 将加劲肋的横截面面积作为混凝土计算。基于这种假设的规范计算值和试验值的比较结果如图 13 所示, 在无轴力的情况下, 试验结果和理论预测值吻合相对较好, 但随着轴压比的增大, 试验值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。

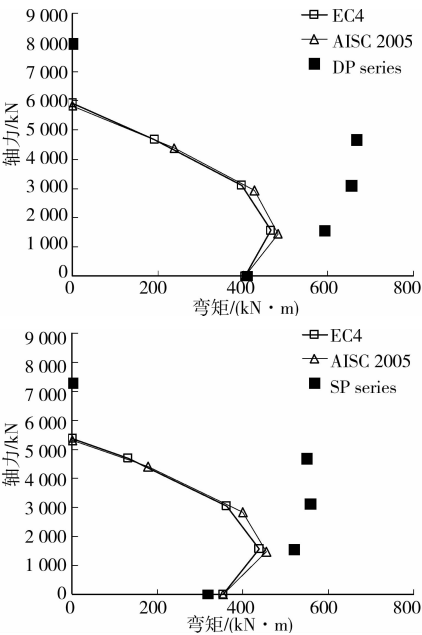


图 13 试件轴力-弯矩曲线

另一种非保守的计算方法是假定开孔板全截面有效, 即忽略开孔板中开孔的存在, 基于这个假定的

理论预测值和试验值的比较结果如图 14 所示, 在轴压比大约为 20% 的时候, 试验结果和规范计算值吻合较好, 但其轴力-弯矩关系的趋势变化与前者相同。

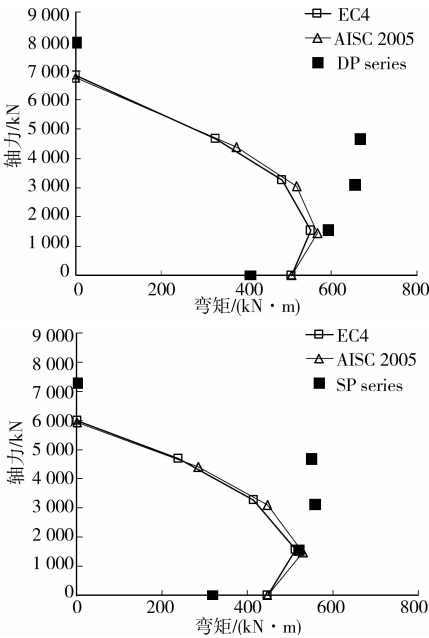


图 14 试件轴力-弯矩曲线

5 结 论

通过轴压和往复荷载下的钢混组合索塔压弯性能试验研究、机理分析以及与规范计算结果比较, 得到如下结论:

- 1) 开孔板可既作连接件又作加劲肋, 能有效地提高钢板抗局部屈曲性能。
- 2) 钢板低周疲劳开裂和混凝土受拉裂缝明显降低无轴力试件的力学性能; 相反, 过高的轴力导致钢板过早局部屈曲和混凝土双轴受力, 从而降低轴压比为 60% 左右试件的力学性能。
- 3) 轴压比是影响构件能力的一个主要因素, 它不仅影响构件的极限弯矩、延性和耗能能力, 而且还控制构件的破坏形态。实际结构设计时应选择合适的轴压比, 对于可能承受往复荷载的索塔来说更应如此。
- 4) 是否考虑开孔板的横截面贡献对计算低轴力和无轴力试件的弯曲能力有明显影响。

参考文献:

[1] KITADA T. Ultimate strength and ductility of state of art on concrete-filled steel bridges piers in Japan [J]. Engng Struct., 1998; 20(4-6): 347-354.
[2] HSU H L, LIN J L. Experimental evaluation on

- seismic performance of sandwich box columns [J]. Earthquake Engng Struct Dyn. , 1999,28(8):823-840.
- [3] NAKANISHI K, KITADA T, NAKAI H. Experimental study on ultimate strength and ductility of concrete filled steel columns under strong earthquake [J]. J. Construct. Steel Res. , 1999,51(3): 297-319.
- [4] GE H B, USAMI T. Strength of concrete-filled thin walled steel box columns: experiment [J]. J. Struct. Engng, ASCE, 1992, 118(11):3036-3054.
- [5] TAO Z, HAN L H, WANG Z B. Experimental behaviour of stiffened concrete-filled thin-walled hollow steel structural(HSS) stub columns [J]. J. Construct. Steel Res. , 2005,61(7):962-983.
- [6] TAO Z, HAN L H, WANG D Y. Experimental behaviour of concrete-filled stiffened thin-walled steel tubular columns [J]. Thin-Walled Struct. , 2007, 45 (5):517-527.
- [7] TAO Z, UY B, HAN L H, et al. Analysis and design of concrete-filled stiffened thin-walled steel tubular columns under axial compression [J]. Thin-Walled Struct. , 2009, 47(12):1544-1556.
- [8] TAO Z, HAN L H, WANG D Y. Strength and ductility of stiffened thin-walled hollow steel structural stub columns filled with concrete [J]. Thin-Walled Struct. , 2008,46(10): 1113-1128.
- [9] DABAON, EL-BOGHDADI M, HASSANEIN M. Experimental investigation on concrete-filled stainless steel stiffened tubular stub columns [J]. Engng Struct. , 2009,31: 300-307.
- [10] ZHANG Y C, XU C, LU X Z. Experimental study of hysteretic behaviour for concrete-filled square thin-walled steel tubular columns [J]. J. Construct. Steel Res. , 2007,63(3):317-325.
- [11] 郭兰慧, 张素梅, 徐政, 等. 带有加劲肋的大长宽比薄壁矩形钢管混凝土试验研究与理论分析 [J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 42-49.
- GUO LAN-HUI, ZHANG SU-MEI, XU ZHENG, et al. Experimental and theoretical analysis of stiffened rectangular composite columns with large height-to-breadth ratios [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 42-49.
- [12] NAKANISHI K, KITADA T, NAKAI H. Experimental study on ultimate strength and ductility of concrete filled steel columns under strong earthquake [J]. J. Construct. Steel Res. 1999, 51(3): 297-319.
- [13] HUANG C S, YEH Y K, HU H T, et al. Axial load behavior of stiffened concrete-filled steel columns [J]. J. Struct. Eng. ASCE, 2002,128(9):1222-1230.
- [14] CAI J, HE Z Q. Axial load behavior of square CFT stub column with binding bars [J]. J. Construct. Steel Res. , 2006, 62(5): 472-483.
- [15] HSU H L, YU H L. Seismic performance of concrete-filled tubes with restrained plastic hinge zones [J]. J. Construct. Steel Res. , 2003, 59(5):578-608.
- [16] AISC. Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings [S]. American Institute of Steel Construction, Inc. , Chicago, IL, 1999.
- [17] ANSI/AISC 360-05 Specification for Structural Steel Buildings [S]. American Institute of Steel Construction, Inc. , Chicago, IL, 2005.
- [18] UY B, BRADFORD M A. Elastic local buckling of steel plates in composite steel-concrete members [J]. Engng Struct. , 1996,18(3):193-200.
- [19] Eurocode, EN 1994: Design of Composite Steel and Concrete Structures; Part 1. 1: General Rules and Rules for Buildings [S]. Eurocode 4, EN 1994-1-1: 2004, CEN, Brussels.

(编辑 胡英奎)