

单斜无粘结内藏钢板支撑剪力墙构造分析

丁玉坤,张耀春

(哈尔滨工业大学 土木工程学院,150090 哈尔滨,dingykun.student@sina.com)

摘要:为考察钢板支撑的宽度和屈服强度、支撑与墙板的厚度、支撑钢板宽厚比、支撑与墙板间的间隙和摩擦对支撑墙板受力性能的影响,对单斜无粘结内藏钢板支撑剪力墙的构造进行参数分析.给出采取适宜间隙时,避免墙板在达 $1/50$ 侧移角前受弯开裂所需的墙板与支撑的最小厚度比的经验公式.结果表明:为避免支撑较早局部屈曲,减小支撑失稳半波数和对墙板的摩擦和冲剪作用,应选用适宜间隙和较厚实的钢板支撑,且支撑宽厚比宜不小于 5,不大于 19.

关键词:无粘结钢板支撑;钢筋混凝土墙板;厚度比;适宜间隙

中图分类号: TU393

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)02-0001-07

Analysis of constructional details for diagonal unbonded steel plate brace encased in reinforced concrete panel

DING Yu-kun, ZHANG Yao-chun

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, dingykun.student@sina.com)

Abstract: A parametric analysis of constructional details for diagonal unbonded steel plate brace encased in reinforced concrete panel (Panel BRB) has been carried out to examine the effects of the width and yield strength of the brace, the brace thickness, the panel thickness, the width to thickness ratio of the steel plate brace, as well as the friction and clearance between the panel and the brace, on the working behavior of the diagonal Panel BRBs. When the appropriate clearance is provided, the regression formula to determine the smallest thickness ratio of panel to brace to prevent the panel from flexural cracking until $1/50$ lateral drift is provided. The analysis reveals that, to prevent the brace from earlier local buckling, to reduce the number of buckling waves of the brace, and to decrease the frictional action and the punching shear force applied to the panel by the brace, an appropriate clearance and an appropriate ratio of width to thickness of the plate brace, which should not be larger than 5 but smaller than 19, should be adopted.

Key words: unbonded steel plate brace; reinforced concrete panel; thickness ratio; appropriate clearance

无粘结内藏钢板支撑剪力墙(支撑墙板),是由钢筋混凝土墙板做为侧向约束构件,内嵌表面覆盖了无粘结材料的钢板支撑构成的一种防屈曲支撑(Buckling restrained brace)^[1-4].一直以来,探讨的一个构造问题是多大厚度的混凝土墙板才能为支撑提供足够的侧向约束.日本早期的研究

表明,为使墙板能为支撑提供足够的侧向约束,一般要求墙板与支撑的厚度比应大于 10,但因墙板构造不同,小于该比值时也可能获得较好的滞回性能^[5].文献[6]推导出在支撑两端铰支和混凝土墙板不出现横向裂缝条件下,为避免支撑整体失稳,墙板与支撑的最小厚度比为 7,通常建议取 8~13.而文献[7]指出,墙板对支撑的约束能力是由墙板的抗弯刚度和强度综合决定的,并受支撑初始弯曲等因素的影响.在上述研究中,侧向约束能力是以墙板能限制钢板支撑不整体失稳来考察的.然而,文献[8-10]的研究表明,当支撑与

收稿日期:2009-06-12.

基金项目:中国博士后基金面上资助项目(20100471067);

黑龙江省博士后基金资助项目(LBH-Z09195);

国家科技支撑计划项目(2006BAJ01B02-01-04).

作者简介:丁玉坤(1979—),男,博士,讲师;

张耀春(1937—),男,教授,博士生导师.

墙板间的间隙等细部构造不当时,也可能导致支撑墙板提前发生局部破坏。

当设计所要求的延性水平和支撑墙板的具体构造方式不同时,为保证支撑墙板能稳定地承载而不破坏,对墙板约束能力的要求也必然不同。本文采用 ABAQUS 程序,通过对单斜支撑墙板构造的参数分析,探讨了构造变化对支撑墙板受力性能的影响,并给出了具体构造的设计建议。

1 支撑墙板构造及有限元模型

1.1 支撑墙板的构造

考虑实际工程应用,分析对象为足尺的单斜无粘结内藏钢板支撑剪力墙(见图 1,尺寸单位均为 mm)。支撑与墙板孔壁间的无粘结处理通过设置间隙来模拟。支撑沿墙板厚度中部放置,墙板两侧设置双向钢筋网,外层钢筋保护层厚度 15 mm。所分析的构造细节如下。

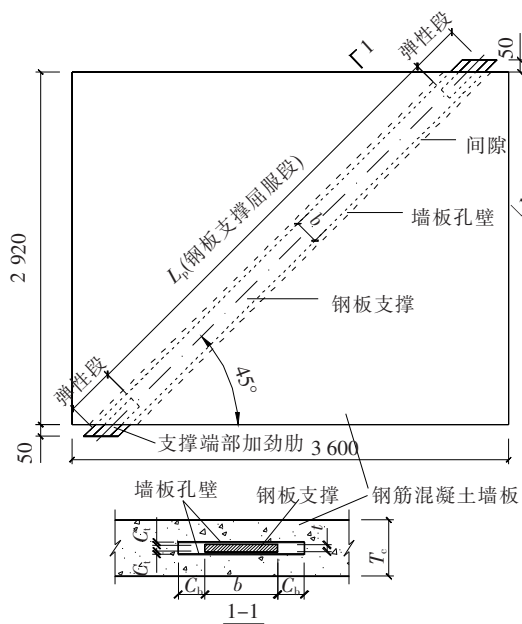


图 1 单斜支撑墙板的构造

钢板支撑:宽度 b ;厚度 t ;屈服强度 f_{yb} ;钢板支撑两端均设置加劲肋,长 330 mm,宽为支撑屈服段板宽的一半,材性和厚度均与屈服段钢板相同;

墙板:厚度为 T_c ;混凝土强度等级为 C20;钢筋网为 $\phi 6.5 @ 150$,且沿支撑周围加密为 $\phi 6.5 @ 75$ (定义该种钢筋布置方式为 r1),钢筋屈服强度为 235 MPa;

钢板支撑的初始弯曲 α :因支撑有初弯曲,实际制作中,混凝土浇注后在墙板中形成弯曲的孔壁,分析中假定支撑初始弯曲变形为一正弦半波,并按照支撑的初始弯曲形状在墙板内生成弯

曲的孔壁。

为使间隙留置较适宜,建议板厚和板宽方向支撑每侧的适宜间隙^[8,10]分别为

$$C_t = 0.5 \varepsilon_p t; C_b = 0.5 \varepsilon_p b. \quad (1)$$

式中 $\varepsilon_p = \delta / L_p$ 为达到设计层间侧移角时支撑屈服段总伸长 δ 与其长度 L_p 的比值,即支撑屈服段的轴向应变。

除了变化间隙的分析之外,间隙量均按式(1)确定。适宜间隙量的侧移角取为 $1/50 \text{ rad}$ (由此求得 δ),而最大加载侧移角 $\gamma_{\max} = 1/25 \text{ rad}$ 。加载至 $\gamma_{\max}$ 时,LY100、Q235 和 Q345 钢材支撑屈服段的轴向应变分别为对应钢材屈服应变的 47.1、20.6 和 14.0 倍。支撑墙板的构造如图 1 所示。

1.2 支撑墙板的有限元模型

支撑墙板的有限元模型详见文献[8]。在墙板孔壁与钢板支撑间建立了接触面以模拟墙板对支撑的侧向约束作用,墙板孔壁表面和支撑表面分别为主面和从属表面。钢板支撑用壳单元 S4R 模拟,墙板用实体单元 C3D8R 模拟,钢筋用杆元 T3D2 模拟,将钢筋通过程序的“Embedded region”选项嵌入到墙板中参与受力。钢材泊松比取 0.3,本构关系采用双线性随动强化模型,弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$,切线模量为 $3E/100$ 。墙板混凝土本构模型取用损伤塑性模型(单调加载中不考虑混凝土的损伤),泊松比取 0.2,分析中混凝土轴心抗压、抗拉强度均取标准值,混凝土强度和弹性模量均按文献[11]取值。文献[12]对杆式防屈曲支撑滞回及受力特性的有限元分析表明,轴向和水平向加载下支撑的受力特性基本相同。文献[13]基于支撑轴向受力的特点,为模拟试验中水平加载下杆式防屈曲支撑的受力性能,在数值模拟中采用了对支撑的轴向加载。在文献[8]中,针对水平加载下单斜支撑墙板的拟静力试验研究,为了详细地模拟钢支撑的构形以及支撑和墙板间的接触作用,采用实体元模拟钢板支撑,水平和轴向两种加载下支撑墙板滞回性能的有限元分析表明,水平加载中支撑带动墙板平动和转动引起很强的非线性,导致计算较早发散。但至发散前,两种加载方式下支撑的受力性能和滞回曲线基本一致^[8],见图 2。鉴于此,考虑实际结构中支撑墙板分担的楼层剪力以内藏钢板支撑承受轴力的形式传递,同时,为避免分析中水平加载时支撑和墙板水平侧移以及转动引发的复杂非线性,只对支撑进行轴向位移加载,支撑下端固定,上端只允许沿支撑轴线方向位移。为避免墙板的

刚体位移而又不影响支撑墙板的受力,在墙板底边4角设置刚度很小的接地弹簧(3向线弹簧的弹簧刚度均取为1.0 N/mm),形成对墙板的约束.分析中,支撑轴向加载位移幅值 δ 和其对应的水平加载位移幅值 Δ 的关系为

$$\delta = \Delta \cos \theta.$$

式中 $\theta = 45^\circ$,为支撑相对水平面的倾角.

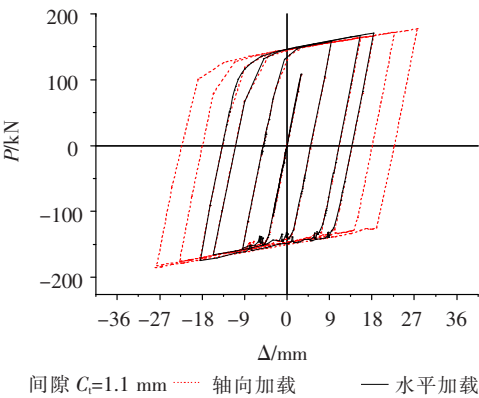


图2 有限元对比分析

分析后,将支撑轴向的力和位移转化为水平方向的力(P)和位移(Δ).在考虑支撑与墙板孔壁间摩擦力的算例中,因无特定的无粘结材料和摩擦因数实测值,为简化考虑支撑与墙板间的摩擦作用,取钢板与混凝土间的摩擦因数为0.25^[14].为使墙板分担支撑轴力,约束墙板下端孔壁的外边缘^[8].

2 数值模拟结果分析

分析表明,取适宜间隙后,加载过程中墙板的开裂形式为:在端部,因墙板和支撑的边界条件不同,受力后变形协调,使两端孔壁窄边沿板厚方向拉裂,厚度比(T_c/t)较小的还伴有少量冲剪斜裂缝(图3(a)).因支撑初弯曲向墙板背面凸出,支撑受压后,墙板整体弯曲也向背面凸出,墙板背面中部受拉产生横向裂缝(垂直支撑轴线),见图3(b).正面两端以纵向(沿支撑轴线)裂缝为主, T_c/t 较小的还伴有少量横向裂缝(图3(c)).定义墙板正、背面受弯开裂时的侧移角与 γ_{max} 的比值分别为 γ_{cr2} 、 γ_{cr3} .

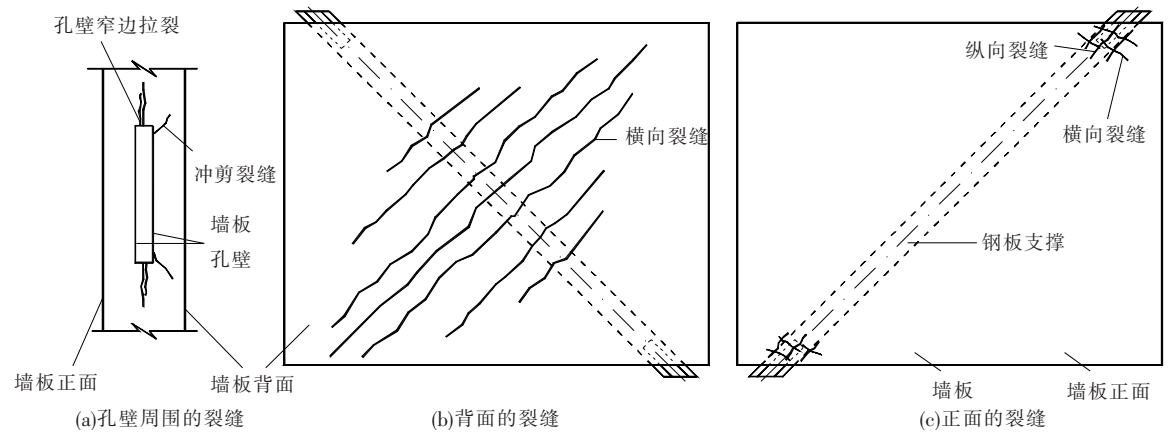


图3 适宜间隙时墙板的开裂形式

2.1 支撑横截面面积、屈服强度和墙板厚度的影响
以16 mm厚200 mm宽的钢板支撑为例,当 $T_c/t = 4$,其他构造相同时,由图4(a)可知,支撑屈服点较低的支撑墙板延性较好.然而,因墙板较薄,对支撑的侧向约束较弱,3种屈服强度下的支撑墙板均整体弯曲破坏.当 $T_c/t = 6$ 时,3种屈服强度的支撑墙板均能加载至 $\gamma_{max} = 1/25$ rad且承载力无下降(图4(b)),但墙板的开裂程度明显不同. $f_{yb} = 100$ MPa加载至 $0.75 \gamma_{max}$ 时墙板下端孔壁一侧窄边轻微受拉开裂,加载至 γ_{max} 时,裂缝开展程度较小且墙板其余部位无裂缝产生;

$f_{yb} = 235$ MPa加载至 $0.62 \gamma_{max}$ 后墙板因整体弯曲而在其两端和中部的表面相继开裂; $f_{yb} = 345$ MPa加载至 $0.08 \gamma_{max}$ 时墙板因整体弯曲而开裂.由图4(c)可知,其他条件相同时,随 b 的减小,支撑墙板整体破坏较晚,延性较好.
分析表明,当支撑初弯曲 $\alpha = L/1\,000$ 时,随 b 的减小 f_{yb} 的降低、 T_c/t 的增大,加载至相同侧移时,支撑的承载力较低,而墙板的约束能力较强,墙板表面弯曲开裂随之延后(如图4,5所示),且开裂程度变小.没有产生裂缝的在图5中赋值为1.0.

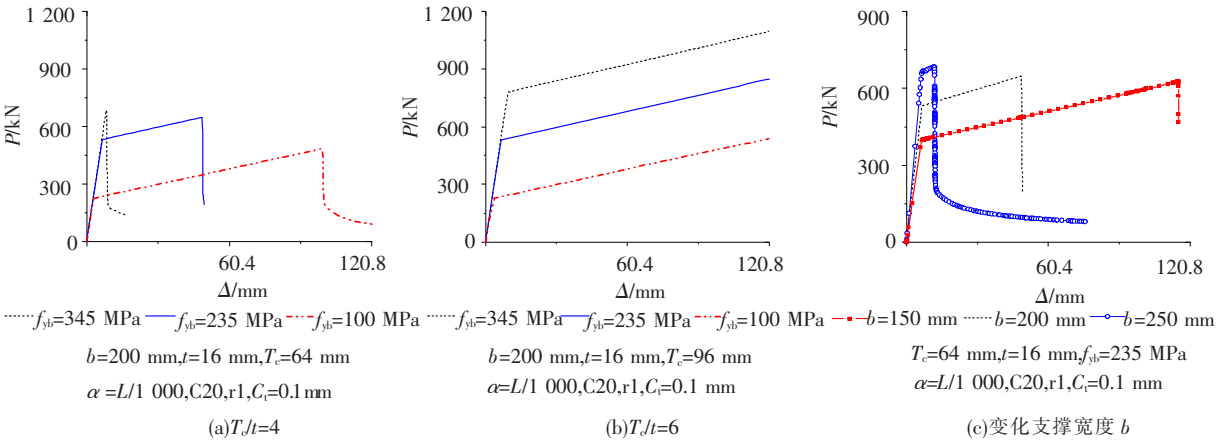


图 4 参数对墙板开裂影响的分析

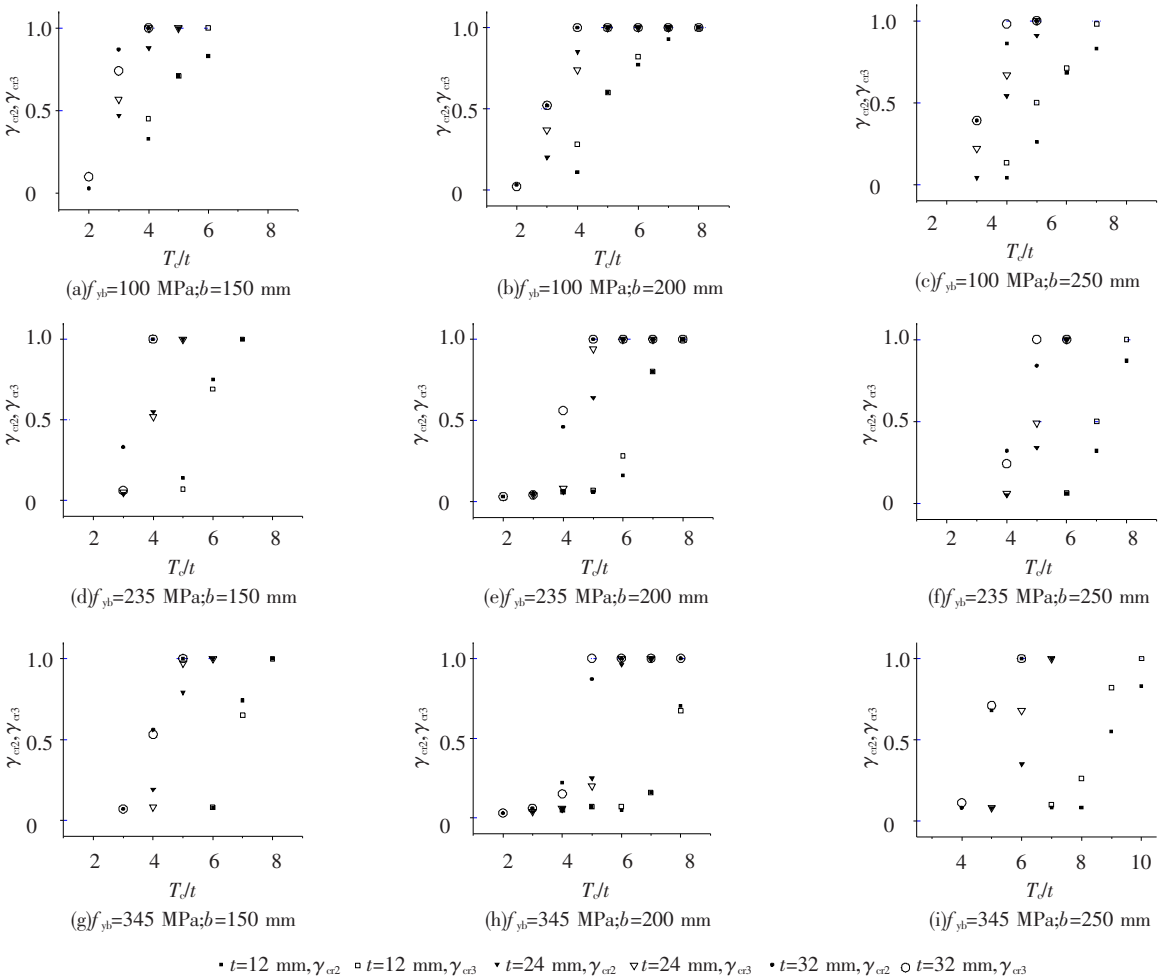


图 5 T_c/t 对墙板开裂的影响

2.2 墙板与支撑的厚度比的要求

分析表明,采用适宜间隙和设置加劲肋后,墙板不发生局部冲剪破坏.因此,墙板主要是约束支撑不整体大幅失稳破坏.当墙板的约束足够时,支撑在屈服后,仅在屈服段两端多波失稳,中部较长的区域没有发生屈曲;而约束不足时,支撑墙板整体弯曲破坏,支撑不发生多波失稳.虽然墙板的约束能力并不会因受弯开裂而立刻丧失,但鉴于分析中远不能考虑实际存在的一些缺陷,以墙板受

弯开裂程度做为一种度量的指标,来评价墙板能否为支撑提供足够的约束作用.

如果以达 1/50 侧移角时,墙板正反两面均不受弯开裂为限制,即以 $\min(\gamma_{cr2}, \gamma_{cr3}) \geq 0.5$ 来确定最小厚度比时,设 $b_B = 200\text{ mm}$, $t_B = 12\text{ mm}$, $f_{yb} = 235\text{ MPa}$,图 6 给出了随钢板宽度、厚度、屈服应力的变化,所需的最小厚度比的关系曲线.

对于 C20 混凝土,经回归分析,可得出所需的最小厚度比为

$$\left(\frac{T_c}{t}\right)^{\min} = 7.17 \cdot \left(\frac{b}{b_B}\right)^{0.47} \cdot \left(\frac{t}{t_B}\right)^{-0.46} \cdot \left(\frac{f_{yb}}{f_{yB}}\right)^{0.33}$$

(2)

当支撑钢板 $150\text{ mm} \leq b \leq 250\text{ mm}$ 、 $12\text{ mm} \leq t \leq 32\text{ mm}$ 、 $4.7 \leq b/t \leq 20.8$ 、 $100\text{ MPa} \leq f_{yb} \leq 345\text{ MPa}$ 、支撑与墙板间采用适宜间隙、控制支撑面外初始弯曲矢高 $\leq L/1\,000$ (L 为支撑长度)、 $L \leq 4.3\text{ m}$ 、钢材的切线模量 $\leq 3E/100$ 、加

劲肋伸入墙板的长度 $\geq 260\text{ mm}$ 、侧移角 $\leq 1/50$ 时,可采用上述公式确定最小厚度比。

选取 $b = 150、200、250\text{ mm}$ 时, $t = 32$ (对应 $f_{yb} = 100\text{ MPa}$)、 24 (对应 $f_{yb} = 235\text{ MPa}$)、 12 mm (对应 $f_{yb} = 345\text{ MPa}$) 的 9 个算例,其有限元分析结果满足 $\min(\gamma_{cr2}, \gamma_{cr3}) \geq 0.5$ 的厚度比与式 (2) 计算结果的对比如图 7 所示,可见式 (2) 能够较准确地测算分析结果。

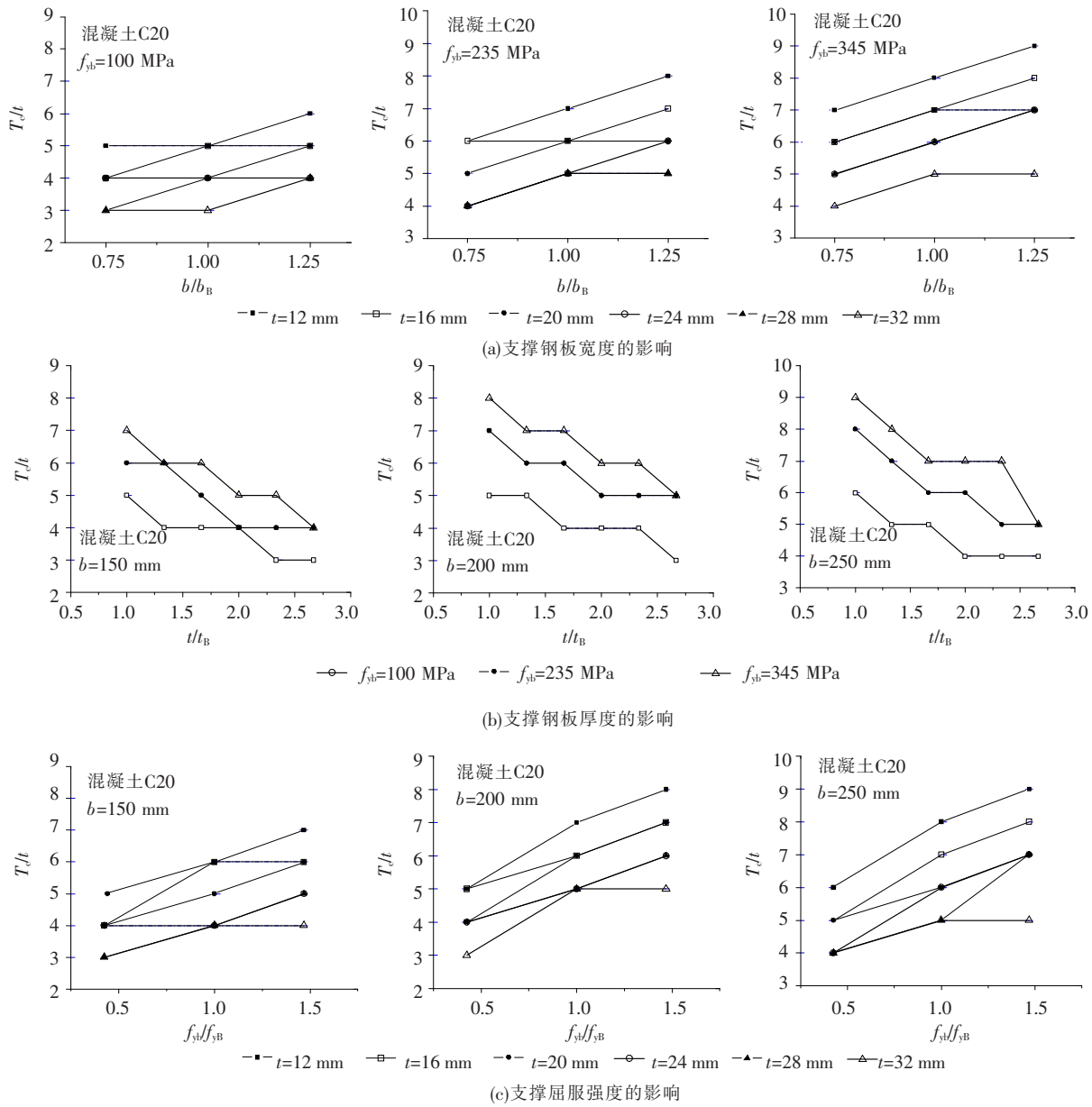


图 6 支撑宽度、板厚和屈服应力对最小厚度比的影响

2.3 支撑钢板宽厚比及支撑与墙板间的间隙和摩擦的影响

当取适宜间隙后,保持支撑横截面积 ($3\,200\text{ mm}^2$) 不变,图 8 为 $f_{yb} = 235\text{ MPa}$ 、 $T_c = 128\text{ mm}$ 时,采用 6 种不同宽厚比 (b/t) 的算例加载至 $\gamma_{\max}$ 时,不同宽厚比的钢板支撑的多波失稳变形。支撑宽厚比大的屈曲半波数较多、半波长较

小、冲剪作用较大。除 $b/t = 3.1$ 外,各宽厚比的支撑加载至相同侧移时,墙板表面受弯开裂程度相差不大。综合墙板的开裂和支撑两端的屈曲变形,以及式 (2) 的取值范围,建议支撑宽厚比的取值范围为 $5 \leq b/t \leq 19$ 。

变化间隙,不考虑摩擦,当取 $b = 200\text{ mm}$ 、 $T_c = 96\text{ mm}$ 、 $f_{yb} = 235\text{ MPa}$ 时,将两个算例分别加

载至 $\gamma_{\max}$ 和墙板严重开裂发散时,内藏钢板支撑的多波失稳变形如图 9 所示(横向变形放大 100 倍, $0.06\gamma_{\max}$ 时进入屈服). 加载至相同侧移角时, 间隙大的算例屈曲半波数较多,对墙板的冲剪作用也较大.

分析表明,间隙的变化对钢板支撑多波失稳的变形模式及发展过程均有影响. 支撑受压屈服后,间隙较小时,随压力增大,支撑的屈曲由屈服段两端向中部发展,半波数逐渐增多;间隙较大时,随压力增大,已多波失稳的支撑在某些局部板段出现局部屈曲,使支撑失稳半波数逐渐增多.

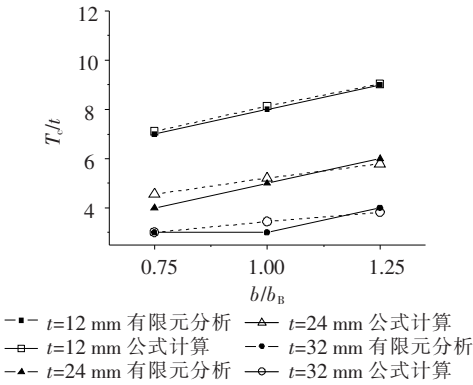


图 7 公式计算结果验证

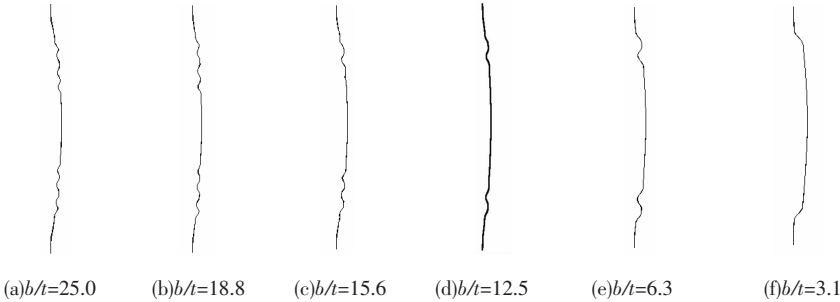


图 8 钢板支撑的多波弯曲失稳

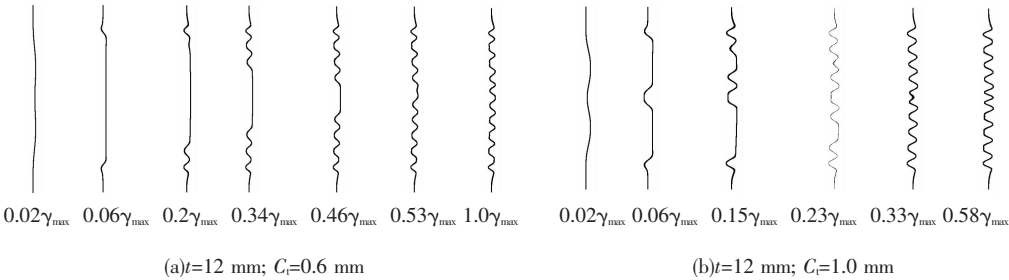


图 9 间隙 (C_i) 对支撑失稳的影响

以往对墙板侧向约束能力的要求是从避免支撑墙板整体压弯破坏来考虑的^[6-7],变化间隙的分析表明,还应注意支撑与墙板间间隙的留置,避免孔壁两侧的墙板过早被多波失稳的支撑局部冲剪破坏.

当 $f_{yb} = 235 \text{ MPa}$ 、 $t = 12、16、32 \text{ mm}$ 时,摩擦因数为 0.25,间隙为 $3 C_i、5 C_i、8 C_i$ 的算例和不考虑摩擦、间隙为 C_i 的算例的荷载 - 位移曲线如图 10 所示,加载至 $\gamma_{\max}$ 时的多波失稳变形(横向变形放大 100 倍)如图 11 所示. 可见,较厚实的钢

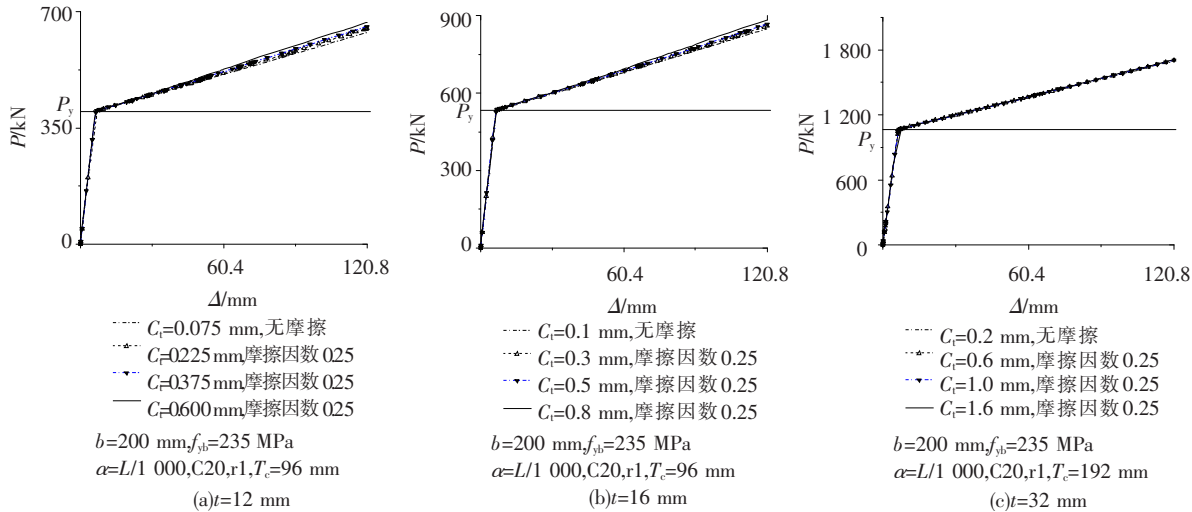


图 10 摩擦的影响

板支撑,屈曲半波较少,墙板分担的轴力也较小。因此,建议采用较厚实的支撑截面。

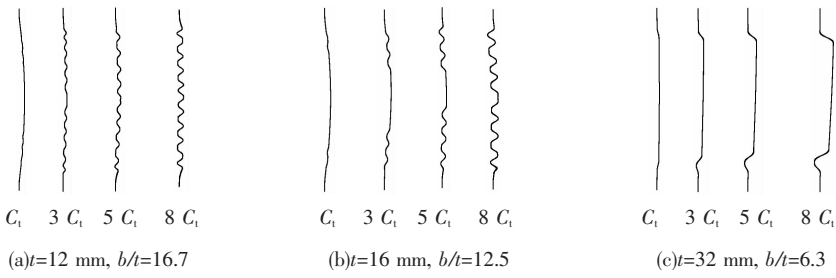


图 11 间隙和板厚变化时支撑的多波失稳

取间隙为 8 倍适宜间隙且摩擦因数为 0.25, 加载至 $\gamma_{\max}$ 时,与适宜间隙且不计摩擦情况的相比,承载力分别提高 4.64%、4.03%、0.74%。可以预见,当取适宜间隙时,即使存在摩擦力,墙板分担的轴力也很小,摩擦力对承载力的提高几乎无影响。因此,建议实际支撑墙板制作时,支撑与墙板间的间隙按式(1)确定。

3 结 论

1) 为避免支撑受压后,墙板受弯开裂和支撑墙板整体压弯失稳破坏,所要满足的墙板与支撑的最小厚度比值受钢板的宽度、厚度和屈服应力以及设计所要求的延性水平等因素的综合制约,而非定值。文中给出的经验公式可用来确定最小厚度比。

2) 随间隙和支撑宽厚比的增大,支撑失稳半波数增多,半波长减小,冲剪作用和墙板通过摩擦的分载作用均增大,不利于支撑墙板的受力。建议采用适宜间隙和较厚实的钢板支撑,且支撑钢板宽厚比控制在 $5 \leq b/t \leq 19$ 范围内。

参考文献:

[1] 丁玉坤,张耀春. 不失稳支撑及不失稳支撑框架结构研究现状[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(4): 514 - 520.

[2] QIANG X. State the art of buckling - restrained braces in Asia[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61: 727 - 748.

[3] DING Y K, ZHANG Y C, ZHAO J X. Tests of hysteretic behavior for unbonded steel plate brace encased in reinforced concrete panel[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65: 1160 - 1170.

[4] 郭彦林,刘建彬,蔡益燕,等. 结构的耗能减震与防屈曲支撑[J]. 建筑结构, 2005, 35(8): 18 - 23.

[5] SERA K, WATANABE S, ITO S, et al. Structural de-

sign of large - scale complex building (Ahinbashi NS Building) [J]. Building Technology, 1983(383): 89 - 103 (in Japanese).

[6] 李清志. 无粘结内藏钢板支撑剪力墙的受力特性及构造措施的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑工程学院, 1993.

[7] INOUE K, SAWAIZUMI S, HIGASHIBATA Y. Stiffening requirements for unbonded braces encased in concrete panels [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(6): 712 - 719.

[8] 丁玉坤. 无粘结内藏钢板支撑剪力墙滞回性能及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2009.

[9] 张耀春,丁玉坤,赵俊贤. 单斜无粘结内藏钢板支撑剪力墙滞回性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(7): 50 - 57.

[10] 丁玉坤,张耀春. 无粘结内藏钢板支撑剪力墙滞回性能的数值模拟[J]. 土木工程学报, 2009, 42(5): 46 - 54.

[11] 中华人民共和国建设部. GB 50010 - 2002, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

[12] SAEKI E, MAEDA Y, IWAMATSU K, et al. Analytical study on unbonded braces fixed in a frame [J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 1996, 489: 95 - 104 (in Japanese).

[13] IZUMITA Y, KAWAKAMI M, IWATA M. Finite element analysis of buckling - restrained braces using steel mortar planks considering elasto - plasticity and large deformation [J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 2007, 618: 207 - 213 (in Japanese).

[14] HU H T, HUANG C S, WU M H, et al. Nonlinear analysis of axially loaded concrete - filled tube columns with confinement effect [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(10): 1322 - 1329.

(编辑 刘 彤)