

开缝和不开缝钢板混凝土剪力墙抗剪性能研究

张博一¹,董莉²,张素梅¹

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090, boyi79@163.com; 2. 哈尔滨工业大学 建筑设计研究院, 哈尔滨 150090)

摘要: 为了避免钢板混凝土组合剪力墙中钢板出现剪切屈曲, 同时也能调整结构的刚度, 通过在钢板上开竖缝, 基于 ANSYS 有限元程序, 分析钢板边长比、高厚比及侧向混凝土板厚度对未开缝钢板混凝土组合剪力墙的极限承载力和刚度的影响; 研究钢板边长比、高厚比、侧向混凝土板厚度及缝间小柱高宽比对开缝钢板混凝土组合剪力墙抗剪承载能力和初始刚度的影响, 比较开缝和不开缝钢板混凝土组合剪力墙的抗剪性能。结果表明: 混凝土板作为侧向约束的存在显著地提高了钢板混凝土剪力墙的极限承载力; 钢板开缝后其极限承载力虽有所降低, 但通过改变开缝特征调节了其极限承载力和初始刚度; 边长比、高厚比和钢板开缝显著地影响剪力墙的极限承载力。

关键词: 钢板混凝土组合剪力墙; 开缝; 不开缝; 抗剪性能

中图分类号: X703.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2010)08-1221-05

Shear resistance behavior of steel plate-concrete composite shear wall with and without slits

ZHANG Bo-yi¹, DONG Li², ZHANG Su-mei¹

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, boyi79@163.com;

2. Architectural Design and Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: As a new type of shear wall, steel plate-concrete composite shear wall can avoid shear yielding and adjust stiffness of structure by opening vertical slits. This paper conducts a finite element simulation by ANSYS, and effects of span-to-height ratio, height-to-thickness ratio and the thickness of concrete panels on the ultimate capacity and stiffness of steel plate-concrete composite shear wall without slits are studied. Meanwhile, effects of span-to-height ratio, height-to-thickness ratio, the thickness of concrete panels and height-to-thickness ratio of columns between slits on shear walls with slits are analyzed, and the shear properties are compared between shear walls without slits and shear walls with slits. It is indicated that the ultimate capacity of steel plate-concrete composite shear walls is evidently improved by constraint effects of concrete panels; the ultimate capacity is reduced after opening slits, but the ultimate capacity and initial stiffness can be adjusted by changing characteristics of opening slits; the and ultimate capacity of shear walls is evidently affected by span-to-height ratio, height-to-thickness ratio and the thickness of concrete panels.

Key words: steel plate-concrete composite shear wall; slits; without slits; shear properties

钢板混凝土组合剪力墙是通过在钢板剪力墙侧向布置混凝土板对其进行侧向约束形成的一种新型抗侧力构件。钢板混凝土组合剪力墙具有自

重轻、刚度大、延性好等特点, 它既克服了钢筋混凝土剪力墙自重大, 混凝土易开裂等缺点, 又克服了钢板剪力墙易失稳、防火性能差等缺点^[1]。开缝钢板混凝土组合剪力墙通过在钢板上进行开缝处理, 使其具有初始刚度和承载力的可调节性。开缝钢板混凝土组合剪力墙可以通过改变钢板上的竖缝布置形式来调整结构的刚度和承载力, 这种特殊的性能可以方便工程师在结构设计时合理匹

收稿日期: 2009-04-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478029).

作者简介: 张博一(1979—), 男, 博士;

张素梅(1963—), 女, 教授, 博士生导师.

配不同部分结构的刚度,因而引起了工程界的重视.国内外学者对其力学性能已经开展了大量相关研究工作^[2-8].

本文基于 ANSYS 有限元软件,对开缝和不开缝钢板混凝土组合剪力墙的抗剪静力性能进行分析.对于剪力墙结构而言,周边框架对剪力墙的性能影响至关重要,而周边刚性框架和周边无框架(即四边简支)正是钢板剪力墙两种极限形式,文献[9]对周边刚性框架的剪力墙结构进行了分析,本文拟对四边简支情况下的钢板混凝土组合剪力墙结构进行分析.

1 ANSYS 有限元模型的建立

1.1 单元类型

在建立侧向约束为零时的 ANSYS 计算模型时,选取 Shell181 单元来模拟钢板.该单元可以考虑塑性、应力硬化、大变形和大应变特性,适用于各向同性材料.在建立侧向混凝土板时,若直接采用实体单元对混凝土板进行模拟并与钢板接触分析,由于混凝土的开裂、压溃以及接触等效效应会导致分析过程非常困难,因此在分析过程中,将混凝土板对钢板的约束作用等效成侧向弹簧,通过计算混凝土板的约束效果确定弹簧的刚度.弹簧单元布置在有限元模型网格交点处,垂直于钢板平面,弹簧单元一端固定 z 方向位移,另一端在网格交点处,从而使弹簧单元可以随钢板平动,且在出平面方向的位移为零.侧向弹簧选用 Link10 单元,该单元可以考虑应力刚化、大变形功能,但没有弯曲刚度,通过设定拉压杆的刚度来模拟混凝土板的侧向约束作用.模型有限元图形见图 1 所示.

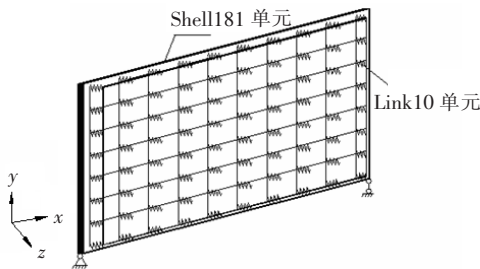


图 1 钢板混凝土组合剪力墙简化模型

1.2 钢材本构关系

钢材的本构关系采用如图 2 所示的双线性随动强化应力-应变关系,该曲线由钢材的弹性模量 E 和单轴屈服强度 f_y 来确定,钢材进入屈服阶段后服从 Von-Mises 屈服准则,钢材泊松比取 $\nu = 0.3$,屈服强度为 $f_y = 235 \text{ MPa}$,弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$,强化段的斜率取为弹性模量 E 的 2%.

1.3 边界条件及初始缺陷的确定

在计算模型中采用四边简支的边界条件,即在出平面方向(垂直于板面方向),限制钢板周边的出平面位移,结构采用平面内简支条件,荷载的施加为均布剪应力 τ .

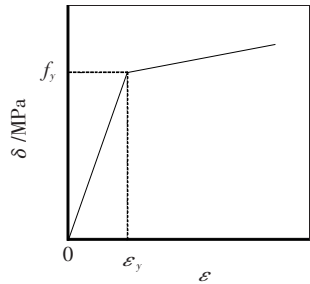
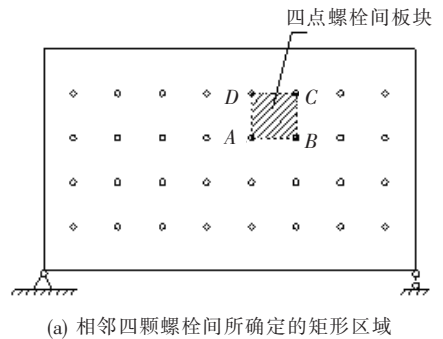


图 2 钢材应力-应变关系曲线

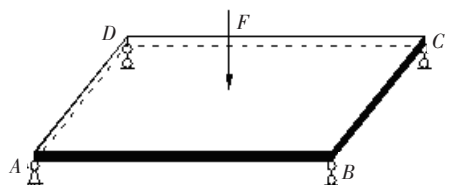
文献[10]研究表明,钢板剪力墙为初始缺陷不敏感构件,故本文采取钢板剪力墙一阶屈曲模态作为所施加几何初始缺陷形式,初始缺陷幅值取为钢板长边长的千分之一,即 $L/1000$.

1.4 混凝土板厚度(侧向弹簧刚度)的确定

在将混凝土板厚度对钢板约束等效成侧向弹簧刚度 k 时,由于实际情况的影响因素比较复杂,很难精确的计算出 k 的取值,但确定 k 的数量级或取值范围是本文进行后续研究工作的关键,因此在确定弹簧刚度 k 的过程中假定在螺栓连接处的钢板与混凝土板之间不发生相对位移,钢板的屈曲只能发生在相邻四颗螺栓间所确定的矩形区域内,因此取任意相邻四颗螺栓间所确定的矩形板为研究对象,通过计算在板中点处作用单位位移时的集中力来确定弹簧刚度 k ,如图 3 所示.



(a) 相邻四颗螺栓间所确定的矩形区域



(b) 板中点处作用单位位移时的集中力

图 3 螺栓间板块简化模型

此外,所取螺栓间板块的边界条件是影响弹

簧刚度 k 的重要因素,但因确定实际边界条件较为困难,本文选用两种极限边界约束条件:1)四个角点简支;2)四边固定。

对于螺栓间距的选择,Astaneh 教授^[2]于2002年所进行的钢板混凝土组合剪力墙试验中,认为螺栓的存在将钢板划分为若干小区格,防止钢板局部屈曲,本文根据这个原则计算出的用于连接钢板与预制混凝土板的螺栓间距为300 mm。

由于 GB 50010—2002《混凝土结构设计规

范》要求钢筋混凝土板的最小厚度为50 mm,对于钢板混凝土组合剪力墙而言,预制混凝土板主要起侧向约束的作用,混凝土板过厚将不够经济,因此本文采用的混凝土板最大厚度为80 mm。抗震设防要求混凝土结构构件强度等级不应低于C20^[11],且主要起侧向约束作用的混凝土强度不必过高,本文采用的混凝土强度等级取为C20~C40。表1给出边界条件为四点简支和四边固定时所计算的弹簧刚度。

表1 两种边界条件下混凝土板厚度与弹簧刚度对应关系

板厚/mm	弹簧刚度/(N·mm ⁻¹)									
	四点简支四边自由					四点简支四边固定				
	C20	C25	C30	C35	C40	C20	C25	C30	C35	C40
50	4 600	5 600	6 600	7 500	8 500	6 000	7 300	8 500	9 700	10 800
55	4 700	5 700	6 700	7 700	8 700	6 100	7 400	8 600	9 800	10 900
60	4 800	5 900	6 900	7 900	8 900	6 200	7 500	8 700	9 900	11 000
65	4 900	6 000	7 100	8 100	9 100	6 300	7 600	8 800	10 000	11 300
70	5 100	6 200	7 300	8 400	9 500	6 400	7 700	9 000	10 300	11 600
75	5 200	6 400	7 500	8 600	9 700	6 500	7 800	9 200	10 500	11 800
80	5 400	6 600	7 800	8 900	10 200	6 600	8 000	9 400	10 800	12 100

由表中可以看出侧向弹簧刚度在 $4 \times 10^3 \sim 1.2 \times 10^4$ N/mm 之间。由于混凝土的开裂与压碎和钢板的屈曲不可能仅仅发生在四颗螺栓所确定的矩形区域内,并且钢板与预制混凝土板之间可能发生相对滑移,这些因素都将导致弹簧刚度换算偏高,也就是说上述等效方式可能过高的估算了混凝土板对钢板的约束效应,因此调整弹簧刚度范围为 $10^2 \sim 10^4$ N/mm。

2 钢板混凝土组合剪力墙抗剪性能的有限元分析

为了考察钢板混凝土组合剪力墙的抗剪静力性能,本节通过对各参数进行变化分析了不同参数对剪力墙结构的影响。这些参数包括:边长比 β ($\beta = L/H$)、高厚比 λ ($\lambda = H/t$) 和不同混凝土板厚度(侧向弹簧刚度)。在分析过程中,钢板高度保持为3 000 mm 不变,通过改变长边边长来改变钢板高厚比,钢板长边边长 L 的取值分别为:3 000、5 000、6 000 mm 和 9 000 mm,对应的边长比 β 分别为 1.0、1.67、2.0 和 3.0;钢板厚度 t 的取值分别为 6、7.5、10、15 mm 和 30 mm,对应的高厚比 λ 分别为 500、400、300、200 和 100。

在分析边长比 β 和宽厚比 λ 对组合剪力墙的影响时,弹簧刚度 k 取为 1 000 N/mm。对于开缝钢板混凝土组合剪力墙,缝间小柱宽度 $b = 300$ mm,

高度 $l = 1 500$ mm,缝宽 $c = 3$ mm。在分析不开缝对组合剪力墙的影响时,通过改变钢板长边长 L 和钢板厚度 t 来分别调整边长比和宽厚比 λ 。

2.1 开缝和不开缝钢板混凝土组合剪力墙承载力对比

图4为开缝钢板混凝土组合剪力墙与不开缝钢板混凝土组合剪力墙荷载-位移曲线的对比。由计算可知无论边长比 β 和宽厚比 λ 取何值,开缝组合剪力墙的荷载-位移曲线都较不开缝钢板混凝土组合剪力墙的荷载-位移曲线平缓,且几乎没有峰值点和下降段;开缝钢板混凝土组合剪力墙的承载力指标 τ_c 和初始刚度 K_c 比不开缝钢板混凝土组合剪力墙有明显降低,这主要是由于开缝后钢板的屈服区域主要集中在缝间小柱的端部,屈服区域的面积远小于未开缝前屈服区域的面积。虽然开缝使组合剪力墙的承载力和初始刚度降低,但可以通过开缝的形式来达到调整剪力墙极限承载力 τ_{\max} 和初始刚度 K_c 的目的。

2.2 边长比 β 的影响

不同边长比的钢板混凝土组合剪力墙的极限承载力随边长比的变化曲线如图5所示。由图中可以看出:对于不开缝钢板混凝土组合剪力墙,在宽厚比 λ 相同的情况下,边长的增大,增加了钢板变形趋势,因此极限承载力降低;而当边长比一定时,高厚比越大承载力也随之减小。对开缝钢板混凝土组合剪力墙,由于开缝的原因使得承载力

较未开缝前锐减,但开缝后随边长比变化不明显,即开缝虽然降低了承载力,但使得承载力变化稳定,即结构趋于稳定。

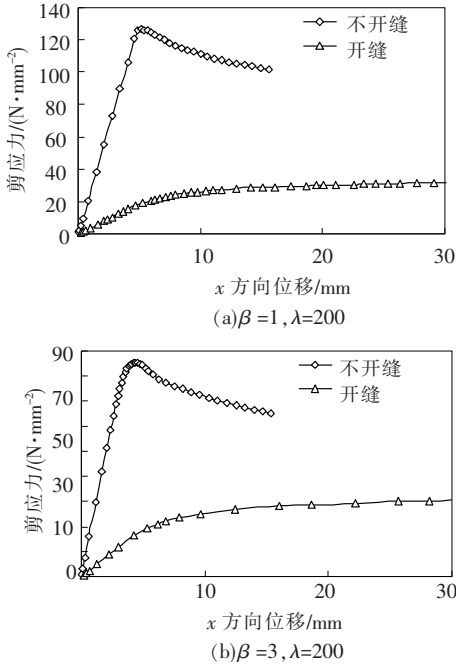


图4 开缝与不开缝组合剪力墙荷载-位移曲线的对比

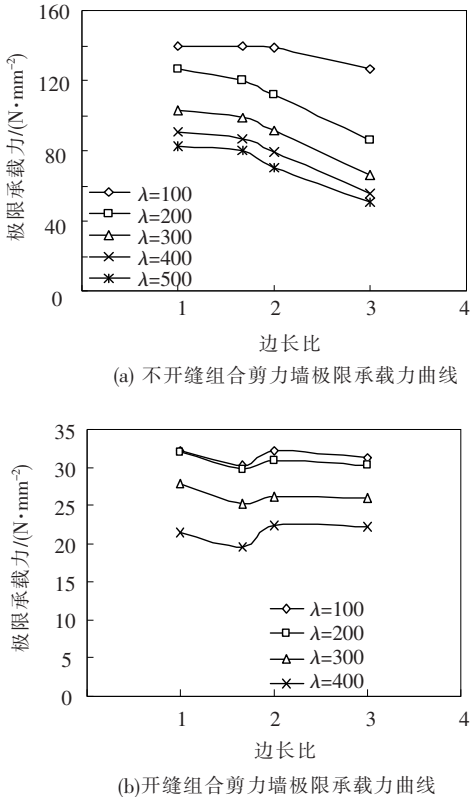


图5 钢板混凝土组合剪力墙极限承载力与边长比关系

2.3 宽厚比 λ 的影响

钢板混凝土组合剪力墙的极限承载力随宽厚比的变化曲线如图6所示。由图中可以看出:对不开缝钢板混凝土组合剪力墙,在边长比 β 相同时,组合剪力墙的极限承载力 τ_{max} 随宽厚比 λ 的增加

而降低,但降低的趋势逐渐减小,并且降低的幅度随 β 的增加而增大。对于开缝钢板混凝土组合剪力墙,在边长比 β 相同的情况下,开缝钢板混凝土组合剪力墙的承载力指标 τ_c 随宽厚比 λ 的增加而降低,且降低的幅度逐渐增大。

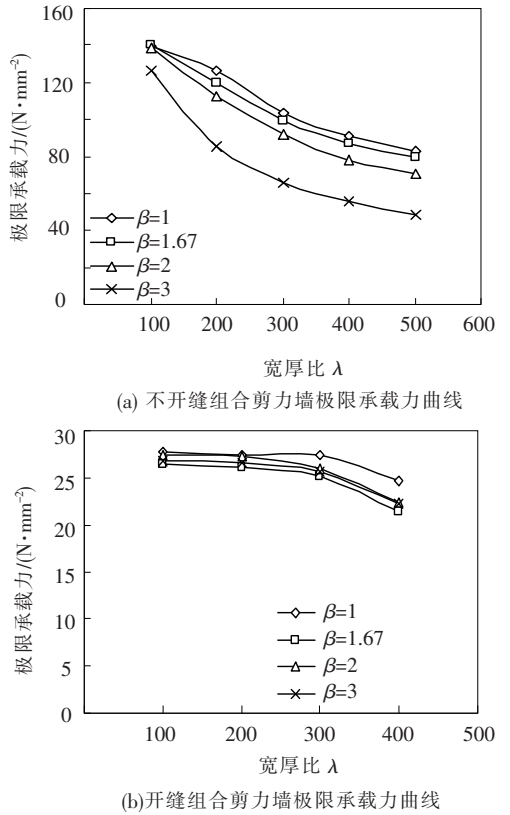


图6 组合剪力墙极限承载力随宽厚比变化曲线

2.4 混凝土板厚度(侧向弹簧刚度)的影响

不同混凝土板厚度对开缝和不开缝钢板混凝土组合剪力墙的极限承载力的影响如图7所示。为更明确显示极限承载力随弹簧刚度的变化,图中横坐标取为弹簧刚度的常用对数,即横坐标为 $lg k$ 。从图中可以看出:在边长比 β 相同的情况下,四边简支组合剪力墙的极限承载力 τ_{max} 都随侧向弹簧刚度 k 的增加而增加,但增加的幅度逐渐减小,最终将达到侧向刚度无穷大时的承载力上限。但对于开缝钢板混凝土组合剪力墙曲线变化平缓且也有达到剪力墙极限承载力上限的趋势,这说明,无论开缝与否,只要混凝土板足够厚就可以使钢板由拉力带^[7]承载转为平面内受剪承载,达到其承载极限。

2.5 开缝形式的影响

在分析开缝形式对开缝钢板混凝土组合剪力墙抗剪静力性能影响时,固定缝数 n 和缝间小柱宽度 b ,通过改变缝间小柱高度 l 来达到改变缝间小柱的高宽比 α 的目的。从图8中可以看出:无论边长比 β 和宽厚比 λ 取何值,随着缝间小柱高宽

比 α 的增大,其荷载-位移曲线都逐渐趋于平缓,承载力指标 τ_e 都随缝间小柱高宽比 α 的增加而降低,但降低的幅度逐渐减小,当 $\alpha > 5$ 时,高宽

比 α 对其 τ_e 几乎没有影响.由此说明:随着缝间小柱高宽比 α 的增大,上下两侧钢板的影响逐渐减弱,开缝钢板混凝土组合剪力墙的破坏形式逐渐转变为缝间小柱的弯剪破坏.

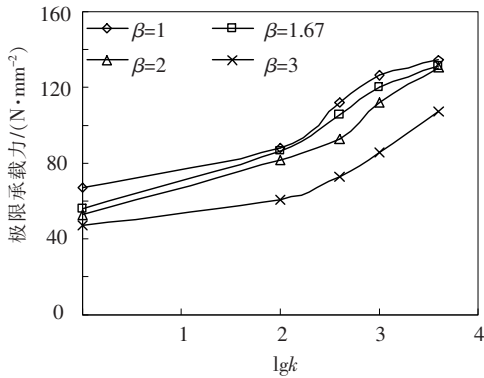
3 结 论

1)混凝土板作为侧向约束的存在能显著提高钢板剪力墙的极限承载力;钢板开缝后虽承载力有所下降,但通过改变开缝参数可以调节其承载力和初始刚度.

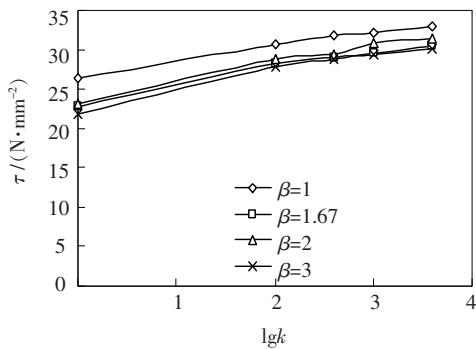
2)边长比增大使剪力墙产生更多的半波数,因此极限承载力降低;高厚比增大,钢板变薄,因此承载力也随之降低;混凝土板厚度的增加使得钢板受力机理改变,当混凝土板足够厚时,可以完全限制钢板的出平面变形,使钢板达到其极限承载力.

参考文献:

- [1] ROBERTS T M. Seismic resistance of steel plate shear walls [J]. *Engineering Structures*, 1995, 17 (5): 344 - 351.
- [2] ASTANEH-ASL A. Seismic behavior and design of steel shear wall [R]//Steel Tips Report. California: American Structural Steel Educational Council, 2001.
- [3] HITAKA T, MATSUI M. Experimental Study on steel shear wall with Slits [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(5):177 - 184.
- [4] ZHAO Q, ASTANEH-ASL A. Cyclis behavior of traditional and innovative composite shear walls [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130 (2): 271 - 284.
- [5] CAN/CSA - S16.1 - 94 (R2000). Limit state design of steel structures [S]. Toronto: Canadian Standard Association. 1994.
- [6] ANSI/AISC 341 - 05. Seismic provisions for structural steel buildings [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction. 2005.
- [7] 郭彦林,董全利,周明. 防屈曲钢板剪力墙弹性性能及混凝土盖板约束刚度研究[J]. *建筑结构学报*, 2009,30(1):40 - 47.
- [8] 郭彦林,董全利,周明. 防屈曲钢板剪力墙滞回性能理论与试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2009,30(1): 31 - 39.
- [9] 方礼凯. 开孔与未开孔钢板剪力墙抗剪性能研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2005.
- [10] 钟玉柏. 钢板剪力墙和开缝钢板剪力墙抗剪性能研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2005.
- [11] GB 50011—2001. 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001. (编辑 魏希柱)

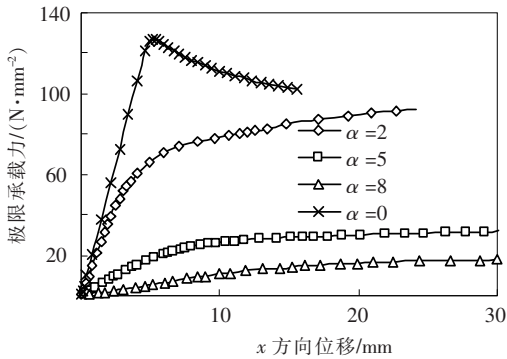


(a) 不开缝组合剪力墙极限承载力曲线

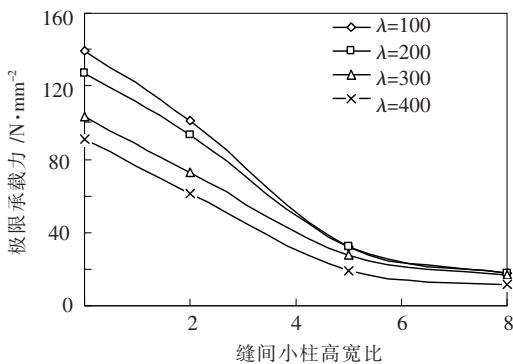


(b) 开缝组合剪力墙极限承载力曲线

图7 混凝土板厚度(侧向弹簧刚度)对极限承载力的影响



(a) 不同缝间小柱高宽比 α 下荷载-位移曲线



(b) 缝间小柱高宽比 α 对 τ_e 的影响

图8 开缝形式对混凝土组合剪力墙的影响