

文章编号:1673-2049(2018)05-0152-08

## 冷弯薄壁型钢 C 形梁受剪性能分析

姚欣梅<sup>1</sup>,周绪红<sup>1,2,3</sup>,张 辉<sup>4</sup>,石 宇<sup>2,3</sup>,管 宇<sup>1</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061; 2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室,重庆 400045; 3. 重庆大学 土木工程学院,重庆 400045; 4. 天津国土资源和房屋职业学院,天津 300270)

**摘要:**为研究冷弯薄壁型钢 C 形梁的受剪性能,在已有试验基础上,采用 ABAQUS 有限元分析软件建立非线性数值模型,对比试验与有限元结果的受剪承载力、试件破坏特征、荷载-跨中挠度曲线等;进而探讨了 C 形梁剪跨比、腹板高厚比、腹板厚度以及钢材强度等因素对冷弯薄壁型钢 C 形梁受剪性能的影响。结果表明:剪跨比是影响冷弯薄壁型钢 C 形梁破坏特征的主要因素,当剪跨比在 0.5~1.1 之间时,C 形梁处于纯剪切受力状态,此时破坏模式为剪切屈服;当剪跨比在 1.1~2 之间时,C 形梁处于弯剪受力状态,此时破坏模式为弯剪破坏;随剪跨比的增加,冷弯薄壁型钢 C 形梁的受剪承载力及刚度均减小;当腹板高厚比在 50~150 之间时,冷弯薄壁型钢 C 形梁的受剪承载力及刚度随腹板高厚比增加而增大,跨中挠度减小;随着腹板厚度的增加,冷弯薄壁型钢 C 形梁受剪承载力及刚度明显提高;增加钢材强度可显著提高冷弯薄壁型钢 C 形梁受剪承载力,但对冷弯薄壁型钢 C 形梁的刚度影响较小。

**关键词:**冷弯薄壁型钢;C 形梁;受剪承载力;有限元分析;截面特性

**中图分类号:**TU391 **文献标志码:**A

## Shear Behavior Analysis of Cold-formed Thin-walled Steel C-shape Beam

YAO Xin-mei<sup>1</sup>, ZHOU Xu-hong<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Hui<sup>4</sup>, SHI Yu<sup>2,3</sup>, GUAN Yu<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 4. Tianjin Land Resources and House Vocational College, Tianjin 300270, China)

**Abstract:** In order to investigate the shear behavior of cold-formed thin-walled steel C-shape beam, a nonlinear numerical model was built up through the finite element analysis software ABAQUS based on previous experimental study. The correctness of the modeling method was verified by comparing the results of finite element model and that of experiment. The compared results included the shear bearing capacity, specimen failure characteristics and load-mid span deflection curves. Then the effects of shear span ratio, web height to depth ratio, web depth and steel strength on the shear behavior of cold-formed thin-walled steel C-shape beam were investigated. The results show that shear span ratio is the main factor determining the failure characteristics of cold-formed thin-walled steel C-shape beam; when the shear span ratio is at 0.5-1.1, the C-shape beam is in pure shear and the corresponding failure mode is yield stress; when the shear span ratio is at 1.1-2, the C-shape beam is subjected to combined action of bending-

收稿日期:2018-07-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51678060);陕西省自然科学基金研究计划项目(2018JQ5037)

作者简介:姚欣梅(1992-),女,河北沧州人,工学博士研究生,E-mail:yaoxinmei1216@163.com。

shear and the corresponding failure mode is bending-shear failure; the shear bearing capacity and the stiffness of C-shape beam decrease with the increase of shear span ratio; when the web height to thickness ratio is at 50-150, the shear bearing capacity and stiffness of the C-shape beam raise with the increase of web height to thickness ratio, and the mid-span deflection decreases; with the increase of web thickness, the shear bearing capacity and stiffness are obviously improved; the steel strength has significant influence on the shear bearing capacity of the beam, but has little effect on the stiffness of it.

**Key words:** cold-formed thin-walled steel; C-shape beam; shear bearing capacity; finite element analysis; section property

## 0 引言

冷弯薄壁型钢 C 形梁作为冷弯薄壁型钢结构中的主要受力构件,在冷弯薄壁型钢组合墙体的过梁、组合楼盖以及屋架结构中得到广泛使用,其受力状态也相对复杂,冷弯薄壁型钢梁可能受到弯矩和剪力、腹板压屈、弯矩和腹板压屈的共同作用。目前国内外学者已对冷弯薄壁型钢 C 形梁的受弯性能进行了大量的试验研究和理论分析<sup>[1-3]</sup>,且中国《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)<sup>[4]</sup>及美国 AISI S100-16<sup>[5]</sup>均规定了冷弯薄壁型钢受弯构件的承载力计算公式。然而当梁剪跨比较小时,其极限承载力取决于受剪承载力,破坏模式与典型 C 形梁受弯也有所差别。目前中国关于冷弯薄壁型钢 C 形梁受剪性能的试验研究较少,且在《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)中并未提出相关设计方法。因此,有必要对冷弯薄壁型钢 C 形梁的受剪性能进行深入研究并分析不同因素对其受剪性能的影响。

国外学者较早采用有限元分析、试验研究和理论分析的方法对冷弯薄壁型钢梁的受剪性能进行研究。Laboube 等<sup>[6]</sup>在未考虑腹板和翼缘相互影响的情况下,对冷弯薄壁型钢 C 形梁受剪性能进行试验研究,提出了 C 形梁的受剪极限承载力计算公式。AISI S100-16<sup>[5]</sup>和 AS/NZS 4600:2005<sup>[7]</sup>均采用了文献<sup>[6]</sup>中的公式。Keerthan 等<sup>[8-9]</sup>采用有限元方法分析了冷弯薄壁型钢 C 形梁腹板与翼缘之间的连接情况及剪力流分布,并对剪跨比小于 2 的短梁进行了受剪试验,研究了梁截面厚度、腹板高度、剪跨比以及钢材强度等因素对梁受剪承载力的影响,并提出了冷弯薄壁型钢梁受剪承载力的设计方法。Degtyarev 等<sup>[10-13]</sup>进行了腹板开槽形孔的冷弯薄壁型钢 C 形梁的三点加载受剪试验,并采用有限元方法对 C 形梁的受剪性能进行研究,分析了开孔形

式、边界条件、翼缘宽度、卷边长度及截面高宽比对 C 形梁弹性屈曲及受剪极限承载力的影响。Pham 等<sup>[14-17]</sup>等采用有限元方法对冷弯薄壁型钢腹板加劲 C 形梁的弹性屈曲及受剪承载力进行数值分析。本文为深入研究冷弯薄壁型钢 C 形梁的受剪性能,首先采用 ABAQUS 建立文献<sup>[9]</sup>中 C 形梁试件的有限元模型,并与其试验结果进行对比,验证建模方法的正确性;在上述模型的基础上,通过改变 C 形梁的腹板高厚比、腹板厚度、剪跨比以及钢材强度对其进行变参分析,研究各参数对冷弯薄壁型钢 C 形梁受剪承载力及破坏形态的影响。

## 1 有限元模型建立及验证

### 1.1 试验简介

图 1 为文献<sup>[9]</sup>中冷弯薄壁型钢 C 形梁的加载装置。为避免偏心加载,试件选用 2 个冷弯薄壁型钢 C 形梁,其上翼缘采用连接角钢连接。在试件两端支座及跨中位置设置 T 形加劲件及腹板加劲件,各位置分别采用 4 个 M16 螺栓组合 C 形梁、T 形加劲件及腹板加劲件。支座两端为铰接,在跨中通过 T 形加劲件对冷弯薄壁型钢梁施加集中荷载,可保证加载点通过试件剪切中心,避免腹板局部破坏。如图 2 所示,集中荷载  $P$  平均分配到单肢 C 形梁上为  $P/2$ ,两端铰接,则支座处剪力为  $P/4$ 。

### 1.2 有限元模型建立

基于上述试验,采用 ABAQUS 软件建立了冷弯薄壁型钢 C 形梁受剪试验模型。建模过程中发现模型忽略腹板加劲件对有限元结果无影响,故为提高模型运算速度,本文中建模不再建立腹板加劲件,整体模型见图 3。

试件采用壳单元 S4R 模拟 C 形梁,采用实体单元 C3D8R 模拟 T 形加劲件;C 形梁的弹性模量为  $2 \times 10^5$  MPa,屈服强度及抗拉强度依据 AS/NZS 4600:2005<sup>[7]</sup>取值,G250 钢材屈服强度取 250 MPa,

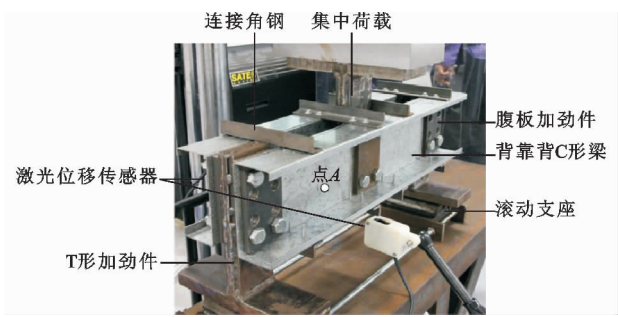


图 1 加载装置  
Fig. 1 Loading Setup

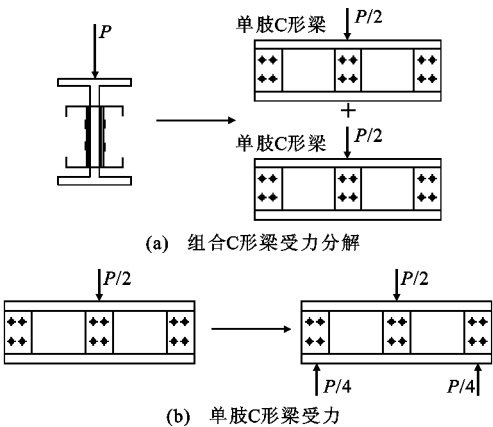


图 2 受力分析示意图  
Fig. 2 Diagram of Load Analysis

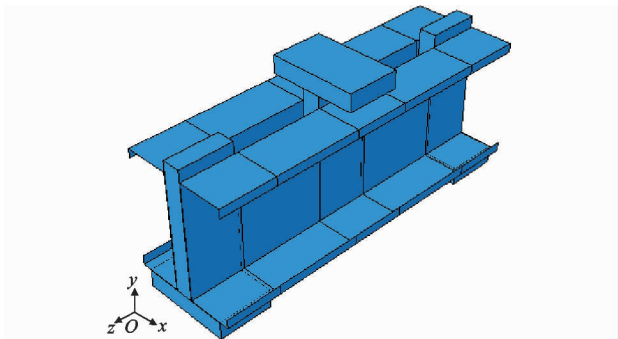


图 3 有限元模型  
Fig. 3 Finite Element Model

极限强度取 320 MPa, G450 钢材屈服强度取 450 MPa, 极限强度取 480 MPa; 由于在试验中 T 形加劲件刚性较强, 且未发生明显变形, 故其弹性模量取为  $2 \times 10^6$  MPa, C 形梁及 T 形加劲件的泊松比取为 0.3; 建立 Tie 约束连接 T 形加劲件腹板及 C 形梁腹板, 建立 Coupling 耦合跨中 T 形加劲件翼缘上表面及其形心上方一参考点, 通过该参考点对试件施加跨中集中荷载; 边界条件为两端简支, 在左侧 T 形加劲件翼缘下端约束其  $x, y$  方向, 即  $U_x = 0, U_y = 0$  ( $U_x, U_y$  分别为  $x, y$  方向的线位移), 在右侧

T 形加劲件翼缘下端约束其  $x, y, z$  三个方向, 即  $U_x = 0, U_y = 0, U_z = 0$  ( $U_z$  为  $z$  方向的线位移)。根据以上建模方法, 分别建立与文献[9]中纯剪切试件相同尺寸的有限元模型(图 3)。

1.3 模型验证

将有限元模拟得到的承载力、破坏特征及荷载-跨中挠度曲线分别与试验结果进行对比。表 1 为试验与有限元受剪承载力对比, 其中  $V_T, V$  分别为试验、有限元受剪承载力。由于有限元模型忽略了 T 形加劲件与 C 形梁腹板之间的滑移影响, 有限元结果略大于试验结果, 相对误差在 15% 之内, 可见有限元分析方法可靠。试件 3 (尺寸为 160 mm × 65 mm × 15 mm × 1.90 mm 的 C 形梁) 有限元模型与试件试验破坏特征对比见图 4, 试件变形均为 C 形梁腹板发生斜向外鼓剪切变形。

表 1 试验与有限元受剪承载力对比  
Tab. 1 Comparison of Shear Bearing Capacities of Finite Element Models and Tests

编号	试件截面尺寸	$V_T$ /kN	$V$ /kN	$V_T/V$
1	200 mm × 75 mm × 15 mm × 1.90 mm	75.0	79.5	1.06
2	250 mm × 75 mm × 18 mm × 1.90 mm	69.4	85.9	1.23
3	160 mm × 65 mm × 15 mm × 1.90 mm	73.8	70.3	0.95
4	200 mm × 75 mm × 15 mm × 1.90 mm	57.0	56.5	0.99
5	250 mm × 75 mm × 18 mm × 1.50 mm	53.2	54.8	1.03
6	160 mm × 65 mm × 15 mm × 1.50 mm	54.5	55.6	1.02
7	120 mm × 50 mm × 18 mm × 1.50 mm	43.3	50.0	1.15
8	200 mm × 75 mm × 15 mm × 1.95 mm	55.1	55.6	1.01
9	250 mm × 75 mm × 18 mm × 1.95 mm	60.3	62.9	1.04
10	160 mm × 65 mm × 15 mm × 1.95 mm	52.2	46.5	0.89
11	120 mm × 50 mm × 18 mm × 1.95 mm	38.1	41.7	1.09

试件 5 (尺寸为 250 mm × 75 mm × 18 mm × 1.50 mm 的 C 形梁) 与试件 11 (尺寸为 120 mm × 50 mm × 18 mm × 1.95 mm 的 C 形梁) 的试验与有限元荷载-跨中挠度曲线对比如图 5 所示, 可见模型的受力过程与试验较为吻合。因此, 采用上述建模方法所建立的有限元模型可用于对冷弯薄壁型钢 C 形梁受剪性能进行参数分析。

2 有限元参数分析结果与讨论

为进一步研究冷弯薄壁型钢 C 形梁的受剪性能, 建立有限元模型进行变参分析, 主要参数包括 C 形梁剪跨比、腹板高厚比、腹板厚度  $t$  及钢材屈服强度  $f_y$ 。根据 GB 50018—2002<sup>[4]</sup>, Q235 钢材的屈服强度取 235 MPa, Q345 钢材的屈服强度取 345 MPa, 各钢材弹性模量及泊松比与试验的有限元模

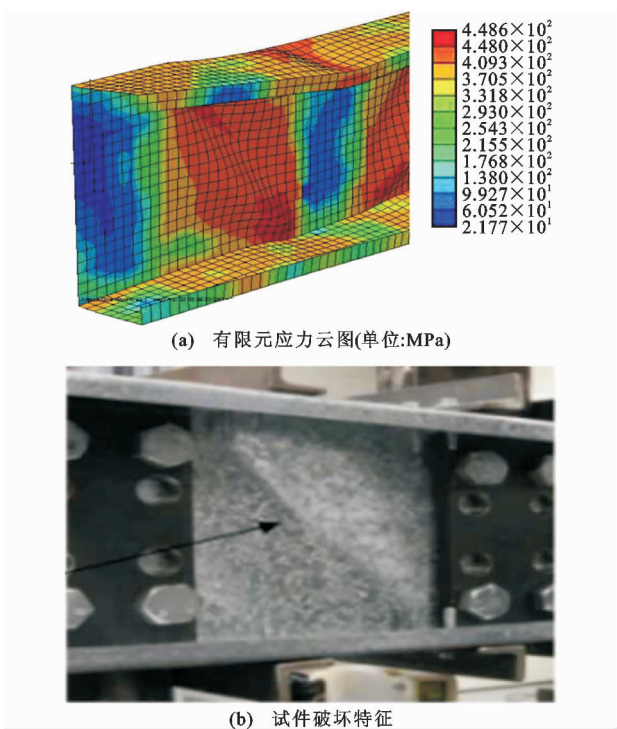


图 4 试件 3 的有限元与试验破坏特征对比

Fig. 4 Comparison of Failure Features of Finite Element Model and Test of Specimen 3

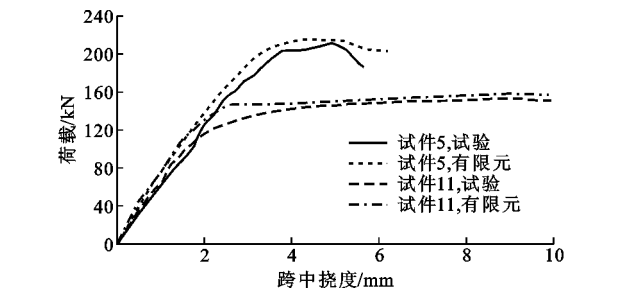
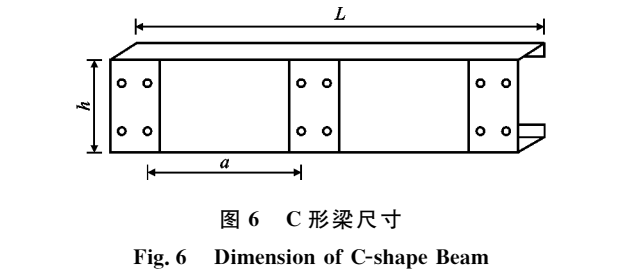


图 5 荷载-跨中挠度曲线对比

Fig. 5 Comparison of Load-mid Span Deflection Curves

型取值相同。模型尺寸见图 6,其中  $L$  为 C 形梁跨度,  $h$  为腹板高度,  $a$  为 C 形梁 2 个相邻加劲肋内螺栓之间的距离,即剪跨。



### 2.1 剪跨比的影响

当冷弯薄壁型钢 C 形梁跨度逐渐减小时,在跨中集中荷载作用下,受力状态由受弯逐渐变为弯剪甚至纯剪状态。为了深入了解 C 形梁的受剪性能,

首先对 C 形梁的剪跨比进行分析,研究其对 C 形梁受力状态及破坏特征的影响。

取试件厚度  $t=1.5\text{ mm}$ ,腹板高厚比  $h/t=150$ ,钢材屈服强度  $f_y$  为 235 MPa,剪跨比  $a/h$  变化范围为 0.5~2.0。图 7 为剪跨比对荷载-跨中挠度曲线的影响,由图 7 可知:增加 C 形梁剪跨比,极限荷载时跨中挠度增大,C 形梁受剪承载力和刚度减小。

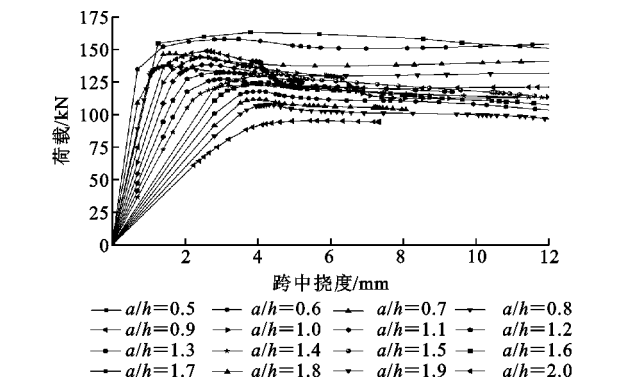


图 7 剪跨比对荷载-跨中挠度曲线的影响

Fig. 7 Effect of Shear Span Ratio on Load-mid Span Deflection Curves

图 8 为不同剪跨比 C 形梁试件在极限荷载作用下的应力图。由图 8 可以看出,C 形梁在跨中集中荷载作用下,破坏主要发生在支座处与加载点间的 C 形梁腹板位置,随着剪跨比的增大,其破坏特征由受剪屈服转变为弯剪破坏,腹板发生斜向鼓曲。表 2 为有限元分析结果,其中  $V_F$  为单肢 C 形梁受剪承载力,  $M_u$  为 C 形梁弯矩,即

$$M_u = \frac{P_u L}{4} = V_F a \quad (1)$$

式中:  $P_u$  为 C 形梁极限承载力。

$M$  为 C 形梁截面弹性弯矩设计值,即

$$M = W f_y \quad (2)$$

式中:  $W$  为冷弯薄壁型钢 C 形梁截面模量。

参考 AS 4100-1998<sup>[18]</sup> 可知,当  $M/M_u < 0.75$  时,即  $0.5 < a/h < 1.1$ ,可认为 C 形梁处于纯剪切状态;当  $M/M_u > 0.75$  时,即  $1.1 < a/h < 2$ ,C 形梁处于非纯剪切状态,即弯剪状态。因此,在后续变参分析中均取  $a/h=1$ ,保证 C 形梁处于纯剪受力状态,进而对其受剪性能进行深入分析。

### 2.2 腹板高厚比的影响

为考察腹板高厚比对试件受剪性能的影响,建立 8 个有限元模型,腹板高厚比  $h/t$  依次为 50,100,150,200,2 组模型腹板厚度  $t$  分别取 1.0,2.0 mm,剪跨比  $a/h$  均取 1,钢材屈服强度  $f_y$  为 235 MPa,有限元对比结果见图 9。



表 2 不同剪跨比的有限元结果

Tab.2 Results of Finite Element Models with Different Shear Span Ratios

试件编号	$a/h$	$V_F/\text{kN}$	$M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M/M_u$
1	0.5	52.88	11.47	5.95	0.52
2	0.6	45.45	9.98	5.95	0.60
3	0.7	41.66	9.32	5.95	0.64
4	0.8	38.82	9.00	5.95	0.66
5	0.9	37.94	8.74	5.95	0.68
6	1.0	36.61	8.47	5.95	0.70
7	1.1	34.54	8.12	5.95	0.73
8	1.2	32.45	7.78	5.95	0.76
9	1.3	30.89	7.47	5.95	0.79
10	1.4	29.41	7.43	5.95	0.80
11	1.5	28.16	7.24	5.95	0.82
12	1.6	27.73	7.08	5.95	0.84
13	1.7	26.89	6.92	5.95	0.85
14	1.8	26.21	6.56	5.95	0.90
15	1.9	25.88	6.32	5.95	0.94
16	2.0	25.06	5.66	5.95	1.05

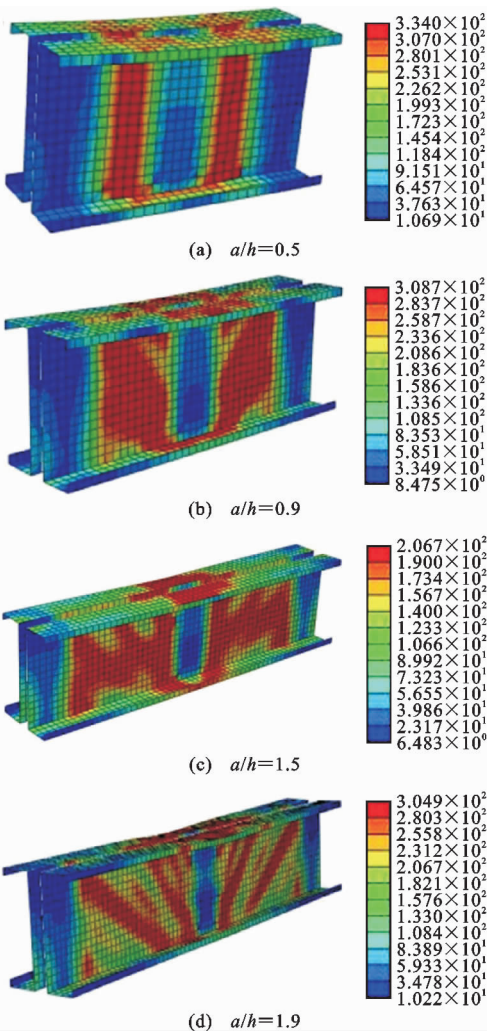


图 8 不同剪跨比的 C 形梁应力 (单位:MPa)

Fig. 8 Stresses of C-shape Beams with Different Shear Span Ratios (Unit:MPa)

从图 9 对比结果可以看出,当  $50\leq h/t\leq 150$  时,C 形梁受剪承载力随腹板高厚比增大而提高,当  $150\leq h/t\leq 200$  时,受剪承载力随腹板高厚比增大而减小。这主要是因为腹板作为 C 形梁受剪的主要受力板件, $h/t$  在一定范围内增加时会增大腹板受力面积,进而提高 C 形梁受剪承载力。同时,由图 9 荷载-跨中挠度曲线的初始斜率以及各试件极限承载力所对应的跨中挠度可以看出,随腹板高厚比的增加,C 形梁的刚度逐渐增加,导致跨中挠度降低。

图 10 为不同腹板高厚比的 C 形梁试件在极限荷载状态下的应力图,此时钢材强度等级为 Q235,  $t=2\text{ mm}$ ,剪跨比  $a/h=1$ 。由图 10 可以看出:当  $h/t=200$  时,C 形梁腹板受剪区域相对较少,此时 C 形梁发生弹性剪切屈曲破坏;当  $h/t=150$  时,腹板剪切变形加剧,破坏模式为非弹性剪切屈曲破坏;当

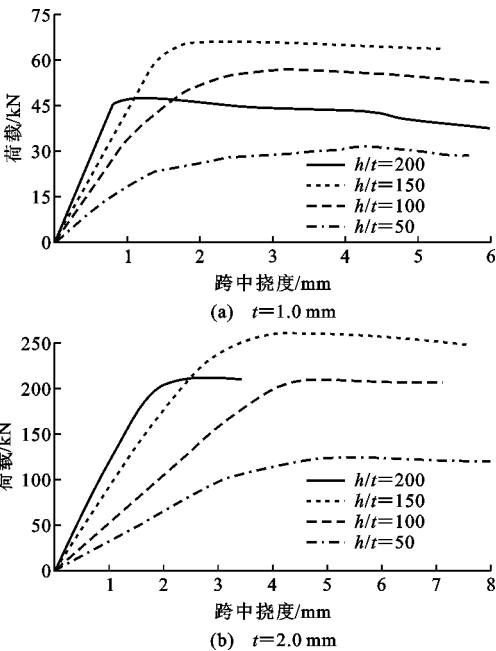


图 9 腹板高厚比对荷载-跨中挠度曲线的影响

Fig. 9 Effect of Web Height to Thickness Ratio on Load-mid Span Deflection Curves

$h/t=100$  时,翼缘开始发生鼓曲,C 形梁发生腹板剪切屈曲破坏并伴随翼缘翘曲;当  $h/t=50$  时,C 形梁受剪面积增加至最大,此时破坏模式为腹板受剪屈服破坏。由此可知 C 形梁腹板高厚比对其破坏模式影响较大。

2.3 腹板厚度的影响

腹板厚度是影响 C 形梁受剪性能的重要因素,

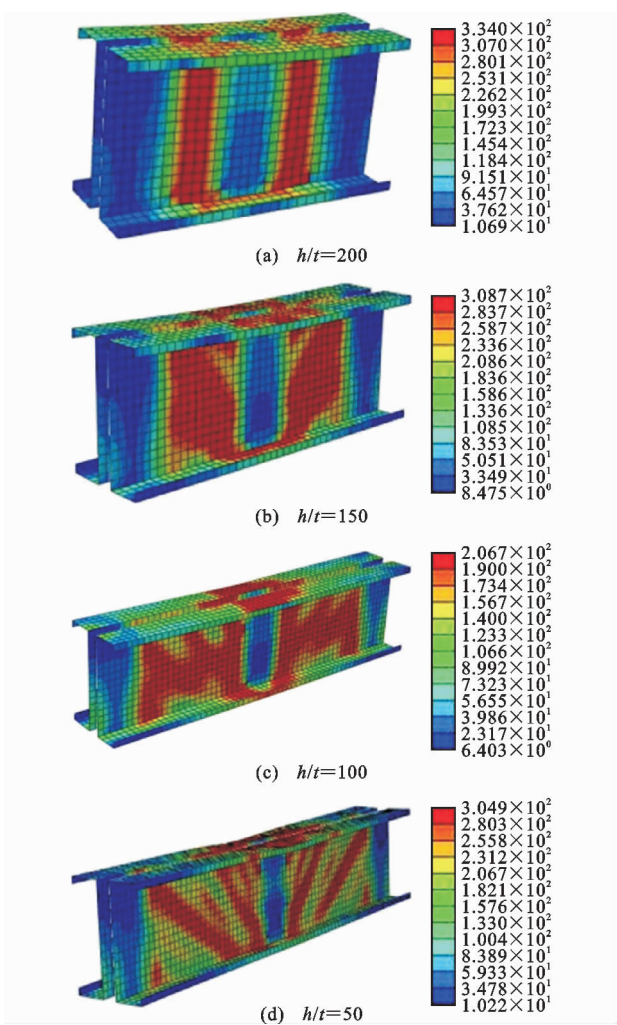


图 10 不同腹板高厚比的 C 形梁应力(单位:MPa)

Fig. 10 Stresses of C-shape Beams with Different Web Height to Thickness Ratios (Unit:MPa)

选取 2 种腹板高厚比 100,200,分析 4 种不同腹板厚度  $t=1.0,1.5,2.0,2.5$  mm 的影响,其中  $a/h=1, f_y=235$  MPa。图 11 为不同腹板厚度的 C 形梁荷载-跨中挠度曲线。由图 11 可见,随腹板厚度增大,C 形梁的受剪承载力大幅度提高。当腹板厚度依次为 1.0,1.5,2.0,2.5 mm 时,抗剪承载力分别为 14.42,31.63,52.29,90.89 kN,后 3 种腹板厚度梁相比 1.0 mm 厚度梁分别提高 119%,263%,530%。同时,C 形梁的刚度随腹板厚度的增大逐渐提高。

图 12 为  $h/t=200, a/h=1, f_y=235$  MPa 时,不同腹板厚度的 C 形梁试件在极限荷载作用下的应力图。由图 12 可知,C 形梁在极限荷载作用下,随腹板厚度增加,梁塑性区域逐渐较少,腹板及翼缘的鼓曲现象逐渐减弱,破坏区域仍在支座附近。当

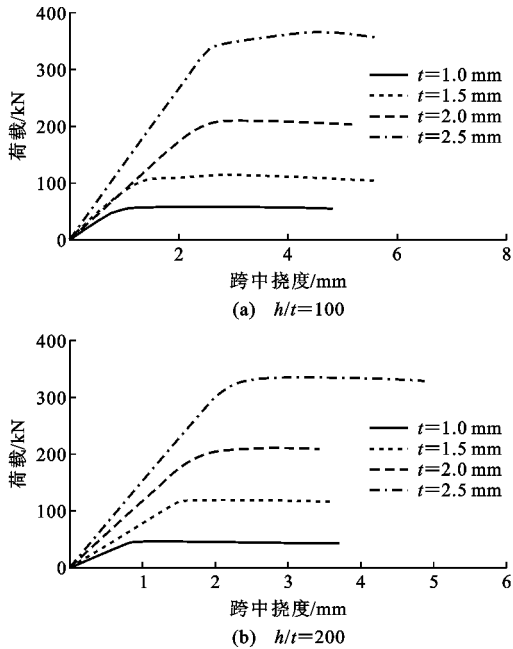


图 11 腹板厚度对荷载-跨中挠度曲线的影响

Fig. 11 Effect of Web Thickness on Load-mid Span Deflection Curves

腹板厚度过小时,C 形梁翼缘发生局部屈曲。

### 2.4 钢材强度的影响

选取 2 种钢材屈服强度  $f_y=235,345$  MPa,研究钢材强度对 C 形梁受剪性能的影响。图 13 为  $h/t=150, t=1.5$  mm,  $a/h$  分别为 0.6,0.8,1.0,1.1 时,不同钢材强度的 C 形梁的荷载-跨中挠度曲线。由图 13 可知:当  $a/h$  依次为 0.6,0.8,1.0,1.1 时,钢材强度由 235 MPa 提高为 345 MPa,其受剪承载力分别提高 36.04%,35.60%,25.70%,27.01%;在仅改变钢材强度的情况下,其荷载-跨中挠度曲线斜率大致相等。因此,C 形梁受剪承载力随钢材强度的提高而增大,但其刚度不受钢材强度的影响。

## 3 结 语

(1)冷弯薄壁型钢 C 形梁在跨中集中荷载作用下其受力状态与剪跨比有关。当剪跨比在 0.5~1.1 之间时,C 形梁处于纯剪切受力状态,此时破坏模式为剪切屈服;当剪跨比在 1.1~2 之间时,处于弯剪受力状态,破坏模式为弯剪破坏。剪跨比对 C 形梁的承载力及刚度影响较大,随剪跨比增大,C 形梁受剪承载力及刚度均减小。

(2)当腹板高厚比在 50~150 时,增大腹板高厚比会提高 C 形梁受剪承载力,刚度也随之增加,跨中挠度降低。同时,随腹板高厚比增大,冷弯薄壁型钢 C 形梁破坏模式依次为剪切屈服破坏、腹板剪切

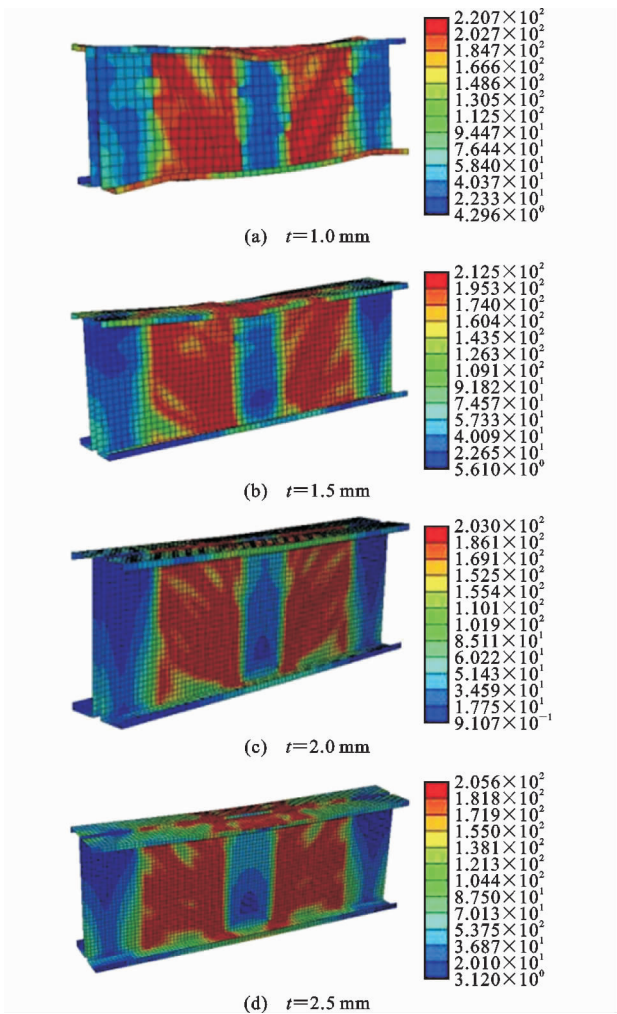


图 12 不同腹板厚度的 C 形梁应力(单位:MPa)  
Fig. 12 Stresses of C-shape Beams with Different Web Thicknesses (Unit:MPa)

屈曲破坏并伴随翼缘翘曲、非弹性剪切屈曲破坏及弹性剪切屈曲破坏。增加 C 形梁腹板厚度可明显提高其受剪承载力及刚度。提高钢材强度会增大 C 形梁受剪承载力,对刚度无明显提高作用。

参考文献:

References:

[ 1 ] 张耀春,王海明.冷弯薄壁型钢 C 形截面构件受弯承载力试验研究[J].建筑结构学报,2009,30(3):53-61.  
ZHANG Yao-chun, WANG Hai-ming. Experimental Study on Bending Strength of Cold-formed Steel C-section Members [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(3): 53-61.

[ 2 ] 王海明,张耀春.冷弯型钢 C 形截面受弯构件平面内稳定性能研究[J].建筑结构,2009,39(4):87-91.  
WANG Hai-ming, ZHANG Yao-chun. Investigation

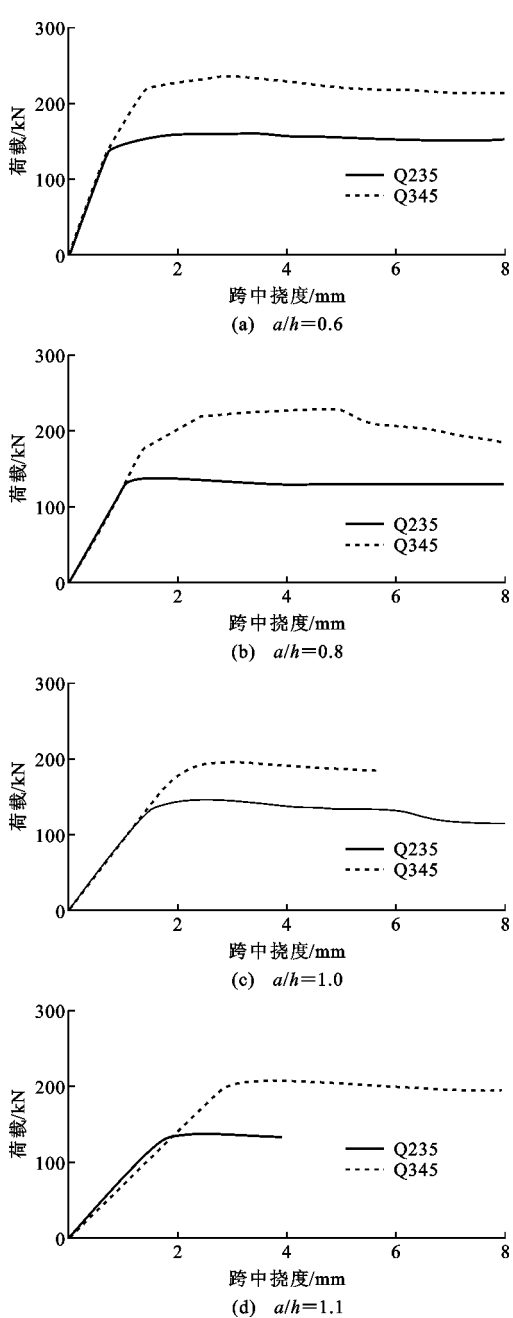


图 13 钢材强度对荷载-跨中挠度曲线的影响  
Fig. 13 Effect of Steel Strength on Load-mid Span Deflection Curves

on In-plane Stability Behavior of Cold-formed Steel C-section Flexural Members[J]. Building Structure, 2009, 39(4): 87-91.

[ 3 ] XU L, ZHOU X H, YUAN X L, et al. On North American and Chinese Standards for Design of Cold-formed Steel C-section Flexural Members[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(1): 16-35.

[ 4 ] GB 50018—2002,冷弯薄壁型钢结构技术规范[S].  
GB 50018—2002, Technical Code of Cold-formed

- Thin-wall Steel Structures[S].
- [ 5 ] AISI S100-16, North American Specification for the Design of Cold-formed Steel Structural Members[S].
- [ 6 ] LABOUBE R A, YU W W. Cold-formed Steel Beam Webs Subjected Primarily to Shear[R]. Washington DC: American Iron and Steel Institute, 1978.
- [ 7 ] AS/NZS 4600: 2005, Cold-formed Steel Structures [S].
- [ 8 ] KEERTHAN P, MAHENDRAN M. Elastic Shear Buckling Characteristics of Lite Steel Beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66 (11): 1309-1319.
- [ 9 ] KEERTHAN P, MAHENDRAN M. Experimental Investigation and Design of Lipped Channel Beams in Shear[J]. Thin-walled Structures, 2015, 86: 174-184.
- [10] DEGTYAREVA N V, DEGTYAREV V V. Experimental Investigation of Cold-formed Steel Channels with Slotted Webs in Shear[J]. Thin-walled Structures, 2016, 102: 30-42.
- [11] DEGTYAREV V V, DEGTYAREVA N V. Finite Element Modeling of Cold-formed Steel Channels with Solid and Slotted Webs in Shear [J]. Thin-walled Structures, 2016, 103: 183-198.
- [12] DEGTYAREV V V, DEGTYAREVA N V. Numerical Simulations on Cold-formed Steel Channels with Flat Slotted Webs in Shear. Part I: Elastic Shear Buckling Characteristics[J]. Thin-walled Structures, 2017, 119: 22-32.
- [13] DEGTYAREV V V, DEGTYAREVA N V. Numerical Simulations on Cold-formed Steel Channels with Flat Slotted Webs in Shear. Part II: Ultimate Shear Strength[J]. Thin-walled Structures, 2017, 119: 211-223.
- [14] PHAM C H, HANCOCK G J. Numerical Simulation of High Strength Cold-formed Purlins in Combined Bending and Shear[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(10): 1205-1217.
- [15] PHAM C H, HANCOCK G J. Tension Field Action for Cold-formed Sections in Shear[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 72: 168-178.
- [16] PHAM C H, HANCOCK G J. Numerical Investigation of Longitudinally Stiffened Web Channels Predominantly in Shear [J]. Thin-walled Structures, 2015, 86: 47-55.
- [17] PHAM S H, PHAM C H, HANCOCK G J. Direct Strength Method of Design for Shear Including Sections with Longitudinal Web Stiffeners [J]. Thin-walled Structures, 2014, 81: 19-28.
- [18] AS 4100-1998, Steel Structures[S].