

Finite Element Analysis for Ultimate Shear Bearing Capacity of High Strength Steel Welded I-Beams

Peng Guo¹ Shichao Xin² Haiyu Cheng³

1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin, 300074, China

2. Beijing Gouli Technology Co., Ltd., Beijing, 100102, China

3. Real Estate Service Center, Dongli District, Tianjin City, Tianjin, 300399, China

Abstract

The calculation formula of shear ultimate bearing capacity of I-beam given in GB50017-2003 *Code For Design of Steel Structures* considers the restraint effect of flange on Web and does not consider the contribution of flange stiffness to shear ultimate bearing capacity, so the results are relatively conservative. In view of the shortcomings in the code, this paper makes a finite element analysis on the shear ultimate bearing capacity of high-strength steel welded I-beam. Based on the existing calculation formula that can consider the contribution of flange stiffness to shear ultimate bearing capacity, according to the finite element calculation results, the calculation formula of shear ultimate bearing capacity of high-strength steel welded I-beam is proposed.

Keywords

high strength steel; welded I-beam; ultimate shear capacity; finite element analysis

高强钢焊接工字梁抗剪极限承载力的有限元分析

郭鹏¹ 忻仕超² 程海宇³

1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 中国·天津 300074

2. 北京构力科技有限公司, 中国·北京 100102

3. 天津市东丽区房产服务中心, 中国·天津 300399

摘 要

GB50017—2003《钢结构设计规范》给出的工字梁抗剪极限承载力计算公式考虑了翼缘对腹板的约束作用, 未考虑翼缘自身刚度对抗剪极限承载力的贡献, 因而得到结果较为保守。论文针对规范中存在的不足, 对高强钢焊接工字梁抗剪极限承载力进行有限元分析, 在现有可以考虑翼缘自身刚度对抗剪极限承载力贡献计算式的基础上, 根据有限元计算结果建议了高强钢焊接工字梁抗剪极限承载力的计算式。

关键词

高强钢; 焊接工字梁; 抗剪极限承载力; 有限元分析

1 引言

目前, 工字梁抗剪极限承载力不同计算方法的主要差别包括腹板中主拉应力与翼缘的夹角、拉力场的分布形式和是否考虑翼缘对抗剪承载力的贡献等方面。不同国家制定钢结构设计规范时依据的抗剪极限承载力计算方法也不相同。

①欧洲钢结构设计规范 Eurocode 3^[1] 给出了抗剪极限承载力简单屈服后方法, 但简化方法没有考虑翼缘对工字梁抗剪极限承载力的影响。

② Device^[2] 对简化屈服后方法进行了修正, 可以考虑翼缘自身刚度对抗剪极限承载力的贡献。但是此方法认为腹

板为四边简支, 没有考虑翼缘对腹板的约束作用。

③中国 GB50017—2017《钢结构设计标准》^[3] 给出的简化计算方法, 并考虑翼缘对腹板的约束作用规定了抗剪极限承载力的计算公式。但公式未考虑翼缘自身刚度对抗剪极限承载力的贡献, 因而得到的结果较为保守^[4]。考虑到以上方法的局限性, 文献^[4] 给出了考虑翼缘自身刚度和翼缘对腹板约束作用的抗剪极限承载力计算方法。

$$V_u = \tau_{per} h_w t_w + \frac{4M_{Nf}}{c_h} \quad (1)$$

式中, τ_{per} 为考虑腹板屈服后强度的折算应力; M_{Nf} 为考虑轴力影响时翼缘的塑性铰弯矩; c_h 为翼缘内外塑性铰间的距离。

式(1)是基于 Q235 钢相关试验和有限元分析得到的计算式, 高强钢(屈服强度不低于 460MPa)的材料性能和

【作者简介】郭鹏(1989—), 男, 中国河北张家口人, 硕士, 工程师, 从事市政工程结构设计研究。

本构关系与 Q235 钢均存在差异, 论文为验证式 (1) 是否适用于计算高强钢焊接工字梁的抗剪极限承载力展开相应分析。

2 有限元模型介绍

构件的几何尺寸主要考虑腹板区格长宽比 a/h_w 、腹板高厚比 h_w/t_w 和翼缘宽厚比的变化。 a/h_w 取 1.00、1.50 和 2.00; 腹板高厚比取 150、200 和 250; 翼缘宽度为 140mm, 通过改变翼缘厚度调节翼缘宽厚比。梁的两端为简支约束, 在支座和跨中设置了加劲肋, 为防止梁在加载过程在发生整体失稳, 约束支座加劲肋和跨中支承加劲肋处节点的平面外位移^[4]。采用 SHELL181 单元建立有限元模型, 如图 1 所示。在数值分析时, Q460 高强钢采用图 2 (a) 所示有屈服平台的本构模型, Q500、Q550 和 Q690 高强钢采用图 2 (b) 所示无屈服平台的本构模型^[5]。图 2 中材料性能指标的含义和取值如表 1 所示。

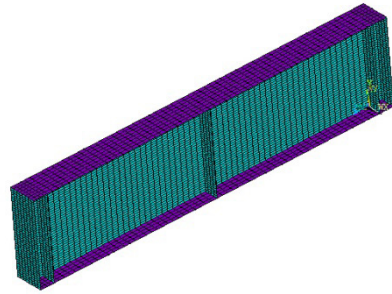


图 1 有限元模型 ($a/h_w=2.0$)

3 计算结果分析

3.1 初始几何缺陷对抗剪极限承载力的影响

GB50205—2020《钢结构工程施工质量验收标准》^[6]规定, 选取 $h_w/200$ 作为腹板的初始几何缺陷幅值, 选取 $h_w/100$ 和 $h_w/400$ 进行对比分析。通过构件的荷载一位移曲线分析初始几何缺陷对抗剪极限承载力的影响。Q460 高强钢的荷载一位移曲线如图 3 所示。

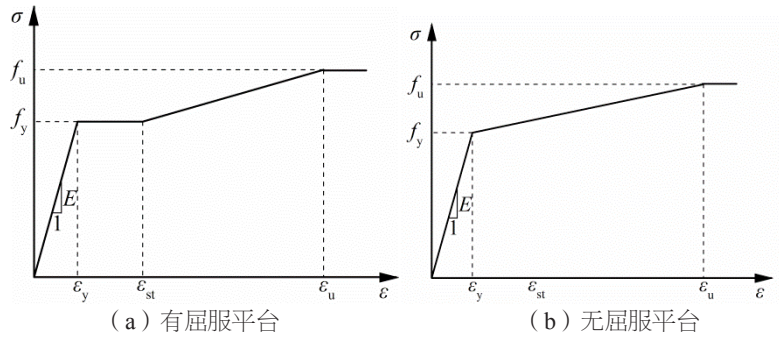


图 2 高强钢的本构模型

表 1 高强钢的材料性能指标

钢材牌号	屈服平台末端应变 ϵ_{st}	极限应变 ϵ_u	抗拉强度 f_u / N/mm^2	弹性模量 E / N/mm^2	剪切模量 G / N/mm^2	泊松比 ν
Q460	0.02	0.14	550	206×10^3	79×10^3	0.3
Q500	—	0.10	610			
Q550	—	0.09	670			
Q690	—	0.08	770			

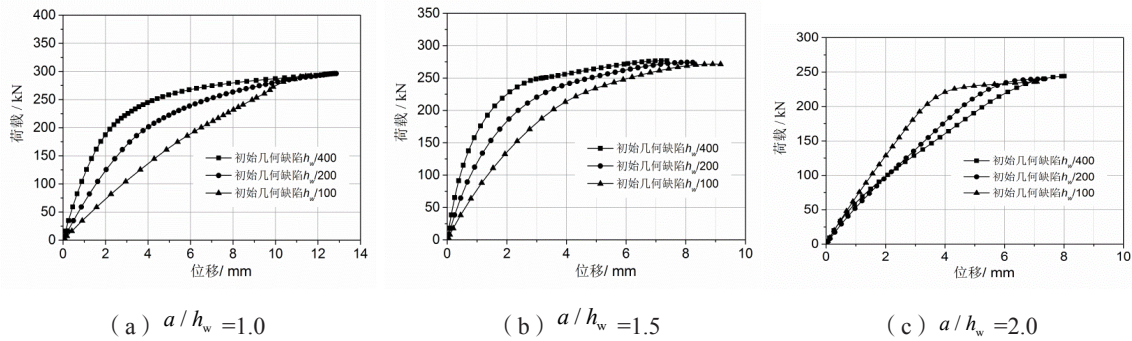


图 3 初始几何缺陷对抗剪极限承载力的影响

由图 3 可知,改变初始几何缺陷幅值只会影响荷载一位移曲线的形状。抗剪极限承载力只取荷载一位移曲线最高点对应的荷载,因此初始几何缺陷对抗剪极限承载力无较大影响。有限元分析计算时选取 $h_w/200$ 的初始缺陷幅值即可。

3.2 翼缘厚度对抗剪极限承载力的影响

其他参数相同,通过改变翼缘厚度研究翼缘自身刚度对抗剪极限承载力的影响。以 $h_w/t_w=200$, a/h_w 为 1.0、1.5 和 2.0 的 Q460 焊接工字梁为例,抗剪极限承载力的有限元计算结果 V_0 如表 2 所示。

表 2 抗剪极限承载力的有限元计算结果 ($h_w/t_w=200$)

构件编号	a/mm	h_w/mm	t_f/mm	a/h_w	V_0/kN
JAA	600	600	6	1.0	231
JAB	600	600	8	1.0	241
JAC	600	600	12	1.0	259
JAD	600	600	16	1.0	266
JAЕ	600	600	20	1.0	296
JBA	900	600	6	1.5	235
JBB	900	600	8	1.5	244
JBC	900	600	12	1.5	237
JBD	900	600	16	1.5	239
JBE	900	600	20	1.5	274
JCA	1200	600	6	2.0	219
JCB	1200	600	8	2.0	223
JCC	1200	600	12	2.0	224
JCD	1200	600	16	2.0	222
JCE	1200	600	20	2.0	240

由表 2 可知,当翼缘厚度由 6mm 增加到 20mm 时, a/h_w 为 1.0、1.5 和 2.0 三组工字梁的抗剪极限承载力分别提高了 28.1%、16.5% 和 11.1%。

t_f 由 6mm 增大至 16mm 时腹板中拉力场宽度逐渐增大,但是 t_f 由 16mm 增大至 20mm 时,拉力场的变化已经不明显。说明翼缘对腹板的约束作用已经趋于稳定,翼缘厚度继续增加,约束作用基本不变。

3.3 已有计算式

任涛^[4]建议的抗剪极限承载力计算式(1)可以考虑翼缘自身刚度对抗剪极限承载力的贡献,抗剪极限承载力 V_u 由腹板承载力 V_{uw} 和翼缘自身刚度贡献的 V_f 组成。式(1)中的翼缘塑性较弯矩 M_{pf} 计算复杂。Davice^[2]

通过计算表明,不考虑压力对翼缘塑性较弯矩的折减对抗剪极限承载力计算结果影响较小。为简化计算,将不考虑压力影响的塑性较弯矩 $M_{pf} = f_y b_f t_f^2 / 4$ 替换 M_{NF} 得到式(2)。

$$V_u = \tau_{pcr} h_w t_w + \frac{4M_{pf}}{c_h} \quad (2)$$

4 抗剪极限承载力建议计算式

通过有限元计算发现,翼缘厚度较小时,式(2)计算结果 V_u 与有限元计算结果 V_0 偏差较大。为修正此偏差,引入参数 $a=t_f/t_w$ 表示翼缘和腹板相对厚度对抗剪极限承载力的影响。根据有限元计算结果对式(2)中第二部分 V_f 的计算式进行修正。修正后翼缘自身刚度对抗剪极限承载力的贡献为 V_f^* ,将 V_f^* 代入式(2)可得抗剪极限承载力 V_u^* 的计算式。

$$V_f^* = (0.15\alpha^2 - 1.75\alpha + 5.7) \frac{4M_{pf}}{c_h} \quad (3)$$

$$V_u^* = \tau_{pcr} h_w t_w + (0.15\alpha^2 - 1.75\alpha + 5.7) \frac{4M_{pf}}{c_h} \quad (4)$$

以 Q460 高强钢为例,式(4)计算结果 V_u^* 与有限元计算结果比较如表 3 所示。

表 3 有限元计算结果与式(4)结果对比(Q460)

构件编号	a/h_w	V_u^*/kN	V_0/kN	V_0/V_u	V_0/V_u^*
JAA	1.00	209	231	1.27	1.11
JAB	1.00	223	241	1.24	1.08
JAC	1.00	230	259	1.15	1.12
JAD	1.00	227	266	1.02	1.17
JBA	1.50	186	235	1.40	1.26
JBB	1.50	197	244	1.37	1.24
JBC	1.50	203	237	1.19	1.17
JBD	1.50	201	239	1.07	1.19
JCA	2.00	175	219	1.35	1.25
JCB	2.00	184	223	1.31	1.21
JCC	2.00	190	224	1.20	1.18
JCD	2.00	188	222	1.08	1.18
JCE	2.00	205	240	1.07	1.17

由表 3 可知,当翼缘厚度较小时,与式(2)相比,式(4)可适当提高翼缘自身刚度对抗剪极限承载力的贡献,与有限元计算结果较接近。当腹板长宽比相同时,式(4)结果与有限元结果偏差减小。因此,论文建议按式(4)计算高强

钢焊接工字梁的抗剪极限承载力。

5 结论

①改变初始几何缺陷幅值只会影响荷载一位移曲线的形状,对抗剪极限承载力无较大影响。

②随着翼缘厚度增大,抗剪极限承载力有较大提高。但是, t_f 由16mm增大至20mm时,腹板中张力场的变化已经不明显,说明翼缘对腹板的约束作用已经趋于稳定。

③为修正计算式(2)结果与有限元计算结果的偏差,建议了高强钢焊接工字梁的抗剪极限承载力计算式。与式(2)相比,论文建议计算式结果与有限元结果偏差减小。

参考文献

[1] DD-ENV-1993-1-1, Eurocode 3: Design of Steel Structure, part 1.1

General Rules.

- [2] Davies A.W. Bhogal A.S and Roberts T.M. Shear strength of welded aluminum alloy plate girders[J]. Proc.InsntCiv Engrs Structures& Bldgs,1998,128(8):308-314.
- [3] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [4] 任涛.工字梁腹板在局部承压和剪力作用下的弹性屈曲及极限承载力[D].杭州:浙江大学,2005.
- [5] 施刚,石永久,班慧勇.高强度钢材钢结构[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [6] GB 50205—2020 钢结构工程施工质量验收标准[S].北京:中国计划出版社,2020.