

文章编号:1000-2472(2008)02-0013-04

端板连接节点中端板强度计算^{*}

郭健^{1,2†}, 何益斌², 黄频², 肖阿林²

(1. 湖南大学设计研究院, 湖南长沙 410082; 2. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要:利用有限元数值分析软件 ANSYS 建立半刚性端板节点模型进行非线性有限元分析. 在建立模型和计算分析过程中考虑了弹塑性、大变形和接触问题, 有限元分析结果与试验结果吻合良好. 根据梁腹板、端板厚度和螺栓对端板强度影响, 对传统计算端板强度的 T 形件方法进行了修正. 分析结果表明: 根据端板的破坏模式应采用相应修正系数来考虑上述因素的影响. 该方法对端板强度的设计有一定的参考价值.

关键词:端板节点; 强度; T 形件; 有限元

中图分类号: TU375

文献标识码: A

Calculation of End-Plate Strength in End-Plate Connections

GUO Jian^{1,2†}, HE Yi-bin², HUANG Pin², XIAO A-lin²

(1. Design Institute, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: The behaviors of bolted extended end plate connections were analyzed by using the finite element software ANSYS. The analytical models took into account material nonlinearities, large displacements and geometrical discontinuities. The analysis has shown that the analytical results match well with experimental results. The traditional T-STUB member calculation method was modified, considering the effects of the bolt and the thickness of the beam web and the end plate on the strength of the end plate. The analytical results have indicated that different failure modes of end-plate have the corresponding correction coefficients. This method has some reference value for the design of end-plate.

Key words: end-plate connections; strength; T-STUB; finite element method

近几十年来, 钢结构以其优越性, 广泛用于住宅、学校、医院、办公、娱乐等多层建筑以及单层轻型厂房和大空间结构. 螺栓端板连接由于其易于安装和定位, 施工较方便而被广泛采用. 目前, 我国端板连接主要用于单层门式刚架结构, 已非常成熟和普及. 梁柱端板连接节点主要由端板、螺栓、节点域柱翼缘和腹板等部分组成, 构造特点决定了端板连接强度和刚度具有一定的复杂性. 在已提出的端板强度计算模型中, 应用最广泛的是屈服线模型^[1-3], 但是这种模型不能将端板、撬力以及螺栓力三者综合考虑, 仅仅是将撬力按照螺栓承载力的 33%^[4]来考虑. 近年来, 在

计算端板强度时, 越来越多的人采用 T 形件方法. 在端板连接中, T 形连接件是一个重要的组成部分. 柱翼缘弯曲、端板的弯曲等都可以用相应的 T 形连接件来模拟. 但是 T 形件连接与端板连接存在几何差异, 端板连接中, 由于梁腹板的存在, 在梁高范围内对端板起了加劲作用, 必然能提高端板的强度^[5]. 因此, 本文用有限元方法对端板连接节点进行了分析, 考虑了梁腹板对端板的加强作用, 引入系数 k , 根据端板的破坏模式对 T 形件方法进行修正, 使之能够用于计算端板连接节点中端板的强度.

^{*} 收稿日期: 2007-08-12

基金项目: 湖南省杰出青年基金资助项目(05JJ10009)

作者简介: 郭健(1970-), 男, 湖南益阳人, 湖南大学高级工程师, 博士研究生

†通讯联系人, E-mail: gj_gc@163.com

1 T形件方法

在计算端板强度时,根据端板强度和螺栓强度的相对强弱,端板有两种承载能力极限状态^[6].这两种承载能力分别为:1)端板弱于螺栓.当螺栓很强,而端板相对柔弱的情况下,到达极限状态时端板在螺栓中线处和焊缝边缘出现塑性铰,形成机构失效,如图1(a)所示;2)端板与螺栓强度相当.当出现这种破坏模式时,螺栓失效的同时端板在焊缝旁出现一条塑性铰线,这种破坏形式主要是由于撬力增大时,螺栓受力增加,从而导致螺栓先于螺栓轴线处的翼缘板破坏,如图1(b)所示.

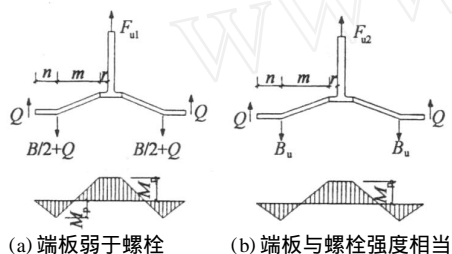


图1 T形连接件的两种破坏模式

Fig. 1 Two failure modes of T-STUB

根据图1,利用平衡关系可得两种破坏模式下的极限承载力分别为:

$$F_{u1} = 4 M_p / m, \quad (1)$$

$$F_{u2} = (2 M_p + 2 B_u n) / (m + n). \quad (2)$$

式中: F_{u1} , F_{u2} 分别为两种模式下的外加拉力; Q 为端板变形引起的撬力; B 为螺栓的拉力; B_u 为螺栓的极限受拉承载力; m 为螺栓中心到焊缝边缘的距离; n 为螺栓中心到端板边缘的距离; r 为焊缝宽度,为焊脚尺寸的0.8倍; M_p 为端板的塑性弯矩, $M_p = b t_p^2 f_y / 4$. 其中, b 为T形件宽度, t_p 为T形件厚度, f_y 为材料的屈服强度.

2 有限元分析

由于实验条件、资金、人力等因素的限制,进行大量的试验研究不太现实,况且一些数据,在现有的条件下,很难通过试验精确测量.而合理的有限元模型能够以较高的精度对实际结构的受力情况进行模拟.在一定程度上弥补了试验研究的不足,通过有限元模拟,人们能够比较准确、全面地了解端板连接的细部受力特性.本文使用有限元软件 ANSYS,通过数值计算的途径解决了理论分析的数据来源问题.为了使所建立的有限元模型具有合理性与精确性,本文对文献[7]中的试件 SC3 进行了非线性有限元

分析,有限元计算得到的极限承载力为 267.6 kN,试验值为 256.9 kN,承载力误差为 4.2%,弯矩-转角 ($M-\phi$) 曲线如图2所示,从图2中可以看出曲线从初始加载阶段到进入非线性阶段,其有限元结果与试验结果能很好地吻合,从而说明有限元方法能够很好地计算其整体受力性能.作者在 SC3 的基础上设计了8组工况,见表1.梁柱截面的设计原则是保证构件不先于节点破坏,只让其发生端板破坏.

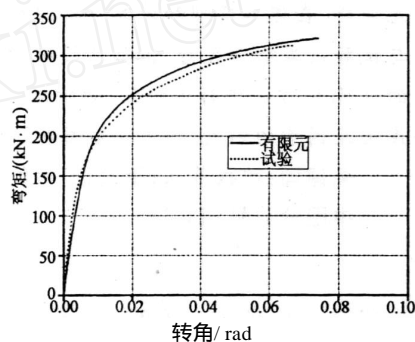


图2 SC3 弯矩-转角 ($M-\phi$) 曲线对比

Fig. 2 Comparison of $M-\phi$ curves for SC3

表1 各工况尺寸明细表

Tab. 1 Details of each load case

工况名称	端板宽度 / mm	端板厚度 / mm	螺栓直径 / mm	m / mm	n / mm
SC3	200	20	20	50	50
SP1	200	18	20	50	50
SP2	200	16	20	50	50
SD1	200	20	16	50	50
SD2	200	20	22	50	50
SM1	200	18	20	40	60
SM2	200	18	20	45	55
SB1	220	18	16	50	50
SB2	230	18	16	50	50

为减少程序计算量,建立有限元模型时进行如下简化^[3]:

1) 本文主要研究节点平面内端板的受力性能,不考虑梁柱构件的平面外屈曲,结构关于梁柱腹板中心线对称,故可以利用结构的对称性,仅建立一半的模型,如图3所示.

2) 将螺栓视为一个整体,其有限元模型如图4所示.由于整个加载过程中,螺栓头和螺母与端板一

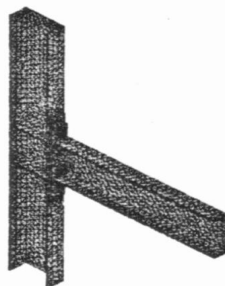


图3 节点的有限元模型
Fig. 3 FE model of a connection

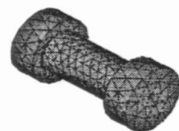


图4 高强螺栓有限元模型
Fig. 4 FE model of a bolt

直保持紧密接触,所以建模时,不考虑螺栓头和螺母与端板接触分析,将其与端板粘结.

2.1 单元类型

本文所有节点均采用三维 10 节点四面体单元 SOLID92. 节点螺栓预拉力的施加通过 PSMESH 生成三维预拉单元 PRETS179 来实现;端板和柱翼缘之间的接触通过创建三维接触对来模拟,将端板表面定义为接触面,将柱翼缘表面定义为目标面,分别用三维 8 节点面-面接触单元 CONTA174 和三维目标单元 TARGE170 模拟. 接触面间抗摩擦因数为 0.44.

2.2 材料模型

梁柱截面尺寸分别为 H300 mm ×200 mm ×8 mm ×12 mm 和 H300 mm ×250 mm ×8 mm ×12 mm. 梁柱均为 Q345B 钢,应力-应变关系为理想的弹塑性模型,屈服后弹性模量均为零,对厚度 > 16 mm 的钢板,屈服强度为 363.3 MPa,弹性模量为 204 227 MPa;对厚度 ≤ 16 mm 的钢板,屈服强度为 391.1 MPa,弹性模量为 190 707 MPa. 螺栓为 10.9 级摩擦型高强度螺栓. 高强度螺栓(包括螺栓头、螺栓杆和螺母)的应力-应变关系采用三线性模型. 屈服准则采用 Von Mises 屈服准则^[8],材料屈服后采用流动理论和随动强化准则.

表 2 高强度螺栓的材料性质

Tab.2 Material properties of bolt

应力/MPa	995	1 160	1 160
应变	0.004 83	0.136	0.15

2.3 边界条件和计算过程

对梁柱腹板中心面施加对称约束,同时对柱脚施加固支约束,所有试件的分析过程都分两个荷载步:第一荷载步施加螺栓预紧力荷载;第二步,锁定第一步中螺栓预拉力产生的位移,在试件的加载位置施加强制位移荷载. 这样的加载顺序完全符合试件的实际试验过程以及实际工程中螺栓受力的先后顺序. 第一步采用小变形静力分析,第二步采用大变形静力分析,即考虑二阶效应.

3 非线性有限元结果

限于篇幅,本文仅给出 SP1 和 SD1 端板屈服时典型应力云图,见图 5 和图 6. 有限元分析计算得出的当端板屈服时各节点梁受拉翼缘塑性承载力见表 3. 由表 3 可知,梁腹板对于端板的加强作用主要取决于端板和梁腹板的相对刚度,其加强作用随着端板厚度和宽度的增加而降低.

图 7 和图 8 为 SP1 和 SD1 节点螺栓拉力随梁翼缘拉力变化图,图 7~图 8 中螺栓拉力是由节点



图 5 SP1 端板屈服时 Von Mises 应力分布

Fig.5 The distribution of Von Mises stresses as end-plate yield for SP1

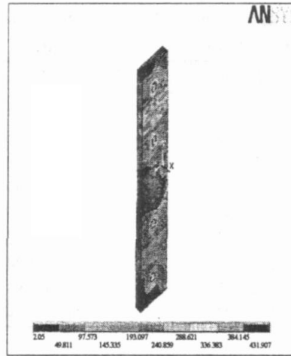


图 6 SD1 端板屈服时 Von Mises 应力分布

Fig.6 The distribution of Von Mises stresses as end-plate yield for SD1

表 3 近似计算结果与有限元结果比较

Tab.3 Comparison of the results of FE method and TSTUB method

工况名称	T 形件梁翼缘 极限承载力/kN	有限元梁翼缘 极限承载力/kN	破坏模式
SC3	290.6	329.3	端板屈服
SP1	235.4	281.1	端板屈服
SP2	186.0	232.2	端板屈服
SD1	228.9	258.4	端板、螺栓屈服
SD2	290.6	333.1	端板屈服
SM1	294.2	361.1	端板屈服
SM2	261.6	317.4	端板屈服
SB1	220.9	249.0	端板、螺栓屈服
SB2	226.8	242.8	端板、螺栓屈服

弯矩引起的,不包括预拉力. 由图 7~图 8 可知,当试件端板达到破坏模式时,受拉翼缘外侧螺栓拉力与内侧螺栓拉力比值为 0.988 和 1.066. 这就表明 T 形件理论中假定梁受拉翼缘两侧螺栓拉力相等的做法是可取的,其余试件的具体结果见表 4 所示.

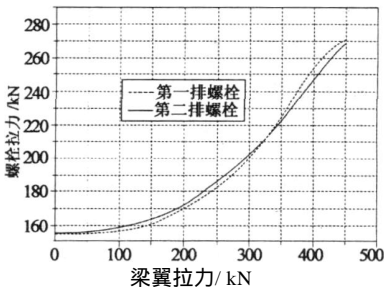


图 7 SP1 梁翼缘拉力-螺栓拉力图

Fig.7 The tension relations of beam flange and bolt for SP1

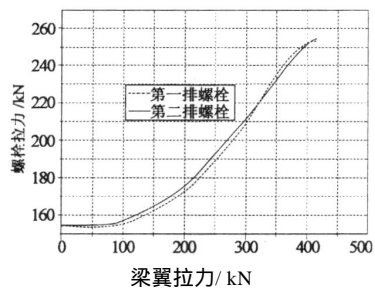


图 8 SD1 梁翼缘拉力-螺栓拉力图
Fig. 8 The tension relations of beam flange and bolt for SD1

表 4 受拉梁翼缘内外侧螺栓拉力比较
Tab. 4 Comparison of the tension of bolts inside and outside of the beam flange

工况名称	第一排螺栓拉力/kN	第二排螺栓拉力/kN	比值
SC3	207.192	204.554	1.013
SP1	192.926	195.336	0.988
SP2	183.108	185.369	0.988
SD1	141.452	140.609	1.006
SD2	233.640	234.159	0.998
SM1	223.456	214.812	1.040
SM2	202.846	204.824	0.990
SB1	150.824	153.107	0.985
SB2	153.730	152.359	1.009

4 修正的 T 形件方法

端板连接虽然在形式上与 T 形件相似,但由于梁腹板的存在,在梁高范围内对端板起了很好地加强作用.本文的关键是为了选取一个参数,能够比较准确地描述 T 形件强度与端板之间的关系,即 $F = kF_T$. F 为真实拉力, F_T 为由 T 形件计算得到的拉力.由表 3 可知,梁腹板对于端板的加强作用主要取决于两者的相对刚度,其加强作用随着端板强度的增加而降低.因此,假设参数 k 与梁腹板厚度 t_{bw} ,梁腹板高度 h_{bw} ,端板厚度 t_{ep} 和端板宽度 b_{ep} 有关,并且应该具有如下的特性: 当 $t_{bw}, h_{bw} \rightarrow 0$ 时, $k = 1$; 当 $t_{bw}, h_{bw} \rightarrow \infty$ 时, k 应该逼近于一个定值; 参数 k 是变量的 t_{bw}, h_{bw} 的增函数; 当 $t_{ep}, b_{ep} \rightarrow 0$ 时, k 应该逼近于一个定值; 当 $t_{ep}, b_{ep} \rightarrow \infty$ 时, k 应该逼近于 1; 参数 k 是变量的 t_{ep}, b_{ep} 的减函数.因此假设其表达式为:

$$k = 1 + 1 / (a_1 t^2 + a_2). \tag{3}$$

式中: $t = t_{ep} b_{ep} / t_{bw} h_{bw}$, a_1, a_2 为待定系数.当破坏模式为端板时,经计算可取 $a_1 = 2.35, a_2 = -1.14$; 当破坏模式为端板、螺栓屈服时,可取 $a_1 = 2.33, a_2 = -5.15$.由此可得,修正后的端板强度计算表达式为:

$$F_{u1} = 4 k M_p / m, \tag{4}$$

$$F_{u2} = 2 k M_p / (m + n) + 2 B_u n / (m + n). \tag{5}$$

修正后得到的梁受拉翼缘拉力值与有限元结果比较见表 5,从表 5 中可以看出,修正后的结果与有限元结果吻合良好.

表 5 有限元结果与修正结果的比较
Tab. 5 Comparison of the results of FE method and amended value

工况名称	有限元梁翼缘 极限承载力/kN	修正后梁翼缘 极限承载力/kN	误差/ %
SC3	329.3	334.8	1.7
SP1	281.1	281.5	0.1
SP2	232.2	235.0	1.2
SD1	258.4	257.9	- 0.2
SD2	333.1	334.8	0.5
SM1	361.1	351.8	- 2.6
SM2	317.4	312.8	- 1.4
SB1	249.0	248.6	- 0.2
SB2	242.8	246.2	1.4

5 结 论

综上所述,通过有限元分析,考虑了端板强度模型中梁腹板对端板强度的影响.根据不同的破坏模式,作者提出的参数 k 能够比较准确地描述 T 形件强度与端板屈服拉力值之间的关系.可以用来计算端板连接节点中端板的强度,为端板强度分析提供了依据.

参考文献

[1] MOFID M. Analytical approach on endplate connections: ultimate and yielding moment[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2005,131(3): 449 - 456.

[2] KOROL R M, GHOBARAH A. Extended endplate connections under cyclic loading: behavior and design[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1990,16 (4): 253 - 480.

[3] BAHAAARI M R, SHERBOURNE A N. 3D simulation of bolted connections to unstiffened columns—II T-stub connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1996,40 (3): 189 - 223.

[4] YEE YL, MELCHERS R E. Moment-rotation curves for bolted connections[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE,1986,112(3): 615 - 635.

[5] 郭秉山, 苏云鹏, 阎月梅. 梁柱端板连接节点的端板强度计算模型[J]. 西安科技学院学报, 2004, 24(1): 41 - 45.

[6] GUO B S, SU Y P, YAN Y M. An end-plate strength model of beam-column end-plate connections[J]. Journal of Xi 'An University of Science and Technology, 2004, 24(1): 41 - 45. (In Chinese)

[7] 陈邵藩. 门式刚架端板螺栓连接的强度和刚度[J]. 钢结构, 2000, 15(1): 6 - 11.

[8] CHEN S F. The strength and stiffness of bolted end-plate connection in portal frames[J]. Steel Construction, 2000, 15(1): 6 - 11. (In Chinese)

[9] 施刚, 石永久, 王元清, 等. 多层钢框架半刚性端板连接的试验研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(3): 391 - 394.

[10] SHI G, SHI YJ, WANG Y Q. Experimental study of semi rigid endplate connections in multi-story steel frames[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(3): 391 - 394. (In Chinese)

[11] 舒兴平, 郑伯兴. KT 型相贯节点极限承载力非线性有限元分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2006, 33 (6): 1 - 5.

[12] SHU X P, ZHENG B X. Nonlinear finite element analysis of the ultimate strength on tubular KT-Joints[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2006, 33 (6): 1 - 5. (In Chinese)