

文章编号:1008-1542(2012)04-0360-04

ST12 材质焊接工字形钢支撑低周疲劳性能模拟及分析

于海丰¹, 邹丹丹²

(1. 河北科技大学建筑工程学院, 河北石家庄 050018; 2. 河北科技大学图书馆, 河北石家庄 050018)

摘要:前期的滞回性能模拟证实有限元可较精确地模拟 ST12 材质焊接工字形钢支撑试件表面的应力应变分布。采用基于应力应变的 3 种临界面损伤模型预测了支撑的低周疲劳损伤及寿命, 结果表明临界面法可较精确预测裂纹开裂位置, 预测结果均低于试验结果。基于临界面法的预测结果回归了寿命估算公式, 并与基于试验结果的估算公式进行了比较分析, 证实了影响支撑低周疲劳性能的主要因素是长细比和翼缘宽厚比。建议设计支撑时在满足“小震”不失稳的前提下, 在规范允许的范围, 尽量采用具有较大长细比和较小翼缘宽厚比的支撑, 以延长支撑的低周疲劳寿命。

关键词:工字形钢支撑; 低周疲劳; 数值模拟; 长细比; 翼缘宽厚比

中图分类号: TU391; TU317.1 文献标志码: A

Numerical simulation and analysis on low cycle fatigue behavior of ST12 welded I-section steel bracing members

YU Hai-feng¹, ZOU Dan-dan²

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China; 2. Library, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China)

Abstract: The research has demonstrated that the stress and strain distribution on the surface of the ST12 welded I-section steel bracing members gained by numerical analysis is in accordance with the true distribution. In this paper, three critical plane damage models, established based on the relationship between the strain and the low cycle fatigue life, are used to simulate the damage and predict the low cycle fatigue lives of the ST12 welded I-section bracings. The results show that, the location of the crack initiation can be predicted accurately, and the predicted lives are all less than the test ones. The empirical formulas are regressed and compared with the empirical formula obtained by the test results. It is verified that the main factors affecting the low cycle fatigue life are the flange width-thickness ratio b/t and the slenderness λ . Under the premise of meeting the design requirement of "no buckling under frequent earthquake" and the allowable range of standards, it is suggested that small b/t and large λ should be adopted in the brace design.

Key words: welded I-section steel bracing member; low cycle fatigue property; numerical simulation; slenderness ratio; flange width-thickness ratio

支撑的低周疲劳性能对中心支撑钢框架结构的抗震性能有至关重要的影响。在罕遇地震时, 一旦支撑

收稿日期: 2012-02-14; 责任编辑: 冯 民

基金项目: 河北省科技支撑计划项目(10276914); 河北科技大学校立基金资助项目(XL201032); 河北科技大学博士科研启动基金资助项目(QD201052)

作者简介: 于海丰(1980-), 男, 辽宁兴城人, 讲师, 博士, 主要从事钢结构抗震方面的研究。

断裂,结构易在局部层间形成薄弱层甚至可能导致结构整体倒塌^[1],因此对其低周疲劳性能展开研究是十分有意义的。

在文献[2]试验研究及文献[3]支撑滞回性能模拟的基础上,笔者对文献[2]的低周疲劳性能试验进行了基于临界面法的数值模拟,综合考虑了材料、几何非线性的影响,详细分析了支撑的裂纹开裂位置,预测了支撑的低周疲劳寿命。基于数值模拟结果,回归了支撑低周疲劳寿命估算公式,并与基于试验结果的寿命估算公式进行了对比,分析了影响支撑低周疲劳性能的相关参数,给出了支撑设计的相关建议。

1 试验概况及数值模型的建立

文献[2]试验试件为两端铰接 ST12 材质焊接工字形截面钢支撑。试件基本尺寸如表 1 所示。为模拟试件在罕遇地震时受到的拉、压载荷及试验安全有效的进行,试验时先在弹性范围内预加反复载荷干 $0.25\delta_y$,干 $0.5\delta_y$,干 $0.75\delta_y$,之后进入弹塑性等幅对称加载阶段。试验在室温条件下进行。为模拟地震时的应变速率,循环周期取 7.5 s 。

表 1 试件情况一览表
Tab. 1 Specimens of bracing members

试件编号	λ	h_0/t_w	b/t	t/mm	t_w/mm	$\Delta\delta/\delta_y$
PS1-1/2/3	127.4	34.61	7.05	2.92	2.50	12
PS2-1/2/3	112.2	17.11	8.80	2.50	2.50	12
PS3-1/2	101.7	42.61	11.35	2.92	2.50	12
PS4-1/2	91.7	21.01	13.30	2.50	2.50	12
PS5-1/2/3	84.5	46.71	5.75	2.92	2.50	12
PS6-1/2/3	74.2	25.31	7.80	2.50	2.50	12
PS7-1/2/3	64.4	55.31	10.55	2.92	2.50	12
PS8-1/2	61.1	29.61	12.30	2.50	2.50	12
A1-C6-1/2/3	80.1	21.61	11.30	2.50	2.50	6
A1-C8-1/2/3	80.1	21.61	11.30	2.50	2.50	8
A1-C10-1/2/3	80.1	21.61	11.30	2.50	2.50	10

注: λ 是钢支撑绕弱轴长细比; h_0/t_w 是支撑腹板净高(腹板高扣除 2 倍的焊角尺寸)与腹板厚度比值; b/t 是工字形钢支撑翼缘净悬伸部分(翼缘悬伸部分扣除 1 倍的焊角尺寸)与翼缘厚度比值; t, t_w 分别是翼缘与腹板厚度; $\Delta\delta$ 是支撑的最大轴向受拉位移与最大轴向受压位移之和; δ_y 为钢支撑轴向受拉屈服位移。

文献[3]借助 ABAQUS 软件,采用壳元对 ST12 材质焊接工字形钢支撑的滞回性能进行了模拟,结果表明有限元可较精确模拟支撑试件表面的应力应变分布。基于此研究结论,笔者采用文献[3]的数值模型开展支撑的低周疲劳性能研究,模型如图 1 所示。

2 低周疲劳损伤预测

支撑在往复载荷下的疲劳问题是比较典型的多轴低周疲劳问题。目前关于多轴低周疲劳损伤预测多采用临界面法^[4]。常用的临界面损伤模型有主应变模型^[4]、最大剪应变模型^[4]以及 BROWN-MILLER 组合应变模型^[4]。这些模型实质上是建立了应力应变与循环次数 N_f 的关系。如式(1)所示的

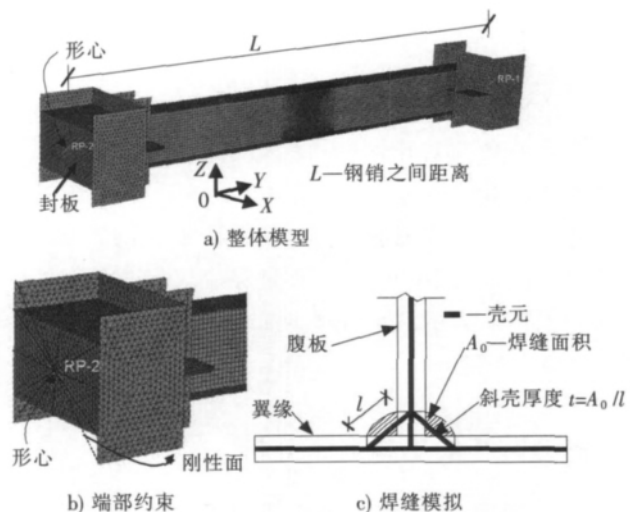


图 1 有限元模型
Fig. 1 Numerical model

主应变模型:

$$\epsilon_a = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \tag{1}$$

式中: ϵ_a 为经历最大主应变振幅平面上的主应变振幅; $\sigma'_f, b, \epsilon'_f$ 和 c 分别是与疲劳相关的系数或指数, 称为材料疲劳性能参数; σ_m 为平均应力。

笔者借助上述 3 种临界面损伤模型(材料疲劳性能参数由 Seeger 近似法^[5]估算)估算了支撑的裂纹萌生寿命。基本步骤如下: 将通过 ABAQUS 弹塑性有限元分析得到的试件上下表面积分点处应力-应变张量结果分解到该积分点的每一个可能临界面上(以 10° 为增量幅), 并对应变荷载谱进行雨流法计数及损伤计算; 一旦某个积分点在可能临界面上的累积损伤(按 Miner 线性累积损伤准则^[6]计算)最大值等于 1.0 时, 裂纹萌生, 此时的循环次数即为裂纹萌生寿命。

3 裂纹开裂位置及寿命预测

图 2 给出了裂纹萌生时(按照主应变模型估算), 典型试件 PS4-1 跨中区域翼缘疲劳损伤分布规律。可见, 局部屈曲越严重的地方, 损伤也越大。预测裂纹最先在弯曲受压侧翼缘板尖端局部屈曲方向内侧出现, 与文献[2]的模拟结果相反, 与试验结果一致。由分析知, 翼缘板件属于薄板, 局部屈曲位置的变形以弯曲变形为主, 拉压载荷交替变化过程中, 沿支撑杆件轴向方向板件弯折方向内侧应变的变化量应高于板件弯折方向外侧, 故板件弯折方向内侧的损伤应高于外侧, 这也证实了本文基于临界面法的模拟结果和试验观测到的裂纹位置是正确的。

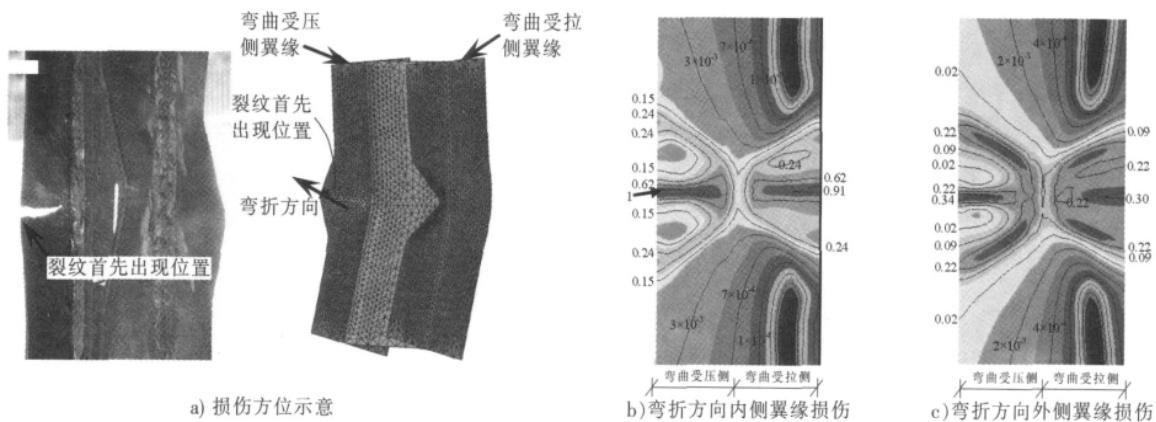


图 2 试件 PS4-1 损伤分布
Fig. 2 Fatigue damage of the specimen PS4-1

图 3 给出了基于 3 种临界面损伤模型的预测寿命与试验实测寿命的对比图。可见, 预测寿命基本在试验实测寿命的 3 倍分散带内, 且均低于试验实测寿命, 主要原因在于试验实测值是借助肉眼观测到的宏观裂纹时的寿命值, 数值模拟中的预测寿命仅仅是积分点处的累积损伤最大值达到 1.0 时的寿命, 二者在物理意义上存在一定差别。

4 低周疲劳性能影响因素分析

文献[2]基于试验实测寿命回归了估算支撑低周疲劳寿命的经验公式, 但该公式没有考虑焊缝对翼缘和腹

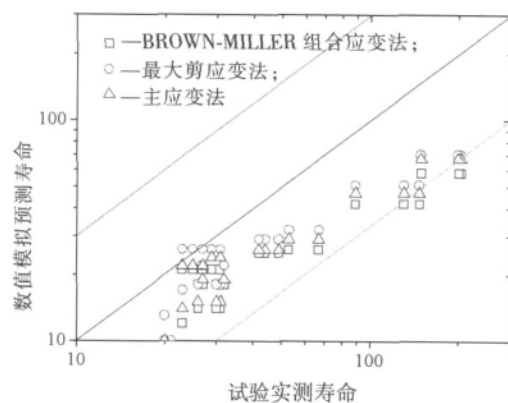


图 3 试验寿命与预测寿命比较
Fig. 3 Comparison of the predicted and experimental lives

$$N_f = 3.16 \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_y} \right)^{-1.07} \lambda^{1.67} \left(\frac{h_0}{t_w} \right)^{0.53} \left(\frac{b}{t} \right)^{-1.8} \quad (2)$$

考虑到试验实测值受观测者的影响较大,该经验公式不能较准确考虑各因素对支撑低周疲劳性能的影响,而基于临界面法预测的支撑低周疲劳寿命则不受这些因素的影响。因此,笔者基于临界面法的预测结果回归了支撑低周疲劳寿命的估算公式,如式(3)一式(5)所示。

$$\text{主应变模型:} \quad N_f = 5.42 \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_y} \right)^{-1.17} \lambda^{1.89} \left(\frac{b}{t} \right)^{-1.89} \quad (3)$$

$$\text{最大剪应变模型:} \quad N_f = 7.84 \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_y} \right)^{-1.04} \lambda^{1.68} \left(\frac{b}{t} \right)^{-1.73} \quad (4)$$

$$\text{BROWN-MILLER 组合应变模型:} \quad N_f = 42.95 \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_y} \right)^{-0.87} \lambda^{1.17} \left(\frac{b}{t} \right)^{-1.72} \quad (5)$$

对照式(2)一式(5),可见 λ 越大, b/t 越小,支撑低周疲劳寿命越高;式(2)认为 h_0/t_w 越大,支撑低周疲劳寿命越高,式(3)一式(5)中没有考虑 h_0/t_w 对支撑低周疲劳寿命的影响。从分析角度讲, h_0/t_w 越大,腹板对翼缘约束作用越小,局部屈曲越容易出现,支撑低周疲劳寿命越低,但考虑到支撑低周疲劳开裂主要集中在翼缘尖端,受腹板高厚比影响不会太大,这也是式(3)一式(5)忽略该因素、式(2)直接将该因素对支撑低周疲劳寿命影响给出相反结论的原因。

以上研究表明,在罕遇地震时某些支撑不可避免会出现失稳的情况下,为避免其断裂而退出工作,支撑设计时在满足“小震不失稳”及相关规范^[7]允许的前提下,应该尽量采用较小翼缘宽厚比和较大长细比。

5 结 语

在综合考虑材料、几何非线性影响的基础上,对 ST12 材质焊接工字形钢支撑的低周疲劳性能进行了基于临界面法的数值模拟研究。结果表明,临界面法可较精确地预测裂纹萌生位置;预测寿命基本在实测寿命的3倍分散带内,且均低于实测寿命。在此基础上,基于试验实测值和临界面法预测结果分别回归了支撑裂纹萌生寿命的估算公式,并进行了对比分析,给出了影响支撑低周疲劳性能的主要因素是长细比和翼缘宽厚比。建议在满足“小震不失稳”及相关规范允许的前提下,支撑应基于采用较小翼缘宽厚比和较大长细比的原则进行设计。

参考文献:

- [1] RAI D C, GOEL S C. Seismic evaluation and upgrading of chevron braced frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(8): 971-994.
- [2] 连耐安. 焊接工字形钢支撑低周疲劳性能及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [3] 于海丰, 连耐安. ST12 材质焊接工字形钢支撑滞回性能数值模拟[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology), 2011, 32(6): 628-634.
- [4] 英国 FE-SAFE 公司驻京办事处. FE-SAFE 软件使用指南[M]. [S. l.]: [s. n.], 2003.
- [5] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [6] MINER M. Cumulative damage in fatigue [J]. Journal of Applied Mechanics, 1945, 12(3): 159-164.
- [7] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].

本刊开设国家级基金项目产文绿色通道

为提高《河北科技大学学报》的刊文质量,缩短优质稿件的审稿、发表周期,本刊对国家级基金项目产文实行快审、快发政策,并在中国知网优先出版。

(本刊编辑部)