

## 考虑钢框架节点局部断裂的滞回模型

刘永明, 陈以一, 陈扬骥

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

**摘要:** 在杆端多弹簧弹塑性模型中引入了断裂机制, 采用根据 J 积分断裂模量法建立的判别裂纹失稳的失效评定图设定模型参数. 通过和有关试验结果比较, 验证了建立的模型及算法可以充分反映局部断裂后节点滞回性能的主要特点. 根据若干算例结果, 归纳出适用于整体结构分析的考虑节点局部断裂的非线性弹簧模型.

**关键词:** 钢框架; 节点; 断裂; 滞回特性; 数值模拟

中图分类号: TU 311.3

文献标识码: A

文章编号: 0253-374X(2003)05-0525-05

## Hysterical Model of Steel Frame Connection Considering Partial Fracture

LIU Yong-ming, CHEN Yi-yi, CHEN Yang-ji

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The fracture mechanism is introduced into an elastic-plastic model, which is composed of several non-linear springs at the end of the members. The failure assessment diagram of fracture based on the J integral theory is adopted for the calibration of the model parameters. By comparison with the experimental results, it is shown that the established model and the computation procedure can fully reflect the main characters of the hysterical behavior after partial fracture. A simplified non-linear model for connection fracture, which can be employed for whole structural analysis, is then proposed based on numerical results obtained.

**Key words:** steel frame; connection; fracture; hysteric behavior; numerical simulation

1994 年美国北岭(Northridge)地震和 1995 年日本神户(Kobe)地震引发的对钢框架梁柱节点断裂的研究主要集中在如下方面<sup>[1]</sup>:① 断裂机理的阐明;② 提高节点抗断裂性能的构造措施和节点形式的开发,以及高性能高强度钢材的开发;③ 节点断裂后结构整体行为的评估. 最后一方面的研究,不仅可以为受损钢结构的诊断和寿命估计提供一种量化分析的工具,也为了解结构连续性局部破坏后的性能提供一种方法. 为实现这一任务,就需要有一个能考虑节点断裂影响的数值计算模型,这就是本文研究的目的.

作为基本研究对象,本文有如下约定:

(1) 由 H 形截面贯通柱和 H 形截面梁采用焊接方法构成的刚性连接节点.

(2) 节点构造属于 pre-Northridge 型,即存在翼缘焊接垫板未予处理而留下的初始裂纹<sup>[2]</sup>. 虽然构造形式的改进可以在今后消除垫板处的显性裂缝,但焊接结构中不可避免的焊接裂纹或缺陷能一般作为初始裂纹源,因而本约定不失一般性.

(3) 断裂发生在节点端部的梁构件上<sup>[3]</sup>,也即本文暂不讨论裂纹向柱子一侧扩展的现象. 所谓节点断

收稿日期: 2002-05-16

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(560.3500)

作者简介: 刘永明(1977-),男,江苏泰兴人,硕士生. E-mail: ymlowell@hotmail.com



裂,严格地说,被本文限制在节点处梁截面的断裂上。

(4) H型截面梁的裂纹始于下翼缘<sup>[4]</sup>,裂纹也可以向梁的腹板扩展.但本文只限于讨论 I 型断裂的模式。

(5) 与前一约定相关,本文研究对象中,梁柱连接节点处,梁端翼缘和腹板都有可能发生裂纹扩展,但不考虑节点处构件的完全断裂,这就是所谓“局部断裂”的含义.而这种局部断裂正是北岭和神户地震中节点破坏的主要现象<sup>[4]</sup>。

(6) 节点区域在经历了较大的塑性变形之后才发生了裂纹扩展和断裂.这一约定主要依据神户地震后的调查资料<sup>[5]</sup>,但对抗震结构而言,在设计中一般允许大震下结构发生较大的塑性变形,这一约定是符合实际的。

### 1 计算模型

考虑节点局部断裂的计算模型是在文献[6]介绍的弹塑性节点域模型中引入断裂机制后形成的.弹塑性节点域模型将钢构件分成弹性单元和弹塑性单元,后者由数个弹塑性轴向弹簧、分别平行于截面主轴方向的两个剪切弹簧和一个抗扭弹簧构成,设置在构件可能产生塑性变形的区域,各单元之间用节点联结.弹塑性轴向弹簧的本构关系如图 1 所示,可以考虑钢材屈服、强化、Bauschinger 效应以及用宏观描述方法表示受压板件由于弹塑性局部失稳后的承载力退化.图 1 中的  $K$  值为各线段的斜率(刚度),左下标  $t, c$  分别表示受拉和受压;  $P$  为线段转折点的轴力,右下标  $y, u$  表示屈服或极限值;  $\psi \delta_p$  为塑性变形引起的滞回线平移量,  $\psi$  为骨架移动系数。

引入断裂机制后,就需要对图 1 所示的本构关系进行修正.因为断裂只发生在板件受拉时,因而,弹塑性弹簧在受拉侧达到临界值时就需要考虑断裂.断裂一旦发生,强度将发生突然跌落(图 2 中 A 点),直至为零(为了计算上的方便,可以取为一个很小的值,例如 0.01 倍断裂荷载,参见图 2 中 B 点).如果裂纹张开阶段保持加载,则定义为“空载加载”(图 2 中 BC 段)——位移增加,而力保持不变;如果出现反向加载,只要裂纹尚未闭合,表现为“空载卸载”(图 2 中 CD 段)——位移减少,而力保持不变.当裂纹闭合以后,认为该弹簧恢复了刚度和强度,和一般的未断裂弹簧等同对待。

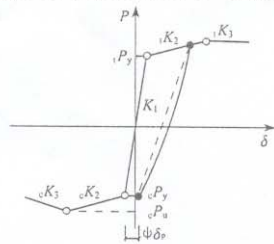


图 1 无缺陷弹簧骨架曲线和滞回路径  
Fig.1 Loading-to-unloading curve of unfractured spring

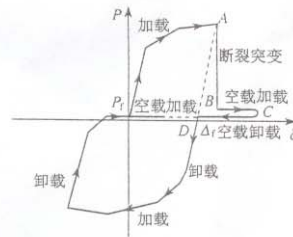


图 2 断裂弹簧的加载卸载示意图  
Fig.2 Loading-to-unloading curve of fractured spring

弹塑性区域的若干轴向弹簧在计算中遵守图 2 的法则,在不同的受力条件下可以表现出不同的力学行为.为实现图 2 的加卸载路径,确定图中曲线的转折点 A(弹簧断裂的临界点)是至关重要的。

对于本文所讨论的钢框架节点域的局部断裂问题,经比较,选择  $J$  积分作为断裂分析参量,采用 EPRI 推荐的弹塑性插值算法<sup>[7]</sup>,将复杂的节点域离散为一系列简单的含裂纹板件,计算中这些含裂纹板件简化为含初始缺陷的轴向弹簧.对于这些含裂纹板件,可以通过线弹性和纯塑性  $J$  积分的插值计算得到各种荷载下的  $J$  积分值.得到  $J$  积分后,结合材料的某些断裂参量,就可以对含裂纹弹簧进行分析。

根据作者在文献[8]中描述的断裂性能试验数据,可以得到两种钢材(Q235c, Q345c)的裂纹失稳扩展的失效评定曲线<sup>[9]</sup>.实际计算中采用增量法,在每一增量步中对裂纹状态进行判别:若不满足失效评定曲线,则计算本计算步内由于荷载增量引起的裂纹稳态扩展量,并将其累计到裂纹的初始长度中;若满足失效评定曲线方程,则认为裂纹发生失稳扩展,该弹簧失效.此时需重新计算截面性质,更新计算用刚度矩