

文章编号:1673-9469(2015)03-0025-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2015.03.006

具有不同焊接孔的梁柱焊接节点非线性分析

陈雨

(同济大学 建筑工程系,上海 200092)

摘要:为了研究不同的焊接孔对节点延性的影响,对具有不同焊接孔的梁柱焊接节点进行了循环荷载作用下的非线性分析。通过改变焊接孔的外形和尺寸来获得不同的有限元模型,节点的延性以焊接孔与梁翼缘相接处的几个力学参数来衡量。分析结果表明,采用中国建筑抗震规范推荐的焊接孔在焊接孔根部产生相对较大的累积塑性应变,而美国 FEMA 推荐的焊接孔在根部具有较高的三轴比,文献资料中的试验数据证明了结论的正确性。

关键词:梁柱焊接节点;焊接孔;非线性分析;延性

中图分类号:TU392.3 TU317.1

文献标识码:A

Nonlinear analysis of welded beam – to – column connections with different weld access holes

CHEN Yu

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

Abstract: In this paper, nonlinear analysis of welded beam – column connection with different weld access holes under cyclic loading were performed, with the objective of gaining a better understanding of the effect of different weld access holes on inelastic behavior of connections. The different FEMs employed in this research were derived by changing the shape and size of weld access holes. The ductility of connection subassemblies with different weld access holes was measured in terms of several mechanical parameters sampled at the root of weld access hole. Results indicate that connections with the weld access holes recommended by “Code for seismic design of buildings” in China produce relatively the maximum accumulated plastic strain while the weld access holes recommended by FEMA have the highest stress triaxiality ratio. The conclusion drawn from this paper is verified by experimental data available in the literature.

Key words: welded beam – column connection; weld access hole; nonlinear analysis ;ductility

为了形成连续的梁上下翼缘对接焊缝,梁柱焊接节点通常需要在梁腹板进行切角(焊接孔)。然而,1994年美国 Northridge 地震和 1995年日本 Kobe 地震出现大量梁柱焊接节点破坏事故,震害调查结果表明,部分梁柱焊接节点破坏发生在焊接孔处。一般认为,焊接孔处的破坏是由于焊接孔和梁翼缘相接处应力集中和焊接热影响使钢材韧性降低造成的。Nakashima 等^[1]对日本常用的梁柱焊接节点进行了试验研究,研究结果表明不同的焊接孔构造对节点延性影响较大,并提出了较为有利的焊接孔构造;El – Tawil^[2]有限元分析结果表明,增加焊接孔的尺寸易于导致焊接孔与翼缘相接处延性断裂;Stojadinovic 等^[3]对十个梁

柱焊接节点进行低周反复加载试验,发现几乎所有的试件破坏发生在焊接孔与梁翼缘相接处;Ricles 等^[4]对采用九种不同焊接孔的梁柱焊接节点进行了非线性有限元分析,得出较为合理的焊接孔构造,并进行了试验验证,该焊接孔被美国 FEMA 所采用。为了评估不同的焊接孔对节点延性的影响,本文分别选取中国建筑抗震设计规范推荐的焊接孔,Nakashima 推荐的焊接孔和 Ricles 推荐的焊接孔,进行循环荷载作用下的非线性分析。

1 与本文有关的几个力学参数

延性断裂是结构钢在单调荷载作用下破坏的

收稿日期:2015-03-27

基金项目:上海市重点学科研究计划项目(0210121002)

作者简介:陈雨(1976-),男,安徽濉溪人,博士,主要从事钢结构破坏的非线性分析等研究。

主要模式,细观力学认为钢材的延性断裂主要是由于金属中的微空洞引起的,金属材料在拉应力的作用下,引起微孔洞的形核和增长,最后微孔洞的结合形成宏观裂纹,材料发生破坏。Kanvinde 等 [5] 提出了预测结构钢延性断裂的 VGI (Void Growth Index) 模型和 SMCS (the Stress Modified Critical Strain) 模型。

$$VGI_{critical} = \frac{\ln\left[\frac{R}{R_0}\right]_{critical}}{c} = \int_0^{\varepsilon_p^{critical}} \exp\left[\frac{1.5\sigma_m}{\sigma_e}\right] d\varepsilon_p \quad (1)$$

其中 R 是微孔洞当前时刻的直径; R_0 是初始时刻微孔洞的直径; σ_e 是 MISES 等效应力, σ_m 平均应力或静水压力, $\frac{\sigma_m}{\sigma_e}$ 称之为三轴比; ε_p 是等效塑性应变,又称之为 Mises 塑性应变; $d\varepsilon_p$ 是增量形式的等效塑性应变,由下式定义:

$$\varepsilon_p = \sqrt{\frac{2}{3}\varepsilon_p^{ij} \cdot \varepsilon_p^{ij}}; d\varepsilon_p = \sqrt{\frac{2}{3}d\varepsilon_p^{ij} \cdot d\varepsilon_p^{ij}} \quad (2)$$

当计算得到的满足下式时,即认为材料发生破坏。

$$VGI = \int_0^{\varepsilon_p} \exp\left[\frac{1.5\sigma_m}{\sigma_e}\right] d\varepsilon_p \geq VGI_{critical} \quad (3)$$

在单调比例加载且变形较小的情况下,可以认为三轴比在加载过程中保持不变,且与等效塑性应变保持独立,可以得到 SMCS 模型:

$$SMCS = \varepsilon_p - \varepsilon_p^{critical} = \varepsilon_p - \alpha \exp\left[-1.5\frac{\sigma_m}{\sigma_e}\right] \geq 0 \quad (4)$$

其中 $VGI_{critical}$ 和 α 为材料韧性参数,通过带圆弧槽口的拉杆试验结合有限元分析确定。

虽然 VGI 模型和 SMCS 模型可以较准确地预测结构钢的延性断裂,但是应用该模型需要把有限元模型的单元尺寸设定为 0.1 mm 的量级,由于目前的计算机性能有限,应用该模型分析实际的大型结构构件仍然非常困难。

根据(4)式,本文定义断裂指数 RI (Rupture Index):

$$RI = \varepsilon_p \cdot \exp\left[1.5\frac{\sigma_m}{\sigma_e}\right] \quad (5)$$

可见,在一定的加载条件下,断裂指数越大的构件越接近延性断裂,在位移控制的单调荷载作用下所能达到的最大位移越小,延性越差,因此可以应用断裂指数 RI 来评估结构或构件的相对延性。

本文应用断裂指数 RI 和等效塑性应变来评估具有不同焊接孔的节点在单调荷载作用下的延

性。同时,本文应用纵向塑性应变时程曲线和累积塑性应变来评估节点在循环荷载作用下的延性,Kanvinde 等认为累积塑性应变显著降低了材料的韧性参数。

$$\varepsilon_p^{accumulated} = \int d\varepsilon_p \quad (6)$$

2 有限元模型的校核

本文有限元模型选取文献 [6] 中梁柱焊接节点试件,试件梁截面为 H400200812,柱截面为 H4503001216,钢材为 Q235 钢。本文有限元模型包括梁上下翼缘对接焊缝,梁腹板角焊缝和焊接孔等细节,有限元模型选取 SOLID185 单元,钢材和焊缝金属的弹性模量均取 200 GPa,泊松比 0.3,钢材的屈服强度取 300 MPa,焊缝金属的屈服强度取 370 MPa,有限元模型如图 1 所示。通过采用大位移小应变分析来考虑几何非线性的影响。加载等级采用与试验相同的加载等级,试验得到的荷载-位移曲线与计算得到的荷载-位移曲线如图 2、图 3 所示。可见,计算曲线与试验曲线相近,证明了有限元模型的可靠性。

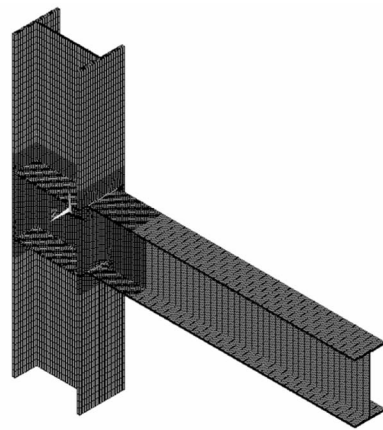


图1 节点试件SPA2有限元模型

Fig.1 Finite element model of the connection specimen SPA2

本文应用通用有限元软件 ANSYS,采用等幅加载,加载位移幅为 ± 45 mm (约 3 倍的节点屈服位移),进行循环荷载作用下的几何非线性和材料非线性分析,共循环 7 周。其中第一荷载步视为单调荷载,读取第一荷载步的分析结果,以判断不同构造的焊接孔附近抵抗延性断裂的性能。应用循环荷载作用下的分析结果,从而判断不同构造的焊接孔抵抗低周疲劳破坏的性能。在单调荷载作用下,采用中国建筑抗震设计规范推荐的焊接孔有限元模型 MISES 塑性应变等值图如图 7 和图

8所示。可见,采用中国建筑抗震设计规范推荐的焊接孔根部等效塑性应变较大。

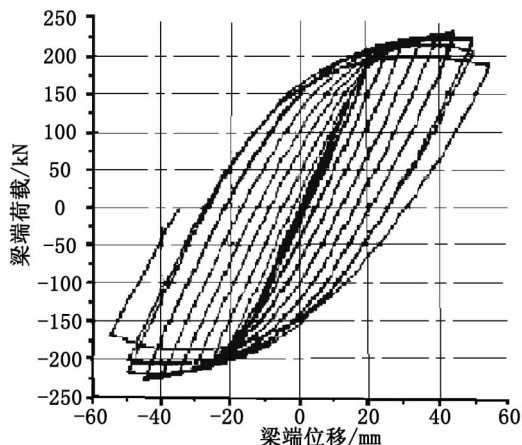


图2 试验得到的节点试件SPA2荷载-位移曲线
Fig.2 Testing load -displacement curve of the connection specimen SPA2

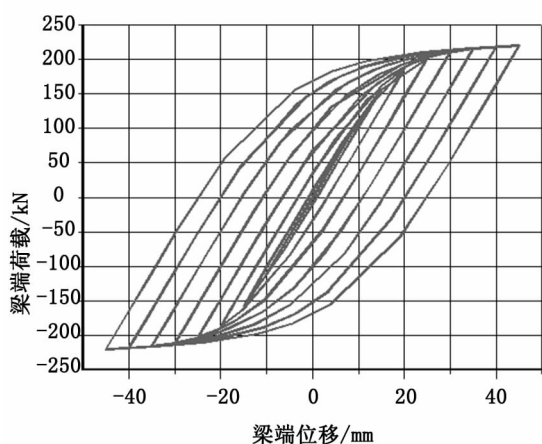


图3 计算得到的节点试件SPA2荷载-位移曲线
Fig.3 Computing load -displacement curve of the connection specimen SPA2

3 有限元分析

为了分析比较不同的焊接孔所造成的应力集中程度,本文焊接孔分别选取 Nakashima 焊接孔(图4所示)、Ricles 焊接孔(图5所示)和中国建

筑抗震设计规范推荐的焊接孔(图6所示)。

读取第一荷载步梁受拉翼缘焊接孔根部应力集中区的分析结果,包括等效塑性应变、静水压力和 MISES 等效应力,计算各焊接孔根部附近的最大等效塑性应变,最大三轴比和最大断裂指数 RI , 分别列于图9~图11。可见,采用中国建筑抗震设计规范推荐的焊接孔详图A和详图B根部应力集中区均产生较大的等效塑性应变。根据图8(a)可以判断,详图B焊接孔根部所产生的应力集中区恰位于对接焊缝处的热影响区,热影响区通常具有相对最低的断裂韧性,易导致节点在该应力集中区首先发生破坏。清华大学熊俊对9个节点试件进行了低周反复加载试验,其中8个节点试件破坏首先在该焊接孔根部应力集中区,所有节点试件均表现较差的延性,本文的分析结果很好地解释了这一破坏现象。

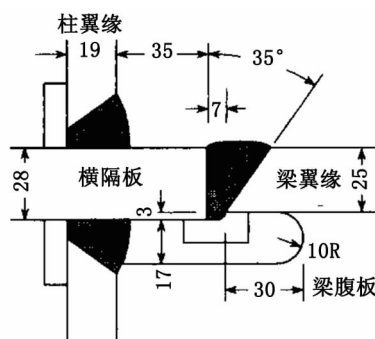


图4 Nakashima推荐的焊接孔
Fig.4 Weld access hole recommended by Nakashima

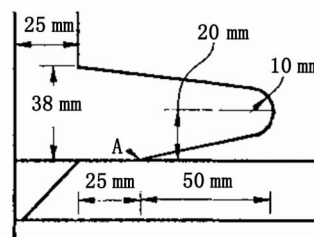


图5 Ricles推荐的焊接孔
Fig.5 Weld access hole recommended by Ricles

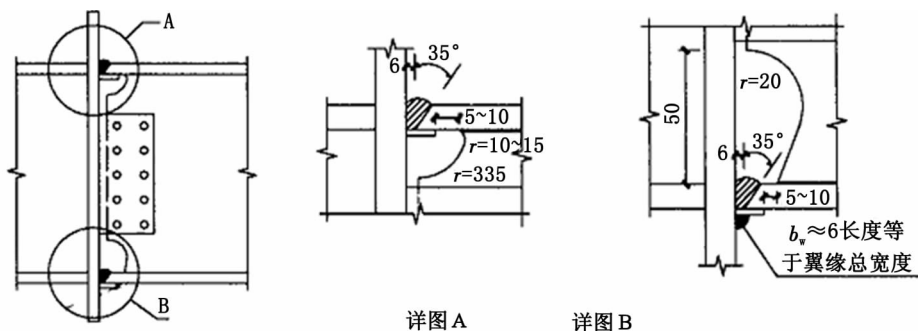


图6 中国建筑抗震设计规范推荐的焊接孔

Fig.6 Weld access holes recommended by "Code for seismic design of buildings" in

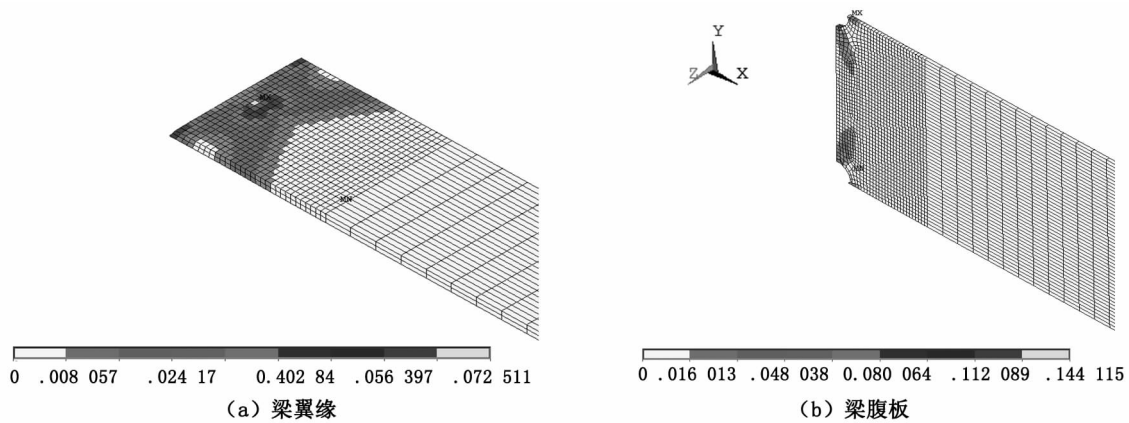


图7 采用建筑抗震设计规范详图A焊接孔的节点等效塑性应变等值图

Fig. 7 Contour plot of equivalent plastic strain of the connection with the weld access holes designated as "Detail A" by "Code for seismic design of buildings" in China

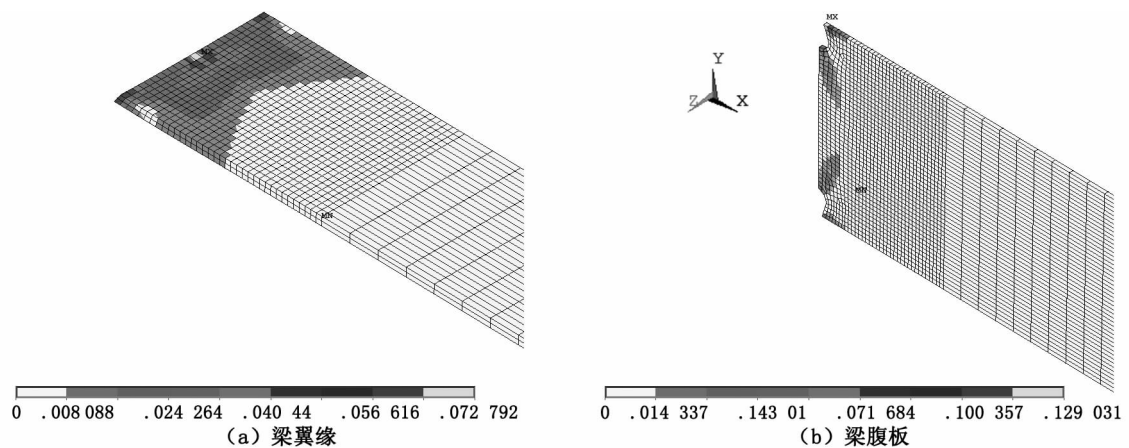


图8 采用建筑抗震设计规范详图B焊接孔的节点等效塑性应变等值图

Fig. 8 Contour plot of equivalent plastic strain of the connection with the weld access holes designated as "Detail B" by "Code for seismic design of buildings" in China

Nakashima 推荐的焊接孔和 Ricles 推荐的焊接孔具有较大的三轴比,其中 Nakashima 推荐的焊接孔具有较大的断裂指数,抵抗延性断裂的性能较差,Ricles 推荐的焊接孔和中国建筑抗震设计规范推荐的焊接孔具有相近的断裂指数。

读取最后荷载步的分析结果,得出各焊接孔根部附近最大的累积塑性应变如图 12 所示。中国建筑抗震设计规范推荐的焊接孔具有相对较大的累积塑性应变,而 Ricles 推荐的焊接孔的焊接孔根部应力集中区所产生的累积塑性应变最小,具有相对较好的抵抗低周疲劳破坏的性能。Nakashima 推荐的焊接孔根部同样产生较大的应力集中,也同样具有较大的累积塑性应变,且具有相对最高的断裂指数,因此本文认为也不宜采用。

4 既有试验验证

清华大学熊俊^[7]对 9 个 T 形单侧节点进行了

试验研究,所有试件的焊接孔均分别采用中国建筑抗震设计规范推荐的焊接孔详图 A 和详图 B,钢材材质为 Q345。所有试件破坏均首先发生在焊接孔附近的应力集中区,其中 8 个试件首先破坏在焊接孔详图 B 根部附近的应力集中区,然后焊接孔详图 A 应力集中区也开始开裂;另一个试件首先在焊接孔详图 A 处开裂,然后焊接孔详图 B 处也开始出现裂纹,所有节点试件均表现较差的延性。

日本的 Rahiminia^[8]对 14 个节点试件进行了反复加载试验研究,其中 12 个试件均采用日本常用的焊接孔(类似于中国建筑抗震设计规范推荐的焊接孔详图 A),2 个试件采用图 4 所示焊接孔。所有试件均首先破坏在焊接孔处。

Ricles^[4]对 11 个采用图 2 所示焊接孔的梁柱焊接节点进行低周反复加载试验,其中 6 个试件为 T 形单侧节点,5 个试件为十字形节点。所有

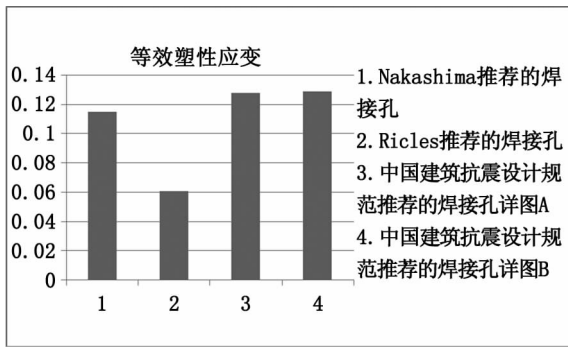


图9 不同焊接孔根部的最大Mises塑性应变比较
Fig.9 Comparison of maximum Mises plastic strain at the root of different weld access holes

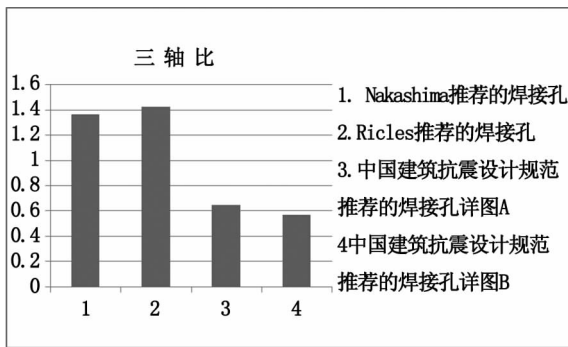


图10 不同焊接孔根部的最大三轴比比较
Fig.10 Comparison of maximum stress triaxiality ratio at the root of different weld access holes

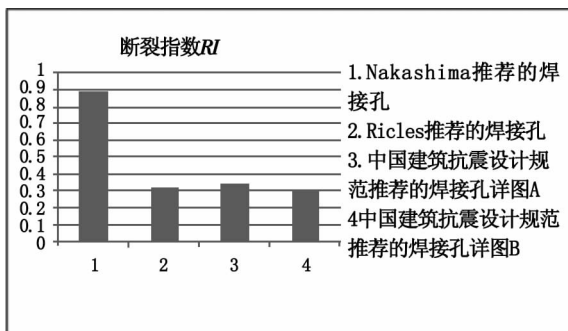


图11 不同焊接孔根部的最大断裂指数RI比较
Fig.11 Comparison of maximum rupture index at the root of different weld access holes

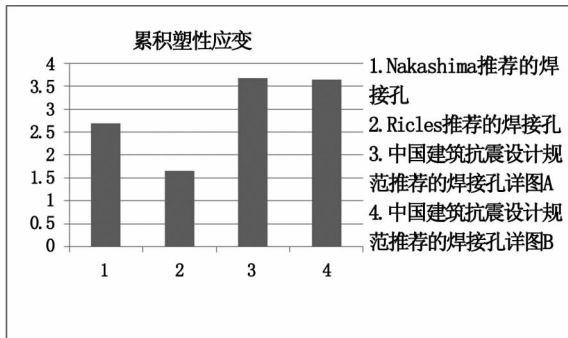


图12 不同焊接孔根部的最大累积塑性应变比较
Fig.12 Comparison of maximum accumulated plastic strain at the root of different weld access holes

试件均没有在焊接孔处发生破坏。

Nakashima^[1]对6个采用日本常用焊接孔(相 近于中国建筑抗震设计规范焊接孔详图A)的试件和4个采用图4所示焊接孔的梁柱焊接节点进行了动力加载和准静态加载试验,其中采用图4所示焊接孔的4个试件在焊接孔处均没有出现破坏,且与采用其它构造形式的焊接孔相比,4个试件具有较好的延性;而6个采用日本常用焊接孔的试件在试验中出现起始于焊接孔处的裂纹。

以上试验结果证明了本文有限元分析的正确性。

5 结论

有限元分析证明:不同的焊接孔的外形和尺寸对节点延性具有重要的影响,容易导致节点在焊接孔根部应力集中区提前破坏,从而显著影响节点延性。

不同构造的焊接孔根部所产生的应力集中程度不同,从而对节点延性具有不同的影响。本文的分析结果证明了中国建筑抗震规范推荐的焊接孔在应力集中区产生的塑性应变稍大,而 Nakashima 推荐的焊接孔也同样具有较高的应力集中,不宜采用。

美国 Ricles 推荐的焊接孔根部应力集中程度相对较小。需要指出的是,Ricles 推荐的焊接孔在焊接孔与梁翼缘相接处具有较高的三轴比,其值约为 1.42,但该处等效塑性应变较小,仅为 0.038。损伤力学认为高三轴比使材料变脆,对单调荷载作用下的延性断裂极为不利。

参考文献:

[1] MASAYOSHI NAKASHIMA, KEIICHIRO SUITA, KIYOTAKA MORISAKO. Test of welded beam - column subassemblies. I: Global behavior[J]. Journal of Structure Engineering, 1998, 124(11): 1236 - 1244.

[2] SHERIF EL TAWIL, TAMEKA MIKESELL, SASHI K, et al. Effect of local details and yield ratio on behavior of fully restrained steel connections [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(1): 79 - 87.

[3] STOJADINOVIC B, GOEL S C, LEE K, et al. Parametric tests on steel moment connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(1): 40 - 49.

[4] CHANGSHI MAO, JAMES RICLES, LE WU LU, et al. Effect of local details on ductility of welded moment connections [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(9): 1036 - 1044.

- [5] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Void growth model and stress modified critical strain model to predict ductile fracture in structural steels [J]. Journal of Structure Engineering, 2006, 132(2): 1907 - 1918.
- [6] 茹继平. 梁腹板开圆孔节点及钢框架抗震性能的实验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.

- (上接第 13 页) [6] 张勇, 孔令伟, 李雄威. 循环荷载下饱和软粘土的动骨干曲线模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1700 - 1701.
- [7] 汪明元, 单治钢, 王亚军, 等. 应变控制下舟山岱山海相软土动弹性模量及阻尼比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1506 - 1509.
- [8] 袁晓铭, 孙锐, 孙静, 等. 常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 地震工程与工程震动, 2000, 20(4): 133 - 139.
- [9] 吴世明, 周建, 杨挺. 土动力学理论与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [10] HARDIN B O, DRNEVICHV P. Shear modulus and damping in soils: design equation and curves[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1972, 98(7): 603 - 624.
- [11] HARDIN B O, DRNEVICHV P. Shear modulus and

(上接第 18 页)

2) 初始围压越大砂岩最终的弹性应变能越大。在卸围压初始阶段由于砂岩中微裂纹没有明显起裂扩展, 砂岩所释放的弹性应变能增大比较缓慢, 当围压降低至一定程度时裂纹扩展并相互贯通, 砂岩所释放的弹性应变能急剧增大, 最终砂岩所积累的弹性应变能超过在某应力状态下砂岩破坏所需要的表面能即发生破坏。

3) 从能量的角度出发, 利用可释放弹性应变能原理推导了砂岩的卸荷破坏准则, 该破坏准则考虑了初始应力状态对砂岩卸荷破坏的影响, 并利用试验数据进行了验证。

参考文献:

- [1] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1729 - 1740.
- [2] BROWN E T, H T D. The failure of linear brittle materials

- [7] 熊俊. 强震作用下钢框架焊接节点损伤性能和计算模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [8] FARAMARZ RAHIMINIA. Effects of joints panel shear deformation on elasto-plastic behavior of steel beam-to-column connections[D]. Kobe: Kobe University, 2013. (责任编辑 王利君)

- damping in soils: design equation and curves[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1972, 98(7): 667 - 692.
- [12] DARENDELI M B. Development of a new family of normalized moduli reduction and material damping curves[D]. Austin: University of Texas at Austin, 2001.
- [13] HARDIN B O, KALINSKI M E. Estimating the shear modulus of gravelly soil[J]. Journal of Rheology, 1966, 10(1): 253 - 273.
- [14] 周建, 龚晓南, 李剑强. 循环荷载作用下饱和软粘土特性试验研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(11): 43 - 47.
- [15] 王军, 陈张林, 蔡袁强, 等. 考虑软化特性的软黏土动应力-应变关系研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(1): 24 - 25. (责任编辑 王利君)

- under effective tensile stress[J]. Felsmechanik, 1967(1): 229 - 241.
- [3] 吴刚. 工程岩体卸荷破坏机制研究的现状及展望[J]. 工程地质学报, 2001, 2(9): 174 - 181.
- [4] 吴刚. 岩体在加、卸荷条件下破坏效应的对比分析[J]. 岩土力学, 1997, 2(4): 13 - 16.
- [5] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 17(24): 3003 - 3010.
- [6] 朱泽奇, 盛谦, 肖培伟, 等. 岩石卸围压破坏过程的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(21): 2675 - 2681.
- [7] 刘维国, 单钰铭, 傅荣华. 岩石扩容过程中的体积应变与超声横波速度[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2006, 33(4): 360 - 364.
- [8] 彭瑞东. 基于能量耗散及能量释放的岩石损伤与强度研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2005. (责任编辑 王利君)