

Q460D 高强度结构钢材循环加载试验研究

施刚¹ 王飞² 戴国欣² 石永久¹ 王元清¹

(1. 清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 重庆大学, 重庆 400045)

摘要: 高强度结构钢材在实际钢结构工程中已经得到广泛应用, 国内外学者已经进行了一些研究, 但对于循环荷载下高强度钢材本构关系的研究还很缺乏。通过对 17 个 Q460D 高强度结构钢材试件进行 14 种不同加载制度的单调和循环加载试验, 得到不同加载制度下的应力-应变关系, 探讨不同加载历史对其本构关系的影响, 研究其材料本构模型、力学性能、破坏模式、变形和延性特征以及损伤退化特性。基于 Ramberg-Osgood 模型, 拟合得到 Q460D 高强度结构钢材在循环荷载下的应力-应变关系骨架曲线; 在 Chaboche 钢材塑性本构模型的基础上, 通过试验标定 Q460D 高强度结构钢材的循环加载本构模型参数, 并结合有限元程序 ABAQUS 对上述试验进行准确模拟。研究结果可为准确分析计算高强度钢材钢结构在地震作用下的受力性能提供基本前提。

关键词: 高强度钢材; 循环加载; 滞回性能; 本构关系; 有限元分析

中图分类号: TU391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2012)07-0048-08

Experimental study of high strength structural steel Q460D under cyclic loading

Shi Gang¹ Wang Fei² Dai Guoxin² Shi Yongjiu¹ Wang Yuanqing¹

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of the Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: High strength structural steel has been widely used in many steel structures. Although there are some studies on high strength steel structures, the constitutive relationship of high strength steel under cyclic loading has not yet been sufficiently investigated. 17 specimens of Q460D high strength structural steel have been tested under monotonic and cyclic loading with 14 different loading programs, and the corresponding stress-strain relationships under these different loading programs have been obtained. The high strength steel constitutive model, mechanical properties, failure modes, deformation, ductility and the cumulative damage deterioration have been studied. The stress-strain skeleton curves of Q460D high strength structural steel under cyclic loading have been obtained by curve fitting using the Ramberg-Osgood model. Based on the Chaboche plastic constitutive model for steel, the key parameters of the stress-strain constitutive model of Q460D high strength structural steel under cyclic loading have been calibrated, and the above tests have been accurately simulated by using ABAQUS. The results are significant for accurately analyzing the behaviour of high strength steel structures under earthquakes.

Keywords: high strength steel; cyclic loading; hysteretic behaviour; constitutive relationship; finite element analysis

E-mail: shigang@mail.tsinghua.edu.cn

引言

地震作用对于结构通常是一个循环往复荷载。钢材在循环荷载作用下的应力-应变关系即钢材在循环荷载下的本构模型是分析钢结构在地震作用下的真实受力性能并进行抗震设计的基础。目前, 高强度结构钢材(强度标准值 $\geq 460\text{MPa}$)已在国内外多个建

筑和桥梁工程中得到应用, 取得了很好的效果^[1]。但是, 国内外目前尚未对其在循环荷载作用下的本构模型进行研究。

本文对国产 Q460D 高强度钢材进行多种循环加载制度下的拉压试验, 研究高强度钢材在循环荷载作用下的力学性能, 分析加载制度对其滞回性能、破坏形式、延性的影响, 并基于 Ramberg-Osgood 模型^[2]研究其在循环荷载下的应力-应变关系骨架曲线。在 Chaboche^[3]钢材塑性本构模型的基础上, 采用试验结果标定 Q460D 高强度钢材的关键材料参数, 建立循环荷载下的本构模型, 以期对高强度钢材钢结构在地震作用下的受力性能分析提供研究基础和科学依据。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51038006)

作者简介: 施刚, 博士, 副教授

收稿日期: 2011-03-17

1 试验概况

本次试验所用 Q460D 钢材由首钢公司提供,钢材的力学性能如表 1 所示,化学成分如表 2 所示。力学性能和化学成分满足《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—2008)^[4]的要求。试件尺寸如图 1 所示,试件厚度为 14mm,夹持端长度为 60mm,宽度为 34mm,过

弧段半径为 50mm,平行段长度为 20mm,宽度为 10mm,试件尺寸对称。共设计了 17 个试件,试验在如图 2 所示的拉扭复合万能低周疲劳试验机(Instron Model 1343)上进行,加载装置如图 3 所示。试验采用手动控制位移加载,共计 14 种加载制度,如表 3 和图 4 所示,采用拉压引伸仪测量应变,引伸仪标距为 20mm,拉量程为 50%,压量程为 25%。

表 1 Q460D 力学性能
Table 1 Mechanical properties of Q460D

参数	下屈服强度(R_{el}) (MPa)	抗拉强度(R_m) (MPa)	断后伸长率(A) (%)	冷弯(180°)	冲击功吸收能量(−20℃) (J)		
数值	474	558	24	$d=2a$	281	281	332

表 2 Q460D 化学成分
Table 2 Chemical composition of Q460D

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Alt	Alsol	V	Nb	Ti	CEQ	pcm	N
含量(%)	0.054	0.20	1.51	0.008	0.0013	0.031	0.028	0.036	0.072	0.011	0.35	0.15	0.0039

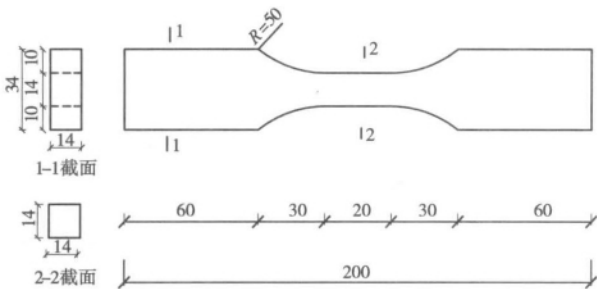


图 1 试件尺寸
Fig. 1 Dimensions of specimens

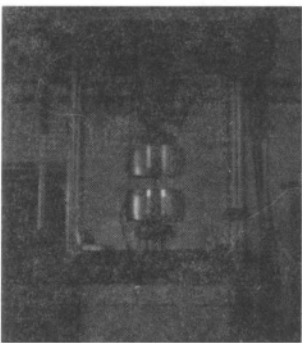


图 2 试验设备
Fig. 2 Test equipment

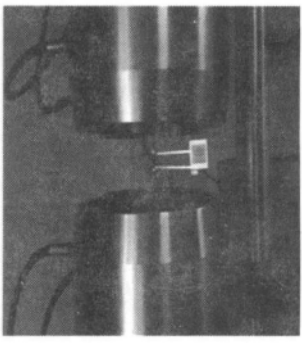


图 3 加载细部
Fig. 3 Details of loading

表 3 试件循环加载制度
Table 3 Cyclic loading programs of specimens

试件编号	加载制度
H1-1 ~ 3	单调拉伸
H2-1 ~ 2	单调压缩
H3-1	关于 $\varepsilon = 0$ 对称加载,第一圈应变加载到 1%,等应变增量 0.5% 对称逐级加载,先拉后压,每级循环两次
H3-2	关于 $\varepsilon = 0$ 对称加载,第一圈应变加载到 1%,等应变增量 0.5% 对称逐级加载,先拉后压,每级循环一次
H3-3	关于 $\varepsilon = 0$ 对称加载,第一圈应变加载到 1%,等应变增量 0.5% 对称逐级加载,先压后拉,每级循环一次
H3-4	关于 $\varepsilon = 0$ 对称加载,第一圈应变加载到 1%,等应变增量 0.5% 对称逐级加载,先压后拉,每级循环两次
H4-1	压应变为固定值 1%,拉应变第一圈加载到 1%,按增量 0.5% 逐级加载
H5-1	关于 $\varepsilon = 0$ 对称加载,以应变 2% 等幅加载 6 圈,再以应变 3.4% 等幅加载 5 圈
H5-2	关于 $\varepsilon = 0$ 对称加载,以应变 2% 等幅加载 20 圈
H6-1	关于 $\varepsilon = 0$ 对称加载,第一圈应变加载到 3.5%,等应变增量 0.5% 对称逐级递减加载
H7-1	以屈服平台上某一点的应变值为中心点($\varepsilon = 1.5\%$),按照等应变增量 0.5% 加载,每级循环两次
H7-2	以强化段上某一点的应变值为中心点($\varepsilon = 4\%$),按照等应变增量 0.5% 加载,每级循环两次
H8-1	加卸载(第一圈应变加载到 1.5%,然后每级卸载应变 0.5%,加载应变 1%)
H9-1	随机加载

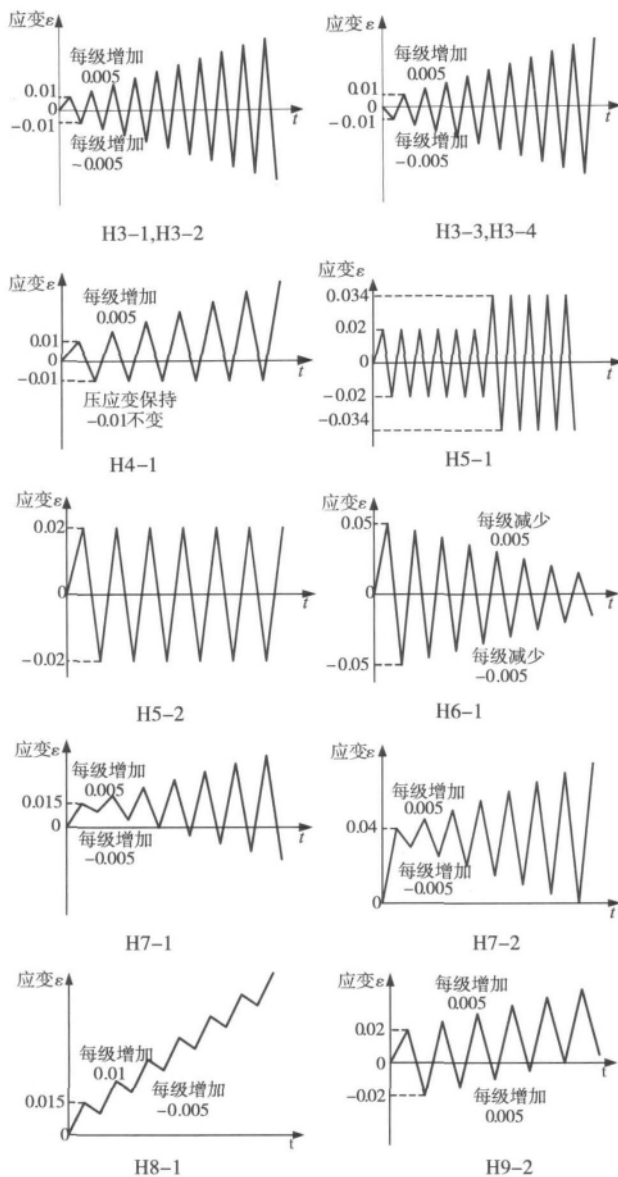


图 4 加载制度示意

Fig. 4 Cyclic loading programs

2 结果和分析

2.1 单调加载试验结果

单调加载试验的结果如表 4 所示,从表中可以看出,单向压缩时的屈服强度和最大强度值都比单拉时的大,但其最大强度对应的应变小于单拉时的应变。

单向拉伸试件 H1-3 和单向压缩试件 H1-2 的应力-应变曲线如图 5 所示,从单向拉伸试验曲线可以看出,这批钢材的延性很好,拉断之前的伸长率已经超过 45%。单向压缩时,由于发生屈曲,试验提前停止,由于试件屈曲,单向压缩的承载力下降提前。

如图 6 所示,当试件在循环荷载下发生较大屈曲或者试件变形超过引伸仪量程时停止循环加载,然后将试件直接拉断。如图 7 所示,部分试件拉断后对其

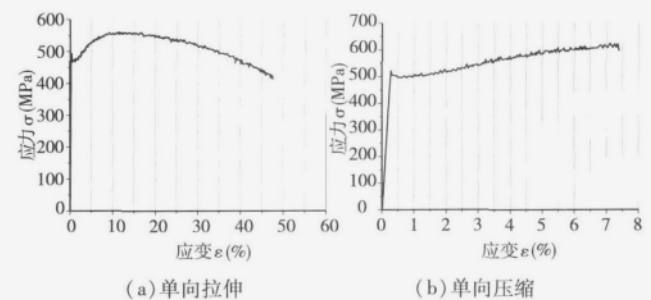
断口进行电镜扫描,图中可以看到有大小不等的圆形和椭圆形的凹坑——韧窝,表明均为延性破坏。

表 4 试件单调加载力学性能

Table 4 Mechanical properties of specimens under monotonic loading

试件编号	E (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ε_u (%)
H1-1	210000	469	565	10.48
H1-2	185000	461	560	12.56
H1-3	208000	467	580	14.07
平均值	201000	466	568	12.37
H2-1	189000	496	621	7.26
H2-2	191000	494	601	6.94
平均值	190000	495	611	7.10

注: E 为钢材弹性模量; f_y 为钢材下屈服强度; f_u 为钢材极限抗拉强度; ε_u 为极限抗拉强度对应的应变。



(a) 单向拉伸

(b) 单向压缩

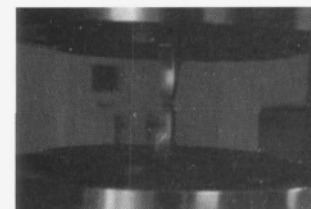
图 5 单调加载应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of monotonic loading



(a) 试件颈缩

(b) 试件屈曲



(c) 试件拉断

图 6 试验现象

Fig. 6 Test phenomena

2.2 循环加载结果

图 8 为所有试件循环加载应力-应变曲线。上一级循环加载的应力、应变值、应变幅及当前加载循环的起始应变值都影响下一循环^[5-6]。H3-1 和 H3-2 第

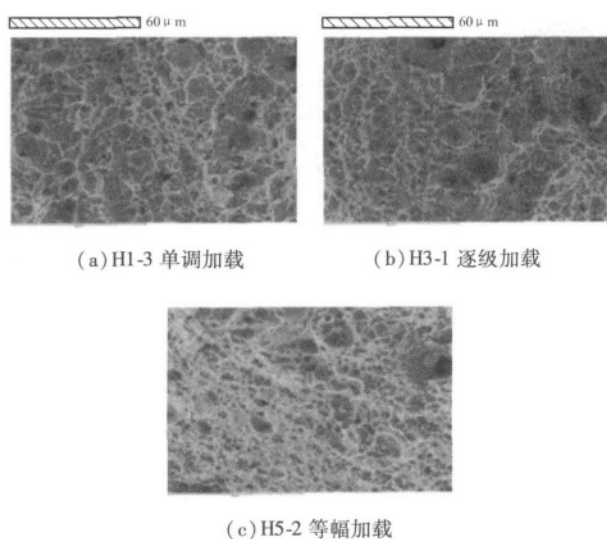


图7 电镜扫描

Fig. 7 Electron microscopic scanning

一圈出现屈服点现象,即曲线出现屈服点后,应力下降并经历短暂平台,随着圈数增加,循环硬化出现,但后期应力提高不明显,与图4所示的单向压缩曲线相比,先拉后压加载制度下曲线的最大压应力有所退化,出现包辛格效应。先压后拉应力-应变曲线如图8H3-3和H3-4所示,每级循环两圈与一圈相比,屈曲现象发生提前,故循环次数少,同时与图3所示的单向拉伸试验相比,其最大拉应力有所退化,这也是包辛格效应。H5-1先等幅加载6圈的最大应力大于H5-2等幅加载20圈的最大应力,这是循环软化现象,即最大应力随着滞回圈数的增加而减小,加大等幅循环应变时,应力硬化现象不明显,应力增加不多。H7-1与H7-2比较表明当初始应变过大时,后续循环加载时应力不会再增加,其中拉应力逐级减少。H8-1加载和卸载时的斜率基本一致,和初始弹性模量基本相同。所有试件循环加载下的应力-应变曲线滞回环饱满,表明其抗震性能良好。

表5列出了所有试件的主要力学参数,其中 f_{u1} 是钢材应力下降到极限抗拉强度85%时强度值, ε_{u1} 是应力为 f_{u1} 时的应变。表中数据表明当承载力下降15%时,应变将有很大的增大,除H7-2外应变都在31.48%~38.32%范围内,与单调加载相比,循环加载下钢材的应变 ε_{u1} 下降,表明延性变差,这是因为随着材料经受循环作用,钢材产生损伤累积,延性变差。由于受试验条件限制,各个试件均未测到拉断时的曲线,故滞回能量采用如下定义:对于单调加载,取应力下降到极限抗拉强度的85%时位移-力曲线的面积,对于循环加载取所有滞回环面积和,它表征了材料层面上钢材的抗震耗能能力。

2.3 单调曲线和循环骨架曲线比较

钢材循环荷载下的骨架曲线和单调曲线由于加载方式不同而表现出不同的特点,本文利用式(1)的Ramberg-Osgood^[2]模型对各种加载制度下的循环骨架曲线进行拟合,其中试件H5-1、H5-2、H8-1、H9-1因为应变幅 $\Delta\varepsilon$ 不变,故未进行拟合,同时为了和单调曲线比较,对对称循环加载制度的试件H3-1、H3-2、H3-3、H3-4采用变形后的式(2)进行拟合,所有拟合结果如图9所示,表6为对Q460D的材料参数进行拟合后式(1)、式(2)中的参数值,从图9中可以看出利用Ramberg-Osgood形式的公式可以较好地拟合高强度钢材Q460D的对称循环加载骨架曲线,可以看出这两种循环骨架曲线和单调曲线基本一致,硬化提前发生,同时可以看出循环硬化作用使得钢材强度也得到一定的提高。

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad (2)$$

3 本构模型

为完整描述钢材的弹塑性反应,要考虑以下几点^[7]:①钢材发生的变形是纯弹性变形还是弹塑性变形,即加载准则;②若在第一点中判定是弹塑性变形,就需要确定塑性变形的方向,即流动法则;③当加载时,钢材的强化作用会使其弹性区随着应力而改变,这时候需要去确定估计弹性范围的方法,即强化法则;④为描述塑性加载的历史,还需要定义一些参数,即强化参数;⑤当材料单元发生弹塑性变形时,弹性区将发生改变使流动应力处于弹性区的边界,即塑性理论的一致性条件。

借助有限元分析软件ABAQUS中的自定义材料功能^[8]对试验中的各种循环荷载下应力-应变曲线进行模拟。

对于加载准则,有限元分析中可利用应变增量去计算变形是纯弹性还是弹塑性,具体形式如式(3)^[8]所示:

$$\begin{aligned} f &= 0, \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} C_{ijkl} d\varepsilon_{kl} > 0 \text{ 时, 加载} \\ f &= 0, \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} C_{ijkl} d\varepsilon_{kl} = 0 \text{ 时, 中性变载} \\ f &= 0, \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} C_{ijkl} d\varepsilon_{kl} < 0 \text{ 时, 卸载} \end{aligned} \quad (3)$$

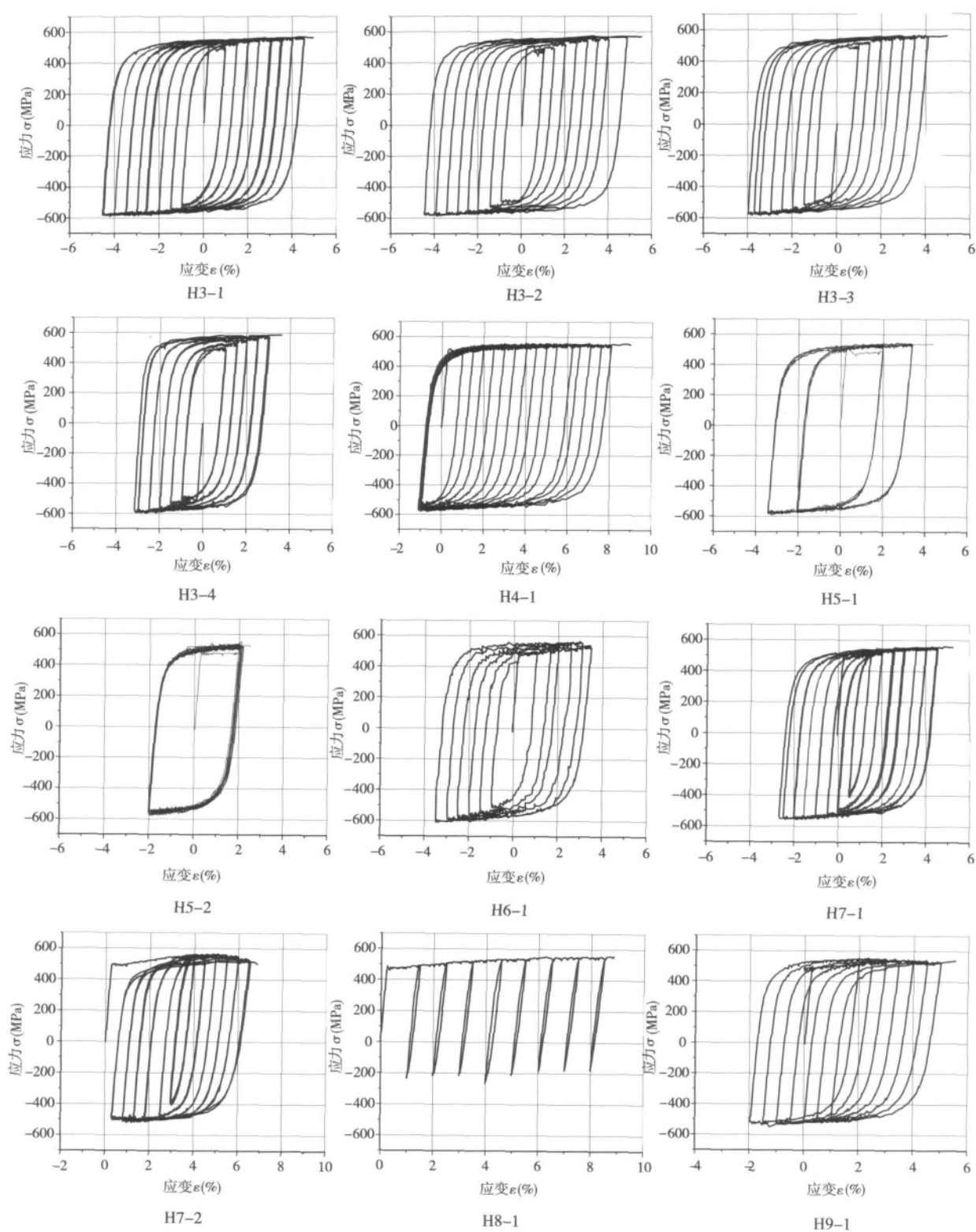


图 8 循环应力-应变曲线
Fig.8 Cyclic stress-strain curves

表 5 试件力学性能参数
Table 5 Mechanical properties of specimens

试件编号	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ε_u (%)	f_{ul} (MPa)	ε_{ul} (%)	滞回数	滞回能量 (N · mm)
H1-1	469	565	10.48	476	40.88	单调	848043
H1-2	461	560	12.56	476	38.84	单调	803315
H1-3	467	580	14.07	493	42.09	单调	894172
H2-1	496	621	7.26	—	—	单调	—
H2-2	493	601	6.93	—	—	单调	—
H3-1	476	576	10.58	489	33.54	16	3348976
H3-2	466	580	8.88	492	32.90	8	1652834
H3-3	480	575	8.84	482	36.59	7	1490138
H3-4	479	596	7.22	505	33.06	10	737320
H4-1	473	562	11.56	476	34.36	15	3263592
H5-1	460	562	13.22	478	33.00	11	1533270
H5-2	464	582	8.91	491	31.48	20	2190953
H6-1	474	571	7.28	487	32.38	6	1072960
H7-1	482	575	7.696	488	36.03	14	2104424
H7-2	485	565	4.85	478	15.92	12	1571350
H8-1	461	569	17.22	485	38.32	8	263409
H9-1	467	555	2.32	472	34.08	7	1064171

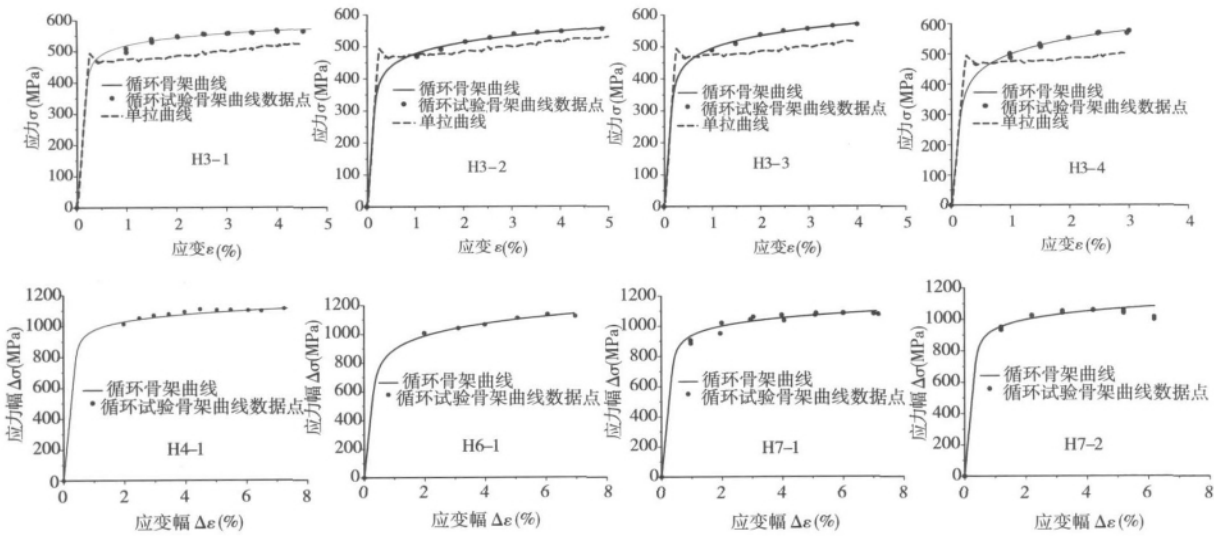


图 9 循环骨架曲线

Fig. 9 Cyclic stress-strain curves

表 6 试件循环强化参数

Table 6 Parameters of cyclic hardening

试件编号	E (N/mm ²)	K' (N/mm ²)	n
H3-1	202000	677.20	0.0541
H3-2	201000	728.55	0.0869
H3-3	203000	770.48	0.0904
H3-4	203000	827.43	0.1143
H4-1	201000	662.71	0.0515
H6-1	201000	807.94	0.1001
H7-1	201000	678.37	0.0623
H7-2	204000	673.92	0.0614
平均值	202000	736.01	0.0776

流动法则和强化法则分别采用文献 [3] 的 Von Mises 流动法则以及混合模型,该模型包含非线性的随动部分和各向同性强化部分。各向同性强化部分由式 (4) 定义:

$$\sigma^0 = \sigma|_0 + Q_\infty (1 - e^{-b_{iso}\varepsilon_p}) \quad (4)$$

式 (4) 为屈服面变化的大小 σ^0 和等效塑性应变 ε_p 的关系式,等效塑性应变可以认为是塑性应变的积累,它的值不会减小,公式中 $\sigma|_0$ 为等效塑性应变为零时的应力(本文取钢材的屈服点), Q_∞ 为屈服面的最大变化值, b_{iso} 为屈服面大小随塑性应变增加的变化率。以上各个参数中 σ^0 和 ε_p 由试验标定,如图 10

(a) 所示。

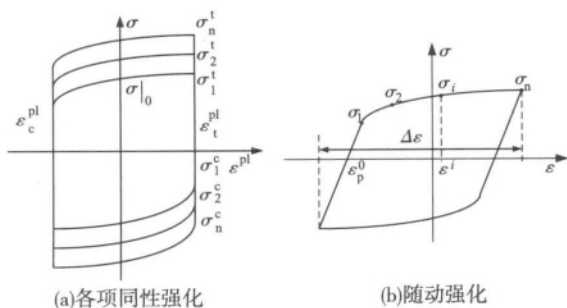


图 10 有限元模型参数校准

Fig. 10 Finite element model parameter calibration

σ_i^0 为第 i 圈的屈服面,可定义为式(5):

$$\sigma_i^0 = \frac{\sigma_i^t - \sigma_i^c}{2} \quad (5)$$

式中: σ_i^t 和 σ_i^c 分别为第 i 圈弹性区的最大拉应力和最大压应力。

$$\varepsilon_i^p = \frac{1}{2}(4i - 3) \Delta\delta_p \quad (6)$$

式中: $\Delta\delta_p$ 为塑性区域的范围,由式(7)确定。

$$\Delta\delta_p \approx \Delta\varepsilon - 2\sigma_i^t/E \quad (7)$$

由式(5)和式(6)得到数据点($\sigma_i^0, \varepsilon_i^p$),将数据点代入式(4)通过曲线拟合可以得到 Q_∞ 和 b_{iso} 。

随动强化模型中定义了背应力 α :

$$\alpha = \frac{C_{kin}}{\gamma} (1 - e^{-\gamma\varepsilon_p}) + \alpha_1 e^{-\gamma\varepsilon_p} \quad (8)$$

式(8)中参数 C_{kin} 和 γ 通过试验标定, C_{kin}/γ 表示背应力的最大变化值, γ 与背应力随塑性应变增加的速率有关。数据点($\sigma_i, \varepsilon_i^p$)由试验数据确定。

$$\varepsilon_i^p = \varepsilon_i - \frac{\sigma_i}{E} - \varepsilon_p^0 \quad (9)$$

式(9)中 ε_p^0 是应力-应变曲线通过应变轴的塑性应变值,如图10(b)所示。定义 $\varepsilon_1^p = 0$,可确定 $\varepsilon_p^0 = \varepsilon_1 - \frac{\sigma_1}{E}$ 。对于每一组数据点,背应力 α_i 由式(10)确定:

$$\alpha_i = \sigma_i - \sigma_s \quad (10)$$

式(10)中的 $\sigma_s = \frac{\sigma_1 + \sigma_n}{2}$, 其中 σ_1, σ_n 是每组数据点的第一个和最后一个数据点的应力值。由式(4)

和式(8)拟合得到的结果见表7,再将表中的结果输入到 ABAQUS 的材料属性中,建立有限元模型,计算如图11所示的6种加载制度得到有限元结果,有限元结果和试验结果吻合良好,通过试验标定得到的参数能用于进一步的研究。

表 7 试验试件参数校准

Table 7 Parameter calibration of specimens

试件	σ_0 (N/mm ²)	Q_∞ (N/mm ²)	b_{iso}	$C_{kin,1}$ (N/mm ²)	γ_1	$C_{kin,2}$ (N/mm ²)	γ_2	$C_{kin,3}$ (N/mm ²)	γ_3
H3-2	474	102.7	2.59	4797	156	3794	145	1498	107

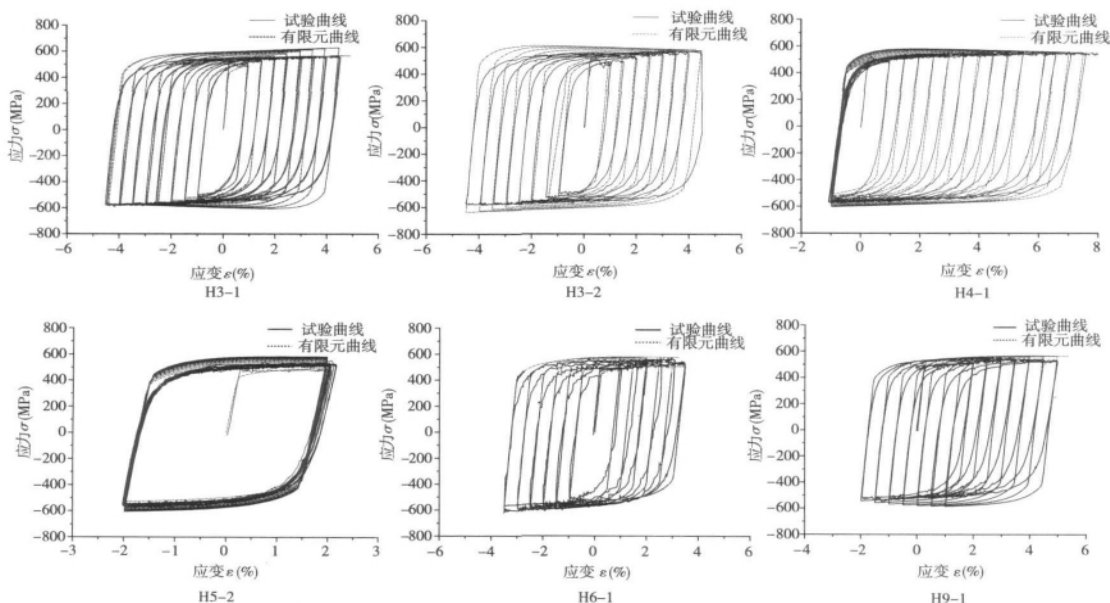


图 11 试验曲线和有限元曲线比较

Fig. 11 Comparison between test curves and FEA curves

4 结论

本文对 17 个 Q460D 高强度结构钢材试件进行了 14 种不同加载制度的单调和循环加载试验,研究其材料本构模型、力学性能、破坏模式、变形和延性特征,以及损伤退化特性,得到如下结论:

(1) Q460D 高强度结构钢材仍然具有普通强度钢材在循环加载下的多种特点:屈服点现象、循环硬化和循环软化、包辛格效应等。Q460D 高强度结构钢材在循环荷载作用下,后期应力逐级达到稳定。

(2) Q460D 高强度结构钢材在各种加载制度下的滞回环饱满、稳定,表明材料的滞回性能良好;且其破坏模式均为延性破坏,变形能力和延性较好,但由于循环加载下塑性损伤积累,使得与单调加载相比延性变差。

(3) 基于 Ramberg-Osgood 模型很好地拟合了其循环加载骨架曲线,高强度结构钢材循环骨架曲线和单调曲线基本一致,循环作用使得钢材的硬化提前。

(4) 利用试验标定了钢材的材料参数,并结合有限元分析软件 ABAQUS 模拟了各种加载制度下的循环拉压曲线,结果表明有限元和试验曲线吻合良好,证明了材料参数的可靠与准确,这将有助于进一步研究高强度钢材在地震作用下应用。

参 考 文 献

- [1] 施刚,王元清,石永久. 高强度钢材轴心受压构件的受力性能[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(2): 92-97(Shi

Gang, Wang Yuanqing, Shi Yongjiu. Behavior of high strength steel columns under axial compression[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(2): 92-97(in Chinese)

- [2] Ramberg W, Osgood W R. Description of stress-strain curves by three parameters [R]. US: National Advisory Committee for Aeronautics, 1943
- [3] Chaboche J L. Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity [J]. International Journal of Plasticity, 1986, 2(2): 149-188
- [4] GB/T 1591—2008 低合金高强度结构钢[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009(GB/T 1591—2008 High strength low alloy structural steels [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009(in Chinese)
- [5] 董永涛,张耀春. 建筑用钢循环塑性本构模型[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1993, 26(5): 106-112(Dong Yongtao, Zhang Yaochun. Cyclic plasticity constitutive model of structural steel [J]. Journal of Harbin Architecture & Civil Engineering Institute, 1993, 26(5): 106-112(in Chinese)
- [6] 王娴明,徐波,沈聚敏. 反复荷载作用下钢筋的本构关系[J]. 建筑结构学报, 1992, 13(6): 41-48(Wang Xianming, Xu Bo, Shen Jumin. A constitutive model of reinforcing steel under reversed loading [J]. Journal of Building Structures, 1992, 13(6): 41-48(in Chinese)
- [7] 陈惠发,萨里普 A F. 土木工程材料的本构方程[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001
- [8] ABAQUS. Analysis user's manual [EB/OL]. Version 6.9. US: ABAQUS, 2009

施 刚(1977-) 男,博士,副教授。主要从事钢结构工程研究。

王 飞(1985-) 男,硕士研究生。主要从事钢结构工程研究。

戴国欣(1955-) 男,博士,教授。主要从事钢结构工程研究。

石永久(1962-) 男,博士,教授。主要从事钢结构工程研究。

王元清(1963-) 男,博士,教授。主要从事钢结构工程研究。