

文章编号: 1000-4750(2017)02-0060-09

低屈服点钢材与 Q345B 和 Q460D 钢材 本构关系对比研究

王 萌¹, 钱凤霞¹, 杨维国¹, 杨 璐²

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

摘 要: 为进一步探讨材料本构行为对构件及结构受力性能的影响, 首先, 进行了 LYP100 低屈服点钢材的本构关系试验研究, 分析此材料的单调性能、滞回性能、耗能能力及循环本构模型等。在此基础上, 全面对比 LYP100 和 LYP160 低屈服点钢材、普通钢材(Q345B)及高强度钢材(Q460D)的本构关系。最后, 通过对比不同钢材的循环本构模型以及理想弹塑性模型对结构构件滞回行为的预测结果, 深入研究材料本构关系对构件及结构的重要影响。结果表明: 低屈服点钢材单调以及循环强屈比均在 2.0~3.0 以上, 是普通钢材以及高强度钢材的 2.0 倍~3.0 倍。同时, 低屈服点钢材具有更好的延性和耗能能力。由于低屈服点钢材具有显著的各向同性强化行为, 其采用循环本构模型和理想弹塑性模型的计算结果差异更大。因此, 在结构计算分析中, 需要根据所采用的钢材选取适当的本构关系模型。

关键词: 结构钢材; 低屈服点钢材; 本构关系; 循环本构模型; 理想弹塑性模型

中图分类号: TU511.3; TG142.15 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.01.0051

COMPARISON STUDY ON CONSTITUTIVE RELATIONSHIP OF LOW YIELD POINT STEELS, Q345B STEEL AND Q460D STEEL

WANG Meng¹, QIAN Feng-xia¹, YANG Wei-guo¹, YANG Lu²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to investigate the effect of constitutive behaviors on mechanical performance of members and structures, the constitutive relationship tests of LYP100 low yield point steel were carried out firstly. The monotonic behavior, ductility, hysteretic behavior, energy-dissipation capacity and cyclic constitutive model were analyzed. Based on these results, the constitutive relationship of low yield point steel, normal strength steel (Q345B) and high strength steel (Q460D) were fully compared. Finally, the predicted hysteretic behaviors of different steels with both cyclic constitutive model and ideal elastic-plastic model were compared to further discuss the significant effect of constitutive relationship on members and structures. The results show that the monotonic and cyclic tensile-to-yield ratios of low yield point steels are more than 2.0~3.0, 2.0~3.0 times of normal strength steel and high strength steel. Meanwhile, low yield point steels have better ductility and energy dissipation capacity. Because low yield point steels have obvious isotropic behaviors, significant difference is observed between the calculated results using cyclic constitutive model and ideal elastic plastic model. Therefore, for structural analysis, an appropriate constitutive relationship should be adopted according to different steels.

收稿日期: 2016-01-20; 修改日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408031); 北京市自然科学基金项目(8154052); 北京交通大学人才基金项目(2015RC056)

通讯作者: 王 萌(1985—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 副教授, 博士, 从事钢结构抗震研究(E-mail: wangmeng1117@gmail.com).

作者简介: 钱凤霞(1991—), 女, 河北张家口人, 硕士生, 从事钢结构抗震研究(E-mail: 14121071@bjtu.edu.cn);

杨维国(1973—), 男, 山西五台人, 教授, 博士, 从事钢结构研究(E-mail: wgyang1@bjtu.edu.cn);

杨 璐(1982—), 男, 湖北宜昌人, 副教授, 博士, 主要从事钢结构和组合结构研究(E-mail: lyang@bjtu.edu.cn).

Key words: structural steel; low yield point steel; constitutive relationship; cyclic constitutive model; ideal elastic-plastic model

准确的材料本构模型是进行结构非线性计算分析的前提保障,对计算结果有着重要影响。特别是在地震作用下,结构材料会进入深度塑性阶段,如果材料本构模型选取不当,会对计算结果产生不良影响^[1]。因此,选取合理的弹塑性本构模型是进行整体结构抗震性能研究的基础。

多年来,为了获得准确的材料本构关系,国内外学者进行了一系列钢材循环加载或疲劳性能试验研究。Nathaniel 等^[2]开展了 A36 钢材在多种加载制度下的循环加载试验; Nip 等^[3]对冷弯薄壁型钢以及不锈钢进行了低周疲劳试验; Dusicka 等^[4]对几种结构钢材进行了塑性应变循环加载试验及低周疲劳试验; 石永久和王萌等^[5]进行了 Q235B 和 Q345B 钢材的循环本构试验,并提出循环本构模型^[6]; 施刚等^[7]进行了 Q460D 高强度钢材的循环加载试验; Xu 等^[8]进行了 BLY160 循环本构试验并提出改进滞回模型。以上的试验结果均为提出更准确的钢材本构计算模型提供了重要的数据支撑。

随着强烈地震频发的严峻现状,在结构中使用隔震减震措施能够有效抵御地震荷载,其中,低屈服点钢耗能元/构件由于其优良的抗震性能在实际工程中广泛应用^[9-18],利用钢材屈服点低而延性高的特点,能够先于主体结构进入塑性状态,有效消耗地震能量,进而降低主体结构破坏的风险。由于材料的特殊性,使得低屈服点结构构件的滞回性能和普通钢构件有显著区别,同时作为耗能元/构件会产生更大的塑性应变,非线性程度更高,故为了准确计算带有低屈服点耗能元/构件的整体结构地震响应,需要采取准确的低屈服点钢材本构关系。然而,目前在结构计算中,对于普通钢材和高强度钢材通常采用简化的理想弹塑性模型以及随动强化流动法则。笔者曾进行了 LYP160 低屈服点钢材试验,研究低屈服点钢材在单调以及循环荷载作用下的本构行为。结果表明,低屈服点钢材具有明显的各向同性强化特征,与传统钢材的本构关系有较大区别。

因此,为了进一步探讨材料本构行为在结构体系中的对应关系,并且研究本构关系对构件及结构受力性能的影响,首先,本文进行了 LYP100 低屈服点钢材单轴试验,分析其单调性能、滞回性能、

耗能能力、本构行为等。在此基础上,全面对比 LYP100 和 LYP160 低屈服点钢材、Q345B 普通钢材^[5]及 Q460D 高强度钢材^[7]的单调及循环本构关系。最后,通过对比不同钢材的循环本构模型以及理想弹塑性模型在结构构件中的预测分析结果,深入探讨材料本构对构件及结构的重要影响。

1 LYP100 低屈服点钢材试验研究

1.1 试验描述

LYP100 低屈服点钢材由鞍山钢铁提供,表 1 和表 2 总结了工厂提供钢材的技术参数,满足我国 GB/T 28905-2012《建筑用低屈服强度钢板》^[19]的具体要求。试验共设计了 15 个试件,试件详细尺寸如图 1 所示,试件有效长度为 14 mm,厚度为 10 mm。

表 1 YLP100 钢材的力学性能

Table 1 Mechanical properties of YLP100 steel

R_{el}/MPa	R_m/MPa	$EL/(\%)$	冷弯性能 180°	冲击韧性 J_k/J		
81	239	55	$d=3a$	192	180	205

注: R_{el} 为钢材屈服强度; R_m 为钢材拉伸强度; EL 为钢材断后伸长率; d 为弯心直径; a 为试样厚度。

表 2 YLP100 钢材的化学成分

(%)

Table 2 Chemical compositions of YLP100 steel

$C/(\times 10^{-2})$	$Si/(\times 10^{-2})$	$Mn/(\times 10^{-2})$	$P/(\times 10^{-3})$	$S/(\times 10^{-3})$	$Als/(\times 10^{-3})$
0.12	1	5	10	4	37
V	Nb	$Ti/(\times 10^{-2})$	Ceq	$Pcm/(\times 10^{-2})$	N
—	—	4.2	—	13	—

注: Ceq 为碳当量; Pcm 为焊接裂纹敏感性指数。

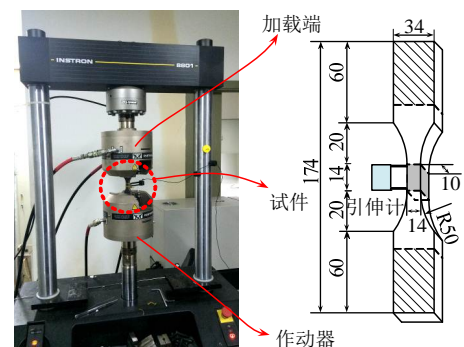


图 1 试件尺寸及加载装置

Fig.1 Details of specimen dimensions and loading device

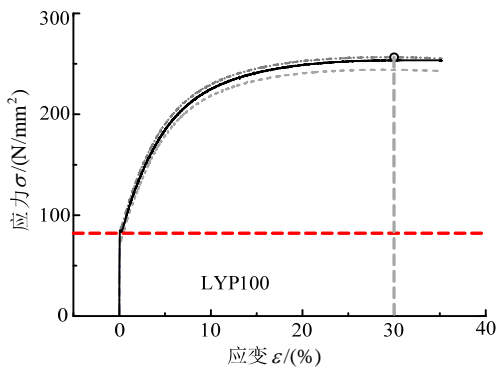
加载装置如图 1 所示,为 Instron Model 8801 拉压扭万能疲劳试验机。加载采用应变控制,施加单调加载以及多种循环加载制度。试件有效长度之

间设置引伸计,控制应变为引伸计测量得到的变形除以引伸计标距 12.5 mm。引伸计拉方向量程为 40%,压方向量程为 20%。

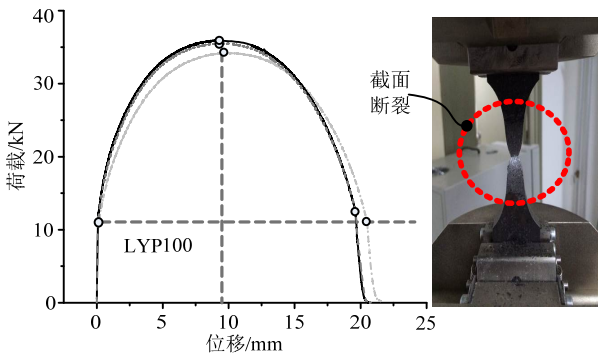
1.2 单调性能

图 2(a)为 3 个单调加载试件的应力-应变曲线。YLP100 低屈服点钢材的单调曲线没有明显的屈服平台,但在弹性段和塑性段之间有一转折点,因此,取此点的应力和应变为屈服强度 f_y 以及相应的屈服应变。由于引伸计的拉方向量程为 40%,控制应变最大值为 36%左右。根据曲线,获得了表 3 中 YLP100 低屈服点钢材的单调性能参数,包括材料弹性模量、屈服应力、抗拉强度最大值 f_u 及对应的应变 ϵ_1 和断裂强度 f_{u2} 。其中,平均屈服强度 f_y 为 78 MPa,平均抗拉强度 $f_u=251$ MPa,平均强屈比 $f_u/f_y=3.22$,说明 YLP100 钢材拥有很高的承载潜能。YLP100 钢材抗拉强度最大值对应的应变 $\epsilon_1=29.1\%$,说明 YLP100 具有很好的延性。

图 2(b)为试件两端的位移-荷载曲线。根据此图可以得到钢材的断裂应力,仅为钢材抗拉强度的 35%左右(平均断裂应力 $f_{u2}=87$ MPa,平均抗拉强度 $f_u=251$ MPa)。图 2(b)的破坏图展示了很高的截



(a) 应力-应变曲线



(b) 荷载-位移曲线

图 2 YLP100 钢材单调加载曲线

Fig.2 Monotonic curves of YLP100 steel

表 3 试件单调性能

Table 3 The monotonic properties of specimens

试件	E_s /GPa	f_y /MPa	f_u /MPa	f_u/f_y	f_{u2} /MPa	f_{u2}/f_u	ϵ_1 /(%)
M100-1	192	70	244	3.49	78	0.32	29.5
M100-2	201	80	256	3.20	90	0.35	28.0
M100-3	191	83	254	3.06	92	0.36	29.9
Mean	195	78	251	3.22	87	0.34	29.1

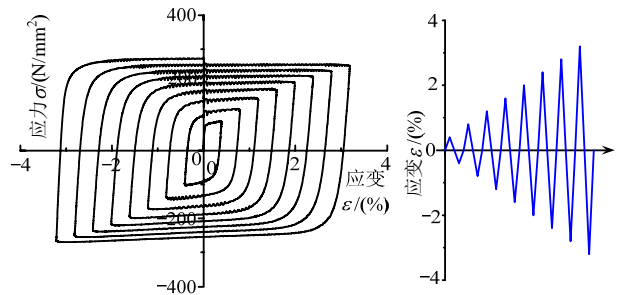
注: E_s 为钢材弹性模量; f_y 为钢材屈服应力; f_u 为钢材抗拉强度; f_{u2} 为钢材断裂应力; ϵ_1 为钢材抗拉强度所对应的应变。

面收缩率,可达 90%。以上现象同样说明了此种钢材具有很好的延展性能。

1.3 滞回性能

YLP100 低屈服点钢材在不同循环加载制度下的典型滞回曲线如图 3 所示。从图中可以看出,此种钢材的循环特征综合了各向同性强化及随动强化,并且各向同性强化特征起主导作用。L100-1 试件(图 3(a))和 L100-3 试件(图 3(c))为逐级加载,屈服面的大小随着加载应变幅值的增长而增加,展示了明显的各向同性强化行为,这种强化不是均匀变化,而是呈现指数规律,前期强化程度高,后期程度逐步降低。L100-2 试件(图 3(b))为同一级应变幅加载 3 次,在同一应变幅时,曲线仍然发生屈服面增加的情况,说明强化行为不仅与应变幅值有关,同时也受到累积塑性应变的影响。L100-4 试件(图 3(d))为应变幅值相同,但最大应变逐步改变,在这种情况下,屈服面随着最大应变的增加而不断增长。L100-5 试件(图 3(e))为应变幅从大到小加载,从曲线中可以观察到峰值指向的再加载规律。L100-6 试件(图 3(f))为压应变固定,拉应变不断增加,同样表现出各向同性强化行为。因此,根据以上滞回曲线规律,循环加载性能受到应变幅值、累积塑性应变以及最大应变值的影响。

试验试件的主要滞回性能如表 4 所示。由于循环加载, YLP100 钢材的强度大幅度提高,表现出明显的各向同性强化特征。在应变小于 3.2% 并且应变幅值小于 6.4% 时,钢材的最大强度和屈服强度的



(a) L100-1

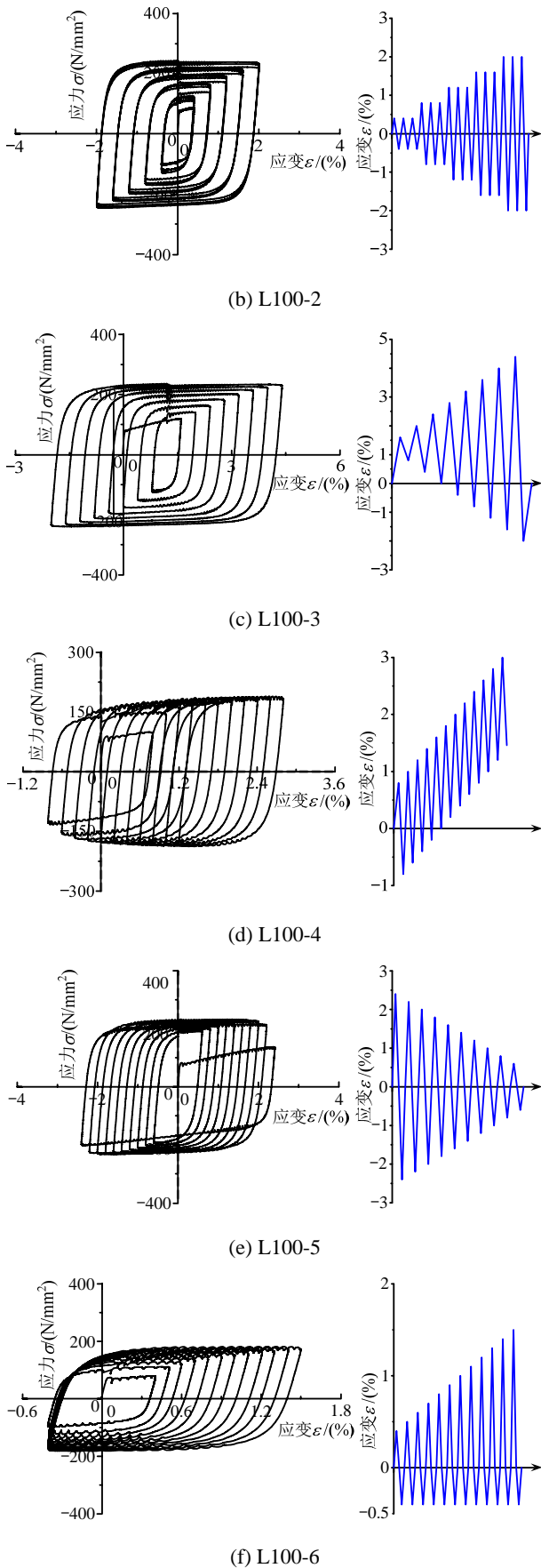


图3 YLP100 钢材典型滞回曲线

Fig.3 Typical hysteretic curves of YLP100 steel

表4 试件滞回性能

Table 4 Hysteretic behaviors of specimens

试件	f_y /MPa	f_u /MPa	f_u/f_y	塑性滞回圈数	最大应变幅/(%)	最大应变/(%)
L160-1	75	256	3.41	8	6.4	3.2
L160-2	73	245	3.36	15	4.0	2.0
L160-3	72	236	3.28	8	3.2	2.4
L160-4	73	189	2.59	11	3.6	2.8
L160-5	71	233	3.28	10	4.8	2.4
L160-6	73	181	2.48	12	1.9	1.5

注：符号含义同表3。

比值 f_u/f_y 在 2.48~3.41。因此，如果 LYP100 低屈服点钢材能够被充分利用，由这种材料制成的构件和结构将具有很好的承载力储备。然而，这种强化行为也会带来不利的影响，在进行构件设计时，如没有将钢材的循环强化特征考虑其中，会低估低屈服点钢构件传递到主体框架上的力，进而影响了主要构件的设计。

1.4 耗能能力

能量耗散系数 E_p 用来衡量结构的耗能能力，计算方法如下式：

$$E_p = \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{OBE} + S_{ODF}} \quad (1)$$

式中： S_{ABC} 和 S_{CDA} 代表上半部和下半部滞回曲线的面积； S_{OBE} 和 S_{ODF} 代表虚线围成的三角形面积，如图4所示。 E_p 值越大，说明结构滞回曲线越饱满，耗能能力越强。当滞回环面积为图4中的虚线矩形时，能量耗散系数 E_p 达到最大值 4.0。

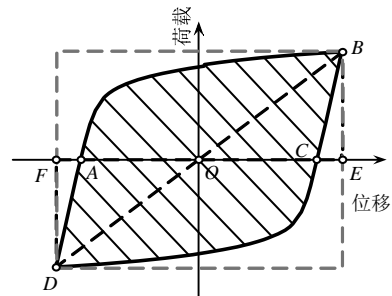


图4 能量耗散系数计算方法

Fig.4 Calculation method of energy dissipation coefficient

LYP100 低屈服点钢材耗能能力随应变幅值的变化如图 5(a)和图 5(b)所示。从图中可以看出，能量耗散系数均在 3.1~3.8，尤其当应变幅达到 2% 以上，能量耗散系数在 3.6 以上，充分说明 LYP100 钢材具有优越的耗能能力。

1.5 循环本构模型

根据试验数据，得到 Chaboche 塑性本构模型^[20]的各向同性强化准则和随动强化准则关键参数平

均值, 如表 5 所示。此参数可作为本构关系输入到 ABAQUS 计算模型之中, 进而准确模拟构件及结构的受力性能。

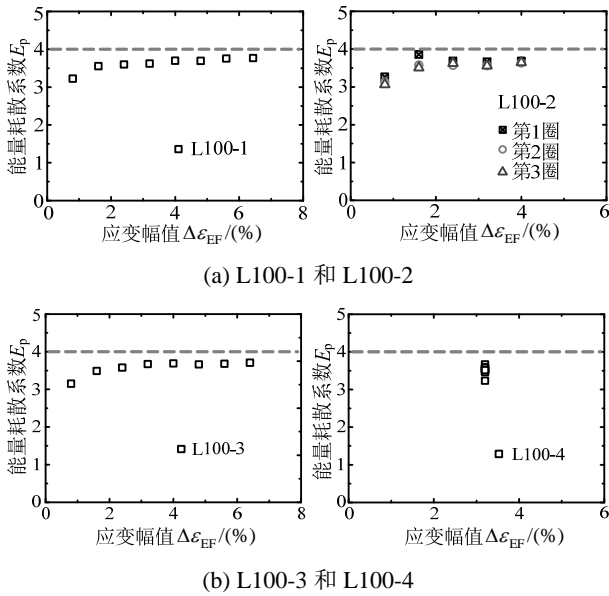


图 5 YLP100 钢材能量耗散系数

Fig.5 Energy dissipation coefficient of YLP100 steel

表 5 循环本构模型参数

Table 5 Parameters of cyclic constitutive model

Q_{∞} /MPa	b_{iso}	$C_{kin,1}$ /MPa	γ_1
134	6	12000	733
$C_{kin,2}$ /MPa	γ_2	$C_{kin,3}$ /MPa	γ_3
1200	200	833	75

2 不同钢材本构关系对比分析

为了对比不同钢材的本构关系, 选取低屈服点钢材(LYP100 和 LYP160)、Q345B 普通钢材^[5]、Q460D 高强度钢材^[7]试验数据进行分析, 包括单调行为、循环强化行为以及耗能能力。

2.1 单调行为对比分析

图 6 对比了不同钢材的单调加载曲线, 关键材料参数总结于表 6, 包括屈服强度、抗拉强度、抗拉强度所对应的应变以及强屈比。LYP100 和 LYP160 低屈服点钢材的屈服强度很低, 仅为普通钢材及高强度钢材的 1/4~1/3, 故此材料不宜仅作为主体承重构件材料, 但通常采用这种材料制作成耗能元件, 在地震作用下, 过板件屈服, 耗能地震能量, 进而保护主体结构不受破坏。

LYP100 钢材的强屈比为 3.22, LYP160 钢材的强屈比为 2.12, Q345B 普通强度钢材的强屈比为 1.37, Q460D 高强度钢材强屈比为 1.21, 因此, 从

上述数据中可以看出, 低屈服点钢材的单调强化更明显, 具有更大的单调承载潜力。

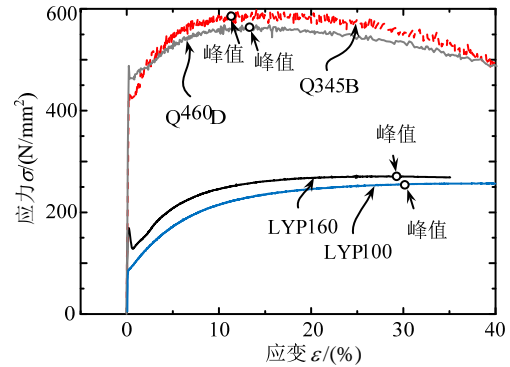


图 6 不同钢材单调曲线对比分析

Fig.6 Monotonic curves of different steels

表 6 不同钢材的单调力学性能

Table 6 Comparison of monotonic parameters of different steels

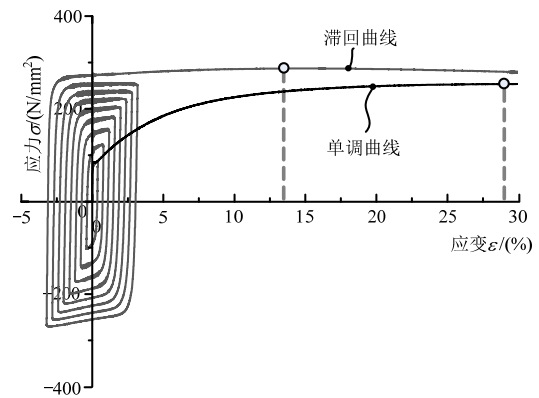
钢材	E_s /GPa	f_y /MPa	f_u /MPa	f_u / f_y	ϵ_1 / (%)
LYP100	195	78	251	3.22	29.1
LYP160	205	129	273	2.12	28.6
Q345B	205	429	589	1.37	10.1
Q460D	201	466	568	1.21	12.4

注: 符号含义同表 3。

LYP100 钢材极限强度所对应的应变为 29.1%, LYP160 钢材极限强度所对应的应变为 28.6%, 是普通钢材及高强度钢材的 2.3 倍~3.0 倍, 并且此应变之后, 低屈服点钢材的承载力退化率明显低于其他两种钢材, 说明低屈服点钢材具有更好的延展性能。同时, 低屈服点钢材的断口截面积只有初始截面的 10% 左右, 而普通钢材的截面收缩率在 60%~70%^[5,7], 进一步说明低屈服点钢材具有更好的延性。

2.2 循环强化行为对比分析

从图 7 可以看出, 循环荷载下, 几种钢材的强化现象更显著, 并且滞回曲线和单调曲线均存在明



(a) LYP100

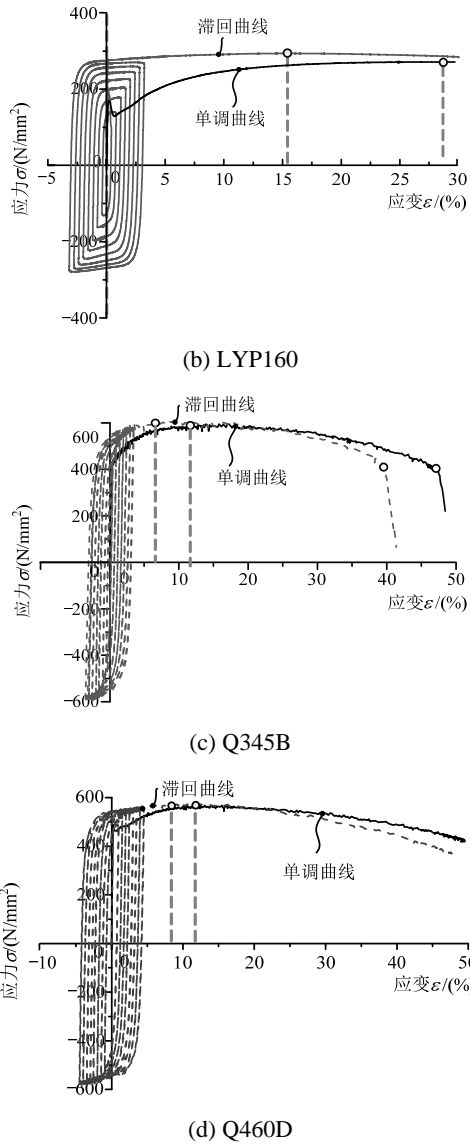


图7 不同钢材单调及循环曲线对比分析

Fig.7 Comparative analysis of monotonic and cyclic curves of different steels

显区别。其中，低屈服点钢材具有更显著的循环强化行为，单调曲线和滞回曲线的差别更明显，在3.5%应变范围内，循环强化作用使材料强度提高40%~50%，因此，不能用单调行为替代滞回性能。几种钢材在循环荷载下的抗拉强度所对应的应变与单调曲线相比发生改变，这是由于塑性应变累积进而导致退化现象的发生。

图8为根据数据拟合得到的Ramberg-Osgood模型^[21]骨架曲线，根据式(2)得到的材料关键参数如表7所示。通过正则化处理，可以清楚获得不同钢材的循环强化程度。

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

式中： K' 为循环强化系数； n' 为循环强化指数； $\Delta \varepsilon$ 代表总应变幅； $\Delta \varepsilon_e$ 代表弹性应变幅； $\Delta \varepsilon_p$ 代表塑性应变幅； $\Delta \sigma$ 为应力幅； E_s 为钢材的弹性模量。

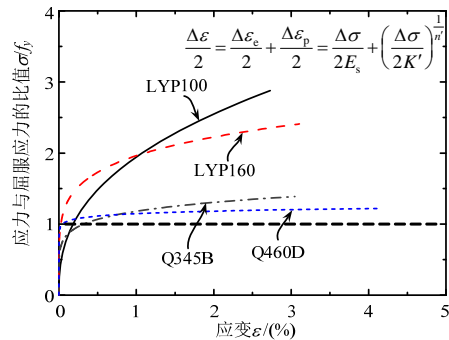


图8 钢材循环骨架曲线对比分析

Fig.8 Comparative analysis of cyclic skeleton curves

从图8可以看出，两种低屈服点钢材的循环强化行为明显大于普通钢材及高强度钢材，尤其是LYP100钢材。应变在4%以内时，普通钢材和高强度钢材的 σ / f_y 小于1.4，而LYP100和LYP160钢材的 σ / f_y 能够达到2.0~3.0以上。

对于低屈服点钢材，由于明显的各向同性强化现象，如果构件像普通钢材以及高强度钢材一样，按照屈服强度进行设计，构件的承载能力以及对整体结构的贡献会被明显低估，产生不利的影响。

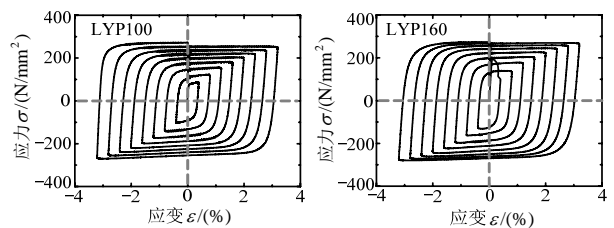
表7 不同钢材的循环强化参数

Table 7 Cyclic hardening parameters of different steels

材料	E_s /GPa	K' /MPa	n'
LYP100	195	162.42	0.3960
LYP160	205	171.70	0.3725
Q345B	205	828.39	0.0973
Q460D	201	736.01	0.0776

2.3 耗能能力对比分析

图9对比了不同钢材的典型滞回曲线以及耗能能力。几种钢材都具有较好的耗能能力，能量耗散系数均随着应变幅的增加而不断增大。从图中可以看出，低屈服点钢材滞回曲线更为饱满，耗能能力也明显高于普通钢材和高强度钢材(最大可提高30%)，并且较为稳定，当应变幅较小时，也具有较大的能量耗散系数。



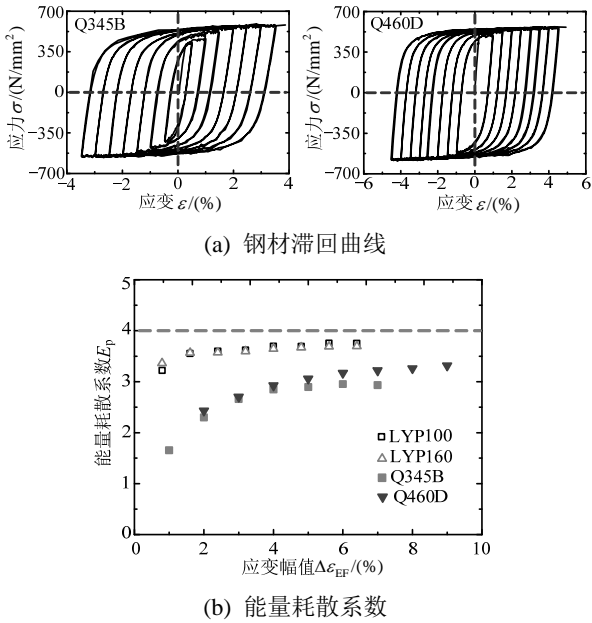


图9 钢材耗能能力对比分析

Fig.9 Comparison of the energy dissipation capacity of different steels

综上所述，低屈服点钢材虽然屈服强度比普通钢材和高强度钢材小，但其抗震性能却十分优越。

3 不同钢材本构关系应用分析

为了对比钢材本构关系对结构受力性能的影响，采用文献[9]的阻尼器试件，利用 ABAQUS 的 SR4 壳单元建立有限元模型。具体模型尺寸如图 10(a)所示。内嵌阻尼板采用 Chaboche 循环本构模型^[20](考虑各向同性强化以及随动强化)以及理想弹塑性模型。本构关键参数根据本文和文献[5]和文献[7]试验结果标定，如表 8 所示。为了验证模型的准确性，采用 LYP100 的材料强化参数以及文献[9]中的屈服强度对结构滞回行为进行模拟，试验与数值测结果对比如图 10(b)所示(正则化荷载 P/P_y 与剪切变形的关系)，说明建议的材料参数能够较好地预测低屈服点结构构件的滞回特性。

图 10(c)为几种钢材的正则化荷载-剪切转角曲线，对比了采用循环本构模型以及理想弹塑性本构的计算结果。从对比图中可以看出，由于钢材的强化特征，所有构件循环本构计算得到承载力均比理想弹塑性本构计算结果大，其中，由于低屈服点钢材的各向同性强化特征起控制作用，故循环本构模型的计算曲线和理想弹塑性的区别远远大于普通钢材以及高强度钢材。因此在结构计算中，对低屈服点钢构件，如果仅用理想弹塑性模型，则会低估结构承载力。图 10(d)对比了当剪切转角为 0.045 时

各构件滞回环的能量耗散系数，其变化规律和图 9(b)中材料的能量耗散系数的变化规律一致。

分析结果说明，钢材本构模型会对结构受力性能分析产生很大影响，因此需要根据所采用的钢材选取适当的材料本构参数。

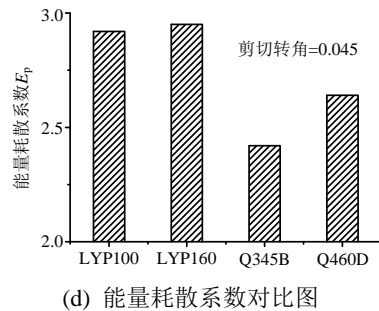
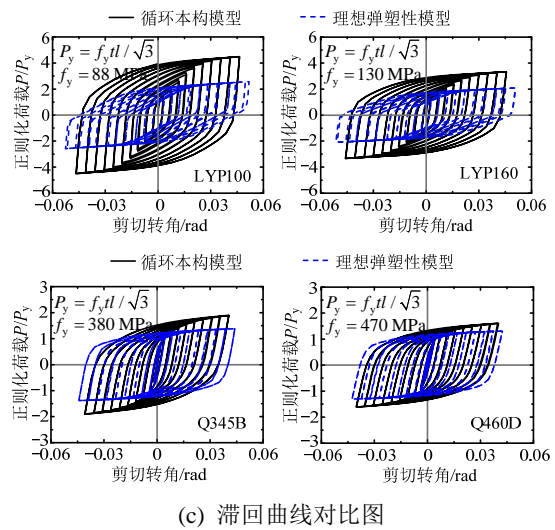
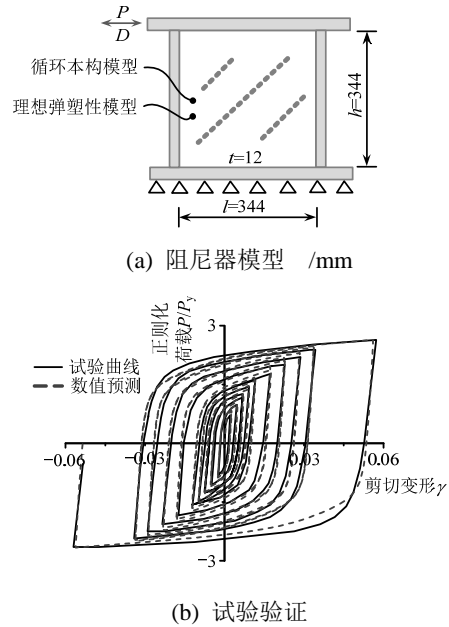


图 10 不同钢材本构关系应用分析

Fig.10 Application comparison of constitutive relationship of different steels

表 8 循环本构模型参数

Table 8 Parameters of cyclic constitutive model

钢材	Q_c /MPa	b_{iso}	$C_{kin,1}$ /MPa	γ_1	$C_{kin,2}$ /MPa	γ_2
LYP100	134	6	12000	733	1200	200
LYP160	118	4.5	18667	1133	1267	233
Q345B	21	1.2	7993	175	6773	116
Q460D	16	1.1	4924	154	3101	120
钢材	$C_{kin,3}$ /MPa	γ_3	$C_{kin,4}$ /MPa	γ_4	—	—
LYP100	833	75	—	—	—	—
LYP160	2730	127	50	9	—	—
Q345B	2854	34	1450	29	—	—
Q460D	2730	31	1450	26	—	—

4 结论

本文进行了 LYP100 低屈服点钢材单轴加载试验, 分析其单调及循环受力性能。在此基础上, 对比了低屈服点钢材、普通钢材 Q345B 及高强度钢材 Q460D 的本构关系, 并将本构关系在结构构件中进行应用对比。总结本文内容, 得到如下结论:

(1) LYP100 钢材的强屈比为 3.22, LYP160 钢材的强屈比为 2.12, Q345B 普通强度钢材的强屈比为 1.37, Q460D 高强度钢材强屈比为 1.21, 因此低屈服点钢材的单调强化更明显, 具有更大的单调承载潜力。

(2) 应变在 4% 以内的循环加载, LYP100 和 LYP160 钢材的 σ/f_y 能够达到 2.0~3.0 以上, 而普通钢材和高强度钢材的 σ/f_y 小于 1.4, 低屈服点钢材具有更大的循环强化特征。然而, 这种强化行为同时会带来不利的影晌, 在进行构件设计时, 会低估低屈服点钢构件传递到主体结构上的力, 存在安全隐患。

(3) LYP100 钢材和 LYP160 钢材极限强度所对应的应变分别为 29.1% 和 28.6%, 为普通钢材及高强度钢材的 2.3 倍~3.0 倍。并且, 在此应变之后, 低屈服点钢材的承载力退化率明显低于其他两种钢材, 说明低屈服点钢材具有更好的延性。

(4) 几种钢材均拥有较好的耗能能力, 低屈服点钢材滞回曲线更饱满, 耗能能力也明显高于普通钢材和高强度钢材(接近 4.0), 且其耗能能力稳定。

(5) 根据应用循环本构模型以及理想弹塑性模型的计算结果, 说明钢材本构关系会对结构构件的受力性能产生很大的影响。由于低屈服点钢材具有显著的各向同性强化行为, 其两种本构模型的计算结果差异更大(1.5 倍~1.8 倍)。因此, 在结构计算分析中, 需要根据所采用的钢材选取适当的本构关系

模型。

参考文献:

- [1] 王萌, 石永久, 王元清, 施刚. 循环荷载下钢材本构模型的应用研究[J]. 工程力学, 2013, 30(7): 212—218.
Wang Meng, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing, Shi Gang. Application study on cyclic constitutive model of steel [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7): 212—218. (in Chinese)
- [2] Nathaniel G C, Krawinkler H. Uniaxial cyclic stress-strain behavior of structural steel [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111(9): 1105—1120.
- [3] Nip K H, Gardner L, Davies C M, et al. Extremely low cycle fatigue tests on structural carbon steel and stainless steel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(1): 96—110.
- [4] Dusicka P, Itani A M, Buckle I G. Cyclic response of plate steels under large inelastic strains [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(2): 156—164.
- [5] 石永久, 王萌, 王元清. 循环荷载作用下结构钢材本构关系试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(3): 293—300.
Shi Yongjiu, Wang Meng, Wang Yuanqing. Experimental study of structural steel constitutive relationship under cyclic loading [J]. Journal of Building Material, 2012, 15(3): 293—300. (in Chinese)
- [6] 石永久, 王萌, 王元清. 结构钢材循环荷载下的本构模型研究[J]. 工程力学, 2012, 29(9): 92—98.
Shi Yongjiu, Wang Meng, Wang Yuanqing. Study on constitutive model of structural steel under cyclic loading [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9): 92—98. (in Chinese)
- [7] 施刚, 王飞, 戴国欣, 石永久, 王元清. Q460D 高强度结构钢材循环加载试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7): 48—55.
Shi Gang, Wang Fei, Dai Guoxin, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing. Experimental and modeling study of high-strength structural steel under cyclic loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(7): 48—55. (in Chinese)
- [8] Xu L Y, Nie X, Fan J S, Tao M X, Ding R. Cyclic hardening and softening behavior of the low yield point steel BLY160: Experimental response and constitutive modeling [J]. International Journal of Plasticity, 2016, 78: 44—63.
- [9] Nakashima M. Strain-hardening behavior of shear panels made of low-yield steel I: test [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1995, 121(12): 1742—1749.
- [10] Chen C C, Chen S Y, Liaw J J. Application of low yield strength steel on controlled plastification ductile concentrically braced frames [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2001, 25(8): 823—836.
- [11] Zhang C F, Aoki T, Zhang Q J, Wu M P. Experimental

- investigation on the low-yield-strength steel shear panel damper under different loading [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 84(5): 105–113.
- [12] Zhang C F, Zhang Z S, Zhang Q J. Static and dynamic cyclic performance of a low-yield-strength steel shear panel damper [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 79(5): 195–203.
- [13] De Matteis G, Landolfo R, Mazzolani F M. Seismic response of MR steel frames with low-yield steel shear panels [J]. *Engineering Structures*, 2003, 25(2): 155–168.
- [14] 王佼佼, 石永久, 严红, 王元清, 潘鹏, 牧野俊雄, 齐雪. 低屈服点全钢防屈曲支撑抗震性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(10): 9–16.
Wang Jiaojiao, Shi Yongjiu, Yan Hong, Wang Yuanqing, Pan Peng, Toshio Makino, Qi Xue. Experimental study on the seismic behavior of all-steel buckling-restrained brace with low yield point [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(10): 9–16. (in Chinese)
- [15] Chen S J, Jhang C. Experimental study of low-yield-point steel plate shear wall under in-plane load [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(6): 977–985.
- [16] Li C H, Tsai K C, Chang J T, Lin C H, Chen J C, Lin T H, Chen P C. Cyclic test of a coupled steel plate shear wall substructure [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2012, 41(9): 1277–1299.
- [17] 房晨, 郝际平, 樊春雷, 袁昌鲁, 郭昭. 半刚性框架-密肋框格防屈曲低屈服点钢板墙抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(11): 10–19.
- Fang Chen, Hao Jiping, Fan Chunlei, Yuan Changlu, Guo Zhao. Experimental study on seismic behavior of semi-rigid frame with buckling-restrained multi-stiffeners low yield point steel plate shear walls [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(11): 10–19. (in Chinese)
- [18] 范圣刚, 丁智霞, 舒赣平, 尚春方, 刘美景. 新型两阶段耗能开孔式低屈服点钢耗能装置试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(1): 110–117.
Fan Shenggang, Ding Zhixia, Shu Ganping, Shang Chunfang, Liu Meijing. Experimental study on new open-pore two-stage energy dissipation device with low yield point steel [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2016, 46(1): 110–117. (in Chinese)
- [19] GB/T 28905-2012, 建筑用低屈服强度钢板[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
GB/T 28905-2012, Low yield strength steel plates for construction [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [20] Chaboche J L. Time independent constitutive theories for cyclic plasticity [J]. *International Journal of Plasticity*, 1986, 2(2): 149–188.
- [21] Ramberg W, Osgood W R. Description of stress-strain curves by three parameters [R]. Washington: University of Washington. National Advisory Committee for Aeronautics. TN 902, 1943.