

# Research on Damage Index of Steel Q225

Lei Wang

College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai  
Email: [397518976@qq.com](mailto:397518976@qq.com)

Received: Apr. 2<sup>nd</sup>, 2014; revised: Apr. 30<sup>th</sup>, 2014; accepted: May 6<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by author and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Damage index describes the damage situation of materials, members and structures. Various damage index models were reviewed and the model suitable for Q225 steel materials was selected. Based on the result of monotonic loading tests and low-cycle cyclic loading tests on steel Q225, the selected damage index model was modified with the suggested weighting coefficient  $\beta$ . This provides the basis for further research on steel Q225.

## Keywords

Q225 Steel, Low-Cycle Cyclic Loading, Damage Index

---

# Q225钢材损伤变量研究

王 雷

同济大学土木工程学院, 上海  
Email: [397518976@qq.com](mailto:397518976@qq.com)

收稿日期: 2014年4月2日; 修回日期: 2014年4月30日; 录用日期: 2014年5月6日

---

## 摘 要

损伤变量是描述材料、构件或结构劣化程度的变量。首先对不同的损伤变量模型进行了评述, 并选择适用于Q225钢材的损伤变量模型, 基于Q225钢材单调拉伸和低周疲劳反复加载试验的结果, 对所选择的损伤变量模型进行了修正, 提出了合理的权重系数 $\beta$ , 为Q225钢材在低周反复加载下力学性能的后续研

究提供了基础。

## 关键词

Q225钢材, 低周反复加载, 损伤变量

## 1. 引言

我国是地震多发国家, 建筑结构在地震作用下的响应和抗震能力关系到人民生命财产的安全, 地震作用是建筑结构分析设计中需要考虑的重要因素。地震作用对于建筑结构通常是循环往复作用, 钢结构中的钢材在循环荷载下将出现如包辛格效应、循环硬化、循环软化、材料累积损伤等, 这导致钢材在循环荷载下的性能不同于钢材在静荷载下的性能。

在地震的反复作用下, 建筑钢材会产生损伤, 钢材的累积损伤将对钢材的力学性能产生影响, 当损伤积累到一定程度, 材料和结构发生破坏。因此有必要对建筑钢材在反复荷载作用下的损伤进行研究。

在对 Q225 钢材进行的单调拉伸试验和反复加载试验的基础上, 本文将对其他学者的多种损伤变量模型进行评述, 并提出适用于 Q225 钢材的损伤变量。为研究低屈服点钢尤其是 Q225 钢材的循环加载性能以及考虑损伤累积影响的钢材本构关系提供基础。

## 2. 损伤变量评述

损伤变量是描述材料、构件或结构劣化程度的变量, 一般定义为反应历程中某与损伤程度相关的累积量与相应的指标极限允许量的比[1]。

基于退化的损伤变量, 其损伤可用截面某种性质的减少来表达:

$$D = 1 - \frac{A_{\text{eff}}}{A} \quad (1)$$

式中,  $D$  为损伤变量,  $A$  为全截面面积,  $A_{\text{eff}}$  为有效截面面积。

基于变形的损伤变量, 其变形变量包括构件的变形、应变和塑性率等, 对于单质点体系的振动, 采用如下方法:

$$D_e = D_e^m + D_e^c = \frac{\mu_{\max} - 1}{\mu_f} + 0.25 \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\mu_{pi}}{\mu_f} \quad (2)$$

式中,  $D_e$  是振动结束时由  $N$  次循环塑性变形产生的损伤;  $D_e^m$  是由最大变形产生的损伤;  $D_e^c$  是由循环塑性变形产生的损伤;  $\mu$  是塑性率, 为塑性变形与屈服变形之比;  $\Delta\mu_{pi}$  是第  $i$  次循环的塑性率增量;  $\mu_{pmi}$  是  $\Delta\mu_{pi}$  的平均值;  $\mu_f$  是单向变形破坏时的塑性率;  $\mu_{\max}$  是循环过程中的最大塑性率。

此外, 基于变形和能量的损伤变量模型认为钢材在反复作用下的损伤变量  $D$  与所经历的塑性应变以及在循环荷载下的耗能有关。Park 和 Ang[2] [3] 基于一大批美国和日本的钢筋混凝土梁柱试验结果, 提出钢筋混凝土构件的双参数地震损伤模型, 从变形和滞回能耗散方面综合考虑, 用规格化最大变形和规格化滞回耗能线性组合的形式来表示损伤变量  $D$ :

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_m} \int dE \quad (3)$$

式中,  $\delta_m$  为实际荷载作用下最大变形;  $\delta_u$  为单调荷载作用下极限变形;  $Q_y$  为屈服强度;  $dE$  为吸收滞回能量增量;  $\beta$  为非负参数。

该模型物理意义比较明确，并且经过试验和地震记录的检验，得到了工程界的认同。但也存在如下缺点：

(1) 单调加载时， $D$  应为 1，表示体系处于破坏极限状态，但是式(1)所示的 Park 和 Ang 模型在单调加载情况下，破坏时  $D > 1$ 。

(2) 在弹性反应阶段， $D$  应该为 0，但是根据式(1)， $D > 0$ 。

针对 Park 和 Ang 模型上述不足，许多研究者提出了改进形式，包括以下几种。

(1) 沈祖炎等[4]针对钢材的特性，提出了钢材在反复荷载作用下的损伤变量  $D$ ：

$$D = (1 - \beta) \frac{\varepsilon_m^p}{\varepsilon_u^p} + \beta \sum_{i=1}^N \frac{\varepsilon_i^p}{\varepsilon_u^p} \quad (4)$$

式中： $\varepsilon_m^p$  为钢材所经历的最大塑性应变； $\varepsilon_i^p$  为钢材

在第  $i$  次半循环中的塑性应变； $\varepsilon_u^p$  为钢材在一次拉伸时的极限塑性应变； $\beta$  为权重系数，对于 Q235 钢， $\beta = 0.0081$ ； $N$  为反复荷载的半循环周数。

(2) 欧进萍，牛荻涛等[5]为分析地震作用下的钢结构破坏机理时，提出了如下表述的损伤变量  $D$ ：

$$D = \left( \frac{\delta_m}{\delta_u} \right)^\alpha + \left( \frac{E_h}{E_u} \right)^\alpha \quad (5)$$

式中， $\alpha$  是试验测定的参数， $\delta_u$  是层间弹塑性极限位移， $E_u$  是在单调加载下体系的滞回耗能， $E_h$  是实际的累积滞回耗能。

## 2. Q225 钢材损伤变量研究

### 2.1. Q225 钢材单调拉伸试验和低周反复加载试验

单调拉伸试验的主要目的是了解此批钢材的一些基本性能，如弹性模量、屈服强度、极限强度和极限应变等。取自同一批 25 mm 厚 Q225 钢板，其出厂检验力学性能列于表 1，沿轧制方向加工成 6 个试件，试件编号 1、2、3 作为试验件，4、5、6 作为备用件。试验采用引伸计测量应变，引伸计标距 50 mm，量程 25 mm。试验机加载速率 2 mm/min。试件尺寸如图 1 所示，实际构件如图 2 所示。试件装好后对中，再按加载速度加载直至试件断裂破坏。

反复加载试件来自同一批 Q225 钢材。共 8 个试件，取自 25 mm 厚 Q225 钢板，试件编号 1#，2#，3#，4# 作为试验件，5#，6#，7#，8# 作为备用件，试件尺寸如图 3 所示，实际构件如图 4 所示。

各试件的具体加载制度如表 2 所示，加载方式采用应变控制，试验机应变加载速率为  $0.002 \text{ mm/mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

### 2.2. Q225 钢材试验结果和损伤变量模型

单调拉伸试验所测得的 Q225 钢材的弹性模量、屈服应力和断后伸长率情况如表 3 所示。

单调拉伸试验所测得三个试件的应力应变曲线如图 5 所示。

低周反复循环试件的破坏标准定为：最大拉力衰减 20% 且出现明显裂纹。四个试件破坏时循环圈数和用时如表 4 所示。

Q225 钢材四个试验件的滞回曲线如图 6 所示。

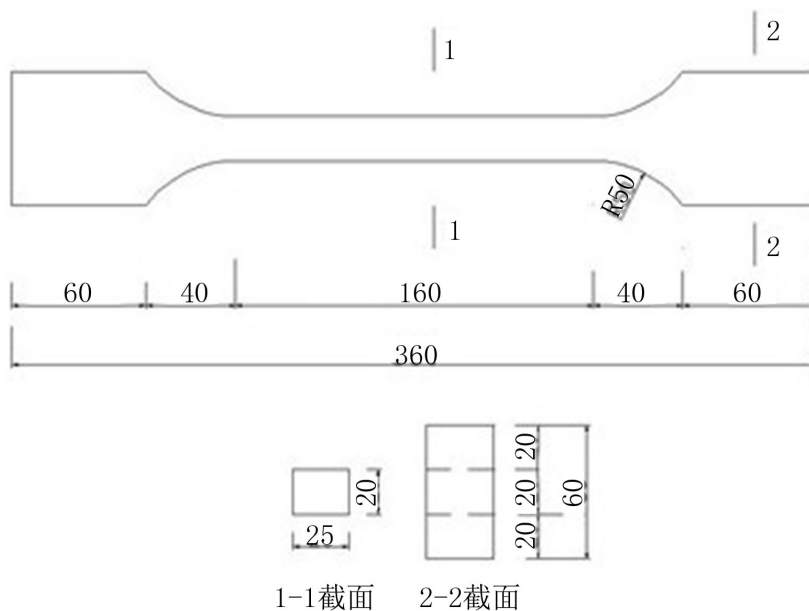
在沈祖炎等[6]提出的钢材在低周反复荷载作用下的损伤变量  $D$  模型的基础上，针对 Q225 的反复加载力学性能对权重系数  $\beta$  进行修正。

$$D = (1 - \beta) \frac{\varepsilon_m^p}{\varepsilon_u^p} + \beta \sum_{i=1}^N \frac{\varepsilon_i^p}{\varepsilon_u^p} \quad (6)$$

**Table 1.** Mechanical properties of Q225 steel (provided by the manufacturer)

**表 1.** Q225 钢材力学性能(厂家提供)

	$R_{p0.2}$	$R_m$	A, %	冲击功吸收能量(-20°C), J			冷弯( $d = 3a$ )
Q225~25 mm 厚	215	313	43.0	171	173	175	完好



**Figure 1.** Size of specimen of Q225 under monotonic tensile tests

**图 1.** Q225 单调拉伸试件尺寸图



**Figure 2.** Practical specimen of Q225 under monotonic tensile tests

**图 2.** Q225 单调拉伸实际构件图

式中,  $\varepsilon_u^p$  为钢材单调拉伸时的极限塑性应变, 对于 Q225, 根据单调拉伸试验结果, 可以取  $\varepsilon_u^p = 0.44$ 。

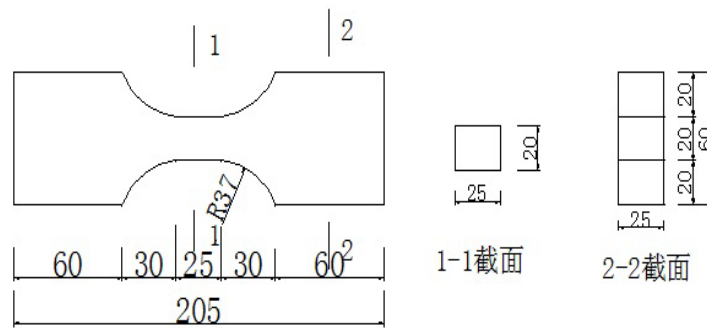


Figure 3. Size of specimen of Q225 under repeated loading tests

图 3. Q225 反复加载试件尺寸图



Figure 4. Practical specimen of Q225 under repeated loading tests

图 4. Q225 反复加载实际构件图

Table 2. Cyclic loading system

表 2. 低周反复加载制度

试件编号	加载制度
1#	关于 $\varepsilon = 0$ 对称加载, 以应变 0.01 等幅度加载, 直至最大拉力衰减 20% 且出现明显裂纹
2#	关于 $\varepsilon = 0$ 对称加载, 以应变 0.02 等幅度加载, 直至最大拉力衰减 20% 且出现明显裂纹
3#	关于 $\varepsilon = 0$ 对称加载, 以应变 0.03 等幅度加载, 直至最大拉力衰减 20% 且出现明显裂纹
4#	关于 $\varepsilon = 0$ 对称加载, 以应变 0.04 等幅度加载, 直至最大拉力衰减 20% 且出现明显裂纹

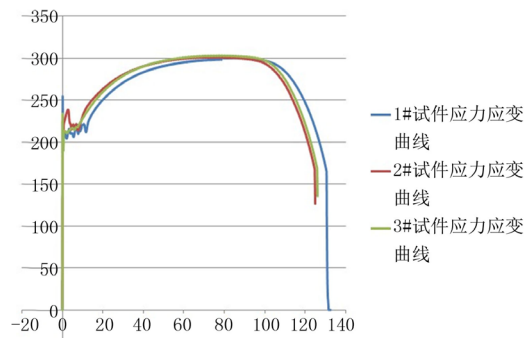
Table 3. Monotonic tensile test results

表 3. 单调拉伸试验结果

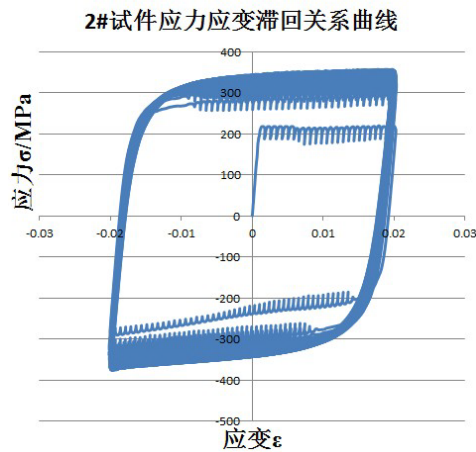
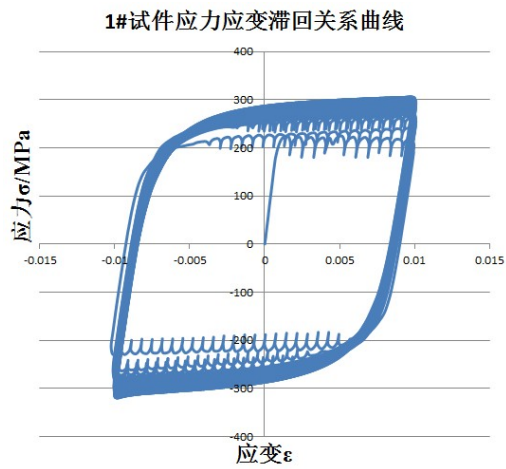
试件编号	弹性模量(MPa)	屈服应力(MPa)	断后伸长率(%)
1	205847.09	254.66	44.17
2	208727.21	238.63	44.00
3	207057.82	234.06	43.92
平均值	207210.71	242.45	44.03

**Table 4.** The number of cycles and the time used of lap when the Q225 specimen fails  
**表 4.** Q225 试件破坏时循环圈数和用时

试件编号	加载幅值	循环圈数	用时
1#	0.01	566	3°13'
2#	0.02	255	3°13'
3#	0.03	115	2°14'
4#	0.04	81	2°6'



**Figure 5.** Q225 monotonic tensile stress-strain curves  
**图 5.** Q225 单调拉伸应力应变曲线



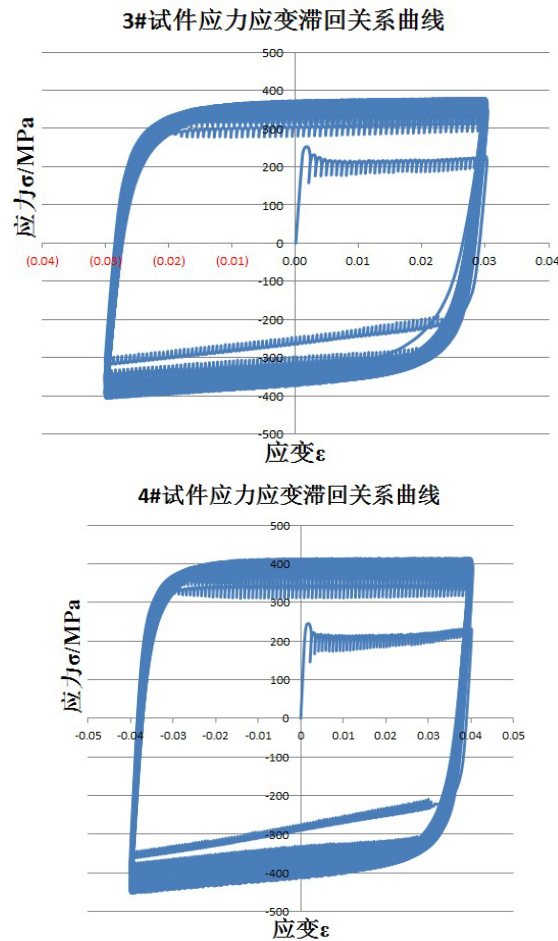


Figure 6. Hysteresis curves of Q225 steel specimen  
图 6. Q225 钢材试验件的滞回关系曲线

对  $\beta$  取不同的值, 可以得到不同的损伤变量计算值  $\bar{D}$ 。根据损伤变量的物理意义, 认为当试件破坏或者强度出现明显下降时,  $D = 1$ 。根据最小二乘法, 最优的  $\beta$  值应该使式(7)中的  $H$  最小, 如图 7。

$$H = \sum_{j=1}^N (\bar{D} - D)^2 \quad (7)$$

根据图中最小二乘法的计算结果, 取  $\beta = 0.051$ , 计算得到此时不同试件破坏时的损伤变量计算值  $\bar{D}$ , 列于表 5 中。从结果可以看出, 四个试件根据  $\beta = 0.051$  计算得到的  $\bar{D}$  均接近于理论值  $D = 1$ , 可以证明取  $\beta = 0.051$  是合理的。

### 3. 结论

本文对不同的损伤变量模型进行了评述, 根据 Q225 单调加载和低周反复加载试验结果, 通过计算分析提出了适用于 Q225 低屈服点钢材的损伤变量模型:

$$D = (1 - \beta) \frac{\epsilon_m^p}{\epsilon_u^p} + \beta \sum_{i=1}^N \frac{\epsilon_i^p}{\epsilon_u^p} \quad (8)$$

式中, 权重系数  $\beta = 0.051$ , 其他参数的意义同前。

经验算, 采用上述损伤变量模型时, 试件破坏时的损伤变量计算值  $\bar{D}$  接近于理论值  $D = 1$ 。证明对

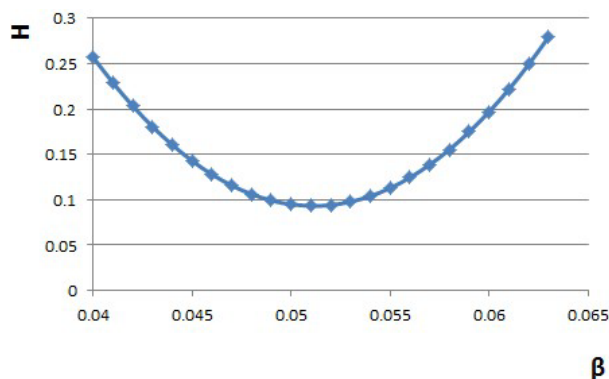


Figure 7. Values of  $H$  under different weighting factors  $\beta$   
 图 7. 不同权重系数  $\beta$  值下的  $H$

Table 5. Calculation of damage variable parameter

表 5. 损伤变量参数计算

构件编号	塑性应变累积 $\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^p$	最大塑性应变 $\varepsilon_m^p$	$\beta = 0.051$ 时损伤变量计算值 $\bar{D}$
1#	10.00	0.0101	1.181
2#	8.57	0.0203	1.037
3#	6.65	0.0325	0.841
4#	5.29	0.0404	0.700
变异系数			10.9%

Q225 钢材，使用该损伤变量模型是对的。

### 参考文献 (References)

- [1] 欧进萍, 吴波 (1992) 结构概率累积损伤的理论和应用. 结构工程科学发展青年专家研讨会, 哈尔滨, 82-88.
- [2] Park, Y.J. and Ang, A.H.S. (1985) Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering*, **111**, 722-739.
- [3] Park, Y.J., Ang, A.H.S. and Wen, Y.K. (1985) Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings. *Journal of Structural Engineering*, **111**, 740-757.
- [4] Kunnath, S.K., Reinhorn, A.M. and Lobo, R.F. (1992) IDARC Version 3.0: A program for the inelastic damage analysis of R/C structures. Technical Report NCEER-92-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo.
- [5] 欧进萍, 牛荻涛, 王光远 (1990) 多层非线性抗震钢结构的模糊动力可靠分析与设计. *地震工程与工程振动*, **4**, 27-37.
- [6] Shen, Z.Y. and Dong, B. (1997) An experimental-based cumulative damage mechanics model of steel under cyclic loading. *Advances in Structural Engineering*, **1**, 39-46.