

川崎製鉄 鋼構造研究所 正員 原 道彦

正員 川井 豊

1. まえがき 硬度(硬さ)は、その材料が他の硬質物質(圧子)により強制変形を与えられたときに呈する抵抗の大小を表わすことから、材料に関する引張強さなどの静的特性向に種々の相関関係があると考えられる。¹⁾ 事実、Vickers 硬さ、Brinell 硬さ、Rockwell 硬さの大きさと材料の引張強さとの間には密接な関係があることはよく知られている。また、低サイクル疲労領域における金属材料の疲労強度が、材料の静的特性と強い相関を有することが報告されており、²⁾ 硬さの測定値と材料の静的特性との関係を明らかにしておけば、硬さ試験が比較的容易な実験手法であることから、構造物における低サイクル疲労特性を把握する場合に益するところが大きいと考えられる。本研究は、Meyer によって提唱された Meyer 硬さの考えを用いて材料の各種静的特性との関係を導くとともに、Meyer 硬さに関する法則がひずみ履歴を受けた後にも成り立つことを確認し、低サイクル疲労領域にまでも拡張し得ることを可能性を証明せんとするものである。

2. Meyer 硬さと材料の静的特性との関係 二で、本研究の基礎となる Meyer の法則を簡単に紹介し、これから導かれる Meyer 硬さと静的特性との関係を示す。直径 D なる球形圧子を用いて試料に直径 d なる圧痕をつけて硬さを測ったとき、加える荷重 W を圧痕の受圧面積 $\{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})\}/2$ で除した平均圧力 P_m は、一般に良く用いられる Brinell 硬さを表わすが、いま加える荷重 W を圧痕の投影面積 $\pi d^2/4$ で除したときの平均圧力 P_m を Meyer 硬さと呼ぶ。すなわち、

$$P_m = 4W/\pi d^2 \quad \text{----- (1)}$$

一般に、ほとんどの金属の降伏応力は、近似的に歪形または歪の簡単なべき乗関数で式(2)の如く表わされる。(Nadai)³⁾

$$\sigma = m \cdot \epsilon^n \quad \text{----- (2)}$$

(指数 n は加工硬化指数に対応する。) くぼみ端の変形 ϵ_E は直接 d/D に比例するものと近似出来るが一般性をもたせると式(3)となる。

$$\epsilon_E = \alpha (d/D)^{n^*} \quad \text{----- (3)} \quad \text{二に、}$$

の α は定数。式(2),(3)から、くぼみ端の代表的な応力は、

$$\sigma_E = m \cdot \epsilon_E^n = m \cdot \alpha^n \cdot (d/D)^{n \cdot n^*} \quad \text{----- (4)}$$

平均圧力 P_m が σ_E に比例すると仮定すれば、

$$P_m = \hat{m} \cdot \sigma_E \quad \text{----- (5)}$$

二に $\hat{m}$ は材料定数で、理想塑性体に対しては平面応力を受ける板に $\hat{m} = 3.0$ (Von Mises の理論) または $\hat{m} = 2.6$ (最大剪断理論) であることが示されており、鋼材ではほぼ $m = 2.8$ ととてよい。式(1),(4),(5)から、

$$W = \frac{\pi k}{4} \cdot \frac{d^x}{D^{x-2}} \quad \text{----- (6)} \quad \text{二に、} k = m \cdot \hat{m} \cdot \alpha^n$$

$$x = n \cdot n^* + 2$$

異なる直径 $D_1, D_2, D_3, \dots$ の球形圧子に対しては、

$$W = k_1 \cdot d^x = k_2 \cdot d^x = k_3 \cdot d^x = \dots \quad \text{----- (7)} \quad \text{二で、}$$

$k_1^*, k_2^*, k_3^*, \dots$ は、 $k_1^* D_1^{x-2} = k_2^* D_2^{x-2} = k_3^* D_3^{x-2} = \dots = \frac{\pi}{4} k$ ----- (8) を満足する。式(8)で表わ

れる関係が Meyer の法則で、式(6)で用いた指数 x は Meyer 指数と呼ばれる材料定数である。また、式(3)において指数 n^* は鋼材では 1 とおけ、 $x = n + 2$ ----- (9)。すなわち、Meyer 指数 n は加工硬化指数 n に 2 を加えた値にほぼ等しくなる。さらに、くぼみ端の変形 ϵ_E と引張・圧縮試験時の真歪 ϵ_t との相関関係が、Tabor⁴⁾

によって明らかにされており、 $\epsilon_E = \epsilon_E/d \approx 0.2(\frac{d}{D}) = \epsilon_t$ ----- (10) とおける。 ϵ_E は、硬さの測定

値から得られ、歪に対応がある量という意味から、硬さ歪と呼ばれる。 P_m と真応力の間に式(5)と同様の関係が成り立ち、

$$P_m = \hat{m} \cdot \sigma_E = k \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n = k \cdot (5 \cdot \epsilon_E)^n \quad \text{----- (10)}$$

すなわち、Meyer 硬さ P_m と d の比 P_m/d を両対数グラフ上にプロットすれば、真歪 ϵ_t と真応力の $\hat{m}$ (約 2.8) 倍との関係をそのまゝ表わすとともに、その傾きは、加工硬化指数を示すことが判る。次に、二の Meyer 硬さの測定値から、他の静的特性が推定出来ることを示す。

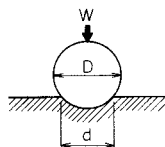


図1. 球形圧痕の径

真応力 σ_t と公称応力 σ_n は、O'Brien の関係式を用いて、

$$\sigma_n = \sigma_t / (1 + \epsilon_t) \quad \text{----- (11) と表わされる。}$$

公称応力の最大値が引張強度を表わすから、式(11)において σ_n の極値を与える真歪 ϵ_t を求めると、引張強度 σ_u を与える真歪 ϵ_{u0} は、

$$\epsilon_{u0} = n / (1 - n) \quad \text{----- (12)}$$

このとき、引張強度は、

$$\sigma_u = \frac{P_m}{A_m} (1 - n) \quad A_m \approx 2.3 \quad \text{----- (13) から求まる。}$$

また、加工硬化指数 n 、引張試験における最高荷重点における真歪 ϵ_{u0} および静破壊延性 ϵ_f との間には、

$$n = \frac{\ln(1 + \epsilon_f)}{\ln(\epsilon_f / \epsilon_{u0})} \quad \text{----- (14)}$$

なる関係が導かれるから、

静破壊延性は、 $\log P_m - \log \epsilon_n$ 線図の傾き(加工硬化指数) n のみによって、

$$\epsilon_f = \exp \left\{ \frac{n}{n - \left(\frac{n}{1-n} \right)^n} \right\} \quad \text{----- (15) と表わしうる。}$$

3. 実験 本報では、先ず式(10)で示される関係を確認するため、土留工における切取板にアプレードを与えるスワリュー型油圧ジャッキのピストン杆およびシリニダー杆について、Brinell 硬度計を用いて 10^{mm} 、 5^{mm} の鋼球圧子を種々の荷重(500g~2750g)で供試材に圧入し、Meyer 硬さ P_m と硬さ ϵ_n との相関関係を求めた。図2

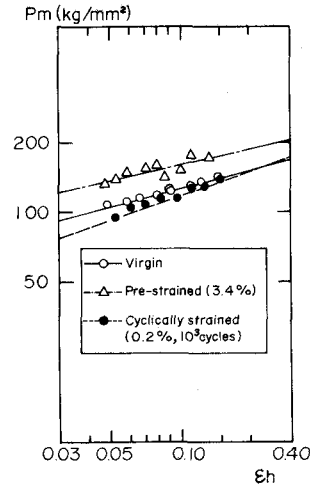


図2 シリニダー杆の $P_m - \epsilon_n$ 線図

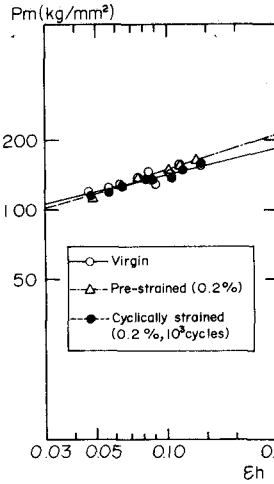


図3 ピストン杆の $P_m - \epsilon_n$ 線図

に対しては Meyer の経験式が成り立つことが判る。

4. あとがき Meyer 硬さの測定値から求まる材料の静的特性(加工硬化指数 n 、引張強さ σ_u 、静破壊延性 ϵ_f) は在用荷重サイクル疲労強度と密接な関係をもつことから、式(13)、式(15)で表わされる関係が成り立つことが確認出来るれば、容易に低サイクル疲労強度が推定することが可能となる。本報では、式(10)で示される $P_m - \epsilon_n$ の関係が推定し得たにすぎないので、今後種々の静的特性との相関の確認を行なうつもりである。

参考文献・引用文献

- 1) D. Tabor: The Hardness of Metals, Oxford at the Clarendon Press (1951)
- 2) 例え、 坂田 他4名: 鋼材の全荷重低サイクル疲労強度の推定に関する研究(第1報~第3報) 日本造船学会誌 第26, 127, 128号 (1966~1970)
- 3) A. Nadai: Plasticity, McGraw-Hill, New York (1931).