FEM を用いたロックウェル硬さに及ぼす構成関係の影響*

濱田 直巳^{*1}, 坂根 政男^{*2}, 大南 正瑛^{*2}

FEM Analysis for Rockwell Hardness

Naomi HAMADA, Masao SAKANE and Masateru OHNAMI

In order to study the effect of the inelastic constitutive relation on Rockwell hardness, elastic-plastic FEM analyses were carried out for *B*-scale Rockwell hardness using a rigid and elastic indenters. Rockwell hardness tests also were carried out using SUS 304 austenitic stainless steel, T 6061 aluminum alloy, and pure copper. FEM results agree with the experimental results within 10% error. Yield stress and work hardening coefficient and exponent have a significant influence on the hardness. Friction and Young's modulus, however, have almost no effect on the hardness. A quantitative equation between Rockwell hardness and the constitutive relation is proposed.

Key Words: FEM Analysis, Rockwell Hardness, Constitutive Relation, Coefficient of Friction, Rigid Body, Elastic Body

1. はじめに

硬さに係わる研究は古くから数多く行われてきており, これらの研究をまとめた著書なども出版されてきている⁽¹⁾. これまでの多くの研究は実験的観点からの考察が多いように思われる. また, 最近では弾塑性有限要素解析法(FEM)を用いた解析も行われてきており, FEM解析の硬さ研究への有効性が示唆されている^{(2)~(6)}. しかし, これまでの有限要素解析では剛体圧子と弾性圧子との差異や硬さと材料定数との関係の系統的な研究は行われていない.

本研究ではロックウェル*B*スケール硬さに及ぼす剛球圧子, 弾性球圧子および摩擦係数の影響をFEM解析を用いてまず検討した. さらに, 材料の構成関係とりわけヤング率, 降伏応力, 加工硬化係数ならびに同指数とロックウェル硬さとの関連性についても検討し, ロックウェル*B*スケール値とこれら材料定数との定量的関係を明らかにした.

2. 有限要素解析モデル

本研究では図1に示す剛球圧子と弾性球圧子の相違

を明らかにするため, 両圧子を用いて有限要素解析を行った. 解析モデルはロックウェル*B*スケールであり圧子の直径が1.5875mmの鋼球, 平板は底面の影響をなくすため直径25mm, 高さ10mmの円柱とした. (a)は鋼球圧子を剛体とみなしたモデル(以下, 剛球と呼ぶ)であり節点数982, 要素数891である. (b)は鋼球圧子を弾性圧子とみなしたモデル(以下, 弾性球モデルと呼ぶ)で節点数1129, 要素数1023である. (b)のモデルでは弾性圧子を保持する剛体ホルダー(弾性圧子の最上部から0.79mmまでの剛体), 弾性圧子ならびに平板の構成となっている. なお, 弾性圧子のヤング率は205800MPaとした. 解析はロックウェル*B*スケールの試験法(JIS Z2245)に基づき, 圧子に980Nの荷重を負荷後, 98Nまで除荷し, 押し込み曲線から押し込み深さを求め, 硬さを算出した. 本解析に使用した要素は両モデルともに四角形四節点軸対称要素であり, 用いた有限要素解析プログラムはMarc K4である. 接触の判定には同プログラム中でオプション設定されているCONTACT⁽⁷⁾を用いた. プログラムではMisesの降伏条件および等方硬化則を使用し, 大ひずみ大変形問題を取扱うためLARGE DISP, UPDATEおよびFINITE⁽⁷⁾オプションを用いた. これらのオプションの特徴はアップデートラグランジェ法の使用, 二次

* 原稿受付 平成6年2月18日.

^{*1} 正員, 広島電機大学工学部 (〒739-03 広島市安芸区中野6-20-1).

^{*2} 正員, 立命館大学理工学部 (〒603 京都市北区等持院北町56-1).

図1 有限要素分割図

図2 FEM解析に用いた構成関係

のひずみ項までの考慮, 非弾性変形による幾何計量の変化, 応力, 非弾性ひずみの補正計算などの考慮である. なお, 本研究では圧子と平板との距離が $1.0 \times 10^{-5}\text{ mm}$ 以内になると接触が起ると見なし解析した.

3. FEM解析結果および考察

3.1 解析結果と実験結果の比較 まず, オーステナイト系SUS304ステンレス鋼, T6061アルミニウム合金および純銅のロックウェル硬さの実験結果とFEM解析結果の比較検討を行った. FEM解析に用いた構成関係はこれらの材料の引張試験での真応力

(σ)—対数ひずみ (ϵ_p) 関係であり, それらを図2に示す. (a), (b) および (c) はそれぞれSUS304, T6061合金および純銅の引張試験結果である. なお, 解析に用いたヤング率 E および降伏応力 σ_y はSUS304では $E=207760\text{ MPa}$, $\sigma_y=213\text{ MPa}$, T6061Al合金では $E=65023\text{ MPa}$, $\sigma_y=260\text{ MPa}$, 純銅では $E=104300\text{ MPa}$, $\sigma_y=146\text{ MPa}$ とした. すべての材料について, ポアソン比は0.3とした. オーステナイト系SUS304鋼は σ — ϵ_p 線図の傾きが大きいのに対しT6061Al合金および純銅のそれらは小さいことがわか

表1 有限要素解析結果と実験結果の比較

Material	Contact body	Disp. (mm)		Hardness (HRB)	
		FEM	Exp.	FEM	
SUS304	Rigid ball	0.101	86.8	79.5	
	Elastic ball	0.098	86.8	81.0	
T6061	Rigid ball	0.145	62.4	57.4	
	Elastic ball	0.142	62.4	59.0	
Cu	Rigid ball	0.205	40.7	27.5	
	Elastic ball	0.200	40.7	30.2

図3 SUS304ステンレス鋼の剛体圧子による変形

図4 T6061アルミニウム合金の剛体圧子による変形

る。

表1にロックウェルBスケール硬さの有限要素解析結果および実験結果のまとめを示す。同表中の変位は予め初期荷重として98Nを負荷し、その後980Nまで負荷し、さらに98Nまで除荷したときの剛球圧子および

(a) SUS304

(b) T6061Al

(c) 純銅

図5 押し込み深さと負荷荷重との関係

剛体ホルダーの初期荷重負荷時からの移動量である。剛球圧子の場合、SUS304では、FEM解析解は実験値に比べ8.4%小さくなる。T6061Al合金の場合、解析値

と実験結果との差は7.3%となり両材料とも実験値との誤差は同程度となっている。弾性球圧子の場合、SUS304の解析値と実験値の差は7.2%、T6061Alは5.5%となり剛球より弾性球の方が実験値により近くなることがわかる。純銅の場合、剛体球が誤差が32%、弾性球が26%と大きくなり、柔らかい材料に対し、FEM解析精度の低下がみられる。3種類の材料ともFEM解析結果の方が、実験結果よりも小さめの値を評価している。実験結果と解析結果との差異については以下の二点の可能性が考えられる。

実験では980Nの最大荷重時に約15秒間の荷重保持を行った。この間に押し込み深さの増加が観察されたが、解析においてはこのような経時変化は考慮されていない。さらに、最大荷重負荷時には実験結果の押し込み深さが解析結果と比べ15~25%大きかったが、98Nまでの除荷後には、逆に実験結果の方が押し込み深さは解析結果と比べ小さくなった。除荷時の回復量が実験結果の方が大きく、除荷時の回復量の差が両者の差の原因となった可能性がある。

図3および図4にSUS304およびT6061Al合金の剛球圧子を用いた場合の除荷後の押し込み変形を示す。両材料とも剛球との接触部外側に盛り上がりを生じている。T6061Al合金の盛り上がり変形がSUS304よりも大きいことがわかる。除荷後の押し込み曲面は、980Nから0Nまでの除荷に伴う弾性回復により剛球圧子の曲面と一致しておらず、とくにx座標の大きいところでの両曲面のギャップが大きい。

3. 2 ロックウェル硬さに及ぼす剛球圧子、弾性球圧子、摩擦係数およびヤング率の影響

図5は押し込み深さと負荷荷重との関係を示す。

(a), (b) および (c) はそれぞれSUS304鋼, T6061Al合金および純銅の荷重一押し込み曲線である。○印は剛球, ●印は弾性球圧子のものである。すべての材料に対し剛球, 弾性球ともに荷重一押し込み

深さ関係は荷重が小さいところで上に凹の曲線となる。SUS304ステンレス鋼, T6061合金の場合, その

図7 T6061アルミニウム合金の押し込み深さと摩擦係数との関係

図8 押し込み深さと縦弾性係数との関係

図6 SUS304ステンレス鋼の押し込み深さと摩擦係数との関係

図9 押し込み深さと降伏応力の関係

後ほぼ直線となるが、純銅は上に凸の曲線となる。また、剛体球、弾性球の押し込み曲線はほとんど差異がないが、剛体球の方が弾性球より曲線の傾きがわずかに大きくなる傾向がみられる。

図10 押し込み深さと加工硬化係数の関係

次に、押し込み深さに及ぼす摩擦係数の影響について調べるために、摩擦係数を0~1まで変化させて有限要素解析を行った。採用した摩擦はクーロン摩擦である。図6および図7はSUS304、T6061Al合金に対する解析結果である。黒塗りの記号は980Nまで負荷した場合であり、白抜きの記号は98Nまで除荷した場合である。SUS304および6061Al合金の剛球および弾球圧子ともに押し込み深さに及ぼす摩擦係数の影響がほとんどないことがわかる。これらのことは村上らによる実験結果⁽³⁾と同じ傾向を示している。

図8は $A=804\text{MPa}$ 、 $\sigma_y=294\text{MPa}$ 、 $n=0.15$ の場合のロックウェル硬さに及ぼすヤング率の影響を示したものである(A および n については後述)。黒塗りのデータは980Nの最大荷重時であり白抜きのものは98Nまで除荷したときのデータである。ヤング率が $147000\sim 245000\text{MPa}$ の範囲まで変化した場合でも、ロックウェル硬さ値はほとんど変化しないことがわかる。より詳細にみると、980Nから98Nに除荷した場合の弾性回復量はヤング率が小さいものほど大きくなる

図11 押し込み深さと加工硬化指数の関係

図12 傾き a に及ぼす σ_y の影響 図15 切片 b 値に及ぼす加工硬化係数 A の影響 図13 傾き a に及ぼす加工硬化係数 A の影響 図14 切片 b に及ぼす降伏応力 σ_y の影響

傾向がみられる。また、同回復量の絶対値は弾性圧子の方が剛球圧子よりも大きい。以上のFEMを用いたロックウェル硬さの解析結果から、剛体球と弾性球を用いた場合は解析結果に実用上問題となるような差異がないことが判明した。従って、以下では剛球圧子を用いた解析結果に基づいて考察を行う。

3.3 ロックウェル硬さに及ぼす非弾性構成関係の影響

次に、引張試験における構成関係式が次式で示されるものと仮定し、硬さに及ぼす構成関係の影響について検討した。

$$\epsilon_p = \left(\frac{\sigma - \sigma_y}{A} \right)^n \quad (1)$$

ここで、 σ は真応力、 ϵ_p は対数塑性ひずみ、 σ_y 、 A および n は降伏応力、加工硬化係数および加工硬化指数である。

図9に $E=205800\text{MPa}$ 、 $n=0.3$ 、 $A=441\text{MPa}$ を一定とし、降伏応力 σ_y を147~490MPaの範囲で変化させた結果を、図10に $E=205800\text{MPa}$ 、 $\sigma_y=196\text{MPa}$ 、 $n=0.3$ の下で A 値を588~196MPaの範囲まで変化させた結果を示す。両図から降伏応力および加工硬化係数の増加に伴って曲線的に押し込み深さが減少していることがわかる。

図11は押し込み深さ δ と加工硬化指数 n の関係を示す。(a)、(b)、(c)および(d)はそれぞれ降伏応力 σ_y が147、196、268および300MPaにおけるものである。すべての降伏応力において同一加工硬化係数 A に対し、押し込み深さは加工硬化指数の増加に伴ってほぼ直線的な増加が見られる。

図16 簡易推定法による評価

3. 4 ロックウェル硬さの簡易推定式

以上のことから押し込み深さは降伏応力 σ_y 、加工硬化係数 A および加工硬化指数 n に大きく依存することが明らかになった。以下では σ_y 、 A および n を用いた押し込み深さの簡易推定法の定式化を試みた。

先にも述べたように σ_y 、 A が一定の時、押し込み深さと加工硬化指数の間には、次式で示される線形関係が成立する。

$$\delta = an + b \quad (2)$$

図12および13は δ - n 線図の傾き a に及ぼす σ_y および A の影響について調べたものである。 a と σ_y との関係はほぼ直線となり $a = -7.75 \times 10^{-4} \sigma_y + 0.3085$ の関係が成立する。傾き a に及ぼす A の影響はデータにバラツキがあるものの、ほとんどないと見なしてよいことがわかる。図14および図15は切片 b に及ぼす σ_y および A の影響を調べたものである。図からわかるように、切片 b は σ_y には依存せず、 A のみの関数であると見なすことができる。すなわち、 b と A の間には $b = -8.28 \times 10^{-5} A + 0.1219$ という関係式が成立する。 a 、 b を(2)式に代入すると(3)式を得る。

$$\delta = -7.75 \times 10^{-4} \sigma_y n + 0.3085 n - 8.28 \times 10^{-5} A + 0.1219 \quad (3)$$

図16は(3)式より求めた硬さ値 HRB_{PRED} とFEM解析より求めた硬さ値 HRB_{FEM} との関係を調べたものである。なお、同図にはSUS304、T6061Al合金の実験値

HRB_{EXP} も黒丸で併記してある。(3)式によるFEM値の推定は一部のデータを除き $\pm 10\%$ 以内でFEM解析結果を予測することができるが、硬さ値 $HRB=60$ 以下で(3)式による推定結果とFEM解析結果との間の誤差が大きくなる傾向がある。また、SUS304およびT6061Al合金の実験値と(3)式による推定値も $\pm 10\%$ 以内にあり(3)式による推定が良好であることがわかる。

4. まとめ

弾塑性有限要素法を用いてロックウェル硬さに及ぼす構成関係の影響について解析した結果、以下のことが明かとなった。

- (1) 弾塑性有限要素解析法を用いてロックウェルBスケール硬さ値を求めることが可能であることが明かとなった。また、柔らかい材料に対するFEM解析は実験値との誤差が大きくなる傾向があった。
- (2) FEMによるロックウェル硬さ解析では弾性球圧子の方が剛球圧子より実験値により近い値が得られることが判明した。とくに、剛球圧子を用いた解析においては柔らかい材料は実験値より大幅に小さめの値となることが判明した。
- (3) ロックウェル硬さ値に及ぼす摩擦係数、ヤング率の影響はほとんどないことが明かとなった。
- (4) ロックウェル硬さ値は降伏応力および加工硬化係数の増加とともに増大し、加工硬化指数の増加とともに直線的に減少することが判明した。
- (5) (3)式で表されるロックウェルBスケール硬さ値と構成関係との関係式を提案し、 $HRB > 60$ において同推定法がFEM解析値を $\pm 10\%$ 以内で推定でき、実験値とも良い一致がみられることがわかった。

最後に、本解析を行うに当たり協力された立命館大学大学院生橋本清司君ならびに当時広島電機大学4回生の海野良行君、野中英明君に感謝の意を表するものである。

参考文献

- (1) 吉沢武男編、硬さ試験法とその応用、(昭42)裳華房。
- (2) Bhattacharya, A.K.他1名, *J.Solids and Struct.*, 24-9(1988), 880.
- (3) 村上敬宜, ほか1名, 機論, 56-526 A (1990) 1274.
- (4) 稲場亨, ほか2名, 日本機械学会材料力学講演会講演論文集, A (1991) 176.
- (5) 香川博之, ほか3名, 機論, 58-546 A (1992) 230.
- (6) J.M.Olaf, *Exp.Mech*, 33-3 (1993), 201.
- (7) MARC, *User Information K-4*(1992), A5-50.