

ビッカース圧子を付与した反発硬さ試験における試験片表面粗さの影響

Effect of surface roughness of specimen on rebound hardness by using hammer with Vickers indenter

九州工大・院（学）*橋口 武尊 九州工大・工（正）松田 健次 都城高専（非）日高 亮晟

Takeru Hashiguchi*, Kenji Matsuda*, Issei Hidaka**

*Kyushu Institute of Technology, **National Institute of Technology (KOSEN), Miyakonojo College

1. 緒言

先の研究¹⁾で、四角錐ダイヤモンド圧子を有する高剛性ハンマを、固定条件の異なる試験片表面へ落下させた際の反発係数を測定したところ、ねじで試験片を締結していない場合にはハンマ衝突によって試験片に剛体的運動が生じ、反発係数が低下することを明らかにした。一方、質量の小さいハンマを衝突させると反発係数の低下の程度を低減できることも明らかとなった²⁾。ただし、ハンマ質量を軽くすると、試験片を締結している場合においても測定値のばらつきが増加した。この原因として、試験片の表面粗さの影響が示唆される。そこで本研究では、新たに表面粗さの小さい試験片を用いて調査するとともに、有限要素法を用いて簡易的に表面粗さが反発係数に及ぼす影響の程度を評価できる手法について検討を行った。

2. 実験方法

装置構造は前報¹⁾りとほぼ同じである。ハンマには、寸法はほぼ同じで質量の異なる2つ（ハンマ A, B）を用いた。軸部の材質は、ハンマ A が超硬合金、ハンマ B がセラミックであり、両ハンマとも先端には対面角 136°の四角錐ダイヤモンド圧子が付与されている。ハンマ質量 m は、A が 4.29g、B が 0.94g である。ハンマの落下高さ H は、4mm を目標に設定した。試験片（外径 40、穴径 7、厚さ 10mm）には、前報³⁾と同じ材質である SCM435 の未熱処理品を使用した。ただし、前報の試験片表面の算術平均粗さの実測値は $Ra=1.4\mu\text{m}$ であったのに対し、本研究の試験片は $Ra=0.04\mu\text{m}$ である。試験片の締結には市販の SCM435 製の六角穴付きボルト（呼径 M6×ねじ長 25mm）1 本を使用し、締付トルク約 9N・m で土台へ締結した。

3. 解析方法

試験片表面には、旋削によって形成された周期的な凹凸が形成されている。これをそのまま解析モデルに取り込むには 3 次元解析が必要となる。本研究では、これを軸対称問題としてモデル化する方法について検討を行った。Figure 1 に、解析モデルの試験片表面に与えた粗さ曲線を示す。図中の Case I は平滑面へハンマを衝突させた場合、Case II は粗さの凹凸頂点へハンマを衝突させた場合、Case III は粗さの凹凸最深点へ衝突させた場合を想定したものである。ここで、Case II, III では、周期的な正弦波形状の凹凸が帯状に並んでいると仮定し、Case II では凹凸の頂点、Case III では凹凸の最深点を中心に半径 r の円を描いた時の円周の平均高さを、中心の高さを 0 としてプロットしたものである。正弦波の振幅（平均線から頂点までの高さ）は 0.003mm で、波長は 0.050mm ある。圧子形状は円錐とし、その頂角は対面角 136°の四角錐と高さと体積の関係が一致する 140.6°とした。試験片と土台のヤング率、ポアソン比はそれぞれ 205GPa, 0.3 であり、試験片には塑性後の変形挙動として引張試験で得られた応力-ひずみ線図を与えている。

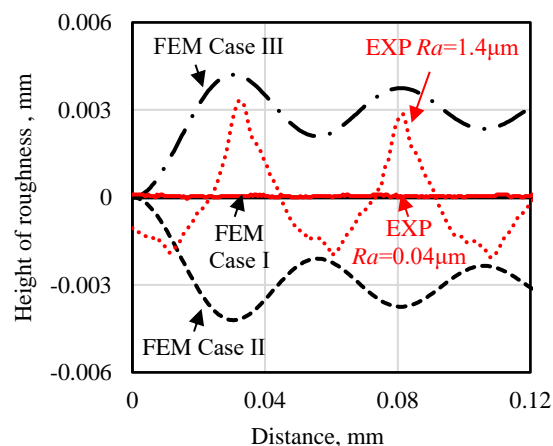
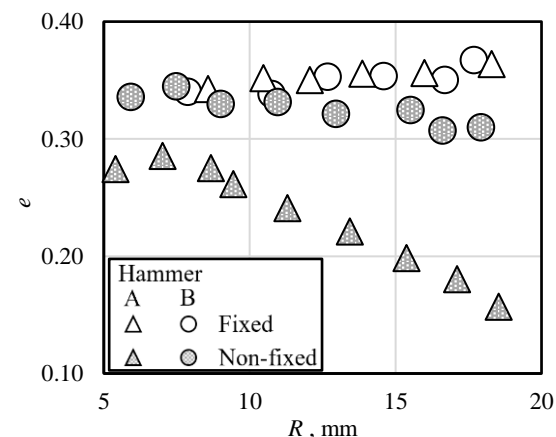
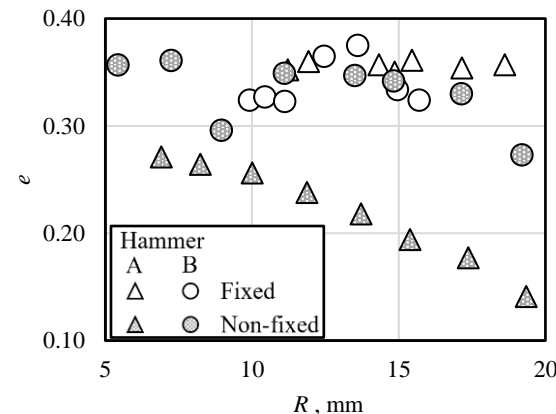


Fig. 1 Curve of roughness on FEM analysis model.



(a) Under $Ra=0.04\mu\text{m}$



(b) Under $Ra=1.4\mu\text{m}$

Fig. 2 Relation between R and e obtained by EXP

4. 実験結果

Figure 2 に、反発係数 e と試験片中心から衝突位置までの距離(半径) R の関係を示す。本研究の $Ra=0.04\mu\text{m}$ の結果 (a) も前報の $Ra=1.4\mu\text{m}$ の結果 (b) と同様に、ボルトで試験片を締結しない場合、ハンマ A では R の増加とともに e は大きく低下するが、質量の小さいハンマ B では低下の程度が抑制されていることが分かる。一方、ボルトで試験片を締結した場合、 $Ra=0.04\mu\text{m}$ では R の増加とともに e は若干増加する傾向が認められるものの、ハンマ種類の影響やばらつきの程度は小さい。これに対して $Ra=1.4\mu\text{m}$ の場合、ハンマ A では $Ra=0.04\mu\text{m}$ に近い傾向を示しているものの、ハンマ B では変動が大きいことが分かる。

Figure 3 に、 $Ra=1.4\mu\text{m}$ の試験片をボルトで締結した場合に、ハンマ B によって形成された圧痕の写真を示す。試験片表面粗さの凹凸ピッチと同程度の圧痕が形成されており、圧痕中心が凹凸谷部付近に位置する場合には e が高めに、一方、凹凸頂部付近に存在する場合には e が低めの値を示す傾向が認められた。

5. 解析結果

Figure 4 に、Case I, II, III の条件でそれぞれ得られたハンマ A と B の e を示す。なお、同図には比較のため、正弦波形状の凹凸が同心円状に形成され、中心が凹凸頂点である場合にそこにハンマを衝突させた場合(Case IV)および、中心が凹凸最深点である場合にそこにハンマを衝突させた場合(Case V)の結果も示している。ハンマ A の場合、反発係数の変動は小さく、ハンマ B の場合、Case III>Case I>Case II の順に大きくなっており、Fig. 3 で確認された凹凸の衝突位置と e との関係と定性的に一致している。一方、同心円状の凹凸が形成されたと仮定した Case IV と Case V の場合は、 e の大小関係に逆転が生じている。

6. 考察

Figure 5 は、円錐圧子の形状を初期凹凸形状と圧痕半径が一致するように描いたものである。 e に大きな変動が生じたハンマ B の場合、圧痕半径の大きさは e の順と同様に Case III>Case I>Case II となっている。同図は、凹凸頂点にハンマを衝突させた場合、接触域中央部はより深く押し込められることを示しており、大きな塑性ひずみが生じることを示唆している。一方、凹凸最深点に衝突させた場合は接触領域が若干拡大するものの塑性ひずみの大きさは低下する。すなわち、凹凸頂点に衝突した場合は対面角の小さい圧子を、凹凸最深点に衝突させた場合は対面角の大きい圧子を衝突させた場合³⁾と同じ効果が生じ、 e に変化が生じたものと言える。

一方、同心円状に凹凸が形成されたと仮定した Case IV の場合、圧子は谷部を飛び越えて 2 番目の山まで接触領域が拡大したことにより、圧子の押込み量すなわち塑性ひずみの増大が抑制され、 e は増大したものと言える。この結果は、3 次元問題を軸対称モデルで近似する場合に留意する必要があることを示唆している。

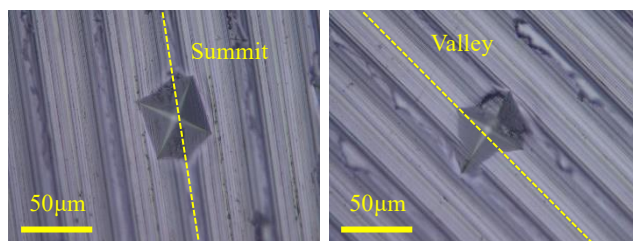
なお、ハンマ A の場合、Case I~III における e と圧痕半径の変動はハンマ B より小さいものの、その大小関係はハンマ B と逆転しており、粗さの影響は粗さのピッチまたは高さや圧痕サイズとの比較の観点から議論する必要がある。

7. 結言

先端にビッカース圧子を付与した質量の異なる 2 種類のハンマを用いて、表面粗さの異なる試験片を対象に反発硬さ試験を行い、試験片の表面粗さが反発係数に及ぼす影響を調査した。その結果、粗さが小さい場合には質量が約 4 倍異なる 2 つのハンマの反発係数はほぼ一致するものの、圧痕寸法と粗さの凹凸ピッチが近くなるとハンマの衝突位置によって反発係数は変動し、凹凸頂点近傍では反発係数は低下、凹凸最深点近傍では反発係数は増加する傾向にあることを明らかにした。また、1 次元周期性粗さを軸対称問題としてモデル化する手法を提案し、有限要素法を用いてその妥当性を確認した。

参考文献

- 1) 橋口・松田：ビッカース圧子ハンマを用いた反発硬さ試験における試験片締結用ねじの有無の影響，トライボロジー会議予稿集，福井 2022 秋 176.
- 2) 橋口・松田・日高：ビッカース圧子を付与した反発硬さ試験における試験片無固定下でのハンマ質量の影響，日本機械学会第 21 回評価・診断に関するシンポジウム予稿集，九州大学 2023-11(2023)207.
- 3) 陳・小山・河村・松田：角錐圧子を用いた反発硬さ試験におけるハンマ傾斜の影響（第 1 報），トライボロジー会議予稿集，松江 2021 秋 318.



(a) $R=9.9\text{mm}$ ($e=0.32$) (b) $R=14\text{mm}$ ($e=0.38$)

Fig. 3 The indentation images specimen surface condition $Ra=1.4\mu\text{m}$ by using hammer B.

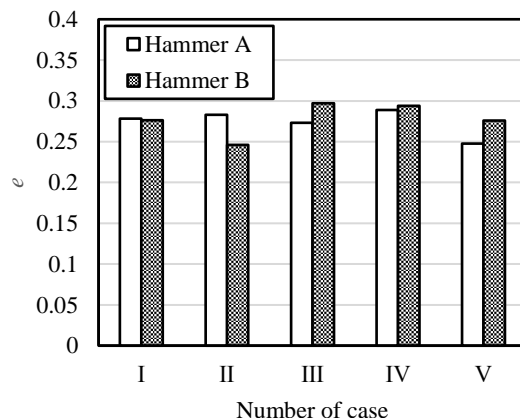


Fig. 4 e obtained by FEM under Case I-IV.

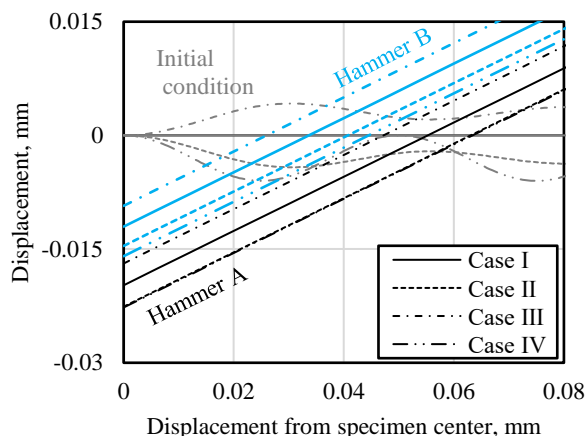


Fig. 5 Cross-sectional shape of indenter obtained by FEM.