二球の非弾性衝突 Non elastic impact of two balls

正 竹園 茂男(豊技大)
○ 永井 基之(豊技大院)

正 感本 広文(豊技大)

Shigeo TAKEZONO, Toyohashi University of Technology, 1-1, Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi
Hirofumi MINAMOTO, Toyohashi University of Technology, 1-1, Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi
Motoyuki NAGAI, Toyohashi University of Technology, 1-1, Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi

Key Words: Non-elastic impact, impact of two balls, F.E.M, Coefficient of Restitution

1. 結 言

二球の衝突問題は工学上基本的かつ重要な問題の一つであるにもかかわらず、動的接触という複雑な現象を伴うためその解析例は少ない。古くは、Hertzの弾性接触理論を用いて衝突速度と衝突時間の関係などが考察されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。また、これらの理論を弾塑性域にまで拡張した理論解析も提案されているが⁽⁴⁾⁽⁵⁾、球の衝突現象が十分に明らかにされたとは言い難い。

そこで本研究では二球の衝突実験を行い、反発係数、衝突後の接触円直径及び球の変形量を調べた。また有限要素法によって二球の弾塑性衝突解析を行い、反発係数に対する塑性変形の影響を調べた。そして反発係数を速度の関数で表し、実験結果と比較した。

2. 二球の衝突実験

2.1 実験装置及び方法

二球の衝突実験をFig.1に示す実験装置で行った。一方の球を空気圧により加速させ(衝突球と呼ぶ)、静止している球(被衝突球と呼ぶ)に衝突させた。弁の開閉は手動で行い、ハイスピード・ビデオシステムを用い二球の変位を時間間隔1/18000[s]で撮影した。ここで、Fig.2にハイスピード・ビデオシステムにより撮影した衝突前、衝突中、衝突後のビデオイメージの一例を示す。このビデオイメージから(1)式を用い反発係数を求めた。また試験後、接触円直径及び球の変形量を測定した。

Fig.1 Experimental apparatus

$$e = \frac{V_2 - V_1}{V_{10} - V_{20}} \quad \dots (1)$$

e: 反発係数

V_{10} : 衝突前の衝突球の速度[m/s]

V_{20} : 衝突前の被衝突球の速度[m/s]

V_1 : 衝突後の衝突球の速度[m/s]

V_2 : 衝突後の被衝突球の速度[m/s]

Fig.2 An example of high speed video image

2.2 実験条件

試験片には焼きなまし処理を行った直径1インチ、材質SUJ2(高炭素クロム軸受鋼)の鋼球を用いた。また、Fig.3にSUJ2の真応力-真ひずみ線図を示す。

球を加速させるための圧力(ゲージ圧)は0.3、0.6、0.8[MPa]の3種類($V_i=15 \sim 25$ [m/s])で、各々3回の試験を行った。

Fig.3 True stress-True strain

3. 有限要素法による二球の弾塑性衝突解析

汎用有限要素解析ソフト(ANSYS)を用い、同一形状・同一材質の二球が互いに衝突速度 V_i で衝突する問題を解析した。これは一つの球が衝突速度 $V_i/2$ で剛体壁に衝突

する問題と等価である。球の軸対称性を考慮して要素には大ひずみ大変形を考慮した2次元構造ソリッド要素(plane42)を、球と剛体壁の接触には2次元点-剛体面接触要素(contact26)を使用した。Fig.4(a),(b)に解析に用いた球の要素分割および接触点近傍の拡大図を示す。球が局部変形を生じるため、接触点近傍では要素分割を細かくとりそれ以外の部分は大きな要素分割とした。なお球材質は密度 $\rho=7810\text{kg/m}^3$ 、ヤング率 $E=206\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ とし、Fig.3の破線に示す応力-ひずみ関係を用いた。

Fig.4 Finite element mesh

4. 実験結果とシミュレーション結果の比較

反発係数の実験結果とシミュレーション結果をFig.5に示す。なお $V_i=0.8\sim 2.5\text{m/s}$ の反発係数は文献(6)から引用した。また、Fig.6に球の衝突過程を示す。 $a_{\max}$ は最大変形時の接触円直径、 a は衝突後の接触円直径、衝突後の接触円直径及び球の変形量の実験結果とシミュレーション結果をFig.7に示す。

Fig.5とFig.7より次のことが分かった。

- ・反発係数は実験結果よりもシミュレーション結果の方がやや低くなっている
- ・衝突後の接触円直径及び球半径の減少量は共に実験結果よりもシミュレーション結果の方が高くなっている

Fig.5 Coefficient of restitution e

Fig.6 Process of impact

Fig.7 Diameter of contact circle and Deformation of sphere

5. 考察

反発係数が実験結果よりもシミュレーション結果の方が低くなり、衝突後の接触円直径及び球の変形量においては実験結果がシミュレーション結果よりも低くなるのは、ひずみ速度が高くなると粘性の影響が現れ、球が硬化し塑性変形が小さくなるからである。

6. 結言

本研究では二球の衝突実験を行い反発係数を速度の関数で表し、有限要素解析の結果と比較した。これより、球の衝突解析には新たに粘性の影響を考慮する必要があると考えられる。

従って、今後は高ひずみ速度域での材料試験の結果を用いて弾粘塑性解析を行う予定である。

文献

- (1)S.P.Timoshenko and J.N.Goodier,Theory of Elasticity (THIRD EDITION),McGRAW-HILL KOGAKUSHA, 413-436.
- (2)P.Villaggio,The Rebound of an Elastic Sphere Against a Rigid Wall,Trans.,ASME,J.,Appl.Mech.Vol63(1996), 259-263.
- (3)Goldsmith,W.,Impact,(1960),Edward Arnold.
- (4)Thornton,C.,Coefficient of restitution for collinear collisions of elastic-perfectly plastic spheres,Trans, ASME,J.,Appl.Mech.,Vol64(1997).383-366.
- (5)K.L.Johnson,Contact Mechanics,Cambridge University Press.
- (6)S.Takezono and H.Minamoto M.Mitsuyama M.Nagai, AN ELASTO-PLASTIC IMPACT OF TWOBALLS, Proceedings of the 4th International Symposium on Impact Engineering Vol. II ,2001,639-644.