

インパルスハンマを用いた厚さ測定方法

輸送高度化研究領域 * 島田道男、吉井徳治
成瀬 健

1. まえがき

船体の経年的劣化を評価する上で、腐食による船体鋼材の衰耗状態を把握することが重要なため、船舶検査において、超音波を用いた厚さ測定が数多く行われている。船殻は巨大で複雑な構造を有し、また錆などの汚れがあることなどから、多くの費用、時間を必要としている。船体への適用性に優れ、効率的に測定できる厚さ測定方法が開発できれば、船舶検査を合理化し、船舶の安全確保に役立てることができる。

テストハンマは船舶検査官も利用しているが、錆落としや骨位置確認が主な用途であり、定量的な厚さ測定には利用されていない。計装化テストハンマによる厚さ測定の可能性を検討するため、インパルスハンマの打撃荷重から厚さを推定する方法とその精度を調べた。

2. 測定原理

鋼板をハンマで叩いたときの応答は、以下のよう
に定式化されている¹⁾。

鋼板を叩いたときに、ハンマの有していた運動エネルギーと運動量は、鋼板のたわみ波(0次非対称モードの板波)に伝えられ、たわみ波の振動に伴い反発される。

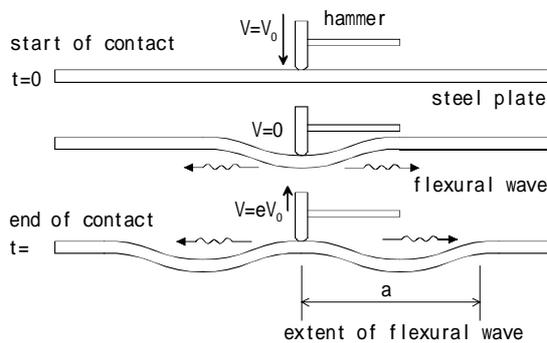


図1 ハンマ打撃に伴う振動の伝搬

反発係数を e とすると、ハンマの持っていた運動エネルギー及び運動量のそれぞれ $(1-e^2)$ 、 $(1+e)$ 倍が鋼板のたわみ波に伝えられる。たわみ波のエネルギーと運動

量は、接触終了時点で半径 a 以内にほとんどが存在すると仮定する。エネルギー保存則、運動量保存則を用いると、次の反発係数の数式表現を求めることができる。

$$e = \frac{T\rho a^2 - 1.12M}{T\rho a^2 + 1.12M} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$a^2 = \frac{\pi\tau T}{2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 T :厚さ、 ρ :密度、 a :接触終了時点におけるたわみ波の存在範囲、 M :ハンマの質量、 τ :接触時間、 E :ヤング率、 ν :密度、 ν :ポアソン比である。

以上から、ハンマの接触時間が決まれば、たわみ波の存在範囲が分かり、反発係数を計算できる。たわみ波の存在範囲外に補強材などがあっても反発係数には影響せず、たわみ波存在範囲内の厚さや密度で反発係数が決まる。

接触時間 τ は、ヘルツの接触理論¹⁾から次式で表現する。

$$\tau = \frac{2.94\alpha}{V} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\alpha = \left[\frac{30}{16} V^2 \left(\frac{1-\nu^2}{E} \right) M \right]^{2/5} R^{-1/5} \quad \dots\dots(4)$$

V :ハンマ速度、 R :ハンマ先端曲率である。

インパルスハンマ計測で得られた荷重 F は、次式で反発係数 e と関係付けられる。

$$I = \int_0^{\tau} F dt = MV(1+e) \quad \dots\dots\dots(5)$$

(1)式と(5)式を組み合わせると、厚さに関して次式が得られる。

$$T = \frac{1.12MI}{\rho a^2(2MV - I)} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ハンマの速度を求めておけば、荷重曲線積分値から反発係数が計算でき、厚さを求めることができる。

3. 実験方法

はじめに、上記原理を確認するため、(5)式、FEM解析及び実験から求めた荷重積分値と厚さとの関係を調べた。

実験には、7種の厚さ(6,9,12,16,19,22,25mm)を有する1m×1mのSM400鋼板を用いた。また、測定システム及びインパルスハンマの定数をそれぞれ図2及び表1に示した。(5)式とFEM解析には、ハンマ落下ジグの質量を考慮し、ヘッド質量407gとした。

測定は、鋼板の端部の影響を避けるため、中央付近で行い、各試験片毎に5回測定し、再現性を調べた。インパルスハンマの先端はR25の鋼製チップを用い、落下高さは232mmとした。

次に、本方法による厚さ推定精度を調べるため、4つの波形特性値(荷重積分値、ピーク荷重、半値幅、最大最小比 - 微分荷重波形の最大値に対する最小値の比)と板厚の関係を多項式と仮定し、係数を求めるために重回帰分析を実施した。7種の厚さ毎に5個の測定データが有るので、計35ケースを用いて5の係数を決定した。この係数を用い、波形パラメータを厚さに変換し、真の厚さに対する誤差を求めた。

なお、荷重波形に含まれるノイズの影響を低減させるため、カットオフ100kHzのローパスフィルタを用いた。荷重波形の最大値の5%を超えてから15%を下回るまでの部分を解析に用いた。

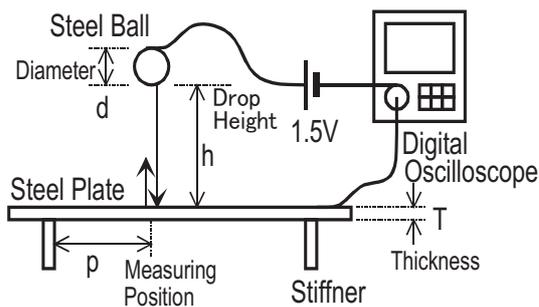


図2 測定システム

表1 インパルスハンマの定数

Measurement range	22	kN
Sensitivity	0.277	mV/N
Time constant	1700	sec
Stiffness	0.202	N/um
Resonant frequency	75	kHz
Head weight	318	g

4. 実験結果

3.1 測定原理の確認

(5)式及びFEM解析、測定実験で求めた荷重積分値(平均値)と厚さとの関係を図3に示した。(5)式とFEM解析は厚さが大きい領域で値が一致した。厚さ6,9mmでは(5)式は負の値が計算上現れ、精度が低下すると考えられた。

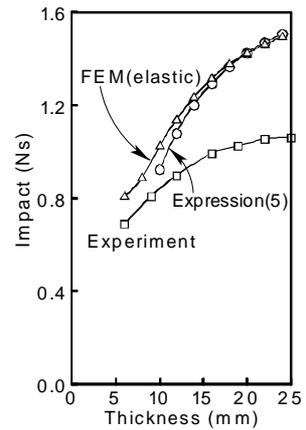


図3 解析式、FEM解析と実験の比較

実験値は、厚さが大きくなると、(5)式及びFEM解析と同様に値が大きくなる傾向を示したが、値自体は両者より常に小さい。厚さが大きい領域で違いが大きい事は、鋼板を叩いた時に生じる表面部塑性変形の影響と思われる。また、厚さが小さい領域での差異には、インパルスハンマの質量やヘッド速度などの算定誤差が含まれていると思われる。

以上から、定性的には(5)式により現象が説明でき、(6)式から厚さが求められると思われる。しかし、これらの式は、小さい厚さ領域では成り立たないことや、測定に伴う誤差などもあるので、次に実験的に厚さを推定する方法を検討した。

3.2 平滑試験片における厚さ測定方法

図4に厚さが異なる場合の荷重波形測定例を示した。Tは板厚である。厚さが薄いときには、荷重の大きさも小さく、また、荷重波形のピークが波形開始点に近くなることからわかる。厚さが19mm以上では、波形観察では違いが分からない傾向である。

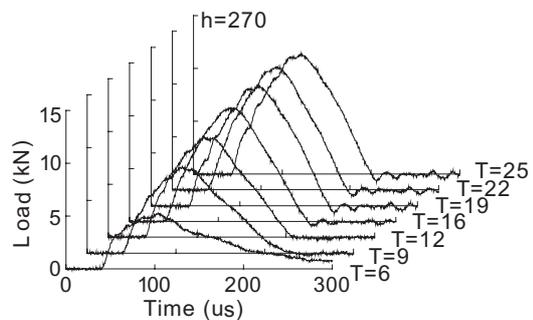


図4 荷重波形例

荷重波形から抽出した4つの波形特性値と厚さとの関係を図5に示した。

4個の特性値に厚さとの相関が認められた。荷重波形積分値、ピーク荷重、最大最小比には厚さが薄いと小さくなる傾向があり、半値幅は逆の傾向を示した。また、各厚さ毎に測定点が5点あるが、荷重波形積分値がもっとも再現性がよく、ばらつきが少ない。

これら4個の波形特性値から厚さを推定した。4つの特性値の内では、荷重積分値による推定誤差がもっとも少なく、ピーク荷重、最大最小比、半値幅の順に厚さ推定誤差が大きくなった。どのケースも厚さが大きい範囲で誤差が増大する傾向であるが、半値幅による推定において、特にこの傾向が著しかった。

図6は、誤差が最も小さい荷重積分値による厚さ推定結果を示した。各厚さ毎に推定が5点ある。20mm以下の範囲における厚さ推定精度が優れている。

図7には、波形特性値と厚さ推定精度の関係を調べるため、厚さ推定の最大誤差と厚さの関係を4つの波形特性値について示した。荷重積分値による厚さ推定は、厚さ20mm以下で誤差0.5mm以内を確保した。20mm程度が厚さ推定の限界と考えられる。

他の波形特性値は、ピーク荷重、最大最小比による厚さ推定が、厚さ20mm以下の範囲において2mm程度以下の誤差を示したが、半値幅による推定誤差はこの範囲でも大きかった。

3.3 隅肉溶接及び切欠きが厚さ推定に与える影響

1m × 1m の鋼板裏面に同じ厚さの井桁状補強材(0.8m 間隔)を隅肉溶接した試験片及び中央に長さ400mmの貫通切欠きを有する同形状試験片を用い、隅肉溶接部と切欠きが測定に与える影響を調べた。

図8には、隅肉溶接部からの距離の関数として求めた荷重積分値を示した。Tは板厚を表す。隅肉溶接部では荷重積分値が大きくなる傾向を示したが、100mm

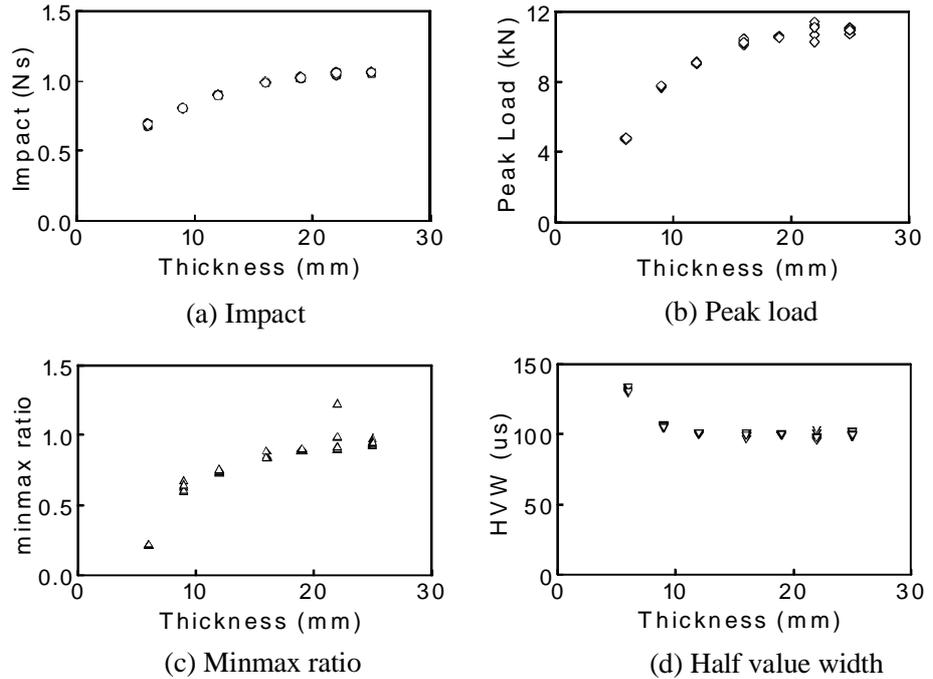


図5 特性値の厚さ依存性

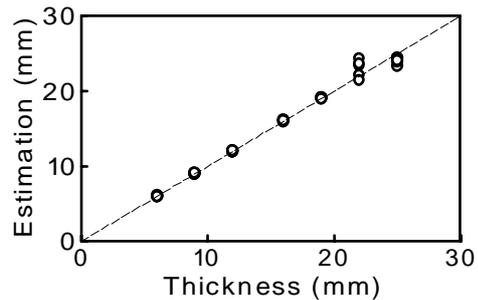


図6 荷重積分値からの厚さ推定値

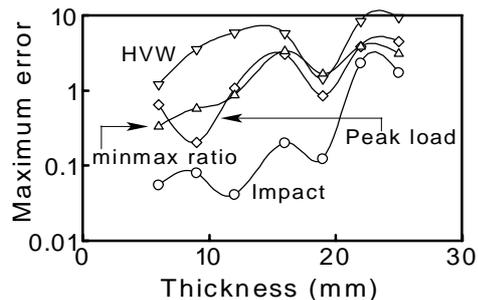


図7 推定誤差の比較

以上離れると、一定の荷重積分値を示した。100mm以上離れると、隅肉溶接部の影響はないと考えられる。

図7は、切欠きからの距離の関数として求めた荷重積分値を示した。板厚は16mmである。切欠き近傍では荷重積分値が低下する傾向が認められた。切欠きの端部付近では、切欠き近傍でも荷重積分値は低下しない。切欠きから50mm以上離れると、切り欠きの

影響はなくなると考えられた。

3.4 腐食凹凸面及び塗膜が厚さ推定に与える影響

腐食凹凸面及び塗膜が厚さ測定に与える影響を調べるため、大きさ0.3m×0.3m以上のナホトカ号残材で表面錆を落とした試験片3種(厚さの平均/標準偏差 8.9mm/0.64mm, 14.0mm/0.35mm, 18.7mm/0.85mm)と厚さ10mm, 16mm, 22mmの鋼板にタールエポキシ塗料を塗布した試験片で測定実験を行った。荷重積分値から求めた厚さと試験片厚さの関係を図10(a)に、推定誤差絶対値の平均と厚さの関係を図10(b)に示した。比較のため、平滑試験片でのデータも図中に示した。なお、塗膜は3種の厚さで実験したが、特性に大きな差がないので、最も薄い塗膜(板厚:膜厚平均/標準偏差 10mmt:194um/3.4um, 16mmt:186mm/10.5um, 22mmt:180um/10.6um)の例を図中に示した。

荷重積分値を厚さに変換するための係数は、平滑試験片で得た値を用いた。腐食凹凸面、塗膜面で新たに係数を求めれば、厚さ推定誤差を低減できるが、腐食凹凸面、塗膜面の特性をあらかじめ特定する手法が必要になるため、利用しなかった。

腐食凹凸面及び塗膜面の双方で厚さが大きい領域における測定誤差が増大することが分かった。腐食凹凸面では、14mmを超えると急激に誤差が大きくなった。また、14mm以下でも誤差が残る傾向があり、今後さらなる検討が必要と思われた。

塗膜面では、厚さ10mmで誤差が小さくなったが、厚さと推定値の関係をみると、10mm以下で誤差が小さくならない場合も想定されるので、今後の検討が必要である。

4. まとめ

インパルスハンマの打撃荷重から厚さを測定する方法について、理論的な説明と適用範囲を明らかにした。板厚20mmまでの平滑材については、十分な測定精度(誤差0.5mm以下)を得ることができた。腐食凹凸面や塗膜面では厚さが大きい領域での精度の低下が大きく、荷重の測定方法や、腐食の程度の異なる試験片による検討が求められている。

5. 参考文献

1) W.H.Hoppmann II, "Effects of impact on structures" shock and vibration handbook, Vol.1, Magraw-Hill, 1961

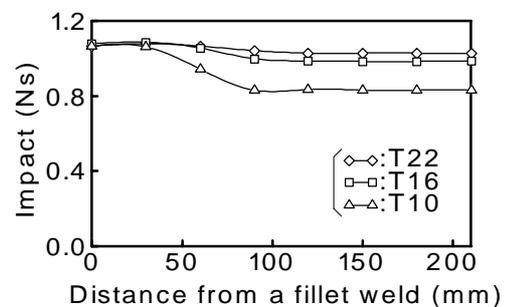


図8 特性値に与える隅肉溶接部の影響

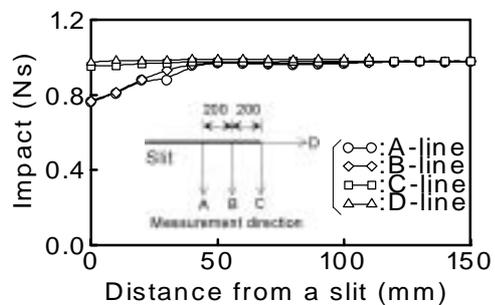
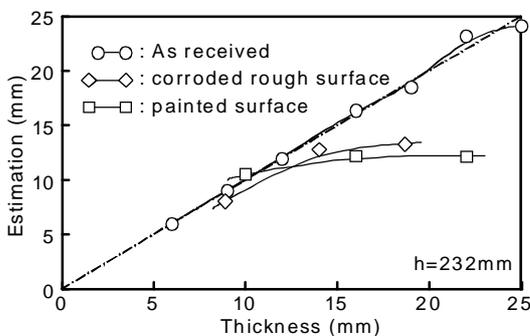
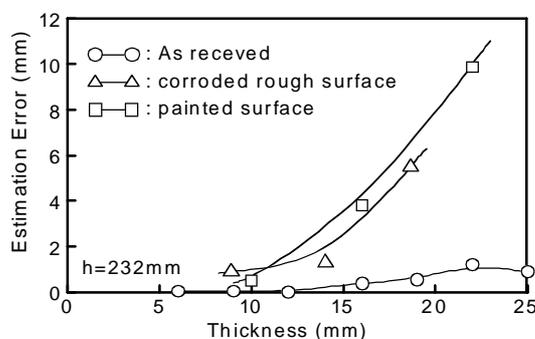


図9 特性値に与える切欠きの影響



(a) 厚さ推定値の平均



(b) 推定誤差の平均の誤差

図10 腐食凹凸面及び塗膜面における厚さ推定精度