438

繰り返し衝撃による鋼のスポール損傷の成長

名古屋工業大学 正 〇 川嶋 紘一郎 名古屋工業大学[院] 中山 治 名古屋工業大学[院] 西村 尚哉

1. 緒言

物体に高速飛翔体が衝突したとき、衝撃波の伝播過程で 発生する引張応力によって物体内に微小ボイド、クラック等 (スポール損傷)が発生し引張応力が大きい場合は内部から 破壊することがある.一般的なスポール損傷の観察は材料 を切断、研磨し光学顕微鏡や電子顕微鏡によってなされる. その場合、点在した損傷の限られた分布しか把握すること ができない.しかし、超音波を用いることにより非破壊的に 内部損傷を観察できる.

本研究では、炭素鋼(S45C)を用いて平板衝撃実験を行い、低周波超音波顕微鏡によりスポール損傷の分布を3次元的に観察した.その後、繰り返し衝撃試験を行う事により損傷分布の変化を観察した.また、音速と超音波減衰も測定し、損傷との関係を検討した.

2. スポール損傷と衝撃応力

速度Vで飛翔板が標的板と衝突すると,発生する衝撃応 力は境界面での応力の釣り合い条件により次のように求め られる⁽¹⁾.

$$\sigma = \frac{\rho_F \rho_T C_F C_T}{\rho_F C_F + \rho_T C_T} V \tag{1}$$

ここで ρ は密度, Cは音速, 添え字F, Tはそれぞれ飛翔板 と標的板を表している. 衝突後, 圧縮応力波が伝播し自由 境界面で反射後, 除荷波となる. この除荷波が重畳すること によって引張応力領域が形成さる. 引張応力がスポール限 界応力を超えると微小なボイド, クラック等が生じる. また, 損傷の発生及び成長は応力値だけでなくその持続時間に も依存する^ω.

3. 実験

3.1 試験片 炭素鋼(S45C)丸棒より,標的板は直径60mm 厚さ8mmに,飛翔板は直径70mm厚さ4mmに機械加工した. 衝撃実験後,回収した標的板を平面研削して2回目の衝撃 試験を行った.

3.2 平板衝撃実験 衝撃実験には、高圧窒素ガスを駆動 媒体とする口径100mm、加速管長さ4mの一段式ガスガンを 用いた.標的板から距離20mmの位置に10mm間隔で光ファ イバースイッチを設け、飛翔板ユニットがその間を通過する

Specimen I		Impact velocity	Impact stress	Spall		
	190.	[III/ S]	[GFa]			
ļ	20	86	2.0	×		
ļ	21	92	2.1	×		
	23	119	2.7	0		
	18	132	3.0	0		
	9	154	3.5	0		

Table1 Summary of impact tests

経過時間により速度を求めた.また,これより理論発生応力 を算出した.

3.3 低周波超音波顕微鏡 超音波顕微鏡は,集束超音波 を二次元的に走査し,微小内部損傷からの反射波強度を濃 淡表示する事により画像を得る.

使用探触子は圧電性高分子膜(PVDF)を用いた点集束型 であり、公称周波数30MHz,探触子直径6.3mm、水中焦点 距離25.4mmである.炭素鋼の場合、表面から約5mmまでの 深さにある欠陥を画像化できる.

3.4 音速,振幅比測定 測定システムは超音波パルサー /レシーバー,A/D変換ボード,パーソナルコンピュータで構 成される.中心周波数5MHz,直径6.3mmの超音波センサ ーを用い標的板厚さ方向に伝播する縦波の裏面反射波を 収録した.これより音速と1回目(B1),2回目裏面反射波(B2) の振幅比(B2/B1)を各試験片について5点で測定した.

4. 結果及び考察

4.1 スポール限界応力 表1に衝撃試験での飛翔体速度, 理論発生応力,超音波顕微鏡による損傷の有無を示す.これよりスポール限界応力は2.1~2.7GPaの範囲内にあると 推測される.

4.2 損傷の分布 試験片No.9を超音波顕微鏡で観察後切 断した.金属顕微鏡写真を図1に示す.幅約10~200μmの クラックが,試験片中央を中心に約3mmにわたって層状に 分布している.図2にB-scan画像を示す.損傷の分布を定 性的に表わしているが浅い位置の損傷による散乱減衰のた め、中心より深い位置の損傷はほとんど表示されない.

4.3 繰り返し衝撃下でのスポール損傷 表2に繰り返し衝撃実験結果を示す.いずれの試験片も表面から深さ2.5, 3.0, 3.5, 3.75mmの位置でC-scan画像を得た.一例として試験片No.12の深さ3.75mmの1回目衝撃後と2回目衝撃後の C-scan画像を図3に示す.No.12は2回目の衝撃応力が高い 場合であり,損傷が全体的に増加している.また,これ以外の深さでも損傷の増加が確認できた.

試験片No.10は最初より2回目の衝撃応力が低い.この場合も同様に画像化した全ての深さで損傷の増加を確認できた.No.13は2回目の衝撃応力が更に低い.この場合は,損傷の分布変化を画像から確認できなかった.

Table2 Summary of repeated impact tests

	First impact		Second impact	
Specimen	Impact	Impact	Impact	Impact
No.	velocity	stress	velocity	stress
	[m/s]	[GPa]	[m/s]	[GPa]
10	183	4.2	148	3.4
12	146	3.3	174	4.0
13	163	3.7	74	1.7



Table3 Change in ultrasonic velocity and amplitude ratio

	Ultrasonic Velocity [m/s]		Amplitude Ratio	
Position	First	Second	First	Second
1	5835	5712	0.51	0.45
2	5727	5615	0.56	0.35
3	5805	5593	0.52	0.40
4	5868	5692	0.65	0.37
5	5680	5538	0.43	0.40



4.4 音速,振幅比測定 一例として,衝撃応力に対する音 速と振幅比変化を図4と5に示す.損傷が少ない2.7GPaでは 変化が見られないが,これ以降衝撃応力が増大するにつ れ音速,振幅比とも低下した.他の4点でも同様の傾向が見 られた.次に,繰り返し衝突後,超音波画像では明確な変 化が確認できなかった試験片No.13の測定結果を表3に示 す.全ての点で音速,振幅比が低下している.これより2回 目の衝撃応力がスポール限界応力以下でも損傷が増加し たと推測される.

最初の衝撃後クラックが発生し、2回目の衝撃試験ではこ のクラックを起因に破壊が進行する.そのため、衝撃応力が 1回目以下の場合でも損傷が成長する.しかし、試験片 No.13の2回衝撃後の損傷増加が僅かな事から、スポール 損傷が成長する最低応力が存在しこれ以下では損傷を圧 縮するにとどまると考えられる.

5. 結言

- (1) 超音波顕微鏡を用いることにより、繰り返し衝撃下でスポ ール損傷の成長を非破壊的に観察することができる.
- (2)炭素鋼について繰り返し衝撃試験を行った結果,2回目の衝撃応力がスポール限界応力以下でも損傷が成長した.しかし、スポール損傷が増加する最低応力は明らかでない.
- (3)損傷の増加に伴い音速,振幅比が低下した.また,音速, 振幅比により繰り返し衝撃下での損傷増加が確認できた.

最後に本研究に協力された小山大輔君に感謝いたしま す.

6. 参考文献

(1)林 卓夫,田中 吉之助,衝撃工学,7,(1988), 日刊工業新聞社

(2)F.R.Tuler and B.M.Butcher, Int.J.Fract.Mech., 4, 431(1968)