AEを用いたコイルばねの遅れ破壊試験システムの開発*

丹後公一**, 小野芳樹**, 杉山充弘**, 阿久津忠良**, 綾田倫彦**

Development of New System for Delayed Fracture Testing of Coil Springs by Using Acoustic Emission

Koichi TANGO, Yoshiki ONO, Mitsuhiro SUGIYAMA, Tadayoshi AKUTSU and Michihiko AYADA

Delayed fracture sensitivity is one of the most important problems for strengthening the spring steels. Recently, some papers are reported to improve the delayed fracture life by adding the alloy elements such as Vanadium and Boron or by refining the grain size. But, in usual case, delayed fracture properties are only evaluated by the total life for fracture and there are few studies on initiation of crack and its propagation. AE (Acoustic Emission) method is already well known to detect the initiation of (initial) crack of structural materials.

Hence, we developed a new system for testing the delayed fracture properties of coil springs by AE method. In this study, we clarified the superiority of this new method by the fact that the location of initial crack and its propagation of coil springs are detected in detail by analyzing AE signals. Using this method, we researched the effects of hardness distribution on the behavior of delayed fracture. The incubation time of initial crack occurrence and its frequency of events vary depending on the hardness distribution of coil spring, especially on surface hardness. Many events of AE signals in lower hardness of coil springs were considered to be related with the depth of quasi-cleavage fracture region detected by scanning electron microscope.

Key Words: Delayed fracture, Acoustic emission, Coil springs, Hardness distribution, Quasi-cleavage fracture

1. 緒言

近年、省エネルギーや環境対策から、自動車の軽量化が進められており、その構成部材であるばねも軽量化に対する要求が強くなっている。その手段の1つにばねの高強度化が考えられるが、遅れ破壊感受性が高くなることが懸念される。

従来、耐遅れ破壊性の向上を図るための組織や組成制御についてはさまざまな研究がなされている^{1)~5)}。しかし、単純形状の試験片を用いた遅れ破壊寿命で議論されている場合が多く、しかも実際のばね形状でき裂発生から進展に至る過程を詳細に捉えた研究は少ない。

一方、構造物の微細き裂の生成から進展を検出するためにAE（アコースティック・エミッション）を用いた方法が既に考案されている^{6)~8)}。

そこで、我々はコイルばねの遅れ破壊機構解明のため、

AEを利用した独自の試験装置を新たに開発した。本論文ではその装置構成について述べると共に、ばね硬さ分布が遅れ破壊感受性へ及ぼす影響について報告する。

2. 実験方法

2.1 供試ばね

SUP7を用いてTable 1に示す諸元のばねを作製し実験に供した。ばねは、熱間コイルリング→焼入→焼戻→セッチングの工程により（ショットピーニングは実施していない）作製したが、材料硬さ（特に、表面硬さ）の影響をみるために、加熱条件を変えてFig. 1に示すA, B, C, Dの硬さ分布の異なる4種類のばねとした。

2.2 AEを用いた遅れ破壊試験方法

Fig. 2に、独自に開発したAE法を用いたコイルばねの遅れ破壊試験装置のシステムを示す。また、実際の装置の外

Table 1 Dimensions of the springs used for test.

Wire diameter(mm)	$\phi 12.5$
Coil diameter(mm)	$\phi 110$
Number of active coils	4.45
Free height (mm)	390

Fig. 1 Hardness distribution of SUP7 springs.

Fig. 2 System of experimental apparatus for delayed fracture testing by using AE (Acoustic Emission) sensor

観をFig. 3に示す。

本システムにおいては、所定のねじり応力（今回の場合、 $\tau_{\max} = 1176 \text{ MPa}$ ）を負荷したばねを水素導入液（25℃の20%チオシアン酸アンモニウム水溶液）に浸漬し、上下のばね座に設けたAEセンサから、フィルタ、アンプを通しオシロスコープとペンレコーダにAE波形（遅れ破壊で発生するき裂）および発生時間を記録した。

Fig. 4にAE信号の出力例を示す。上下センサにAE波の到達する時間差からコイルばねのどこにAE（き裂）が発生したかが分かる。そこで、事前に位置の検出精度を確認すべく、シャープペンシル芯圧折試験³⁾を行った。Fig. 5に、シャープペンシルの芯を圧折した位置とAEが上下センサーに到達するまでの時間差との相関を示す。ここで、横軸はばね高さの中心を0とした位置を巻数で表現しており、縦軸は上下センサーへ到達するAEの時間差を示している。Fig. 5のように圧折位置と到達時間差はよい対応がとれ、今回の装

Fig. 3 Appearance of delayed fracture testing apparatus.

Fig. 4 Example of AE waves detected in delayed fracture testing.

Fig. 5 Relation between location generated AE source and arrival time differences of AE signals measured at two sensors.

置系での位置標定は ± 0.15 巻の精度であった。

2.3 SEM観察および光顕微観察

AE信号と実際のき裂の発生状況とを比較する、あるいはき裂深さを確認する、さらには遅れ破壊後の破面の状況を確認するためにSEM観察および光顕観察を行った。

2.4 水素分析

遅れ破壊試験で破断したばねを直ちに切出し、4重極質量分析計による昇温脱離法（昇温速度 $100^\circ\text{C}/\text{h}$ ）を用いて水素放出速度を求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 AEによる遅れ破壊試験

Fig. 6に、代表的な例として硬さ分布の異なるばねA, C, Dについて、遅れ破壊試験開始から破断に至るまでのAE信号の発生状況を示す。ここで、横軸はAEの発生した時間、縦軸はばね高さの中央を0として、AEの発生したばねの位置を巻き数で表している。

表面から内部まで一様に硬さの高いばねAは、最も寿命が短く試験開始後2.5時間で破断した。また、試験開始直後にAEは見られず、破断の約1分前からほぼ同じ位置で集中してAEが発生し破断に至った。

一方、表面から内部まで一様に硬さの低いばねDは、試験開始から約9時間後にAEが発生し始め、ほぼ同じ位置で約1時間連続して発生した後に破断した。

また、表面硬さを低下させたばねCは、試験開始直後から、多数のAEがいろいろな個所で発生し、時間とともにその回数は減少した。しかし、約10.5時間経過後に同じ位置からAEが頻繁に発生し破断に至った。

このように、ばねの硬さ分布によってき裂の発生や進展状況が異なることが分かった。そこで、AEの発生状況と実際のき裂の発生状況の関係をみるために、AEの発生状況にあわせて試験を中断し、ばねを引上げ、AEの発生位置と推測される部分を切出し、き裂の状況を観察した。

Fig. 7にばねA, D, Cの観察結果を示す。まず、ばねAについては、AE発生直後（2回）に試験を中断し、AEの対応する位置のばねの表面観察を行ったところ、非常に微細なき裂が観察された。しかし、他の場所ではこのようなき裂が観察されなかった。このことからAEと実際のき裂が良く対応していると考えられる。

一方、全体に硬さの低いばねDは、AEが15回発生後に試験を中断し、AEを検出した位置を切出して、表面の観察を行った。AE検出位置に微細なき裂が、ばねAより多く観察された。しかし、他の場所はばねA同様、き裂が観察されなかった。

ばねCは、初期の多数多箇所のAEが発生している試験開始から2時間後で試験を中断し、AEがより多く検出された位置を切出して、き裂の観察を行った。すると非常に多数のき裂が観察された。さらにこの部分の縦断面を観察すると、深さ約 $10\mu\text{m}$ の水素割れと思われる微小き裂が多数観察された。ばねA, C, DについてAEの発生状況と実際のき

Fig. 6 Appearance of AE wave during delayed fracture tests for various type of coil springs.

Fig. 7 Micro-cracks observed by SEM and optical microscope at the points detected by AE signals.

Fig. 8 Effect of surface hardness on time to fracture.

Fig. 9 General view of coil spring after delayed fracture test and macro photographs near the origin of fracture.

Fig. 10 Fractographs of spring A after delayed fracture test.

Fig. 11 Fractographs of spring D after delayed fracture test.

裂は発生数・位置について良く対応し、本システムが遅れ破壊のき裂進展過程を調査する上で有効であることが分かった。

3.2 表面近傍硬さと破断時間の関係

Fig. 8に、試験したすべてのばねについて、表面近傍（深さ30 μm）の硬さと破断時間との関係をまとめて示す。

これより、表面硬さと遅れ破壊時間との間には、良い相関関係があり、硬さが高くなると遅れ破壊寿命が短くなる。すなわち硬さの低いばねD（平均ビッカース硬さ500）は約10時間の寿命に対して、硬さの高いばねA（平均ビッカース硬さ570）は約3時間となった。また、ばねAとCを比べると、内部硬さが同じにもかかわらず、表面硬さが低いばねCの方が破断時間ははるかに長くなり、表面硬さが遅れ破壊時間に大きく影響していることが分かった。

ばねCが遅れ破壊性に優れた理由としては、(1) 表面の炭素濃度が低いために、母材に比べて卑の電位となり多数のAE（割れ）発生にもかかわらず犠牲アノードとして機能し、き裂の周りで腐食が優先して進行し水素割れが停留した、あるいは(2) 表面部の硬さが低いために、局部的に塑性変形が起こり、応力集中を緩和してき裂の進展を妨げた¹⁰⁾、さらには、(3) 遅れ破壊を生じる限界拡散性水素量が大きくき裂が進展しにくかった、と考えられる。

拡散性水素と思われる第一ピーク（約160℃）の水素放出速度（mass ppb/min）は、ばねAで約1.0、ばねCで約2.8、ばねDで約4.4となった（Fig. 8）。これより、硬さが高くなるほど微量の水素でも破断していることから、遅れ破壊感受性が高いことがうかがえた。

3.3 破面の状況

Fig. 9に、破断したばねの外観および、破断部の状況を示す。遅れ破壊したばねは、外径側の最大主応力面で破断していた。

Fig. 10に、ばねAの起点近傍のSEM観察結果を示す。破壊形態は通常のばね疲労試験で見られるものと類似していた。すなわちせん断方向に初期き裂が入り、主応力方向へ進展していた。破面を詳細にみると、起点部は粒内の延性的な擬へき開割れ（QC；Quasi-Cleavage Fracture）であり、内部は粒界割れ（IG；Intergranular Fracture）となっていた。これは、擬へき開割れの領域ではき裂が徐々に進展し、粒界割れの領域に達したところで、急進破壊したものと考えられる^{21) 22)}。すなわち擬へき開割れの深さは脆性破壊を起こす限界き裂深さと考えられる。ばねAの擬へき開割れ領域の深さは約75 μmだった。

一方、全体に硬さの低いばねDについて、破面を観察するとばねA同様、せん断方向に初期き裂が入り、主応力方向へ進展しており、破面内部の起点部近傍では擬へき開割れ、内部は粒界割れと一部デンプルが混在していた（Fig. 11）。なお、ばねDはばねAよりも、擬へき開割れの領域が大きく、深さが約200 μmであった。

このばねAで擬へき開割れ領域が浅いことはFig. 6に示したようにAE発生から破断になるまでの時間が短く、AE発生数も少ないことと対応していると考えられる。また、ばねDの擬へき開割れ領域が深いことは、AE発生から破断するまでの時間が長く、AE発生数も多いことと対応している。

なお、擬へき開領域の寸法 d_{max} と破壊応力 σ_t との関係については(1)式で表される古典的Griffithの脆性破壊条件式が成り立つといわれている²³⁾。

$$\sigma_f \cdot d_{\max}^n = C \dots\dots\dots (1)$$

σ_f : 応力 [MPa] $d_{\max}$: 限界き裂長さ [m]

ここで, n, C は材料によって求まる定数を表す. n は通常0.5近傍, C は5近傍の値をとる. 今, $n=0.5$ の場合, 両辺に $\sqrt{\pi}$ をかけると

$$\sigma_f \sqrt{\pi d_{\max}} = \sqrt{\pi} C \dots\dots\dots (2)$$

となり, この値は擬へき開割れから粒界割れへ遷移する際の限界の応力拡大係数, 言い換えると水素環境下における粒界割れ形成に対する破壊靱性値 (K_{IH}) を示す.

ばねAの場合 $d_{\max}=75 \mu\text{m}$, $\sigma_f=1176\text{MPa}$ を代入すると $K_{IH} \div 18.1\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, ばねDの場合 $d_{\max}=200 \mu\text{m}$, $\sigma_f=1176\text{MPa}$ を代入すると $K_{IH} \div 29.4\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ となる.

一方, SUP7の破壊靱性に関する既報告¹⁴⁾に基づいてばねA (HRC52), ばねD (HRC49) の破壊靱性値 (K_{IC}) を求めると, ばねAでは $K_{IC} \div 14.3\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, ばねDでは $K_{IC} \div 20.4\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ となり, 先に求めた水素環境下での破壊靱性 K_{IH} とおおむね良く対応することが分かった.

4. まとめ

本報で得られた結果は以下の通りである.

- 1) AEと実際のき裂の有無と発生位置とはよく対応した.
- 2) ばねの硬さ分布によって, AEの発生状況が大きく異なり, ばね硬さが高いと試験開始後の短時間にAEが発生し, すぐに破断に至ることがわかった.
- 3) 以上より, AEによるばね遅れ破壊試験はき裂の発生, 進展, 破壊に至る過程を解析する手法として有効であることが判明した.
- 4) 硬さが低いほど遅れ破壊寿命は長くなった. 特に表面硬さが遅れ破壊寿命に大きく影響し, 内部硬さが同じでも表面硬さを低くすることにより, 遅れ破壊寿命は長くなった.

- 5) 遅れ破壊はき裂発生初期では擬へき開割れ, その後に粒界割れへ移行することがわかった.

参考文献

- 1) 中野智弘, 榊原隆之, 脇田将見, 杉本淳, ばね論文集, No46 (2001), 7.
- 2) 岡村司, 村山行雄, 川寄一博, 山下英治, ばね論文集, No45 (2000), 9.
- 3) 青木利憲, 脇田将見, 小曾根敏夫, ばね論文集, No43 (1998), 43.
- 4) 紅林豊, 伊藤幸生, 米口明雄, ばね論文集, No45 (2000), 1.
- 5) 渡辺純, 高井健一, 南雲道彦, 鉄と鋼, 82-11 (1996), 947.
- 6) 岸輝雄, 材料, No29 (1980), 765.
- 7) 岸輝雄, 材料, No29 (1980), 908
- 8) 山崎真吾, 高橋稔彦, 鉄と鋼, 83-7 (1997), 460.
- 9) 大平貴規, 岸輝雄, 日本金属学会誌, 46-5 (1982) 518.
- 10) 岩田祐治, 浅山行昭, 坂本昭, 日本金属学会誌, 30-2 (1966), 169.
- 11) 水口俊直, 山田邦博, 國尾武, 日本機械学会論文集 (A編), 56-2 (1990), 304.
- 12) 木村勝彦, 山田邦博, 日本機械学会論文集 (A編), 58-1 (1992), 78.
- 13) 中谷祐二郎, 山田邦博, “遅れ破壊解明の新展開” (1997), p.13, (社) 日本鉄鋼協会.
- 14) 小山博, 北村朗, 丹下彰, ばね論文集, No29 (1984), 30.