

計算機制御による破壊過程の破壊力学的解析 (第1報)

—オンライン K 関数演算制御疲れ試験方法の開発—

The fracture mechanics analysis of fracture processes by digital computer control (The first report)

—Development of a fatigue testing method by on-line K function calculation control—

北川英夫*・岡村弘之**・大平寿昭*・Y. S. Choy***

Hideo KITAGAWA, Hiroyuki OKAMURA, Toshiaki OHIRA and Y. S. Choy

構造物や複合材料の破壊強度の研究, その他多目的の使用を目標として, オンライン K 関数制御疲れ試験方法, すなわち, 小容量のデジタルコンピュータを使って破壊力学パラメータの応力拡大係数 (K) の変化を演算制御することにより, 破壊の進行を自由に制御しつつ疲れ試験を行なうことのできる実験システムとこれに必要な関連機器を開発した。

1. 破壊過程の制御の可能性と K 関数制御

与えられたプログラムに従って荷重や変位を時間的に変化させて, 材料や構造物を破壊させる試験方法ならびにそれに必要な試験装置の開発が最近までかなり多く進められて来た。以下に述べる制御はこれとは原理的に異なるものである。すなわち, 疲れ, 環境われを含め実際の破壊過程は, “き裂”(われ, クラック) の発生, 成長を経て最終破断に至ることが多く, 外部荷重がたとえ不変でも, その“成長する”, すなわち, “先端が空間的に移動する” “き裂” 自身によって力学的境界条件が変化を受け応力状態が変わる。したがって, 破壊過程の制御は, 単なる外部からの荷重 (P) や変位 (δ) のプログラム制御のみでは達せられず, 刻々の破壊の進行の度合いを量的に示す情報 (たとえば, き裂先端座標, またはき裂長さ a など) と荷重 (P) や変位 (δ) の両者を含む関数たとえば, $F(P, \delta, a, N, t, \dots)$ を与えられたプログラムに従って変化させつつ, 刻々の a の値などを入力信号として, 試験機の操作指令信号を継続的に出力しなくてはならない。ここで, N は荷重繰返し回数, t は時間である。K 関数の変数であるき裂長さ (a) の N や t に対する変化はあらかじめ予知できないものである。

上記の関数 F としては, 現在では, 破壊力学のパラメータを使うのが最善であるが, 中でも特に, 疲れき裂特性はそのパラメータの一つ応力拡大係数 **stress intensity factor** (通常 K と書く) の関数であることが, 一般的には承認されている。すなわち, 刻々の

疲れき裂の成長速度 da/dN に対する各種影響の中, 力学的境界条件の影響に関してはすべてその時々刻々の K という窓口を通して与えられるとするのである。それはたとえば次のように表現される。

$$\frac{da}{dN} = f(K)$$

本試験法ではこの K を被制御関数として採用したのである。この K は構造物や試験片などの供試体の形状・板厚変化, 荷重分布や成長するき裂自体の形状・位置・方向など広義の力学的境界条件のみによってきまる関数で, 理論的に求められるものであるが, 有限体では単純な閉じた解として与えられることは少なく, 通常は楕円関数や各種の超越関数, 無理関数, 有理関数などを含む多項式その他で近似的に表わしている。

K は通常はこのように境界条件によってきまるが, この K を, 自由に直接に制御し, それによって破壊の進行を自由に制御することができるならば, それは疲労の研究者にとって一つの新しい, 楽しい夢になりうるのではあるまいか。

材質的条件と力学的条件が混在する複合材料の破壊や強度の研究や, 複雑な形状や荷重条件の実在構造物の強度の研究に, 有力な武器となりうることを目標として本試験方法が開発されたのであるが, 第2報¹⁾にも一部ふれるように, 本試験法の用途は, 実際には更に広く, 新しい興味ある各種の研究や試験方法の開発の可能性が見込まれている。

2. 制御システムの選択

上述のごとき K 関数制御を行なうためには, 各種の制御方式²⁻⁸⁾ がありうるが, われわれの今回の選択は次ごとくなされた。

(a) 材料試験と構造物試験との間の相互の転用可能性を考慮し, 油圧負荷方式と電子・油圧サーボ制御系を採用し, これに, この制御系を制御する別の制御系 (既述の K 関数制御系) を付加する。

(b) 直接の荷重制御や変位制御でなく刻々の変化量を変数の一部とする K 関数が制御の対象であり, かつ,

* 東京大学生産技術研究所 第1部

** 東京大学工学部

*** 成均館大校

既述のごとく、そのK関数が必ずしも単純でないこと、長時間安定に精度よい制御をする必要、また、Kの変化のみでなく複合材料などにおける破壊過程でのK関数の取り換え指令などの各種操作指令の必要なども合わせ考え、制御のできるデジタルコンピュータによるリアルタイム演算制御方式を採用した。

(c) き裂成長を伴う破壊試験は比較的短時間で終るが、それでも時に10日以上にわたり連続実施することもあるので、リアルタイム制御であることも考慮して、専用のコンピュータを有することが好ましく、従って、経費の点から、長時間連続使用可能な制御用のカリキュレータを見出すことができればまずこれを採用することにした。

(d) 少なくとも疲労き裂ではその成長速度が一般に遅く、荷重繰返し速度を低くとれば、現象の変化を全般的に遅めることも可能であるから、計算時間は0.1~1.0sec.程度で一般には十分であり、K関数も必要に応じ、マクローリン展開その他により十分近似的に使える項数の多くない級数で代用できることも多いので、性能の悪くない制御用カリキュレータならば取りあえずは十分と判断し採用した。必要に応じ数学ブロックやメモリーの追加のほか、他のコンピュータへの切換えも可能であることを考慮して、オンライン方式を基本とした。これは、荷重系、荷重制御系、K関数制御系、き裂追従系を各独立に構成して連結することにつながる。

(e) da/dN が通常は $\Delta K (=K_{max} - K_{min})$ の n 乗 ($n = 2 \sim 10$ 程度)に比例し、1回の荷重繰返し当りの変数 a の変化量が a の絶対値に比べて一般にはかなり小さいことを考慮すると、刻々のき裂長 (a)、荷重、K値などの関連量は精度よくデジタルに記録され使用されることが必要と考えた。

(f) その他、ソフトの良さをなるべく生かして、自由に各種の試験ができることを念頭においた。

3. K関数制御疲れ試験に対するその要求と選択

i) クラックフォロアは交流プローブを用いそのキャリヤの周波数を上げて表皮電流とし、材料表面での読取顕微鏡による測定値と照合できるようにする。き裂の非直進成長も考慮して、XY両軸追従を可能とする。試験片の伸びによりき裂部がY軸方向に振動するがその変位振幅は無視できぬ量であり、しかもき裂の成長に伴って変化するので、XおよびY座標はその短時間平均値で追従する。この操作もX座標に関しては、ソフトでできる。X軸方向に非対称なプローブ(すなわち、+X方向と-X方向とで追従特性の異なるき裂端位置センサ)を新しく開発してき裂端追従の精度向上

をはかる。すなわち、き裂が閉じた時と開いた時とではプローブのとらえるき裂端位置が異なるので、後退抑制制御を行ないき裂の最大開口時のき裂位置を測定できるようにしてあり、また、何かの理由でプローブがき裂端から遠く離れた場合もそのまま遊ばず直ちに元のき裂端にもどることが必要である。これらの目的のためにもプローブの非対称性は必要である。

ii) K制御疲れ試験でき裂追従を自動化するとき裂寸法の測定精度の低下を伴う。これを軽減するため、長い広幅試験片を採用し、それに伴って試験機本体の剛性やチャック方式について大幅な改良をはかる。ただし、広幅試験片はK制御の本来の諸目的からも必要であった。

iii) K制御では一般に大きなき裂長まで追従して試験効率を上げるためバネ定数が低下し、疲れ試験機の動特性が低下するので、設計時および使用時に特に注意する。

iv) 必要に応じ無人化ができるよう、プリセットカウンタを使用し、インターフェースを介してこれをコンピュータに結び、指定繰返し数でK, a , σ 等をプリントすると同時にその指定繰返し数も記録できるようにする。

v) 特性の近似したクラックフォロアを複数台製作して、中央き裂などの対称試験片の実験で両端追従を可能にすると同時に、万一偏心が生じた場合のソフトによる処理を可能にする。この場合、き裂追従用プローブ相互間およびプローブ・板端間の干渉がありうるので、広幅試験片がこのためにも必要である。

vi) コンピュータのソフトにより、 K_m , ΔK , P等の制御、 ΔK 一定、公称応力制御を始め任意の構造物のシミュレーション等の実験が可能であるようにする。

4. 開発したK関数制御疲れ試験装置の概要

4-1) 荷重制御系(疲れ試験機その他)

開発したK関数制御疲れ試験装置の構成略図を図1に、その外観を図2に示す。荷重制御系は20 ton電気油圧サーボ式疲れ試験機である。動特性の極力よいものを用いるように、また特性のよい範囲で用いることが、コンプライアンス変化の大きいこの実験では特に重要である。荷重の読み取り精度は少なくとも0.1%である。

4-2) き裂追従・測定系(クラックフォロアその他)

このき裂追従・測定系はその原型としてMTSのものをも参考に製作されたが内容はかなり異なったものになっているつもりである。渦電流法によるき裂端追従のためのプローブは内部に外径が3mmの3個のマイクロコイルをもちき裂端がこの円断面プローブの

研究速報

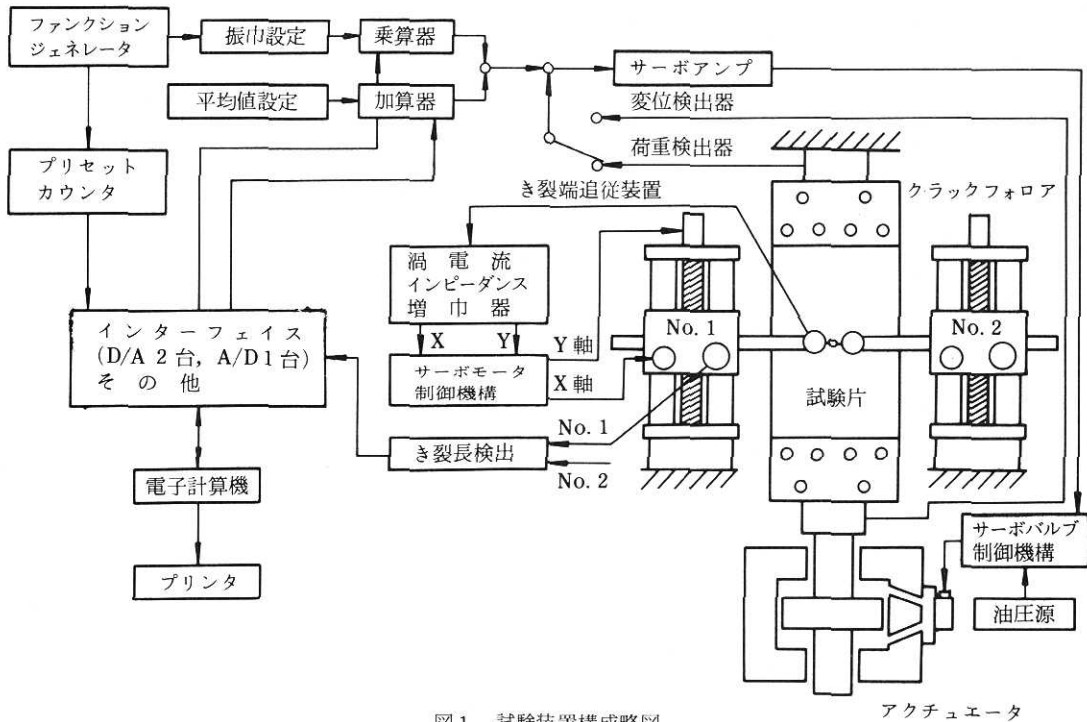


図1 試験装置構成略図

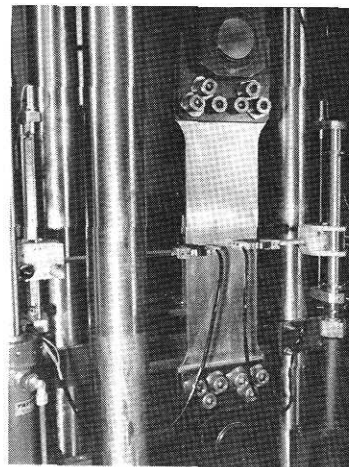
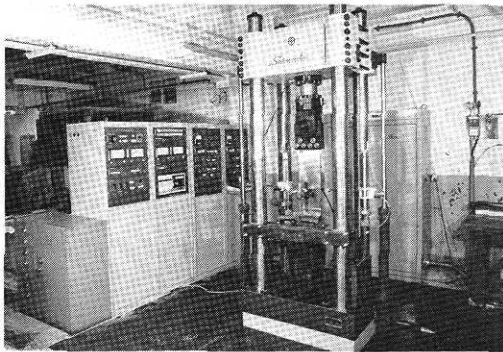


図2 開発したK関数制御疲れ試験装置

ほぼ中心に位置するように追従するのである。き裂が成長しき裂端がわずかに移動すると、3個のコイルのインピーダンスに不平衡を生じる。それによる電圧と位相の変化分を検出し、プローブのほぼ中心のある位置が常にき裂端にあるようにX、Y両軸各々の駆動モータを動かして、き裂先端をサーボ方式で追従するようになっている。一方、X軸用モータと直結されたポ

テンショメータにより、このプローブの位置、すなわちき裂端位置の座標に応じた出力を出すようになっているので、これによりき裂端の座標を読み取ることができる。

またX軸、Y軸方向のサーボ出力としてはA、B、C各コイルの出力をそれぞれ \dot{A} 、 \dot{B} 、 \dot{C} としてこれをベクトル的に構成するとY軸方向の不平衡出力は $[\dot{B}-$

表1 使用した制御用カリキュレータの諸元

型 式 名	横河・ヒューレット・パッカード, パーソナルコンピュータ, モデル10
標準演算速度	加 1.4msec 減 1.6msec 乗 5.9msec 剰 11.8msec
容 量	500ステップ, 51メモリ, 3.4KB (追加のメモリを付加すれば 2036 ステップ, 111メモリ, 4KBまで)
入力方式および 機 器 名	命令キー, 磁気カード
出 力 機 器	プリンタ, X-Y-Zレジスタ
主 なる 言 語	メーカーの特殊語, 一般にはすべて算 用数字表示 (アルファベット, 仮名も可)
主なる被制御機器	K関数制御疲れ試験機
主なるオプション	数学ブロック (統計ブロックなども可)

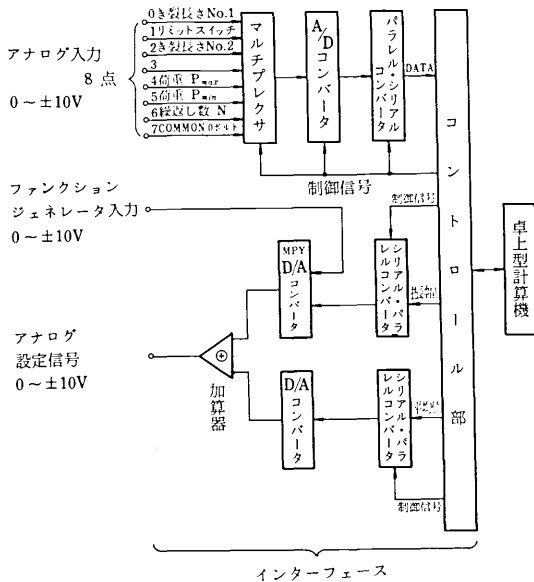


図3 使用したインターフェース

に比例し, X 軸方向の不均衡出力は $(\dot{B} + \dot{C})/2 - \dot{A}$ に比例して取り出されるようになっている。

4-3) K関数制御・記録系(コンピュータを含む)

K関数制御装置は, 前記測定系より送られる, 試験体中のき裂の長さまたはき裂端の位置に関するアナログ信号を入力として受け, それらの量および供試体の形状や荷重条件の関数であるK関数の値または指定された応力値等が, 指定されたプログラムに従って変化するように荷重信号または変位記号を試験機に送る。同時に, すべての関係諸量(たとえば, 繰返し数, き裂端座標, Kの平均値, Kの振幅, その他)を計算して刻刻記録する。

コンピュータはインターフェースを介して, き裂長さをデジタル量で受け, 与えられたプログラムに従って荷重または変位の振幅値および平均値の計算と, 実験の進行に関する各種の指令発信を行ない, インターフェースを通して最終的にはアナログ電圧を荷重制御系へ送るのである。コンピュータは制御用カリキュレータである横河・ヒューレット・パッカード社製MODEL-10でオプションなしの本体は表1の諸元をもつ。また, インターフェースは図3に示す構成でマルチプレクサーへのアナログ入力としては, 通常はき裂端座標の測定値, 制御された荷重や変位の実現値, 操作指令発信の基準位置を教える信号などが入る。このK関数

制御系では, 信号電圧が高いので, K関数制御系が試験機の近くにあってもノイズの妨害を受けない。半年に1回程度の部品補修で使用開始時の要求どおり安定に使用されている。

A/D, D/A変換器を低価格のものに抑えたために, コンピュータ制御の能力が十分には発揮されていないが, 別報(第2報)に述べるように, 既に多種多様な新しい興味ある実験が, 必要な精度では実施できる段階に達したものと考えている。

5. 謝辞その他

本研究は文部省科学研究費の補助を受けて行なったものであり関係者各位に対して厚く感謝の意を表する。また試験機的设计製作に当っては島津製作所の技術と協力に負う所が大きく深謝する次第である。

(1975年10月27日受理)

参 考 文 献

- (1) 北川, 岡村, 大平, Choy; 生産研究, 27, 12 (1975-12)
- (2) S. R. Swansonほか2名; ASTM STP 415 (1967) 312
- (3) R. H. Gallager; Engng. Frac. Mech., 3, 1 (1971) 27
- (4) 太田, 佐々木; 機械学会講演論文集, 750-1 (1975-4), 123
- (5) H. Itagaki, T. Ogawa, Y. Minami; 造船学会論文集, 133 (1973) 277
- (6) 北川, 山田, 西山; 材料学会第22期学術講演会前刷(1973-5) 117
- (7) 北川; 機械の研究, 24, 12 (1972-12) 1561
- (8) 北川; 機械の研究, 25, 1 (1973-1) 15