

面内二軸荷重下の疲労き裂成長の破壊力学的研究 (第1報)

—高サイクル二軸荷重疲労試験機の開発—

Fracture Mechanics Approach to the Fatigue Crack Growth under
In-plane Biaxial Loads (The First Report)
—Development of a biaxial loading high cycle fatigue testing machine—

北川 英夫*・川井 忠彦**・岡村 弘之***
結城 良治*・大平 壽昭*・松原 季男****
Hideo KITAGAWA, Tadahiko KAWAI, Hiroyuki OKAMURA
Ryoji YUUKI, Toshiaki OHIRA and Sueo MATSUBARA

1. まえがき

近年き裂の発生・成長から最終破断に至る破壊過程に着目し、そのき裂挙動をき裂の弾性解析で得られる応力拡大係数(K)で特性づける破壊力学的方法論が確立され、各種の破壊現象に適用されている。疲労き裂の成長挙動にもKによる整理が適用でき、Kを使って荷重レベル、荷重様式、試験片・き裂形状などの力学的境界条件の異なる諸実験の結果が統一的に良く整理されることが知られている。現在までにKの解析がされている中央き裂入り帯板試験片、CT試験片などの単軸荷重方式の小型試験片を用いた各種の疲労き裂実験が行われ、疲労き裂の成長に関する多くのデータが蓄積されている。またそのデータに基づき、欠陥を含む構造部材の寿命推定や安全評価が行われている。このような単軸荷重の疲労実験で得られた疲労き裂成長特性と二軸荷重の疲労実験で得られた疲労き裂成長特性との間では顕著な差異があるとの報告もあり¹⁾、一方実際の構造物で破壊が問題となる箇所では、二軸または多軸応力状態である場合がむしろ多く、小型標準試験片による材料試験から、構造物部材の安全評価へとその応用を拡大しつつある破壊力学の現段階において、このような構造物中の疲労き裂成長のシミュレーション試験として、またはこの評価の基礎実験として二軸荷重疲労実験の重要性が認識され、二軸荷重疲労に関する実験的および理論的研究が試みられつつある^{2)~10)}。

著者らは、構造物の極限強度を解析する共同研究¹¹⁾の一環として単位構造要素の強度を求めるため、また同時

に現在まで主として単軸荷重試験を用いて行ってきた疲労、環境破壊、延性・ぜい性破壊などの破壊力学的研究の次段階の要解決課題として、この二軸荷重疲労の研究に着手した。まず第1段階として本研究に必要な高サイクル二軸荷重疲労試験機の開発を行い、また本試験機を使った二軸荷重下の疲労き裂成長に関する基礎的実験を行った。以下に本試験機の開発に関する概要を述べる。本試験機を用いた二軸荷重下の破壊の実験結果および破壊力学に基づく各種の研究については、次報以降に順次報告する予定である。

2. 従来の二軸荷重疲労試験方法と新たな試験機開発の必要性

二軸荷重による疲労実験例は通常の単軸荷重の疲労実験に比較して極めて少ない。筆者らの理解では高サイクル二軸荷重疲労き裂成長をKで整理した信頼できる一般的データはほとんど皆無であったようである。これは二軸荷重疲労実験における実験技術上または解析上の困難さによるものと思われる。その一つは疲労試験機の問題である。最近発表された二軸荷重疲労き裂成長実験の実験法を大別すると、1) 中空円筒試験片を用いた軸方向の引張りまたは圧縮荷重と内圧²⁾またはねじり荷重³⁾の重量による実験、2) 特殊形状や拘束を持つ試験片を用いた実験^{4) 5) 12) 13)} 3) 平板試験片(一般には十字形試験片)を用いて面内二軸荷重をかける実験^{6) 7) 8) 14)} などがある。

上記1)、2)の実験では多くの場合既存の試験機をそのまま、または若干改良して使用できる利点がある反面、引張り、面外曲げおよびせん断の変形モードが混在する場合が多い、供試体が曲面である、または試験片の有限形状を含めたき裂の厳密な解析が現在まで十分にできていないなど、実験結果の破壊力学的評価に関する一般

* 東京大学生産技術研究所 第1部

** " 第2部

*** 東京大学工学部

**** オートマックス株式会社

的な困難が残る。したがって二次元問題として扱え、試験片形状の影響を含むき裂の精度の良い解析の可能な十字形またそれに類する試験片を用い面内二軸繰返し荷重をかける基本的な実験がまず必要であろう。しかも低Kレベル、比較的小さなき裂の実験まで含む広領域のデータがとれることが応用上は望ましく、そのためには荷重速度を上げざるを得ない。しかし実際にこれらの諸条件を満足する実験を行うには、まず性能の良い面内に直交二軸繰返し荷重をかける疲労試験機の開発が先行しなければならなかった。従来の平板に面内荷重をかけた同種の実験的研究の二、三を一瞥すると、一軸は繰返し荷重であるが他の一軸は静荷重のもの、必ずしも“単純な二軸荷重”が保証されていないもの、低繰返し速度の荷重のみを負荷するもの、Kの解析における境界条件の設定が困難と見られるものなどを含んでいるように見える。ここで“単純な二軸荷重”とは、各軸ごとの外力の合力が常に0であり、荷重端で面内曲げや横せん断力が存在しない荷重方法をさす。各試験機はそれぞれ所定の研究目的に沿って設計・製作されたものかと思われるが、既述の筆者らの意図する研究条件とは一致しないものと考えた。したがって本研究では、まずき裂の解析と試験片製作費の低下を念頭において選定した十字形平板試験片に上記の意味での単純な面内二軸荷重が負荷でき、しかも各軸とも独立に繰返し荷重および静的荷重を負荷でき、さらに各軸の変位、各軸両端の荷重差および両軸間の位相差も制御または変化できる高サイクル二軸荷重疲労試験機の開発を試みた。またこれと併行して実験に使用する十字形試験片中のき裂の応力拡大係数の解析および応力分布の解析も行ったが、その詳細は次報に譲る。

3. 本試験機の開発における設計上の要求と仕様

破壊力学的に整理しやすい二軸荷重による疲労き裂成長特性のデータをなるべく広い試験条件下で求めることを目的として今回開発した二軸疲労試験機に要求した仕様を解説的に述べると次の通りである。

(1) 試験片・き裂とも二次元的に扱えるように平板試験片を使用し、その中立面内に互いに直角な二方向(x , y)の荷重がかけられること。

(2) 荷重は最大板厚 10 mm までの鋼、アルミニウムなどの材料の試験片の中央の直線貫通き裂を少なくとも全長 5 mm から 100 mm までの範囲で安定成長させるにたる荷重を、この疲労き裂成長の全域で目標値 1% 程度の精度で制御しつつ与えること。ただし、これは採用する試験片形状、実験条件、材料にもよる。

(3) x , y 各軸について対向する両荷重端(チャック部)の軸方向分力の合力が各瞬間で 0 であり、かつ負

荷重端での軸と直角な方向の分力および固定端方式チャックならば面内曲げモーメントがそれぞれ 0 でなければならない。これは今回の二軸疲労試験機の基本的要求であると同時に良好な制御のための荷重計、変位計からの要求でもある。そのためには、たとえば x 軸の両端での荷重 P_{x1} , P_{x2} はそれぞれ独立に計測され、その差 $P_{x1} - P_{x2}$ が常に 0 を指向するように制御されることが望ましい。 y 軸についても同様である。また変位制御疲労実験ならば、両端での変位差 $\theta_{y1} - \theta_{y2}$ についても同様であり、一般には試験片の中央点が中立点で静止するごとく制御されることが望まれる。

(4) 荷重繰返し速度の仕様は、0 (静荷重) から少なくとも 10 Hz とする。すなわち長時間の静荷重、低速低サイクル疲労というまでもなく、高サイクル疲労領域までの実験をしたいという要求である。これは破壊力学の立場では、低 ΔK レベルで da/dN または小き裂から大き裂までの da/dN , ΔK_{th} など実際に工学上要求されるデータの決定や、二軸荷重下で屈曲しつつ成長するき裂の追跡などには必要との想定による。上記(2), (3), (4)の条件を同時に満足する、特に(4)の条件を満足する試験機を開発し、成功裏に使用するの難しいことであり、本研究のもっとも重要な解決点である。この速度の要求のため単軸荷重疲労試験機を利用し、その試験片に横方向のアクチュエータをのせるような方式が採用できなかった。

(5) あらゆる種類の共振を避けるに必要な静止部分(フレーム、ベット、基礎など)の剛性と製作精度が必要とされる。これは上記(4)の条件からの付帯要求としての面が強い。

(6) x 軸と y 軸の荷重波形の位相差は 0° から 360° までの任意の値に設定できること。各種板構造物のひずみ測定結果がこれを要求するばかりでなく、構造強度解析における破壊要素の特性としても要求される。

(7) 実験中断や測定のための運転停止または非常停止による静止位置・時期が荷重的にも変位的にも中立位置であることが望ましい。これが満足されるためには、まず条件(3)の解決が先決である。

(8) Kの解析に便利で同時に製作費の安い形状の試験片を使えるように考慮すること。この二点は実際の研究の遂行には影響が大きい。また各種の形状、寸法の試験片が使用できることも必要である。

(9) 与えられた任意の板厚の平板をそのまま実験でき、しかも板厚の異なる試験片の使用時も面外曲げを生じないこと。

(10) 万一誤操作・誤制御で試験片が座屈したり、破断しても、ロードセルやチャックの性能低下や故障が生

研究速報

しないこと。

4. 開発した高サイクル二軸荷重疲労試験機の概要

以上述べた要求または仕様を念頭において、次のような水平型油圧サーボ式高サイクル二軸荷重疲労試験機を開発した。本試験機は試験機本体および制御装置の外観写真を図1に、本試験機の構成図を図2に、また装着された試験片およびチャック部の写真を図3に示す。本試験機の現段階での諸元および性能を以下に挙げる。

(1) x 軸および y 軸にそれぞれ対向した2本ずつ計4本の独立な電気-油圧サーボ駆動制御式アクチュエータとロードセルを有し、 x 、 y 両軸の荷重(または変位)振幅と平均荷重(変位)をそれぞれ任意の値に各別に制



図1 高サイクル二軸荷重疲労試験機

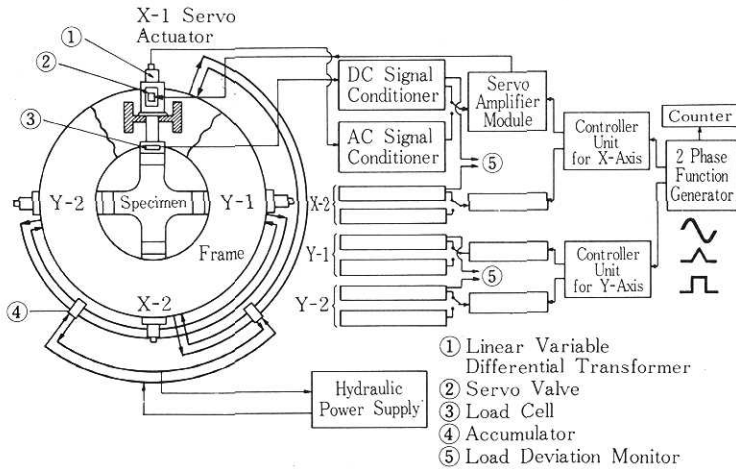


図2 高サイクル二軸荷重疲労試験の構成略図

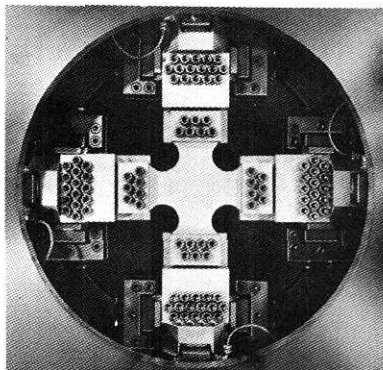


図3 試験片の装着状態

御でき、また両軸の荷重波形の位相差も 0° から 360° まで変化できる。

(2) x 軸、 y 軸とも対向するアクチュエータの荷重差を制御パネル面で計測でき、その荷重差を0にするべく制御できる。この制御精度はきわめてよかった。

(3) 試験機本体は直径2mの大きな2枚の円板形フレームを主部材として構成され、想定されるすべての変形モードに対して、きわめて剛性の高い構造となっている。仕上げは大型工作機械の基準面程度で経年変形を生じないことを目標に製作した。減衰と剛性をさらに上げるためコンクリート基礎水平設置した。10tonの荷重に対する変動は $3/100$ mm 以下である。

(4) 4本のアクチュエータが同一水平面上互いに 90° になるように高精度の位置、方向設定で配置されている。

(5) 特に吟味された電気-油圧サーボ制御式アクチュエータ・ロードセルを使用し、静的試験から40Hzまでの高速繰返し長時間運転が可能である。しかし既述の仕様は10Hzまでであり、これ以上の高速での周波数特性がき裂成長とともにいかに変化するかについては実際の実験ごとを確認せざるを得ない。

(6) 試験片はボルト締めつけで行い、最大板厚が10mm、平面形の最大寸法は 670 mm \times 670 mm の平板試験片が使用でき、密なボルト配置またはアタッチメント

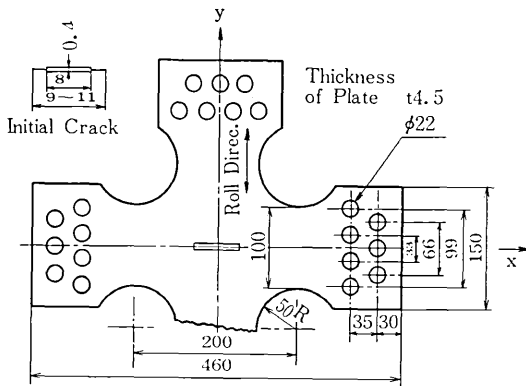


図4 本実験で用いた試験片と初期き裂の形状 (単位: mm)

の利用により他の各種の形状、寸法の試験片が使用可能である。精度の良いKの解析が可能で製作費が比較的安価であるため、現在の実験では図4のごとき小形試験片を多く使用している。

(7) 本試験機の容量は最大荷重± 10 ton, 最大変位± 50 mmである。

(8) 対向するロードセルの荷重差が設定値を越えた場合、荷重・変位が定格を越えた場合などの各種の異常に対し、自動的に非常停止する装置がついている。

本試験機は高サイクル二軸荷重疲労実験を主たる用途として開発したものであるが、経済性を考えなければ、通常の単軸荷重疲労にも使用できるばかりでなく、原則として二軸荷重の静的引張試験、圧縮、圧屈試験などにも適用できる汎用性のある試験機である。また高温、低温および腐食性環境中でも実験を行えるための十分なスペースが用意されている。なお本試験機は東京大学生産技術研究所材料実験室に設置されている。

5. まとめと謝辞

幸いにも多くの技術的課題をはば解決でき、難しい大型高サイクル二軸疲労試験機の開発に成功し、おそらく初めての信頼できるK基準き裂成長速度を求めることが

できたのではないと思われる。この試験機開発の基礎方針の決定に当たっては、シラキウス大学、ケンブリッジ大学、京都大学、大阪大学、東芝・電技研などにおける貴重な経験を参考にさせていただき、記して謝意に代えるものである。また本試験機は文部省科学研究費の一般研究Aの補助と生産技術研究所の援助により開発・設置された。その関係で各種の面でお世話いただいた当時の生研所長武藤義一教授、現所長田中尚教授、山田嘉昭教授、渡辺勝彦助教授、当時の生研・研究協力掛、司計掛、施設掛の関係各位および直接製作に関与されたオートマックス株式会社の方々に対し厚くお礼申し上げる (1978年7月1日受理)

参考文献

- 1) Christensen, R. H. & Harman, M. B.: ASTM STP 415 (1967), p. 5
- 2) 佐賀, 三好ら; 第25期応力連合学術講演会前刷 (1976), p. 143
- 3) Pook, L. P. & Denton, K.; Int. J. of Frac. Mech. 8 (1972), p. 118
- 4) Toor, P. M.; Eng. Frac. Mech. 7 (1975), p. 321
- 5) Joshi, S. R. & Shewchuk, J.; Exper. Mech. (1970), p. 529
- 6) Kibler, J. J. & Roberts, R.; Trans. of ASME, Ser. B, 92 (1970), p. 727
- 7) Hopper, C. D. & Miller, K. J.; J. of Strain Analysis, 12 (1977), p. 23
- 8) 平, 田中ら; 第21回材研連前刷 (1977), p. 103
- 9) Ogura, K., Ohji, K. & Okubo, Y.; Int. J. of Frac. 10 (1974), p. 609
- 10) Eftis, J. et al; Eng. Frac. Mech., 9 (1977), p. 189
- 11) 昭和51年度文部省科学研究費一般研究補助による「塑性変形、安定およびき裂成長を考慮した構造物の最終強度に関する研究」(主任研究員川井忠彦)
- 12) 大路, 小倉, 原田, 千賀; 機論, 39, 321 (昭和48-5), p. 1416
- 13) Erdogan, F.; HCHP
- 14) Lin, K. Y., 岡村; 私信

