繰返しひずみ感度計*

中 村 和 雄**

Repeating Stress Detector

by

Kazuo NAKAMURA

(Railway Technical Research Institute, JNR)

The author proposes in this paper a new device directly analysing the strength of constructions submitted to dynamic loads in service. This is a sort of qualitative dynamic strain counter which permits us, the author expects, to make over-all evaluation of these constructions from the point of view of fatigue strength.

The essential features of this device are as follows:

- i) the materials, which are sensitive to repeating strain, should be ductile metals; for example copper,
- ii) these metals should have a fine wire or ribbon shape and be attached to the surface of construction members with some kind of resin adhesive just as in the case of wire strain gauge,
- iii) the variation in some characteristic qualities of the detecting metal should be easily distinguishable and so definitely regular that we could determine the equivalent strain amplitude and cycles of the examined construction with the indication of this device.

As one example of such device the author has described here his first attempt utilizing a notched fine wire and some of his characteristics revealing the feasibility of the proposed device.

Purposes of several reports in U.S.A. and England are a little different from mine. The latter is never any fatigue detector but a load counter of fatigue testing machine (i.e. in service condition) utilizing the actual construction in service as test piece. (Received May 17, 1958)

1. ま え が き

われわれが構造物の強度を論ずるにあたって、一方には理論のはなやかな展開が行われ、同時に他方では材料の静的または動的強さに関する主として実験を基とした研究が進められた。しかるに、1930年前後から次第に構造物自体を直接相手とした実験的研究の必要性が生じ、ことに第2次大戦を境として、この第3の分野においてなされた急速な進歩は衆知のところである。

しかるに、筆者のこの方面における経験によれば、現在といえどもこの三つの分野に分れた研究の結びつきにおいて、いろいろな欠陥の残存するのを歎かざるを得ない。筆者がここに提案する「繰返しひずみ感度計」とは、そのうちの構造物に生ずる疲れ破損と試験片による材料の疲れ強さとの間の溝を幾分かでも埋めようとする目的を持った新しいメーターである。

2. 感度計の構想

(1) 必 要 性

近來われわれは抵抗線ひずみ計その他、各種の方法を応用して構造物に加わる外力や、それによって生ずる静的動的の部材応力分布を知ることができる。また、多くの材料については試験片による疲れ強さおよび、それが受ける各種因子による影響をも知っている。しかるに依然として、ときに説明しにくいき裂、折損の事故に遭うことがある。この事情は部材が大きく、また、長年月にわたって使用される構造物になるほどいちじるしく、これが構造物の設計安全率を1.0に近づけたいというわれわれの欲望を妨げている。

たとえば、野外で長年月にわたって使用される構造物の疲れに影響するすべての物理、化学的因子は、たとへ最近盛んとなっている構造物疲れ試験機をもってしても容易に実現しえない条件であろう。

古来数多くの研究者が、もっと直接の要求から材料に生じた疲れの程度を非破壊的に検出しようと試みたし、最近でも P.E. Cavanagh 氏の研究はこの努力の一つである。

筆者の見解によれば、これら数多くの試みがいずれも実際の構造物に対して適用するには便利でなかった

* 原稿受付 昭和33年5月17日, 昭和33年5月17日第7期総会で講演

** 正員 国有鉄道鉄道技術研究所

と云う原因は、主としてかれらが構造物の部材自体の疲れを直接見出すとしていているところにある。

筆者はこの点に着目して間接的な進路を開こうと志し、その可能性を確かめるための実験を行った。そしてこの感度計を進歩させることにより、構造物自体の疲れ強さを直接求めて設計の可否を論ずる実用的目的を満すとともに、将来進められるべき実物の疲れ強さの根本的解明に対して一層確かな検討の資料を与えたいと考えた。

すべての構造物は毎日実際に運用されている。すなわち構造物自体を一つの試験片と考えると、正しくあらゆる意味において運用中の構造物が受けたとまったく同様なすべての影響を受けながら、あるものは、ある時期にき裂を生じ、あるものは、いつまでも健全な状態で働いている。現在までわれわれがこの貴重な試験片をみすみすみ見逃してデータを採らないでいる原因は、それに加わる負荷とその頻度がまったくわれわれの意志で自由にならぬばかりか、それを多くの「試験片」について測定する手段を持たないからである。

したがって、もしも構造物の運用応力の大きさと頻度とを実物の多くについて知る手段さえあれば、われわれは構造物の疲れ強さの受ける各種因子の影響を調べることができ、さらには疲れの法則を明らかにすることによりき裂の発生をまったく間接的なながらも事前に予知することができるようになるであろう。

このような研究は、まず実用に耐える丈夫で取り扱いの簡単な感度計を必要とする。ただし、感度計指度の読み取り操作だけは特殊な専門家が行うものであるから、必ずしも極度に現場的であるに及ばない。

(2) 金属細線式感度計の原理

実物としての構造物に生ずる応力または加速度を統計的な観点から実測することは、機械的または電気的手段の組み合わせによってかなり古くから試みられている²⁾³⁾⁴⁾。しかし、この方法は特に計画された測定実験として行われる性質のもので、筆者の提案する上述の目的に対しては単なる補助的手段でしかない。

普通によく使われている応力塗料⁵⁾も疲れによってき裂を生ずることが知られている。しかし、今の目的に対してこの感度計は、たとえば1~2年という長期にわたり物理的にも化学的にもできるだけ安定なものである必要がある。この観点から見る場合、現在の応力塗料のようなものはあまり適当であると考えられず、金属こそまず第1候補として可能性を試みるべき材料であると思う。

さて、金属を検体とする感度計が被測定体の応力に比例したひずみを受けて、なんらかの指度を示すようにさせる方法はわざわざ簡単である。すなわち抵抗線ひずみ計そのものの構造で充分である。このように断

面積の小さい金属片を樹脂で貼り付けるという原理は今の場合、化学的に樹脂が金属を保護する利点があり、また、この樹脂は単にひずみを伝える役目しか持たないから、もしも樹脂が老化することがあっても貼り直せばよい。

この金属が繰り返しひずみによって示す変化の内で、検知するに適したものとしていろいろの撰択の可能性が考えられる。

(a) 古くから知られており、また、筆者自身も実験して確かめつつあるごとく⁶⁾、普通の抵抗線ひずみ計は多くの場合、繰り返しひずみを受けると抵抗線が切断して働かなくなる。この断線は単に電流の導通試験によって容易に検べることができる。

(b) 磁性体に属する金属で細線が作られている場合には磁気性質の変化から、これに加えられた繰り返しひずみの程度を検知できであろうことが過去の¹³⁾¹⁷⁾実験結果から予想できる。

(c) かつて大久保氏の提称した鍍金層⁸⁾の変色による繰り返しひずみ検知法は、しばしば微妙な操作を要するとはいえ、かなり精密な結果を与える方法と考えられる。

(d) その他、前記のような考え方により表面に取り付けた金属における疲れの検出法として採り上げてよいと思われるものには、応力-ひずみ履歴曲線の変化⁹⁾、静的機械的性質(硬度、弾性限、抗張力など)の変化¹⁰⁾、顕微鏡組織の変化¹¹⁾、X線による結晶構造の変化¹²⁾などいろいろ考えられる。

強度の実験的研究手段として筆者と類似の考えを過去においてすでに応用した例は案外に多い。

Powell 氏は細線とコンデンサーとを組み合わせ、試験片の静的破壊実験における破断の発生点を見出すのに利用した。この方法を疲れ破損の生ずる瞬間の検知法として利用する試みが Foster¹³⁾ 其他の人々により行われ、ことに Valluri 氏はこれによってき裂の予知も可能であると指摘し、かなり克明に基礎的性質を調べ¹⁴⁾、この研究は今も C.I.T. で続けられている。さらに英国では、もっと直接的な方法で疲れ破壊を予知する¹⁵⁾¹⁶⁾方法が試みられている¹⁷⁾¹⁸⁾。

ただこれらは、いずれもきめて実用的な目的のみを意図としていて、筆者の提称するようにひずみ感度計として広く構造物の疲れを研究する手段とするという考え方は存在していない。むしろ、これらの研究によって筆者の感度計の具体的な可能性が発見された。

(3) 感度計の読み取り方

これは要するに一つの物尺である以上、なんらかの方法によって目盛を与える必要がある。筆者の現在までの実験はすべてこの目盛をいかにして作るかという目標に向かって進められている。

第1図 整理法

ところで、いま異なる感度を持つ一連の感度計があるものとして、それをいかに読み取るかについて述べる。

一般に異なる感度を持つ2個の感度計の特性が第1図(a)の D_1 , D_2 のごとくであったとする。この2個を調べようとする個所に並べて取り付け、定期的にその変化を検査する。すると結局、ある異なった二つの時期に各感度計に変化が現われ始める。そのおのおのを T_1 , T_2 とすると、普通の場合、特に運用条件に大きな変化のない限り両者は大体同一水平線上にくると仮定できる。すなわち、この感度計は相当ひずみ振幅 ε を与える。もちろん感度計の特性と構造物の材料、負荷の種類で、この感度計の指数が必ずしも疲れ程度の直接的物尺とはならないであろう。しかし、少なくとも構造物の種類に応じて感度計の材質その他を選べばもっとも適当な物尺を探すことは可能であると期待しているのである。

さて、この相当ひずみ ε を見出す手段として、もっとも簡単な場合は第1図(b)のごとく $\log(t_2/t_1)$ が ε の関数に表わされる場合である。すなわち、測定値 T_1 , T_2 により図から相当ひずみ振幅、したがって、さらに相当繰返数も見出ことができる。

この D_1 , D_2 のごとき特性曲線は必ずしも2個の感度計によらないでも、1個だけで、たとえば変質の開始と終了のごとき二つの値を検知することによって作られる可能性もある。

(a)図の曲線で傾斜部分がすべて平行である場合には、止むなく一連の異なる感度を持つ感度計を同時に用い、長日月のうちにどの感度のものまで変質した

第2図 整理法

かを検べることにより相当ひずみ振幅を求める方法を強えられる。しかし、感度が不足であれば、いつまでも変化の生じない場合もありうる。この場合、重複荷重の関係が比較的単純であると仮定すると、別の整理法が可能である（この仮定は少なくとも銅系統の線には許せるかも知れない）。

いま、第2図において D なる特性を有する感度計がその疲れ限度 ε_0 よりも高いある相当ひずみ振幅 ε を受けていたとする。これをある時期（相当繰返数 N ）に取脱し、一定の検査ひずみ振幅 ε_f を与えて調べると N_f 回で変質が現われるはずである。 N_f と ε_f に対する特性繰返数と N_0 の比は、 ε に対する特性繰返数を N_0 として比 $(N_0 - N)/N_0$ に等しいか、少なくともそれに類似の単純な関係にあるものと想像されるので、この N_f をもって少なくともその試験対象の安全度を評価する指数と考えることができる。

(4) 感度計の目盛

感度計として以上のような読み取りを行うためには種々の感度のものが必要になるが、もっとも簡単なことは材料を変えることであろう。これは測定対象にもっとも適したものを選ぶと云う面からも必要である。

次に Valluri 氏も述べたように、感度計にあらかじめ疲れ試験機を用いて適当な前歴を与えておく方法が考えられる。しかし、実際問題としてこの方法があまり信用すべき結果を得るとはいいいにくい。

この他にも金属の疲れ強さを変えるいろいろな因子が知られているので、これらを今の目的に逆用できると思う。たとえば、表面の腐食作用¹⁹⁾、鍍金、あるいは冷間加工、熱処理などである。²⁰⁾
²¹⁾

前述の抵抗線ひずみ計自体の疲れ強さの研究において、しばしばその引出線が製作中に不注意に作られた切欠位置において容易に切断する例があった。そこで筆者は、まず第1の試みとして感度計の感度を各種の切欠を与えて変化させる方法を採用することとした。すなわち以下に述べる実験結果は切欠法を主とし、その他若干の因子によって金属細線の繰返しひず

みに対する受感度を調査したものである。

3. 予 備 試 験

(1) 実験条件

前節に述べた各種の候補因子の内から金属細線感度計に適用して便利で確実なものを選び出すため、まず定量的な実験を行った。ここで確めようとした因子は、

{ 一般処理 冷間加工 (圧延)
 表面処理 { 一様腐食
 切 欠

ここで、表面処理を与えた方法を分類すると、

機械的方法 かみそりによる切り目
 化学的方法 冷水による長期の腐食
 塩水 (NaNO_3 , NaCO_3 , NaCl)
 酸性の水 (HCl , H_2SO_4 , HNO_3)
 塩基性の水 (NaOH)
 電気分解
 水銀による腐食

ここで化学的な腐食を与える場合、金属線に与えた初期引張の影響、アンモニウム酢イオン存在の影響をも確めた。

実験目標は次に示す限界値を基準として、受感度の不足する因子をふるい落とすことにある。すなわち

(a) 限界ひずみ振幅 $\pm 1.000 \times 10^{-6}$
 限界繰返数 10^6 回

この値以上に強い場合には、われわれの目標とする構造物用感度計として不適当であると考えた。

(b) 試験機 仏国 SNECMA 社製片持回転曲げ式で、その試験片は第3図に示す。その表面応力は同図中に示すように約 80 mm にわたって一定とみなせる。この母線に沿って供試細線をほとんど全長にわたって貼り付けた。回転数は 2800 r.p.m. 供試線を貼るベースとなる試験片は銅およびジュラルミンであった。

(c) 供試線 過去の報告ではすべて Constantan が最適であると結論している。筆者は次のごと

第3図 ベース試験片

たまたま手に入るものを選んだ。

銅線 { 裸線 0.10 m/m 径
 { エナメル線 0.106 m/m 径
 ニクロム線(裸) 0.10 m/m 径
 フューズ線(裸) 0.35 m/m 径 (素材)
 $0.4 \times 0.2 \text{ mm (圧延)}$
 $0.8 \times 0.1 \text{ mm (")}$

線径はひずみの伝達上少し太過ぎるが、切欠加工の便宜を重視した。錫合金の場合、矩形断面を試みたのはひずみ伝達をよくすることと、冷間加工度の影響をみるためであった。

(d) 接着剤 すでにこの問題については詳細な検討が行われて発表されているので、筆者の利用した3種の接着剤はまったくのあり合わせという意味しかない。唯一の制限は供試細線よりも強いということだけで選んだ。

セルローズ系樹脂
 ポリエステル樹脂
 エポキシ系樹脂

(e) 細線の変質検知法 実用上使いうる検知法でなければならないので、まず次のようなものに限った。

— 肉眼または拡大鏡による接着剤のき裂検査
 — 偏光による接着剤の検査
 — 細線の電気抵抗変化のテスターによる測定

接着剤き裂発見に蛍光探傷を利用するとか、線の抵抗変化をサイラトロンを利用して一層正確に捕えるなどは当然試みてよいと思う。ただ今回は研究期間に制限があったので省略した。

(2) 実験結果

上述のようにして行った一連の試験結果をまとめると第1表のようであった。すなわち16種類のうち6種の条件が仮りに定めた限度をこす影響を与えた。また、すでにこの実験によって次のような有用な知識も得られた。

(a) 接着剤の気泡は多くの報告書にいうほどの悪影響がない。もちろん結果を誤らせる傾向は認められたが、この点からみてポリエステル系は貼付操作のいかんによらず、まったく気泡を残さないという好ましい性質を持つ。

(b) Valluri 氏のすすめるような紙の層を線の下に挿む方法は結果がばらつき、き裂が検知しにくくなってまったく望ましい方法ではない。

(c) 用いた接着剤はいずれもわれわれの目的上充分に強いことがわかった。すなわち線が切れ始めぬ限りき裂は想定限度以前に生じない。

(d) 線が切れても接着剤には肉眼的な大きさの光弾性的変化は起らない。

第 1 表 予 備 試 験 結 果

金 属 線	ニ ク ロ ム	銅	錫 合 金	判 定
素 線	○	○	—	—
圧 延 断 面 $0.2 \times 0.4 \text{ mm}$	—	—	1.1×10^5	} 可
〃 $0.1 \times 0.8 \text{ mm}$	—	—	1.1×10^5	
剃刃による切欠 紙ベース	—	5×10^5	—	} 可
ベースなし	1.2×10^5	3×10^5	—	
水 中 腐 蝕 (5.5 日)	○	○	—	可
極稀 HCl 腐蝕 (5.5 日)	—	7×10^5	—	
極稀 H_2SO_4 腐蝕 (5.5 日)	○	○	—	(抵抗増加開始)
稀 HCl 腐蝕 (1 日)	○	○	—	
稀 HCl による局部腐蝕	○	○	—	可
($\text{NaNO}_3 + \text{NaCO}_3$) 水中腐蝕 (12 日)	○	○	—	
稀 HNO_3 中にて交流電蝕 (初期引張)	○	—	—	(可)
($\text{HCl} + \text{NaNO}_3$) 水中にて電解腐蝕	○	6.7×10^5	—	
($\text{NaCl} + \text{NaNO}_3$) 水中にて電解腐蝕	—	(粗い腐蝕表面)*	—	可
HNO_3 水中にて初期切欠の電解 (初期引張)	—	7×10^5	—	
($\text{HNO}_3 + \text{NH}_4\text{OH}$) 水中にて 同 上	—	(深い切欠)*	—	(可)
($\text{NaOH} + \text{NaNO}_3$) 水中にて 同 上	—	7×10^5	—	可
水 銀 腐 蝕 (7 日)	○	○	—	
接 着 剤	セルローズ系	ポリエステル系	エポキシ系	
細 線 な し	○	○	○	

(注) ○印は $N=10^6$ 回まで変化なし, N は断線までの繰返数

* 印のものは疲れ試験をしていない。

(e) ベース試験片にきわめてわずかのき裂が入っても、直ちに接着剤にはき裂を生じ、きわめて明瞭に検知できる。もちろん、これは感度計としての問題と無関係である。

(3) 電気分解処理

上の実験から機械的初期切欠のある線を電気分解により、さらに切欠く方法がもっとも確実なことがわかった。また、この方法はき裂発生位置があらかじめ決

っているため、接着剤があまり好しい状態でない場合にも無意味なき裂と本質的なものを識別するのが容易である。

そこでこの方法について、いま少しくわしく調べた。線は先のエナメル銅線を用い写真 1 のような装置で処理した。電解液としては 3 種の酸 HCl , H_2SO_4 , HNO_3 を用い、初期引張力および酢イオンの影響をも調べた。初期引張力を与える装置も上図中に示されている。引張力は先端の距離短縮量から求められる。

写真 2 は機械的に与えた初期切欠、写真 3 は電食後

写真 1. 電 解 槽

写真 2. 初 期 切 欠

写真 3. 孤立切欠仕上り

の状態を示す顕微鏡写真で、各条件により得た切欠をこのようにして比較した。

その結果、酸の種類による差も酢イオンの影響もいちじるしくはないが、初期引張は切欠を均一化し、また、電食操作を容易にする点でも好ましいことがわかった。

初期切欠は特別な装置を用いていないので、そのままでは線の疲れ強さが±10%ぐらい変動した。しかし、後述するように電食後の線は性質がまったく均一化されているので、特に初期切欠の大きさをそろえるため

写真 4. 脆性塗料の亀裂

写真 5. 蛇腹切欠 (亀裂が既に発生)

の特殊の考慮は不必要である。

4. 蛇腹式切欠

これまで試みた一様腐食と単一切欠との利点を共有する状態として、きわめて接近した無数の切欠を蛇腹のように一様に与える方法を考えた。そのためには、まず線のエナメル代りに応力塗料を塗り、これを引張ると写真4のように引張力に比例した密度で塗料に一樣な円周き裂が入る。これに電解処理を施せば正しく予想したとおりの蛇腹式一様分布切欠が得られた。この場合に用いたぜい性塗料は SNECMA 式液体型 A-SY 式1シリーズ13号である(写真5)。

4. 系統的試験

これまでの経験を基として、まず第1次の系統的試験に着手した。

(1) 実験条件

(a) ベース試験片 今回はジュラルミン試験片のみを使い、ただ便宜上の理由で全面をポリエステル樹脂で被い、その上に母線に沿って4本の供試線を90°ずつ隔ててセルローズ系接着剤で貼ることとした。このとき、なるべく気泡を少なくするため少量ずつ薄く数回に分けて塗った。

(b) 供試線 これまでと同じものであるが、

エナメル銅線 素材のまま、径は0.1mm
1%酸性電解液による孤立切欠
3% " " " " " "
蛇腹式切欠(3%液を使用)

錫合金リボン線 0.15×0.6mm

孤立切欠線の切欠は第4図のように6個が配置されている。

第4図 孤立切欠の配置

(c) 電解条件

——電 解 液 ポーメ 1.38~40 度の硝酸を容積にて1又は3%加えた水
——電解温度 孤立切欠線るとき 17°C
蛇腹切欠線るとき 14°C
——電 圧 孤立切欠線 7.5 Volt
(電流約 1mA)
蛇腹切欠線 3.0 Volt
——電解時間 孤立切欠線 120 sec
蛇腹切欠線 30 sec
——初期引張力 100gr (応力は約 40kg/mm²)

前述のように孤立切欠線の初期切欠は必ずしも厳密に等しくないので電解の初期には、ときに1~2秒間電流値が小さく止まっていることがあったが、常にその

第5図 Cu線の疲れ特性

第6図 Cu線の疲れ特性

第7図 Sn-合金線の疲れ特性

直後に一定値になった。

また、この条件で電解を続けて断線するまでの時間を参考のため測定すると、孤立切欠1%液のとき7min 30sec, 3%液4min 20sec, 蛇腹切欠80secであった。

(d) ひずみ振幅段階 平均応力は常に0であって、振幅は次の各段階とした。

$\pm 1720, \pm 1280, \pm 1000,$
 $\pm 710, \pm 430 \times 10^{-6}$

(e) 測定項目

—線の電気抵抗
 —接着剤のき裂数とその長さ

(2) 実験結果

いままでに得られた測定値を要約すると、第5, 6, 7, 8図のようになっている。

実験値はいまだ少なく、特に蛇腹切欠線については不十分である。すべての実験は最大繰返数が約 2×10^8 回に止っているのも研究期間に制限があったためである。

実験した最大ひずみ振幅 $\pm 1720 \times 10^{-6}$ の場合を除き、他のものについては第1次振幅で $1 \sim 2 \times 10^8$ 回後にひずみをすべて $\pm 1720 \times 10^{-6}$ に高めて第2次試験を行ってみた。その結果も合わせて前の図に示してある。

これらの図において、

N_a : 接着剤にき裂の現われるまでの繰返数

N_b : 細線の電気抵抗の変わり始めるまでの繰返数

N_c : 細線の切断するまでの繰返数

をおのおの意味している。

なお、観測された接着剤のき裂は写真5, 6, 7, 8, 9に示すように現われた。このき裂は光を斜めに当てるだけできわめて明瞭に見られるし、簡単な拡大鏡を用いれば1/10mm以下の長さのときにすでに発見できる。

各計測値の相互関係には一定の経過順序がある。まず、線に切欠があると、ここで接着剤がき裂す

第8図 接着剤き裂の発達

写真 6. 孤立切欠におけるき裂の発生

写真 8. 孤立切欠における発生したき裂

写真 7. 切欠なし銅線におけるき裂

写真 9. 錫合金線におけるき裂

る——線の電気抵抗が変り始める——接着剤のき裂が拡大する——線が断線する——き裂がある収斂値まで伸びる。すなわち線が変化の主因子であって接着剤ではない。

もしも接着剤に気泡などの欠陥がある場合、ベース試験片に偏心があると、試験機の始動または停止時に起る共振現象のときに、この気泡などを起点とするき裂が現われた。すなわち便宜的に用いた普通のセルローズ系接着剤は気泡などがあると、大荷重において切欠付細線よりも弱いことを示している。

今回のところは単に偏心のない試験片を選んでこの不具合を避けたが、接着剤の選択はやはり本質的な今後の問題である。

もっとも、この基礎試験に関する限りき裂を原因によって区別することは容易であった。すなわち線の電気抵抗がその後も変わらず、また、き裂が線の直上を横切ることなく線の横で停止するものは本質的なき裂ではない。鋅合金の場合にはこの2次き裂から線の断線が起ることが多く、さらに抵抗測定之都度テスター先端で線が傷けられる不具合もあるので、なんらかの改善の要がある。

結果を示す $S-N$ 曲線をながめると、

——同じ線材について、傾斜した直線部は互いに平行であり、異種の場合には交差する。

—— N_a 曲線は孤立切欠と蛇腹式で大差がないが、 $N_b \cdot N_c$ はいちじるしく隔たってくる。

——軟金属はせん移期間 (N_a , N_c の間) が長い。

——接着剤の厚さが増すとき裂の伸長速度が増す。しかし、き裂密度は応力分布、厚さによって決まるある値に収斂する。

——線の疲れ限度に近いところで測定値のバラツキが目立ってくる。今回の実験では前述のごとく重複試験法をとり、簡単な重複法則がなり立つものとして曲線を延長してある。

——例が少ないが N_a について Understressing らしい傾向がある。

5. 結 論

以上述べた第1次試験結果は、要するに比較的口の広い奥行の浅い検討に過ぎぬものではあるが、筆者がここ数年間提称してきた感度計の考えに具体的な可能性を与えたものと考えられる。今後はその性質を明らかとしつつ特性の改善に努め、具体的な応用によって価値を直接に判定してゆきたい。

たとえば、線の材質、これに与える切欠の形、大きさ、密度の問題、接着剤の種類、厚さ、接着時と運用時との温度の影響など、多くの基礎的な性質が明らかにされていない。

結果の整理に関して始めに述べた方法については、

同質材特性曲線の傾斜部は平行であって、あまり便利でないが、重複試験法の可能性はあることがわかり、今後の方向に対する指針が得られた。

現在までのものは鋼構造物に対する適用に対して、なお感度が充分でないが、特性の基礎研究成果を利用しつつ、これと平行に研究して行きたい。予備実験中にも硬度の高いニクロム線では軟い銅線に比べてはるかに感度の高いものが得られているので、まだまだ感度向上の余地はあるものと思う。

上記の例では常に線が直線的に張られてあったから、一方向のひずみにしか感じない。しかし、抵抗線ひずみ計の場合と同様に一点を中心とする放射状または円周状のような2次元的張り方が想像できる。このことに関連して線のみならず箔を利用する感度計の性質も検討してゆきたい。

本稿執筆中に、先に引用した大久保法(メッキ利用)のまったく同じ目的を持った発展が佐藤氏によりなされていることを知った。²³⁾ 本感度計発展のため大いに喜ばしい。この場合、筆者の提称する細線にメッキする法をとることが実用目的上有利であると思う。

本感度計は、その目的上きわめて大量に量産すべき性質のものであるから、その特性曲線検定を手軽に短時間でやる必要に迫られる。

そのためには第1として、ベース試験片を高いひずみ疲れ強さを持つ樹脂材に変えることが、試験機を小型化し、消費パワーを減少させる上に望ましい。

第2に、このような小型試験機を数多く持つのみならず、共振法によって振動数を高めて短時間に検定を終了させたい。現在 Vidal 氏は 87000 c.p.s. までの装置を試作しており、²⁴⁾ この性能はわれわれの目的にむしろ充分過ぎるものである。

終りに、本研究は仏国政府の留学資金によって、同国国立機械および材料研究所で行われたものであることを記し、仏国政府ならびに Nicolau 所長その他の方々に厚く感謝の意を表し度い。

参 考 文 献

- 1) P.E. Cavanagh, The Progress of Failure in Metals as Traced by Changes in Magnetic and Electrical Properties, ASTM Proceedings Vol. 47 (1947)
- 2) H.W. Kaul, Die erforderliche Zeit- und Dauerfestigkeit von Flugzeugtragwerken, Jahrbuch 1938 der deutschen Luftfahrtforschung
- 3) N.H. Jasper, The TMB Strain Cycle Gage and Counter. Proc. S.E.S.A. Vol. X, No. 1 (1952)
- 4) K.R. Meldahl, Forces dynamiques appliquées aux essieux montés de véhicules de chemin de fer, Congrès des Chemins de Fer, Vol. XXX, No. 8 (1953)
- 5) G. Ellis and F.B. Stern, Dynamic stress analysis with brittle coatings, Proc. S.E.S.A. Vol. III, No. 1 (1945)
- 6) 中村和雄, 杉本忠勝, 抵抗線ひずみ計の疲れ強さ, 非破壊検査, 7, 4 (1958)

- 7) K. Fink u. H. Lange, On Alternating Strain and Magnetic Properties, Phys. Zeit. Vol. 42 (1941)
- 8) H. Okubo, Determination of the surface Stress by means of Electroplating, J. Appl. Phys. Vol. 24, No. 9 (1953)
- 9) B. Hopkins and G.T. Williams, Proc. Roy. Soc. A 87 (1912)
- 10) 山田良之助, 松岡陽三, 機械学会誌, 37 (1934)
- 11) J.A. Ewing and J.C.W. Humfrey, Phil. Trans. Roy. Soc. A 200 (1903)
- 12) 西原利夫, 小林篤郎, Mem. Coll. Engg. Kyoto Imp. Univ. XI (1944)
- 13) R.W. Powell, A Failure-Sequence Indicator for Static Test Specimens, Trans. A.S.M.E. Vol. 68, No. 7 (1946)
- 14) H. Foster, A method of Detecting Incipient Fatigue Failure, Proc. S.E.S.A. Vol. IV, No. 2 (1947)
- 15) D.M. Howard, Development of a Fatigue Damage Indicator, WADC TR 53-393 (1953)
- 16) M.J. McGuigan, Fatigue Investigation of Full-Scale Transport Airplane Wings, NACA TN 3190 (1954)
- 17) E.R. Valluri, Developments in Fatigue Crack Detecting Systems, Sou. Cal. Coop. Wind Tunnel Rep. No. P-5 (1955)
- 18) "Fatigue Indicator" The Aeroplane, Vol. LXXXVIII, No. 2284 (1955)
- 19) Haigh: Experiments on the fatigue of brasses, Jour. Inst. Metals, No. 2 (1917)
- 20) 河本実, 水ノ上喜明, 金属の疲労におよぼす鍍金の影響, 材料試験, 3, 17 (1954)
- 21) 深井誠吉, アルミニウムとマグネシウム, (昭19.4)
- 22) Symposium on Stress-Corrosion Chacking, A.S.T.M. and AIMME (1944)
- 23) 佐藤芳久: めっき法による繰返し応力の測定について, 材料試験協会講演会 (昭33.5)
- 24) G. Vidal et F. Girard, Nouveau dispositif des rupture des Matériaux, Comptes Rendus des Séances Acad. Sc. (1956)

引張側鉄筋を持つはりの静的および疲労せん断耐力

[Static and Fatigue Strength in Shear of Beams with Tensile Reinforcement, by T.S. Chang and C.E. Kesler. Journal of ACI., Vol. 29 No. 12, p.p. 1033~1057 (June 1958)]

鉄筋コンクリートはりのせん断破壊耐力, 斜引張り裂耐力は, 鉄筋比, はり断面の大きさ, せん断スパン, コンクリートの圧縮破壊耐力, コンクリートおよび鉄筋の弾性係数によって影響を受ける。従来の実験的研究では単に実験的にこれら相互の関係を表わす実験式を求めているが, これらは, それぞれ各実験者の実験の範囲内における鉄筋コンクリートはりのせん断破壊耐力および斜引張り裂の計算に適しているにすぎない。著者は次元解析を適用してこれら相互の関係が,

$$V_c/bd = f(f'_c) \cdot g(p) \cdot h(a/d) \cdot i(d) \quad (1)$$

$$M_s/bd^2 = f'(f'_c) \cdot g'(p) \cdot h'(d) \quad (2)$$

でなければならないことを示し, 実験によって上記各式における関数 f, g, h, i, f', g', h' を求めた。ここに, V_c =斜引張り裂荷重, M_s =せん断破壊モーメント, b =はり幅, d =有効丈, f'_c =コンクリート標準圧縮強度, p =鉄筋比 (引張側鉄筋だけ), a =せん断スパンである。(1)および(2)式は圧縮側鉄筋およびせん断補強筋のあるはりには適用できない。

著者は断面 4×6 in., $f'_c = 2160 \sim 5940$ p.s.i., $p = 1.86 \sim 2.89\%$, $a = 10 \sim 21$ in. の広範な範囲にわたるはり42本の静的実験を行い, かつ, 他の研究者によって得られた実験結果も含めて, (1)および(2)式の形に表わされた実験式

$$V_c/bd = 1.90 f_c'^{0.53} (1 + 0.00562 p^{1.8}) \times (1 + 0.685 d^{1.42} / a^{1.42}) (1 + 13.4 / d^{2.61}) \quad (3)$$

$$M_s/bd^2 = 21.3 f_c'^{0.35} (1 + 0.188 p^{1.62}) (1 + 17.8 / d^{3.25}) \quad (p \leq 2.5\%) \text{ の場合} \quad (4)$$

$$M_s/bd^2 = 12.8 f_c'^{0.35} (1 + 1.25 p^{0.5}) (1 + 17.8 d^{3.25}) \quad (p \geq 2.5\% \text{ の場合}) \quad (5)$$

を示している。これらの式で計算された計算値と実験値とは, V_c については $\pm 17\%$ (標準偏差 0.095), M_s については $\pm 19\%$ (標準偏差 0.102) の範囲において一致することが示された。

著者はさらにせん断破壊をおこすはりの疲労試験も行っている。はり断面 4×6 in., $a/d = 3.53$, $f'_c = 2500 \sim 6500$ p.s.i., $p = 1.86$ および 2.89% のはりを使用, 荷重は最低荷重 200 lb, 最大荷重 $4100 \sim 9500$ lb (これは(3)式で計算される V_c の $45 \sim 91\%$, (4)または(5)式で計算される $M_s/a = V_s$ の $51 \sim 10\%$ の荷重にあたる) の範囲の繰返し載荷を行った。はり39本, 載荷速度は毎分 400 回の繰返し, 10 000 000 回繰返しを行った後もなお破壊しないはりでは, その後静荷重を載荷して破壊している。実験結果は 10 000 000 回繰返しに対するせん断疲労破壊限界荷重 V と(3), (4)または(5)式からそれぞれ計算される斜引張り裂静的耐力 V_c , または, せん断破壊静的耐力 V_s との比

(53頁へつづく)