◀|| 資料 ||▶

溶接構造物の疲労強度

Fatigue Strength of Welded Structures

溶接鋼構造の疲労設計理念*

白石 隆 義**

Fatigue Design Concepts of Welded Steel Structures*

by Takayoshi Shiraishi**

1. 累積との戦い

大気汚染、水質汚濁、海洋汚染、P.C.B., カドミウム、有機水銀などといった公害問題は、今日人類の生存に最も大きい脅威を与えようとしている。そして人類はこれらの公害との戦いにおいて一進一退を続けるのみで決定的勝利を得るには至っていない。

科学の発達した今日どうして一挙に勝利を収めることができないのであろうか。

それは、これらあるいはこれらによる被害がすべて累積現象であるためである。すなわち一つ一つはほとんど無害と思われる事象が、数多く繰返されるうちに、その累積によって一つ一つの場合には想像もできなかったような結果をもたらすからである。

したがって、「現代は累積との戦いの時代である」ということができる。そして今や人類は一人一人が累積との戦いの場に臨んでいることを認識しなければならない。

しかしながら工学の世界ではすでに一世紀以上も前から累積現象との戦いが始まっている。すなわち疲労、磨耗および腐蝕との戦いである。そして、他の方面での輝かしい戦果にひきかえて、これらとの戦いでは、最近になってようやくなんとか有効な戦略戦術を編み出すことができるようになったにすぎない。

本資料はこれらのうちの繰返し荷重をうける鋼構造物

の疲労に対して設計者たち、とりわけ設計基準の作成者たちが採用してきた、そして今後採用するであろう戦略戦術とその理由のあらましを述べようとするものである。

2. 疲労設計理念の歴史

2.1 安全率

一般的にいつて構造物の設計は、計画した使用期間の間損傷することなく要求される機能を発揮し続け、しかも総合的にみて最も経済的な構造物を追求して進められる。

したがって強度だけについてみれば、損傷が起らない必要最小限の強度にいくらかの余裕があればよいのである。それ以上の不必要な強度の余裕は不経済であるということになる。安全率とは、実際に構造物に与えられる強度とこの必要最小限の強度との比と考えるのが最も妥当であろう。

ところが荷重が繰返し作用する構造物では前述の累積現象がからんでいるために、この必要最小限の強度の把握がむづかしく、安全率の意味が久しい間誤って考えられてきた¹⁾。

歴史的な経過をざっと眺めてみよう。まず19世紀の始めまでは木材、石材、鋳鉄などの曲げあるいは引張を受ける部材に用いるには全く不適当な材料を用いて構造物が作られていた。材料自身の中にしばしば大小の欠陥があり、しかもどのような欠陥が存在するかを検査する適当な方法がなかったため、欠陥がない場合には恐ろしく

*原稿受付 昭和47年12月7日

**正 員 (株)ダイクレ Member, Daikure Co.,

無駄だと思われる断面が用いられていた。それにもかかわらず時おり、大小の損傷が発生していた。すなわち実際の安全率には非常に大きいばらつきがあった。

当時発生した鉄橋建造物の損傷の中には欠陥より発した疲労による損傷がかなりあったのではないかと思われるが、鉄橋のような脆い材料では微小な疲労き裂を生ずるとあとは一挙に脆性破壊を起すために延性材料の場合のような疲労破面が認められず、静的破壊による破面と区別できないため、すべての損傷は静的強度の不足により起ったものと考えられていた。

19世紀に入って構造技術者待望の靱性に富んだ練鉄が登場し、続いて軟鋼が出現する。これらに至って材料の強度上のばらつきは非常に小さくなり、材料の内部欠陥に帰因する損傷は絶滅した。そして、トラブルのほとんどは当時材料の結合に専ら用いられていた鉄継手のゆるみやき裂つであっていずれも致命的なものではなかった。

しかし、ごくまれに架設中あるいは最大荷重時に大きな破壊が発生した。

この大きな破壊事故はほとんどの場合設計者の計算ミスまたは予測ミスあるいは工事の際の過失に帰因するものであったが、すべて圧縮材の座屈が誘因となっていた。研究のために行われた静荷重による模形あるいは実物の破壊試験でもすべて破壊は座屈により起った。このため各種の座屈の研究が進められ、多くの設計基準（仕方書）は圧縮材の計算上の安全率を偏心その他の影響を考慮して1.5～2.0とするのが普通となった。

一方、鉄継手に対してはどのような安全率がとられていたであろうか。繰返し荷重をうける構造物の引張をうける鉄継手における材料の純断面当りの許容応力としては練鉄の場合 $7 \sim 8 \text{ kg/mm}^2$ 軟鋼の場合 $12 \sim 13 \text{ kg/mm}^2$ が長い間採用されてきた。

単純に考えると練鉄あるいは軟鋼の静的な最低の引張強さはそれぞれおよそ30あるいは 40 kg/mm^2 であるから、安全率は4あるいは3程度であるということになる。または降伏点を基準にすると安全率は2.5あるいは2ということになる。ところがこのような考え方は実際に起る破壊形式とは無関係に近い様式の破壊に対する強度を安全率の基準にとっているから非常に危険な考え方ということになる。

上記の許容応力は、これらの応力が繰返し作用した場合にトラブルが起らない（換言すれば疲労による損傷が起らない）ことを目標にあまり余裕なしに定められたものである²⁾。

鉄継手のトラブルは鉄により締めつけられた隣接する二板の板の間ににりが起り、これが繰返されると起るの

である。したがって継手の設計が不適当であったり、鉄の締め付け力が不十分であったりすれば上記の許容応力の繰返しでもトラブルは起りうるのである。すなわち安全率は許容応力に等しい片振り応力が繰返し作用する場合にはいくらか1.0より大であって、時には1.0以下になることもありうるのである。

しかし、この許容応力は最大応力に対する値であったため、死荷重応力があって応力変動範囲が小さい場合にはそれに応じて安全率は1.0より大きくなり、また設計時に想定した最大荷重が常に作用するものでなければ、さらに安全率は大きくなってゆく。

このような理由で鉄構造物における実際の安全率は引張圧縮いずれにおいても1.0よりかなり大きく、そのためあまりリラブルが起らなかった。

やがて、軟鋼よりも強い材料として高張力鋼が出現する。この材料でも鉄継手の疲労強度はあまり向上しないのであるが、平穩無事が続くうちに、いつのまにか人々の心のうちに浸透していた前記の単純な考え方、すなわち「許容応力は引張強さ（あるいは降伏点）を安全率3.0（あるいは2.0）で割った値である」という考え方が受け継がれ、高張力鋼の引張に対する許容応力は引張り強さ（あるいは降伏点）に比例して高められるに至った。幸いにして高張力鋼は死荷重応力の大きい、また大きい荷重の繰返数の少い構造物に多く用いられたため軟鋼を用いた場合大きすぎた安全率が適当に小さくなっただけで、トラブルがあまり起らないという結果となった。

20世紀のなかばに接溶が出現し、急速にそれまでの鉄構造が溶接構造に移り変った。始めは鉄を単純に溶接におきかえた構造が用いられたが、次第に溶接の長所を生かした設計が行われるようになった。

初期の溶接構造物の設計では鉄時代の基準をそのまま踏襲して母材の引張りに対する許容応力として一律に鉄継手に対する値を用いていた。そして、溶接部（溶着金属）には必ず欠陥があるものとして、それに対する許容応力を若干低目に定めていた。

しかしながら、繰返し荷重をうける溶接構造物に生ずるトラブルはほとんどが疲労によるものであることが明らかとなり、また各種の溶接継手の疲労試験データが蓄積されるにつれて、溶接継手の種類によって疲労強度に著しい差があることが認識され、溶接構造における許容応力体系はこれらのデータを基礎にして改められるに至った。

すなわち、疲労強度の高い母材の平滑部の引張り許容応力は鉄継手に対して定められた値（ $12 \sim 13 \text{ kg/mm}^2$ ）から次第に高い値に改められ、反面高い応力集中のため

鋸継手よりも大巾に鋸労強度が低くなっている溶接継手に対しては許容応力が低く定められている。

しかしながら鋸構造時代に行われていた最大荷重による応力がその作用する繰返し数とは無関係に許容応力を超えなければよいとする方式が踏襲され、ごく最近になってようやく荷重の頻度分布の影響すなわち累積の影響を考慮してより合理的な設計をしようとする思想が表われるようになった。また高張力鋼の溶接部の疲労強度が軟鋼に較べてほとんどすぐれていないことが明らかになるにつれて、繰返し荷重をうける高張力鋼溶接継手の許容応力は次第に軟鋼のそれに近づけられている。

以上を要するに練鉄時代よりこのかた、ごく最近までは繰返し荷重をうける構造物の引張部材は、設計最大応力を最大値とする片振り引張応力が十分多く繰返し作用した場合の安全率がおよそ 1.0 となるように設計されてきたのであり、実際の安全率は、死荷重応力の占める割合が大きい程、そして大きい荷重の繰返し作用する頻度が小さい程大きくなり、また反面、高張力鋼なるが故に軟鋼より高い許容応力が与えられた場合や、応力集中が著しく、採用した許容応力に較べて実際の疲労強度が低い場合には小さくなるといえる。

2.2 仕方書における疲労設計条項の変遷

設計の際に疲労を考慮しなければならない鋼構造物の中で最も古くから仕方書が定められていたものは鋼鉄道橋である。

したがって疲労設計理念の歴史的変遷をたどるには鋼鉄道橋の設計仕方書に盛られた疲労設計条項の移り変りを調べるのが最もよいと思われる。

先ず 1091 年に米国鉄道技師 T. Cooper が作った仕方書を挙げるのが適当であろう。Cooper はこの仕方書に

より、クーパー荷重なる鉄道橋用の近代的荷重体系を制定しているが、繰返し荷重の問題に関しては、活荷重が通過するうちに応力の符号変化が起る部材に対し（交番応力）、正負の各応力に小さい方の応力の $\frac{1}{2}$ を算術的に加えた値が許容応力を超えないことを要求しているに過ぎない。そしてこの種の条項は Cooper 以前の仕方書にも認められる。

わが国においては明治 45 年（1912 年）に始めて鋼鉄道橋設計仕方書が制定され、昭和 3 年（1928 年）にその改訂が行なわれているが、これらはいずれも外国の仕方書を参考に作られたものであり、その疲労設計条項は全く Cooper の仕方書と同一であった。

このようにして溶接が鉄道橋に本格的に用いられるようになるまでの半世紀余りの間は鋼鉄道橋の設計仕方書にはこれ以外の疲労条項は表われなかった。

図 1 初期の許容応力

表一 1 最近の各国設計仕方書の疲労条項比較

国 名	西 独	日 本	米 国	英 国	米 国	米 国	日 本
仕 方 書 名	DV 848	鋼鉄道橋	AASHO	BS 153	AREA	AISC	鋼鉄道橋
制定または改訂年度	1955	1960	1965	1966	1969	1969	1970
基本許容応力 (引張) kg/mm^2	軟 鋼	16.0	13.0	14.0	14.2	14.0	14.0
	50K 級	24.0	18.0	19.0	20.3	19.0	18.0
継 手 等 級 の 数	7	7	9	7	9	7	7
許容応力線図傾斜部の勾配 α (1) 式の α (例, リブ十字)	0.60	0.67	0.83	0.67	0.67	1.0	0.7
許容応力を定めるために想定 する荷重繰返し数	2×10^6 のみ	2×10^6 のみ	$10^5, 5 \times 10^5$ 2×10^6	各構造物について 個々に定める	5×10^5 2×10^6	$10^5, 5 \times 10^5$ $2 \times 10^6, 10^7$	2×10^6 のみ
荷重頻度分布の推定	最大荷重変動が 単調に作用	同左	同左	4 水準に分けて 分布を設定	最大荷重変動が 単調に作用	同左	同左
軟鋼の基本設容応力以下での軟 鋼と HT との許容応力の区別	HT をやゝ大き 目に定める	区別せず	同左	同左	同左	同左	同左
軟鋼リブ十字(溶接のまゝ)の片振 引張許容応力 kg/mm^2 (2×10^6)	10.0	10.0	5.6	7.7	5.6	7.0	10.5

この条項の要求する許容応力 S_{all} (最大応力) を最小応力 S_{min} を横軸にして表わすと図1のごとくなる。そして図1の許容応力線図の傾斜部を最大応力と最小応力との比 k を用いて表わすと(1)式において

$$S_{all} = S_{oa} / (1 - \alpha k) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$\alpha = 1/2$ とおくことになる。ここに S_{oa} は $k=0$ すなわち片振りの場合の許容応力である。

20世紀の後半に入り、溶接継手の疲労に関する知識が整うにつれて、それまで鉄構造時代の思想をほとんどそのまま受けついで暫定的に定められていた鉄道橋の設計仕方書にこれらの知識を反映させる動きが各国において起り、次々と新しい仕方書が制定され改訂されている。その動きのあらましを追うために、日本(国鉄)、米国(AREA)、英国(BS 153)および西独(OV 848)の鋼鉄道橋設計仕方書、ならびに参考のために米国のAASHTOおよびAISCの仕方書の疲労条項の主な内容を比較すると表1のとおりである。

すなわち、母材の基本許容応力(引張)の欄では軟鋼に対する値が日本や米国で次第に高くなり、早くから高く定めている西独に近づく傾向を示している。

各種の継手は7～9の等級に分類されている。

一例としてあげたリブ十字に対する強度線図の傾斜部の勾配((1)式の α の値)は多くの場合%であるが最近では1.0にする場合がでてきている。これは後にも述べるように溶接の残留応力の影響などを考えて平均応力の影響を軽視し、応力範囲のみを重視しようとする方向に向っていることを示す。

想定する荷重の繰返数および頻度分布については、日独では単に一定の最大荷重が 2×10^6 回作用することを想定しているが、米国では構造物や部材の種類により2～4種類の繰返数を考え、最大荷重がこの繰返数だけ作用することを想定しており、英国のBS 153では、構造物や部材の種類によって、それぞれ異なる荷重の繰返数および頻度分布を想定している。このためBS 153では各等級の溶接継手に対するS-N線図(表)を与え、累積疲労被害を計算することを求めている。

西独のDV848を除き軟鋼の基本許容応力以下では軟鋼とHTの疲労許容応力は等しくとられている。そして、一例としてあげた溶接のままの隅肉によりスチフナを付けた母材(リブ十字)の許容応力(片振引張)は日独が比較的高く英米と次第に低くとられている。T.R. Gurneyは各種の溶接継手に対する各国の設計仕方書に示された疲労許容応力を比較して、国によりかなり大きい差があることを指摘し、共同研究その他の方法を用いて万国共通な値を定めるべきだと述べている³⁾。

各種溶接継手の疲労強度に関するデータを各国が協力して整備することについては大いに賛成であるが、仕方書に示された許容応力の差は必ずしも疲労強度データの差によるものではないかもしれない。というのは、仕方書の許容応力は、これらのデータの他に荷重の大きさや頻度分布に関する規定と実際との相違なども考慮に入れて定められているからである。したがって、表1の場合必ずしも日独のデータが高く、英米のそれが低いと断定するわけにはいかない。

3. 疲労設計(基準制定)に際し考慮すべき諸問題

3.1 合理化と簡単化の調和

設計仕方書などの設計基準は、それに従って設計製作された構造物が総合的にみて最も経済的で(単に製作費や機能だけでなく、安全性も万一損傷が起った場合の経済的、社会的損失の期待値として考慮に入れる)、しかも設計作業がなるべく簡単であることが望ましい。すなわち合理化と簡単化の相矛盾する要素をうまく調和させねばならない。

疲労設計においてこの調和を得るためには、疲労の諸因子の中で重大な影響ありと考えられる因子は、できるだけ正確に反映し、さほど重大でないとは判断されるものはできるだけ簡単化の方向に向って考慮するといった配慮が必要である。以下各種の疲労の諸因子について、それぞれどのように判断すべきかについて述べる。

3.2 荷重の繰返数と頻度分布

最も重要でありながら推定が非常にむずかしいため、これまでの設計仕方書のほとんどが避けて通ってきた問題である。しかし、今後合理化を追求するならば、この問題に敢然と立向わねばならない。

同種の構造物に関するなるべく正確な資料を集め、ばらつきを考えてやや安全側に推定するのが適当であろう。この場合、頻度の捕え方が重要であって、計測その他の便宜のために本質を見失うようなことがあってはならない。

疲労き裂発生のもっと重要な条件が、そ性ひずみの繰返しであるから、途中の荷重(応力)の増減には無関係に大きい荷重(応力)変動範囲から順に正確に計数するレンジペア法を用いて頻度分布を測定するか、あるいは、この精神で推定しなければならない⁴⁾。レンジペア法の弱点は計数法がややむずかしいことと、平均応力とは無関係に応力範囲を計数することであるが、前者は技術の進歩につれて克服されるであろうし、後者は後に述べるように平均応力の影響はあまり大きくないと考えられるから、それほど問題にしないでよからう。

最近になって、この荷重頻度分布の問題と取組んだ研究が多く進められている⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾。

3.3 疲労強度のばらつきと $S-N$ 線図

溶接継手に一定の応力変動(最大値、最小値、平均値一定)を単調に繰返し作用させてゆくと、先ず最も応力(ひずみ)集中のきびしい箇所の表面よりわずかに内に入った位置に微小き裂を生じ、これがやがて拡大して表面に表われ、さらに拡がり続けて全断面が破壊するに至る。

普通の場合内部に微小き裂を生じた時期を知ることにはできないので、き裂が表面に表われて観密された時点までをき裂発生とし、それまでの応力繰返数をき裂発生までの繰返数(N_c)とよぶ。そして、き裂が進行して、はじめの応力変動条件が維持できなくなった時点までの繰返数を破壊までの繰返数(N_f)とよぶ。すなわち N_f はき裂発生に要した繰返数 N_c とき裂進展に要した繰返数の和である。

N_c/N_f の比は、切欠が鋭く応力集中度が大きいほど、また疲労限を超えて応力が大きくなるほど小さくなり、時には $1/2$ より小さくなることもあるといわれている。

これまでの多くの疲労試験では N_f だけしか求められず、試験結果は応力変動量 S と N_f との関係を両対数紙にプロットして表示されている。この場合各データの点は普通一つの曲線(あるいは直線)上に乗ることはなく、かなりのばらつきを示す。

機械加工により応力集中の条件を描えた人工切欠試験片を用いた疲労試験の結果でもある程度のばらつきを示すが、溶接継手の場合には全く同じ溶接条件による溶接

でも場所により応力集中の程度が異なるため、疲労試験結果はかなりばらつき、同じ継手を異った人や異った条件で溶接した場合には結果のばらつきはさらに大きくなる。

そして、このばらつきは疲労強度の高いすなわち応力集中度が小さい溶接継手ほど大きい傾向がある。

普通、このようなばらつきの平均値を通るような曲線(直線)を画いてこれを $S-N$ ($S-N_f$) 線図(図2)と呼んでいるが、設計用のデータとしてこの $S-N$ 線図だけを用いるのは適当でない。なぜならばこの $S-N$ 線図よりどの程度まで低い強度の溶接継手が存在するかわからないからである。換言すれば、ばらつきに関する情報が含まれていないからである。

現在のところ、このばらつきを考えて、ほとんどのデータはこれ以上であるという下限線の意味で、破壊確率 $1/20$ の信頼限界線(これを破壊確率 5% の $P-S-N$ 線図と呼ぶ)を求め、これをその溶接継手の強度データとして用いる方法がよいとされている¹⁾⁹⁾¹⁰⁾。

前述のように、 $S-N$ 線図(あるいは $P-S-N$ 線図)を画くための繰返数 N としては、普通 N_f が用いられている。

実際の構造物においては、進行性のき裂が発見されても、まだ破壊までには多くの時間がかかるであろうからといって、そのまま使用が続行されることはなく、必ず補修および多くの場合補強が講ぜられるから、これらの補修や補強による経済的損失を考えれば、軽量化が構造設計の第一条件であるといわれる航空機などの場合を除き、設計は寿命期間中に疲労き裂を発生させないことを

図2 軟鋼突合せ継手(非仕上、無欠陥)の片振引張疲労試験結果のばらつき

目標に進められるべきである。したがって、 N_f のかわりに N_c を用いた $S-N$ 線図が設計上は必要である：さらに後述するように、累積疲労被害の問題はき裂発生だけに限って考えないと混乱を生ずるという見地からも、 $S-N_c$ 線図が必要となる。

現在は $S-N_c$ 線図（ばらつきを考えた破壊確率 5% に対する $P-S-N_c$ 線図を含めて）は全く求められていないから、既存の各種のデータにもとづいて、なるべく正確でやや安全側と思われる線図を推定しなければならない（図 3）。

図 3 $P-S-N_f$, および $P-S-N_c$ 線図（推定）

3.4 平均応力

一定の応力変動 {その最大値を最大応力 S_{max} , 最小値を最小応力 S_{min} , $(S_{max} + S_{min})/2$ を平均応力 S_{mean} , $(S_{max} - S_{min})$ を応力範囲 S_r , $S_r/2$ を応力振幅 S_{amp} , S_{min}/S_{max} を応力比 k と呼ぶ} を繰返し加えて破壊（き裂が発生）するまでの繰返数 $N_f(N_c)$ を求める疲労試験では、普通 S_{mean} , S_{min} あるいは k のいずれか一つを一定にし、 S_r を試験片ごとに变化させて、その結果により $S-N$ 線図を画き、これより疲労限や、時間強度を求めるのであるが、 S_{mean} (あるいは S_{min} や k) が変わった場合のこれらの強度は溶接継手の場合、実際にどのように変るであろうか。

図 4 疲労強度線図

平滑材の場合は S_{mean} と S_{amp} との間に図 4 の実線のように S_{mean} が 0 より大きくなるにつれて S_{amp} が直線的に減少する傾向があるとされてきた。（疲労強度線図）

切欠材の場合にも S_{mean} の増加につれて S_{amp} は減少するが、その度合は平滑材の場合に較べて、応力集中の度合が大きく、疲労強度が低いほど小さいといわれてきた。（図 4 の点線）

溶接継手の場合も切欠材の場合と、ほぼ同じ傾向を示すといわれてきた。

しかしながら、これらの強度線図は多くの場合、 $S_{mean}=0$ の両振のデータと、 $S_{min}=0$ の片振のデータだけによって画かれることが多く、平均応力がもっと大きくなった場合のデータが整った場合にもやはりこれまでに画かれた通りの直線関係が保たれるかどうかは疑問である。

それだけでなく、二、三のデータは否定的な傾向を示し応力集中が大きく疲労強度が低い場合には、 S_{mean} が片振以上では、平均応力の影響は図 5 のようにかなり小さいと考えられる。

このことは、応力集中が大きい場合には、平均応力が変化しても、応力集中部での応力とひずみの関係は、疲労試験の初期の段階におこる塑性変形により、ほぼ同じ

図 5 平均応力の影響

図 6 応力集中部における応力とひずみの関係

になるであろうことから、定性的に推察することができる。(図6)

また、平均応力が片振りの場合より小さくなり、圧縮領域での応力変動範囲が増すにつれて疲労強度が高めに表われる(図5)ことについては、次のように説明することができる。

すなわち、平均応力が減少して圧縮領域での応力変動範囲が増加しても、試験途中の応力とひずみの関係は、き裂が発生するまでは、ほぼ同じと考えられるから、き裂発生までの繰返数はほぼ同じであろう(図6)。しかしながら、一旦き裂が発生してからのかき裂の進展速度は、応力変動範囲がどの程度圧縮領域にあるかによって著しく変化し、このため片振の疲労強度より両振のそれが、やや大きく目に見られるのである¹⁾。

したがって、もしすべての疲労試験結果がき裂発生までの繰返数で整理されるようになれば、平均応力の影響は、応力集中が大きい場合すべての範囲において、あまり重要でなくなるであろうと思われる。

このように、平均応力の影響が、それ程重要でないということは、溶接構造物の疲労設計においては、きわめて有利なことである。というのは溶接構造物には溶接熱により、大なり小なりの残留応力が生じており、このために、実際に作用する応力変動の平均応力は、外から加える荷重変動から算出されるそれとは全く異っており、設計時に残留応力による平均応力の移動を推定することは不可能であるから、平均応力の影響が万一重要であっても、これを考慮することはできないからである。

しかし、一たん疲労き裂が発生した後のき裂進展に対しては平均応力というより応力範囲の圧縮領域の大きさの影響はかなり大きい。そして、き裂進展過程全般については、構造物の内部で釣合っている残留応力の影響は、マクロにみて一応無視できるとすれば、荷重による応力変動範囲の圧縮領域の大きさは、き裂発生後の寿命が長くなるという意図で、設計時に考慮されるべきであろう。

3.5 疲労被害の累積

一般の構造物では毎回ランダムに変化する応力変動を受けるのが普通であるが、かかる構造物の部材や継手の疲労寿命を、一定の応力変動による疲労試験結果を用いて推定するためには、疲労被害の累積という概念を導入する必要がある。

最も簡単に考えられる概念としては、ある大きさ(および平均応力)の応力変動による疲労被害は過去の応力履歴には無関係に一定であるという仮定から帰納される直線累積被害則(いわゆるマイナー則)である。この直線累積被害則によれば、 $S_1, S_2 \cdots S_i \cdots$ なる応力変動が順

序は無関係にそれぞれ $n_1, n_2 \cdots n_i \cdots$ 回ずつ作用したときの疲労被害 D は、(2)式で与えられ、 $D=1$ になるとき裂発生(破壊)が起るのである。

$$D = \sum n_i / N_i \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

ここに、 N_i は S_i が単調に作用した場合のき裂発生(破壊)までの繰返数である。

これまでに、この直線累積被害則が妥当であるか否かを検証するための多くの実験が遂行された。そのなかで最も多く行われた、始めに S_1 を連続して n_i 回作用させ、続いて S_2 を繰返し作用させて破壊させる二段荷重の疲労試験の結果の多くはやや否定的で、 D は順序により大きくも小さくもなっている。

ここで十分注意しなければならないことは、疲労き裂が一たん発生した後は直線累積被害則の前提である疲労被害が過去の履歴に無関係という仮定が明らかに成立たなくなることである。

ところが、すでに述べたように、これまでの疲労試験では N_f だけしか求められないため、(2)式の n_i や N_i にもき裂発生後のき裂進展に要する繰返数が含まれており、破壊時の D が1よりも大巾に大きくなったり小さくなったりした理由の第一はこのへんにあるのではないかと考えられる。

もちろん、これ以外の理由もいろいろ指摘されているが、厳密にき裂発生をとらえた実験により、この法則の妥当性が明らかにされるまでは、これ以外に提案されている各種の疲労被害則は単純化の要請に反する限り、仕方書の中に盛り込まれないであろうと考えられる。

前述のように累積被害則はき裂発生だけに限って適用されねばならないが、き裂発生後破壊までの寿命も万一き裂が発生した場合の構造物の安全性の見地から設計時に考慮されるのが望ましい。

たとえば、き裂発生には何等の貢献をしない低い応力の繰返しも、一旦き裂が発生した後はき裂進展に貢献するであろうから、かかる疲労限よりやや小さい応力の繰返数が非常に多い構造物と、そうでない構造物とでは、き裂発生に対する安全率に若干の相違があつてしかるべきであろう。

この配慮を簡単に設計に織込むには、設計に使用した $S-N_f$ 線図が疲労限(かりに存在が確認されたとして)で水平に折曲つていても、これを折曲とせず疲労限以下もそれ以上の傾向が持続され N の増加につれて S が低くなると仮定して設計を進めればよい。(応力集中が大きい場合の $S-N_f$ 線図は、 N_f の大部分がき裂進展に要する繰返数であるため、き裂の進展速度の傾向に大きく影響されて、勾配が急になっている。もし疲労限以

下の応力のき裂進展に対する貢献を考慮に入れるため、この急な勾配をそのまま延長して、累積被害を計算すると不当に安全側になりすぎることになる。)

4. 今後の疲労設計理念

今後新たに制定または改訂されるであろう設計仕方書(設計基準)に盛り込まれる疲労設計理念は前章に記した諸問題に関する最新の知識を織込んで、合理化と単純化の調和を計ったものとなるであろう。そして、その大要を予想すると次のとおりである。

- (1) 寿命期間中に疲労き裂が発生しないことを設計の目標とする。
- (2) き裂発生だけに対し直線累積被害則を用いる。
- (3) 各種継手に対する $P-S-N_c$ 線図をできるだけ正確に推定してこれを用いる。
- (4) 軟鋼と高張力鋼とは疲労強度に関しては差がないとして取扱う。
- (5) 平均応力の影響はき裂発生に対しては無視できるとする。
- (6) 応力の頻度分布を構造物の部材や継手ごとになるべく正確に推定してこれを用いる。この推定の場合、レンジペア法で頻度分布の計数を行う。
- (7) き裂発生に対する安全率は応力計算が精密に行なわれるようになった場合には5%の破壊確率の $P-S-N_c$ 線図が用いられるかぎり1.05~1.25の範囲で構造物の重要性や軽量化への要求の強さに従って採用される。
- (8) き裂発生後の寿命の長短が安全率に加味される。すなわち、疲労限以下の応力の繰返数が非常に多い場合には安全率はやや大き目に、また応力変動範囲の圧縮領域にある部分が大きい場合には安全率はやや小さ目にとられる。

現在、日本鋼構造協会技術委員会耐久性分科会の中の疲労小委員会は、上記の線にそった疲労設計指針の原案を作成中である¹¹⁾。

この原案の中で特に目新しいことは、各種継手に対する $P-S-N_c$ 線図をいずれも両対数紙上で同じ勾配 ($K = -0.18$) を持つ直線であると仮定し、さらに5%破壊確率の $P-S-N_f$ 線図の $N_f = 2 \times 10^6$ 回の強度が $N_c = 10^6$ 回の強度であると仮定していることである。そして一応、この直線は疲労限なしに無限に下ると仮定している。

5. 今後期待される研究

以上を読まれてもおわかりのように、合理的でしかも簡単な疲労設計基準を打立てるためには、現在でも不明

な点が多過ぎるといえる。これら不明な点を解明するための数多くの研究が今後期待されるのであるが、その主なものを気が付くままに記すと次の通りである。

(1) 疲労き裂発生機構の解明

この研究はおそらく非常に困難であろうが、もし解明された場合には平均応力や累積被害の問題も明確になるであろう。

(2) 各種継手に対する $P-S-N_c$ 線図の確立

このためにはき裂の発生と進展の移り変りを明らかにしなければならない。

(3) 各種構造物における荷重の頻度分布に関するデータの集積

レンジペア法で数えなければならない必然性の証明も同時に必要であろう。

(4) 直線累積被害則の適用可能範囲の把握

(5) 平均応力の影響の解明

(6) 高張力鋼の溶接継手の疲労強度が軟鋼のそれに較べて優れていない原因の解明

(7) 構造上の応力集中部に疲労強度の低い継手が存在する場合の強度低下の度合の解明

一方研究とは別に疲労による溶接構造物の損傷防止のために声を大にして叫びたい問題がある。それは構造物の設計や製作に携わる人々、および将来携わるであろう人々に対する教育の問題である。疲労によるトラブルが構造物のトラブルの大半を占めており、これらトラブルの原因の大半が設計者や製作者の疲労に関する知識の欠除にあるという点からいって、教育の重要性は明白である。

6. あとがき

以上述べた溶接構造物の疲労設計に関する考え方の大部分は、10年余に亘るF S委員会(溶接学会疲労強度研究委員会)での勉強を通じて筆者の頭の中に形成されたものであって、その中に有益な部分があれば、それはF S委員会の功績であり、誤りがあったとすれば、それは筆者の考えが浅薄であったことに帰せられるであろう。

ここに文末を借りてF S委員会の委員各位に対する敬意を謝意を表明する次第である。

参考文献

- 1) 白石：「溶接技術者のための疲労の知識」，溶接技術，1969年7月~11月
- 2) J.G. Whiteman ; 「The Problem of Cumulative Damage in Welded Structures, 1970 Welding Institute Conference on "Fatigue of Welded Structures" 資料
- 3) T.R. Gurney ; 「A Comparison of Fatigue Design Rules」, 1970 Welding Institute Conference on "Fatigue of Welded Structures" 資料
- 4) 白石：「疲労を考慮した設計の一例」F S資料 84—40, 1965年8月

- 5) 伊藤:「実働荷重による鉄道橋の疲労被害推定」, 鉄研報告 No. 676, 1969年4月
- 6) 国広, 井上:「道路橋の疲労設計」, 道路, 1972年3月, FS 資料—275—47, 1972年
- 7) 植田, 鯉淵, 松川:「クレーン鋼構造物の実働荷重を考慮した疲れ強さについて」, FS 資料214—45, 1970年4月
- 8) 白石, 吉田:「大形鉄道連絡船の強度ならびに構造設計に関する研究」, 鉄研報告 No. 816 1972年8月
- 9) 土木学会: 鋼鉄道橋設計標準解説, 1970年11月, 土木学会
- 10) 白石: 溶接設計者のための疲労に関する一般常識, 溶接技術, 1964年1月~5月
- 11) 白石: 疲労設計指針案の考え方について, FS 資料258—46, 1971年6月

疲労強度から見た溶接継手の分類*

太 田 省 三 郎**

Classification of Welded Joints from a Standpoint of Fatigue Strength*

by Shozaburo Ohta**

1. ま え が き

溶接継手に用いられる溶接の種類は, (1)融接, (2)圧接および(3)ろう付に大別され, (1)には最も広く使用されているアーク溶接, ガス溶接, テルミット溶接, エレクトロスラグ溶接, 電子線溶接などが含まれ, (2)にはガス圧接, 抗抵溶接, 鍛接, 冷間圧接, 超音波溶接などが含まれ, また(3)は硬ろう付と軟ろう付などに分けられる。これらの溶接はさらに溶接前後の溶接部の形状などから, たとえばアークおよびガス溶接ではグループ溶接, すみ肉溶接, プラグ溶接, ビード溶接などに分けられ, 抗抵溶接では点溶接, プロジェクション溶接, シーム溶接, フラッシュ溶接, アプセット溶接などに分けられる。このように溶接部の種類から分類すると, テルミット溶接やエレクトロスラグ溶接も主としてグループ溶接で使用されることが多い。これら溶接あるいは溶接部の種類と継手の種類(突合せ継手, 当て金継手, 重ね継手, T継手, かど継手, ヘリ継手など)との組合せによって種々の溶接継手が構成される。

これらの溶接継手のうち, 重要構造物に使用されるのは主としてグループ溶接, およびすみ肉溶接の継手であり, これらは溶接継手の設計あるいは強度計算が他の溶接継手に比較してとくに重要である。グループ溶接は強度計算(静的)の必要は比較的少ないが, グループ形状寸法の設計が重要であり, すみ肉溶接は他の溶接に比較して強度計算をとくに必要とする。

溶接発達の初期においては, 施工の容易なすみ肉溶接が好んで用いられたが, すみ肉溶接はルートに溶接欠陥を生じやすく, ルートに切欠きを有し, また止端では断面が急変するため, それらの部分の応力集中が大きくなり, 疲労強度が低い。ため繰返し応力の高いところや重要個所には極力避けられ, グループ溶接継手を用いるのが普通である。しかしこれらの欠陥も静的強度にはあまり影響しないことがわかっている。

本稿は上述の溶接継手の種類が疲労強度から見てどの様に分類され, そしてそれらに対応する疲労強度がどの程度のものであるか, また疲労設計上重要な疲労強度線図の表わし方などについて述べる。なおデータについては鋼に限ることとする。

2. 構 造 種 別

構造物の疲労破壊は主として構造各部の応力集中によるもので, ボルトあるいはびょう孔, 溶接のような構造的な不連続および局部的あるいは全体的な幾何学的形状の変化はすべてその主要因となるものである。これには応力条件の外に, 継手の種類, 形状, 材料, 施工条件(仕上げ条件を含む), 環境などが関連している。

疲労荷重をうける構造各部の種類は, 各種締結法の場合, 例えば溶接継手の種類をも含めて構造種別(const-ructional details)と称しているが, これには締結法による種類例えば溶接の種類と継手の種類の組合せによる溶接継手の種類形状の外に, 継手と荷重(種類および方向)との関係が加味されている。例えば「横縁」とは部材の結合線に対して直角方向に荷重がかかる場合(荷重

* 原稿受付 昭和47年11月30日

** 正 員 鉄道技術研究所溶接研究室 Member, Railway Technical Research Institute of J.N.R.