

JSSC 疲労設計指針・四方山話

Reminiscences about Fatigue Design Recommendation for Steel Structures by JSSC

法政大学 都市環境デザイン工学科

Dr. Eng.
Professor
Department of Civil and Environmental Engineering
Housei University

教授
森 猛
Takeshi MORI



1. はじめに

1980・81年度に大阪大学・博士課程の学生として堀川浩甫先生の研究室に在籍していた。そして、82年度から東工大で三木千寿先生の助手として勤務した。その4年後の1986年に鋼構造協会(JSSC)の疲労設計指針を改定するための委員会が設置された。三木先生が委員長ということもあり、幸いなことに幹事として参加させていただいた。そして、1989年に「鋼構造物の疲労設計指針(案)」がJSSCレポートとして公表された。さらに1993年に設計例と指針改定のために調査・整理した事項を取りまとめた資料編を含めて「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」が出版された。この数年間の活動は、私にとって勉強になることが多く、また疲労関連のいろいろな分野の第一線の研究者の方々と交流することができ、その後の活動の糧となっている。

2006年に鋼構造協会事務局の方から疲労設計指針改定のための委員会立上げの依頼があった。正直なところ、そろそろ改定の時期かなとは考えていたものの、そのころ土木学会「鋼・合成構造物標準仕方書 施工編」の出版作業や、土木鋼構造診断士の立ち上げなどを行っていたため、もう少し後に、などと勝手に考えていた。結局、これも何かのお告げかもしれないと考え、引き受けることにした。そして、2010年12月に日本鋼構造協会標準として「改定案」を出版した。その後、設計例について準備を進め、2012年6月に「鋼構造物の疲労設計指針・

同解説 - 付・設計例 - 2012年改定版」(図-1)を出版することができた。

ここでは、これら2回の疲労設計指針作成に携わった際に私なりに考えたこと、思ったことを述べたい。

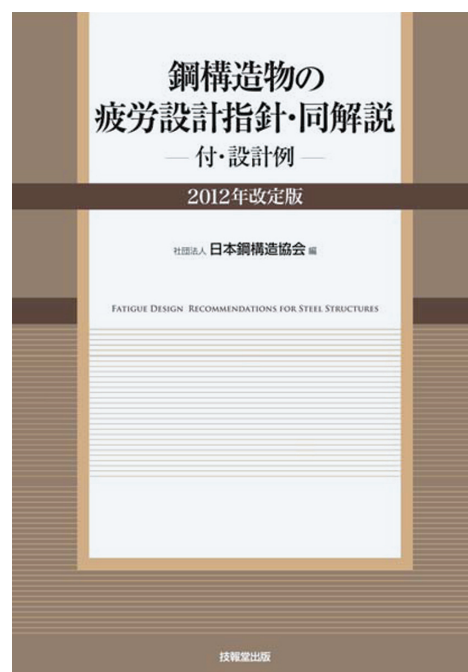


図-1 2012年版疲労設計指針

2. 1993年版疲労設計指針の作成活動

鋼構造物の疲労設計のためのモデルコードとして1974年に「日本鋼構造協会疲労設計指針(案)」が出版されている。この指針のことを知ったのは、大阪大学大学院在籍時の1980年であった。当時前田研究室の博士課程の学生であった瀬良さんが学内のゼミで鋼床版の疲労

について発表される際に、たびたびこの指針を引用されていた。指針の内容は衝撃的であり、当時疲労関係で学位取得を目指していた私にはバイブルのように感じた。

繰り返しになるが、このバイブルの改定に携われたことは幸運であった。改定委員会でまず行われたのは、フリーディスカッション（当時はブレーンストーミングという言葉が流行っていたように思う）であった。第一線の疲労関係の研究者が集まっており、話についていくのがやっとだった（ついていってなかったかも？）ように覚えている。さまざまな話が出て、それをKJ（川喜田二郎）法を用いてまとめなさい、と三木先生から指示された。これも、よい勉強になった。しばらくこのような活動が続いた後、指針の内容についての検討が始まった。三木先生の指示に従い、いろいろな資料をもとに検討した結果を、すなわち改定案を委員会に提出する、という作業がしばらく続いたように覚えている。提出した資料とその説明に対して、委員の皆様からいろいろな、そして時には厳しい意見をいただくこともあった。

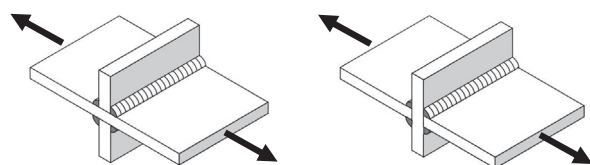
1993年版では、疲労設計荷重を除き、ほとんどが新しい内容となった。その一つが設計疲労曲線（ $\Delta\sigma-N$ 曲線）である。各継手の疲労強度については、ちょうどそのころ名古屋大学の山田健太郎先生の研究室で作成され、川崎製鉄の川井さんらがデータを補充されていた疲労試験データベースを用いて、検討を進めた。そして、1974年版で傾きを5としていたものを3とした。また、変動振幅応力下の応力範囲の打ち切り限界という新しい概念を採用した。三木先生のアイデアであり、その具体的な数値については関西大学の坂野先生が検討された。実は私が検討するように三木先生から指示されたのであるが、学位論文の準備など他にやらなければならないことが多かったためか、あるいは生意気にも他の考えがあったためか、辞退した。そのことについて、三木先生にお詫びすることはなかったかもしれないが、いまでも反省している。

当時、三木先生の指導の下、疲労き裂進展解析を用いて様々な継手の疲労強度、また疲労強度に対する諸因子

（溶接きずや溶接止端形状、板厚）の影響について検討していた。疲労き裂の進展を考えると、応力範囲の打ち切り限界など存在するはずはなく、き裂が伸びるにしたがって、き裂の進展に寄与する応力範囲が徐々に小さくなる。この小さくなる限界値をマイナー則に組み込むのがよい、というのが私の考えであった。その思いを持ち続け、2つの論文としてまとめた^{1,2)}。累積疲労損傷比（マイナー和）に応じて疲労に寄与する応力範囲の限界値が変化するというアイデアである。しかし、このような方法を疲労設計に取り入れることは煩雑であり、変動振幅応力下の応力範囲の打ち切り限界という考え方は設計する立場からは使いやすく、また結果も若干安全側の評価となる。

荷重伝達型十字すみ肉溶接継手の疲労強度についての検討も深く記憶に残っている（図-2）。この継手では、溶接止端、溶接ルートが疲労破壊の起点となる。1974年版では、止端破壊する場合の疲労強度等級を非伝達型継手と同じとしていた。しかし、伝達型か非伝達型によって応力の流れが異なり（非伝達型では溶接部ではなく多くの力が母板で伝達されるのに対し、伝達型では溶接部のみで伝達される）、非伝達型に比べて伝達型で溶接止端の応力集中が高くなる。そのため、同じ溶接形状であっても、伝達型で疲労強度が低い。このような事実を、当時金属材料研究所の太田さんらの実験結果、また有限要素応力解析から確かめ、伝達型止端破壊の疲労強度等級を非伝達型止端破壊の一等級下とした。

1974年版では、荷重伝達型十字すみ肉溶接継手がルート破壊する場合の疲労照査にせん断応力が用いられていた。しかし、この場合の疲労寿命の大半は疲労き裂進展



(a) 荷重非伝達型

(b) 荷重伝達型

図-2 十字すみ肉溶接継手

過程で費やされ、き裂は直応力に対応するモード I で進展する。したがって、せん断応力ではなく、直応力をベースに疲労強度評価すべきである、というのが委員会での合意であった。もちろん、実験結果などからもその妥当性を確認している。せん断応力ベースの疲労設計曲線の傾きは 5 であり、直応力ベースの傾きは 3 である。大きな違いである。現在でも道路橋仕方書の静的な強度チェックでは、せん断応力が用いられている。直応力ベースに変えるべきと、勝手に考えている³⁾。

この検討の際に考えたのが、十字継手ルート破壊の疲労強度は疲労き裂進展解析によって高い精度で求めることができるのではないかと、そして溶接の溶け込み、溶接サイズ、溶接形状、板厚などの影響を定量的に評価できるのではないかとということである。法政大学に勤め始めた 1990 年ころからこのようなテーマに取り組み、疲労強度評価法の提案、疲労破壊起点、2 軸荷重の影響、板曲げを受ける場合の疲労強度などを明らかにしてきた³⁻¹⁰⁾。

疲労強度に対する板厚の影響についても新しい内容が盛り込まれた。従来、荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手を対象とした検討が行われ、板厚の 1/4 乗に反比例するとされていた。これは、欧州を中心として海洋構造物・船舶関係で検討されたものである。これを突合せ継手や面外ガセット継手についても適用しようというのが当時の考え方だったと記憶している。しかし、継手の形状によって疲労強度の支配因子の一つである応力集中係数に対する板厚の影響は異なるはずである。そのような考えをもとに、板厚による疲労強度の変化を考慮する継手としない継手に区別した。また、十字継手についても、付加板の厚さや溶接サイズによって板厚効果の有無を規定した。その根拠の一つとなった研究に携われたことも幸いであった¹¹⁾。

さらに勉強になったのが、信頼性の評価についてである。信頼性評価に関する知識をほとんど持っていなかった私にとって、高い壁に感じられたが、やってみればどうにかなるとの自信にもなった。その検討結果が資料編

第 6 章「安全性の評価」である。わずか 4 ページの資料であるが、現在でも有用な資料では、などと勝手に考えている。現在、道路橋示方書を部分安全係数法で記述する作業が行われているが、この勉強のおかげで、その大変さ、気を付けなければならないことが、何となくわかっているような気がしている。

3. 2012 年版疲労設計指針の作成活動

2012 年版指針の改定作業を始めた 2006 年ころに考えていたことは、溶接方法の変化である。1993 年版の各継手の疲労強度等級は、山田先生らが収集した疲労試験データに基づいているが、当時までの溶接の主流は低水素系溶接棒を用いた被覆アーク溶接であった。しかし、1990 年ころから、鋼構造物の溶接の主流は、炭酸ガスシールドアーク溶接 (CO₂ 溶接) へと移行した。溶接継手の疲労強度は、継手形式だけではなく溶接形状にも影響されるため、CO₂ 溶接で施工された継手に旧指針で定めている疲労強度等級をそのまま適用してよいかという疑問を持っていた。東工大の助手のころから多くの溶接部の形状を測定してきたが、その止端曲率半径は低水素系溶接棒を用いた被覆アーク溶接で 0.5mm 程度、CO₂ 溶接では 1.0mm 程度というのが私の感覚であった。また、CO₂ 溶接にしても、フラックスコアタイプのワイヤを用いると、ソリッドワイヤを用いた場合よりも一般に止端形状が滑らかになる。とすれば、1993 年版で定めた疲労等級を溶接方法や溶接材料によって上げることができないのではないかと考えた。1993 年版においても、「滑らかな止端を有する継手」と規定した上で疲労強度等級を通常の止端形状を有する継手よりも 1 ランク上、すなわち止端を仕上げた継手と同じとしている。「滑らかな止端を有する継手」とは、ぬれ性のよい被覆アーク溶接用の改良棒を意識したものであった。

以上の溶接方法・溶接材料による疲労強度の相違を明らかにする目的で、1993 年版を作成する際に利用した疲労試験データに、最近 20 年間の疲労試験データ (10 224 データ) を加えて新たなデータベースを作成した。この

データベースは希望者に配布したが、今後どのようにメンテナンスしていくかが問題である。正直なところ、2009年までのデータに留まっている。どこかで管理してくれるとありがたいのだが。

図-3 (a)と4 (a)は、溶接方法と溶接材料ごとに整理したそれぞれ荷重非伝達型十字溶接継手と面外ガセット溶接継手の疲労試験データを示している。また、図-3 (b)と4 (b)は、各継手の200万回疲労強度と溶接材料の関係を示したものである。これらの図では、溶接方法として手溶接(被覆アーク溶接)と半自動溶接(CO₂溶接)、溶接材料としてはそれぞれの溶接方法で低水素系溶接棒とその他、ソリッドワイヤとフラックス入りワイヤで分けている。

一般に、低水素系溶接棒、またソリッドワイヤを用いると溶接形状が凸になりやすいとされている。図-3 (b)に示す荷重非伝達型十字溶接継手では、その他の手

溶接(イルミナイト系溶接棒など)の継手での疲労強度が、低水素系溶接棒やCO₂溶接よりも高くなっている。しかし、他の3つの溶接方法・材料で作成した継手の疲労強度に対する溶接方法と溶接材料の影響は認められない。さらに、面外ガセット溶接継手の疲労強度についても、溶接方法と溶接材料の影響は認められない。このように、期待とは異なる結果となった。

改定のもう一つの目的は、この20年間の新たな研究成果を指針に取り入れることである。例えば、ホットスポット応力を用いた疲労照査や疲労き裂進展解析を用いた疲労照査の充実である。前者については名古屋大学の館石先生、後者については大阪大学の沢先生を中心に作成いただいた。この充実のために、目次を大幅に見直し、第1章「総説」、第2章「疲労設計荷重」、第3章「公称応力を用いた疲労照査」、第4章「ホットスポット応力を用いた疲労照査」、第5章「疲労き裂進展解析を用

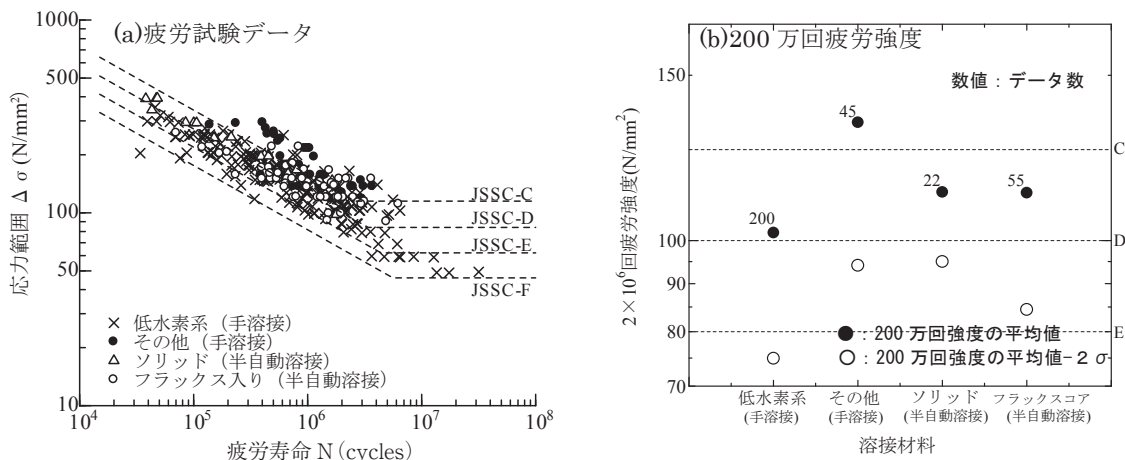


図-3 疲労強度に対する溶接法と溶接材料の影響(荷重非伝達型十字溶接継手)

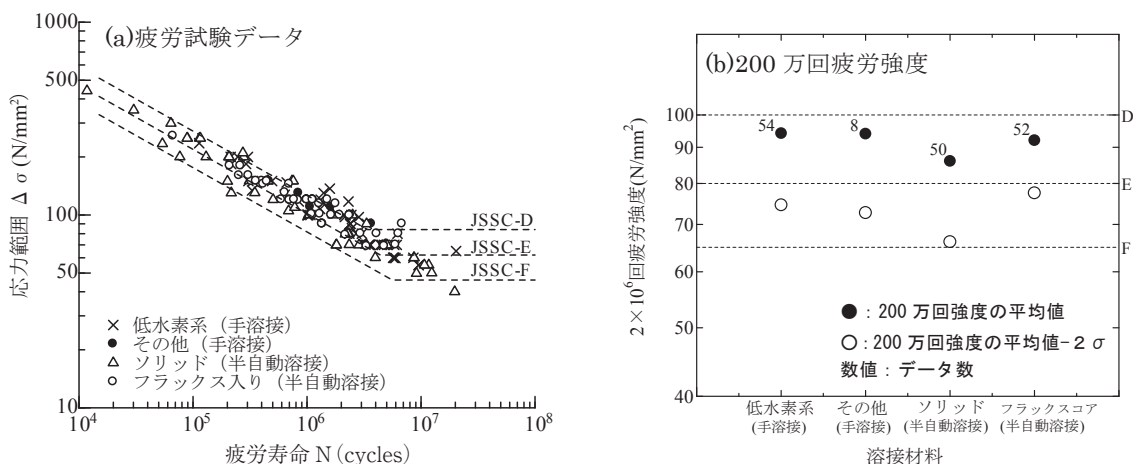


図-4 疲労強度に対する溶接法と溶接材料の影響(面外ガセット溶接継手)

いた疲労照査」,そして第6章「既設鋼構造物の疲労照査と点検・診断・対策」とした。第6章についても,九州大学の貝沼先生を中心に,1993年版の「維持・管理」を充実させた。また,1993年版には,付録としてレインフロー法のプログラムを掲載していたが,恥ずかしながら,私が今は亡きN88BASICで記述したものである。これを館石先生がFortran90で改良してくださったものが2012年版に掲載されている。この方法は,レインフロー法とは異なるのではないかとの指摘を受けることがある。この点を明確とするために,以下のように説明を加えることとした。「レインフロー法による応力範囲の計数プログラムを簡易化するために遠藤によって提案された以下の方法¹²⁾で応力範囲頻度を計数することを推奨する。……ここでは,この方法をレインフロー法と呼ぶ。」

疲労き裂進展解析の基となる疲労き裂進展速度表示式($da/dN - \Delta K$ 関係, da/dN :疲労き裂進展速度, ΔK :応力拡大係数範囲)の傾きを2.75から3.0へ変更することも改定の狙いの一つであった。疲労き裂進展解析を行うと,応力範囲 $\Delta\sigma$ と疲労寿命の N の関係が求められるが, $da/dN - \Delta K$ 関係の傾きを2.75とすると, $\Delta\sigma - N$ 関係の傾きも2.75となる。とすると,設計 $\Delta\sigma - N$ 曲線の傾き3.0と異なるという不都合が生じる。例えば,国際溶接学会(IIW)の疲労設計指針においても $da/dN - \Delta K$ 関係の傾きは3.0とされている。委員の一人である物質材料機構の早川さんに貴重な膨大な数のデータをいただき,再検討した。ところが,結果は2.75という傾きが適切であり,3.0とするとデータの傾向を再現することは難しいというものであった(図-5参照)。継手の疲労強度に対する溶接方法の影響と同様,「泰山鳴動して鼠一(零?)匹」というような結果となった。ところで,1993年版作成の際にも,設計 $\Delta\sigma - N$ 曲線と整合させるために3.0とならないか,回帰解析の方法を変えることにより $da/dN - \Delta K$ 関係の傾きを3.0とすることが可能ではないか,と発言した覚えがある。その時の担当者であった新日鐵の征矢さんの答えは,一言Noで

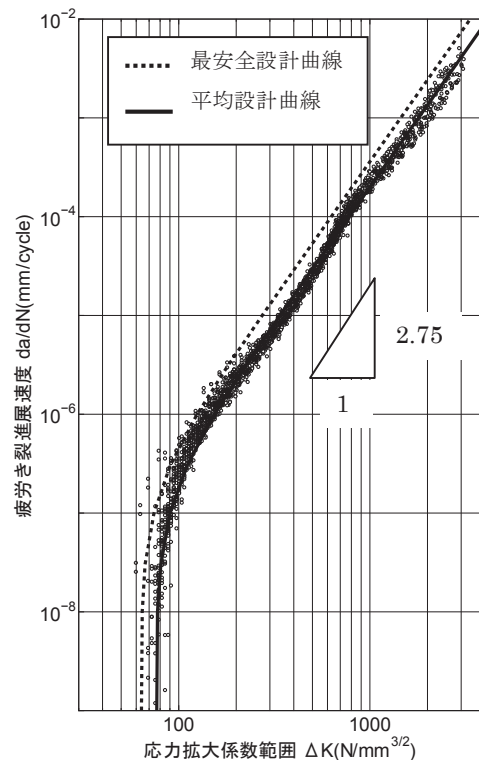


図-5 $da/dN - \Delta K$ 関係

あったように覚えている。すみませんでした。

仕上げの効果,またその品質についても検討しなければならなかった。1993年版に記載されている内容からは,バーグラインダーやTIGなめ,ピーニングによって溶接止端を仕上げた場合に疲労強度等級を1ランクあげてもよい,と判断される。また,1993年版には「仕上げはアンダーカットが残らないように行う。グラインダーで仕上げる場合には仕上げの方向を応力の方向と平行にする。」との記述はあるものの,疲労強度への影響が大きいと考えられる止端曲率半径をどの程度にすればよいか,など適用に迷いが生じる懸念があった。そこで,2012年版では,目標とすべき曲率半径や仕上げ部の範囲・深さについても検討し,記載した。

図-6(a),(b)は,止端曲率半径 ρ が3mm以上の荷重非伝達型十字溶接継手と面外ガセット溶接継手の疲労試験データを示したものである。図中のマークは, ρ の大きさ(3~5mm,5mm以上)によって変えている。荷重非伝達型十字溶接継手および面外ガセット溶接継手ともに,溶接のままの継手(強度等級E,F)と比べて疲労強度が1等級程度向上している。そのため,2012年版では,グラインダー処理を行った継手の疲労強度は,

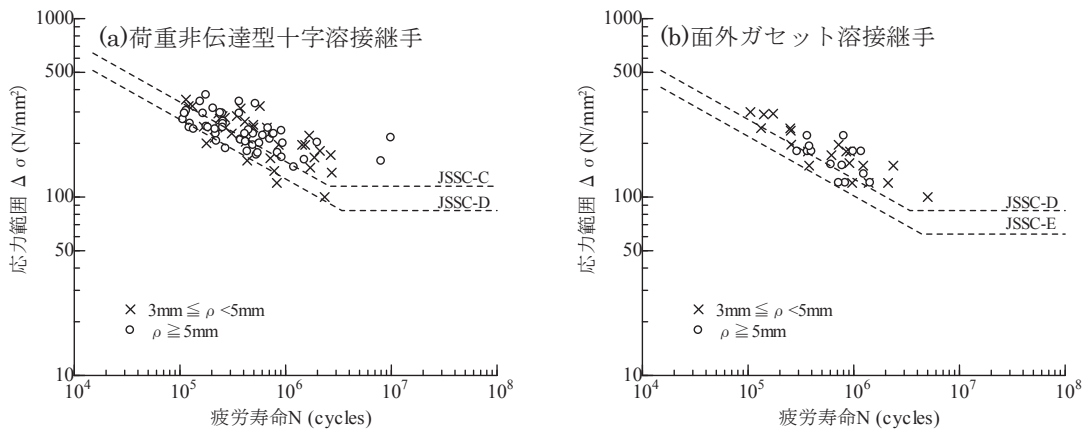


図-6 グラインダー仕上げの効果

止端曲率半径 ρ が 3 mm 以上を満足すれば、1 等級向上させてもよいとした。グラインダー処理は、ディスクグラインダーによる処理とバークグラインダーによる処理に分けられる。ディスクグラインダー処理を行った場合、溶接止端に溶接ビードと平行に微細なきずが生じ、このきずの方向が作用応力に対して直角に近い場合、きずが起点となって疲労き裂が生じる恐れがある。また、止端部の曲率半径を所定の値となるように仕上げることは難しい。そのため、バークグラインダーによる処理を基本とした。

曲率半径を 3 mm よりもさらに大きく仕上げた場合、疲労強度はさらに向上すると考えられる。しかし、図-6 に示した結果からは、 ρ による疲労強度の明確な違いは認められない。しかし、有限要素法による止端部の応力集係数の解析からは、 $\rho \geq 5$ mm とすれば、2 ランクアップも可能という結果が示されている¹³⁾。そのため、2012 年版では、 ρ を 3 mm よりもさらに大きくした場合（例えば 5 mm 以上）には、疲労試験を実施し、その結果に基づいて疲労強度等級について検討するのがよいとした。今後、仕上げ部の品質を含めて、止端等を仕上げた溶接継手の疲労強度等級に関する検討が必要と考えており、そのような検討を進めている。ただし、仕上げは必要に応じて行うのが基本であり、不必要な部分まで手間と費用を掛けて仕上げるような事態は避けるべきである。

溶接止端形状を滑らかにする方法に加えて、圧縮残留応力を付加することにより疲労強度を改善する方法もあ



図-7 せん断力による板曲げ

る。しかし、架設時などに過大な応力を受けた場合や、死荷重などの影響で平均応力の高い状態で繰返し応力を受ける場合には、圧縮残留応力の効果が消失する場合もあるため、指針では対象外とした。ピーニングなど、圧縮残留応力の効果が支配的となる疲労強度改善法については、処置を行うタイミング（例えば、架設前か後か）や、構造物の使用状態、適用箇所の応力状態などを明確にした上で適用すべきであり、そのような検討¹⁴⁾が必要と考えている。

桁ウェブにスカラップが設けられた場合の疲労照査法についても検討した。1993 年版作成時には不明であったが、その後の研究^{15,16)}により、桁に作用するせん断力の影響でスカラップ内のフランジに板曲げが生じることが明らかとなった（図-7 参照）。この板曲げによりスカラップ内のフランジ側溶接止端で高い応力が生じ、フランジの公称応力範囲で整理した場合には、図-8 に示すようにせん断応力範囲 $\Delta \tau$ と直応力範囲 $\Delta \sigma$ の比 $\Delta \tau / \Delta \sigma$ の値が高いものほど、疲労強度が低いという結果になる。そのため、例えば道路協会「鋼橋の疲労設計指針」では、 $\Delta \tau / \Delta \sigma$ の値によって疲労強度等級を変えている。しかし、この場合には疲労強度が異なるのではなく、

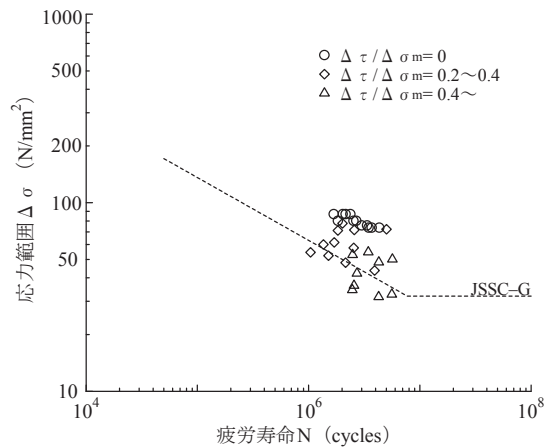


図-8 スカラップ構造の疲労試験データ

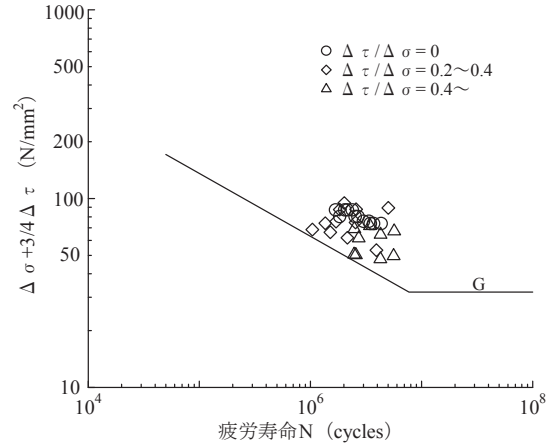


図-9 修正した応力範囲で整理したスカラップ構造の疲労強度

疲労き裂起点での応力が高くなり、疲労強度は変わらないと考えるのが合理的と考えた。 $\Delta \tau / \Delta \sigma$ の値によって、疲労き裂起点の応力がどの程度増加するかは、スカラップ半径やフランジの板厚など、いくつかの因子の影響を受ける。これを定式化¹⁷⁾すれば、より合理的な疲労設計が可能となる。しかし、疲労設計は煩雑となる。そのため、以下の式で疲労照査に用いる応力範囲を計算することとした。

$$\Delta \sigma = \Delta \sigma_m + (3/4) \Delta \tau$$

σ_m : 曲げモーメントによる公称応力

τ : ウェブ面に作用するせん断応力

この式から求めた応力範囲で整理した疲労試験結果を図-9に示す。疲労試験データのばらつきは図-8よりも小さく、 $\Delta \tau / \Delta \sigma$ の値による差は認められない。また、データの下限はG等級とほぼ一致している。

最後に組み合わせ応力下での疲労照査法について述べたい。1993年版では、せん断応力の影響で主応力が無視できない程度に大きくなる場合には主応力を求め、それを直応力とみなして疲労照査を行うことが推奨されていた。しかし、これに関する実験的な裏付けはなされていなかった。この影響を考えるためには、図-10(a)に示すように、応力の方向に付加板を傾けた試験体を用いて疲労試験を行うことが考えられる。しかし、この場合の疲労き裂は付加板の端部から生じることになり、組み合わせ応力の影響の評価はできない。この問題の重要性は

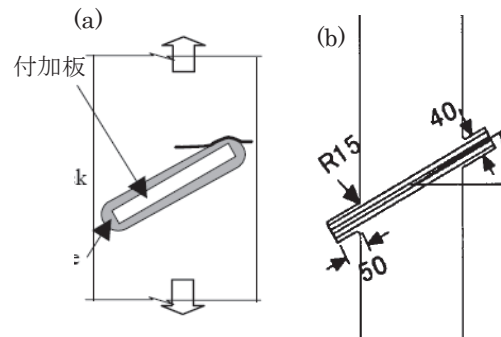


図-10 合わせ応力を一様にするための試験体

痛感しており、どうにかできないものかと考えていた。そうした中、図-10(b)に示すような試験体形状案が出され¹⁸⁾、その試験体を用いた検討が名古屋大学の山田先生のグループでなされた。正に目から鱗である。このようなことに気が付かれたのは、羨ましい限りである。そして、これらの一連の研究の成果を2012年版に反映させている。

4. おわりに

名古屋大学の山田先生(現在 名誉教授)に「疲労設計指針は森さんのライフワークだね。」と言われたことがある。山田先生は忘れていたかもしれないが、2012年版改定作業を始める何年前の話である。その時には、そんなもんかなと思ったように覚えている。しかし、とても印象に残っている。この2つの活動に加えて、道路協会「鋼道路橋の疲労設計指針」の作成に携われたことも幸運であった。JSSC指針はモデルコードであるため、

疲労設計荷重については考え方を示すに留まらざるを得ない。「鋼道路橋の疲労設計指針」に示されている具体的な疲労設計荷重の設定に協力できたことは、一つの喜びであった。

十数年後には、JSSC 指針 2012 年版も改定されるものと思われる。その改定作業には参加できそうにないが、そのための新しい知識を学生と一緒に、またいろいろ方とともに少しでも増やしていけたらと考えている。

参考文献

- 1) 森 猛：変動応力下の疲労寿命評価方法の検討，構造工学論文集（土木学会），Vol.37A，pp.1199-1209，1991.
- 2) 森 猛，林暢彦：変動振幅荷重を受ける鋼部材の疲労寿命評価方法の提案，土木学会論文集，No.537，pp.107-117，1996.
- 3) 森 猛，吉本秀一，林俊一，三木千寿：塗装鋼板のすみ肉溶接施工試験および十字継手の引張強度と疲労強度，構造工学論文集，Vol.40A，pp.1223-1232，1994.
- 4) 森 猛，貝沼重信，三木千寿：荷重伝達型十字すみ肉溶接継手ルート破壊の疲労強度解析，構造工学論文集，Vol.39A，pp.937-946，1993.
- 5) 森 猛，貝沼重信：荷重伝達型十字すみ肉溶接継手・ルート破壊の疲労強度評価方法の提案，土木学会論文集，No.501，pp.95-102，1994.
- 6) 森 猛，一宮充：荷重伝達型十字すみ肉溶接継手の疲労破壊起点の検討，溶接学会論文集，Vol.17，No.1，pp.94-101，1999.
- 7) 森 猛，明見 正雄：2 軸荷重を受ける十字溶接継手ルート破壊の疲労強度評価法，土木学会論文集 A，Vol.64，No.3，pp.617-626，2008.
- 9) 森 猛，明見正雄：十字溶接継手ルート破壊の疲労強度評価に対する有効切欠き応力概念の適用性，土木学会論文集 A，Vol. 65，No.1，pp.188-195，2009.
- 10) 森 猛，内田 大介，福岡 哲二，明見 正雄：板曲げを受ける十字溶接継手ルート破壊の疲労強度評価法の提案，土木学会論文集 A，Vol.66，No.3，pp.568-575，2010.
- 11) 三木千寿，森 猛，阪本謙二，柏木洋之：前面すみ肉溶接継手の疲労強度に対する継手寸法の影響，構造工学論文集，Vol.33A，pp.393-402，1987.
- 12) 遠藤達雄，安住弘幸：簡明にされたレインフローアルゴリズム「P/V 差法」について，材料，Vol.30，No.328，pp.89-93，1981.
- 13) 森 猛，南 邦明，甲 弓子：JSSC 疲労設計指針の溶接継手疲労強度と強度評価法の検討，鋼構造論文集，Vol.18，No.69，pp.71-81，2011.
- 14) 森 猛，島貫 広志，田中 陸人，宇佐美 龍一：UIT を施した面外ガセット溶接継手の疲労強度に対する施工時応力レベルと応力比の影響，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.67，No.2，pp.421-429，2011.
- 15) 田島二郎，山下清明，津田 徹：曲げ部材のスカラップ周辺の応力集中について，土木学会年次学術講演会講演概要集第 1 部，41 巻，pp.531-532，1986.
- 16) 三木千寿，館石和雄：鋼橋 I 形断面部材におけるスカラップディテールの疲労設計法，土木学会論文集，No.563，pp.41-47，1997.
- 17) 森 猛，内田大介：公称応力範囲を用いた溶接スカラップ部の疲労強度評価方法の提案，鋼構造年次論文報告集，第 5 巻，pp.473-480，1997.
- 18) 山田健太郎，金 仁泰，伊藤健一：作用応力に斜めな荷重非伝達型リブ十字すみ肉溶接継手の疲労挙動，土木学会論文集，No.682，pp.383-390，2001.