

橋梁の疲労と耐久性

東京工業大学 三木千寿

1. 疲労とは

疲労とは、応力が繰り返されることにより、構造物あるいは部材のある位置にき裂が発生し、それが進展して最終的には破断に至る現象である。原因となる外力は、自動車や列車などの活荷重のことが多いが、風や波によることもある。また、地震による10~100回程度の外力の繰り返しによる破壊も疲労と考えることができる。一般に応力の繰り返し数が10⁶回以上による疲労を高サイクル疲労あるいは単に疲労と呼び、設計では10⁸程度までを考えることが多い。応力繰り返し数が10⁶回以下での疲労現象は低サイクル疲労、あるいは塑性ひずみが支配的となることから塑性疲労とも呼ばれる。鋼素材としての疲労強度は、引張強さが高いほど高くなる傾向がある。しかし、実際の構造物では必ずと言っていいほど応力集中部があり、応力集中部の存在により、疲労強度は急激に低下する。図-1は種々の切り欠きを有する800MPa級鋼部材の疲労試験結果である。平滑材の10⁶回強度は素材で70kg/mm²程度であるが、鋭い切り欠きがあると10kg/mm²まで低下する。この程度の応力集中部は実際の部材の溶接部などにいくらかでも存在する。また、形から鋼素材に近いようにみられるケーブルでは、その素線ワイヤーでは、2×10⁶回で40~50kg/mm²の疲労強度を有するが、構造部材として用いる際に必ず存在する定着部の構造によっては15~20kg/mm²まで低下することがある¹⁾。静的な強度が高い鋼ほど切り欠きや欠陥に対する感度が高く、急激な疲労強度は低下につながるおそれがあり、注意しなければならない。

溶接部の疲労強度は、板と板をつなげる、ガセット等の板を取り付けるなどその形状からくる応力集中に加えて、溶接残留応力の影響を強く受ける。また、融合不良、われ、アンダーカット、スラグ巻き込み、ブローホールなどの溶接欠陥も急激な疲労強度の低下の原因となる。塑性変形をともなって生じる延性破壊強度は欠陥に通常さほど影響を受けないが、疲労は欠陥に対して敏感である。応力集中と溶接残留応力のために、溶接継手の疲労強度は鋼材の強度レベルに依存せず、継手型式によっては高強度鋼の方が低下することもある。溶接は、溶接性の保証された鋼材に対して、それにマッチした溶接材料を用い、適切な環境と管理により初めて健全なものを得られる。そのいずれかが欠けてもわれなどの疲労に対して極めて厳しい欠陥が発生する可能性があり、不用意な溶接施工には十分注意しなければならない。特に、曲げ加工を行った鉄筋に対する溶接など、思わぬわれを生じる可能性がある。

2. 橋に生じた疲労損傷事例

実際に生じた疲労損傷は設計、施工、維持、管理に対して非常に有用な情報を供給してくれる。筆者は、ある先生から疲労研究の第一

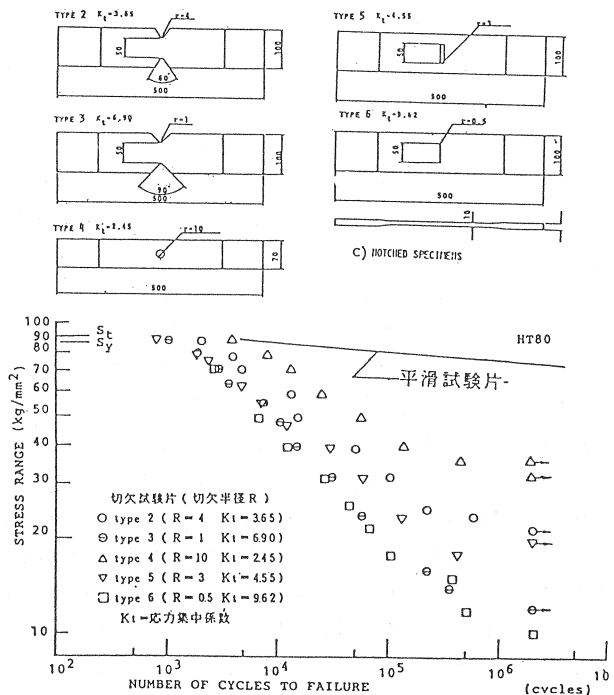


図-1. 切り欠き材の疲労試験結果

歩は、今までに作られ、使われてきた構造物に何が起きているかを知ることにあるといわれて以来、疲労損傷に関する各種の記事や、報告類を収集、整理してきた。米国では1967年のポイントブレザンド橋の崩壊以降の調査で膨大な数の疲労損傷が発見されていることは周知のことである²⁾。日本では疲労は鉄道橋だけの問題とされてきた。事実、道路橋では1970年代には後で示す風によるランガー吊り材の損傷を除けば報告されていないが、この10年急激に増加の一途をたどっている。

疲労損傷の原因は概略次の三つに分類できる。

- (1) 欠陥の存在
- (2) 設計時に想定しない変形挙動
- (3) 設計時に想定しない外力の作用

この分類にしたがってその特徴を示すことにする。

(1)欠陥の存在

図-2は米国道路橋の例³⁾であるが、下フランジの板継ぎ溶接に融合不良が残されており、そこから疲労き裂が発生し、それがウェブまで進展した直後にぜい性破壊を起こしたものである。この継手部に対しては工場内でX線検査されているが、X線検査では極めてシャープで平面的な欠陥は検出しにくく、また検出もれが生じる可能性もある。

図-3も米国の例^{2) 3)}であるが、装飾のための水平方向の部材中に極めて劣悪な板継ぎ溶接が存在し、それが橋本体にすみ肉溶接で取り付けられたために、本体と同じ応力状態となり、疲労き裂が発生し、すみ肉溶接から本体中に侵入し、橋全体を破壊させたものである。単なる飾りの部材のため、その板継ぎ溶接部の品質管理など思いもよらなかったであろう。

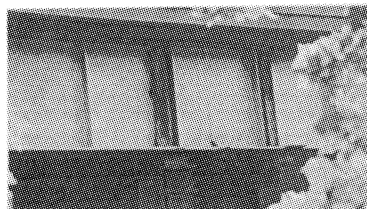
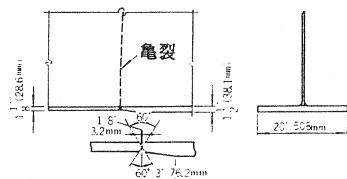
欠陥は意図して残されるものではない。設計あるいは施工段階で何らかのミスをしていることが多い。たとえば、図-4に示す橋脚の横ばりと主桁のように直交する部材の一方のフランジが片方のウェブを貫通する部分など、気が付いたら、溶接われを発生させるための試験体と同じディテールになっていたりすることがある。

(2)設計時に想定しない変位、変形

設計段階にはその計算を簡便にする目的でさまざまな仮定をおいている。例えばプレートガーダー橋では、活荷重を直接受ける床板は縦桁で単純支持され、縦桁は横桁で単純支持されていると考えることが多く、また、横桁は主桁に単純支持されていると仮定する。しかし、橋は完成後は全ての部材が協力して荷重に耐えるのであり、仮定とはかなり違う挙動となる。特に単純支持で連結されていると仮定した直交する部材間に生じる固定端モーメントは疲労損傷の大きな原因となっている。

図-5は対傾構をとりつけた垂直補剛材と上フランジの間に生じた疲労損傷である。対傾構の上支材および斜材が、ガセットを介してこの薄くて幅の狭い垂直補剛材に取り付けられており、この部分のディテールが固定端モーメントを伝達するのに十分ではなかったために生じた損傷といえよう。横桁をとりつけた垂直補剛材など、同じような直交部材間の接合部に数多く生じている損傷である。

支点部近傍の挙動も設計時の仮定とかなり異なることがある。例えば、はり理論では中立軸を支持しているが、実際の支点と中立軸は高さかなりの差があり、これにより高い二次応力が発生する。また、単純支点では回転拘束がないことになっているが、実際の支承部ではしばしばこの機能が損なわれ、二次応力発



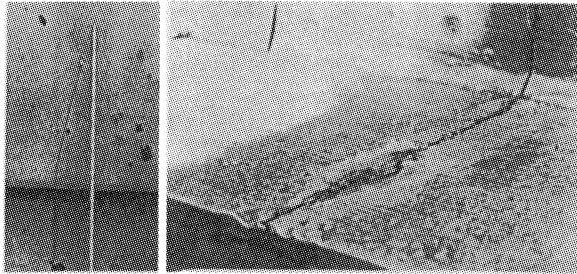
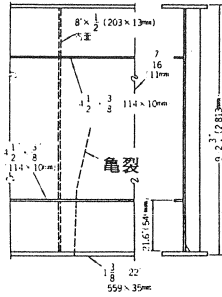
脆性亀裂はウェブを貫通して上フランジまで達している!



切り出された破面を筆で観察しているところ

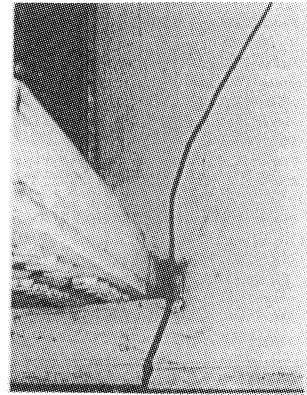
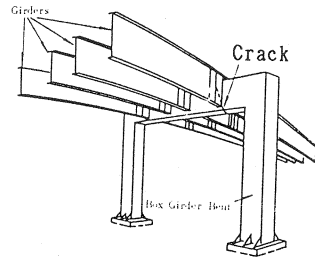
図-2. プレートガーダー橋下フランジ板継ぎ溶接部の融合不良から発生した疲労き裂

生の原因となる。図-6はこのような原因で生じた支点部ソールプレートの疲労損傷である。支点反力を分散させるために溶接により取り付けられたソールプレートの溶接前縁に沿って疲労き裂が生じる。



亀裂はウェブの中央 疲労亀裂が発生した水平補剛材突合わせ溶接部部まで達している

図-3. 装飾のための水平部材板継ぎ溶接部から発生した疲労き裂



疲労亀裂から脆性破壊に至っている

図-4. 桁交差部に生じた疲労き裂

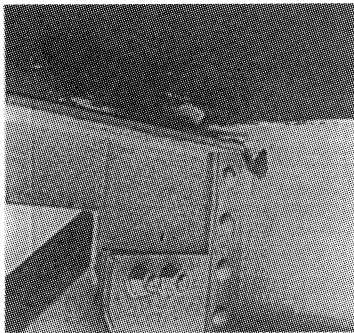
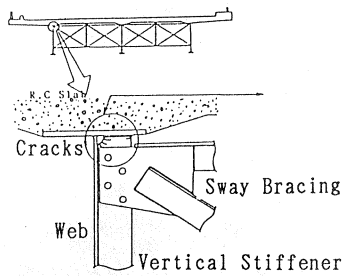


図-5. 対傾構を取り付けた垂直補剛材の上端部周辺に生じた疲労き裂

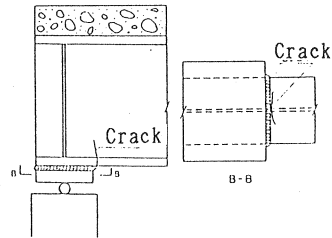


図-6. ソールプレート前縁の疲労き裂

図-7は桁端切り欠き部に発生した疲労損傷である。さまざまな理由で桁端を切り欠くことがある。また、ゲルバー桁の支持点でも同様である。切り欠いたことにより、その切り欠き部コーナーにはフランジ縁に沿った方向とそれに直交する方向の両成分の高い応力が生じ、疲労き裂の発生原因となる。はり理論で断面を決めその形に余り注意を払わないことの典型的な例であろう。

(3)設計時に想定しなかった外力

今までに橋で経験したものとしては、風による振動と、高速鉄道の通過による振動がある。ここではランガー桁の吊り材に生じた風による振動による疲労損傷を紹介しよう。

図-8にランガー桁に生じた損傷を示す。円形やH形など、鈍な断面に風をうけると、その後流にカルマン渦が発生し、それが部材に風とは直角方向の振動を励起する。振動が大きく、また支持点のディテールが不十分であると疲労損傷につながる。風により励起された振動は、短時間に多数回の応力繰り返しを生じる可能性が高く、疲労損傷も急速に進行する。同様な風による振動が斜張橋のケーブルにも生じる可能性がある。雨の時に生じるレインバイブレーションや、とくに2本組のケーブルの後流側乱流域に入ったときケーブルに生じるウェイクギャロッピングなど、十分な注意が必要である。

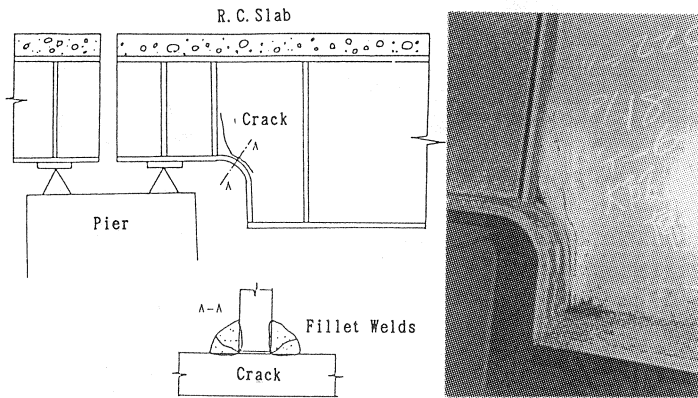


図-7. 桁端切欠き部に発生した疲労き裂

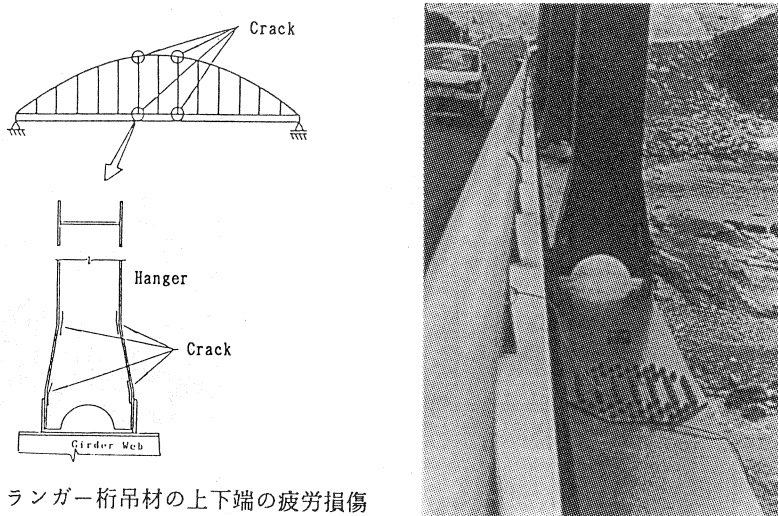


図-8. ランガー桁吊材の上下端の疲労損傷

経年劣化の問題を議論するときに、図-9のようなバスタブカーブがしばしば用いられる。使いはじめてしばらくは、いわゆる初期故障が生じる。それが終わると安定の時期がある。そして老化が始まる。筆者がみる限り、いままで経験したほとんどの疲労きれつは初期故障ではないだろうか。うまく直せば、安定状態に入ることができる。ところが、その対策が悪くてそこで寿命をつきさせている例もある。本当の寿命は十分な疲労設計を行い、それに対応した施工をやり、さらにメンテナンスをやってそれでも駄目になったときをさすのである。

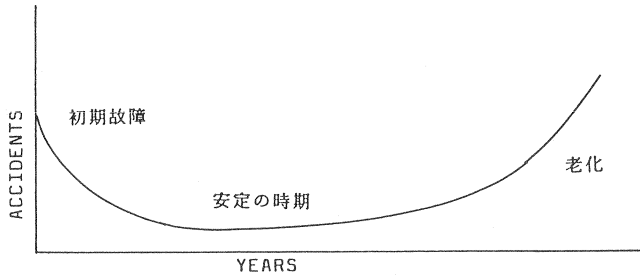


図-9. バスタブカーブ

3. 疲労制御設計

鋼構造物を対象にした疲労設計の基準類としては、日本鋼構造協会(JSSC)疲労設計指針(案)(1989年)⁶⁾と鉄道橋設計標準(1991年)がある。後者は前者をモデルとし、鉄道橋用として使いやすいように若干の変更を加えたものである。いずれも、公称応力範囲を基準としていること、溶接継手部直応力に対して8本、せん断応力に対して2本、ボルトやケーブルなどの非溶接継手に対して4本の設計曲線を用いていることなど同様である。図-10に設計曲線と継手分類の例を示す。

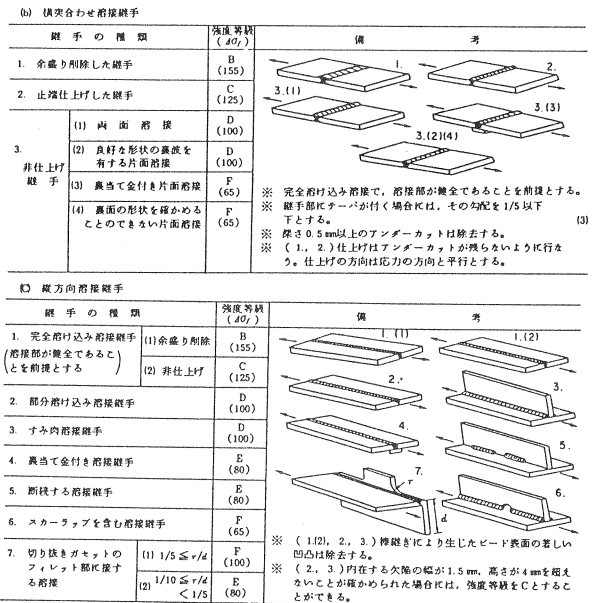
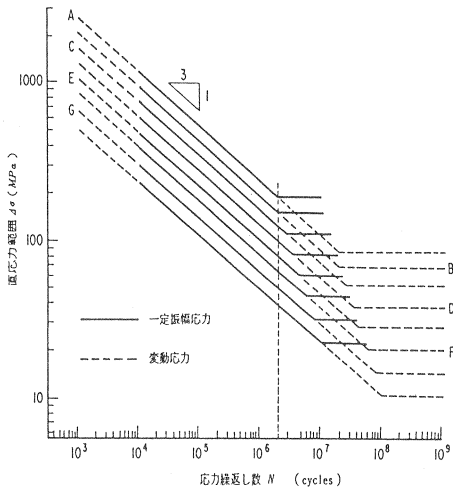


図-10. JSSC疲労設計指針(案)(1989)の設計曲線と継手分類の例

JSSCでは部分安全係数として、 γ_b 、 γ_w 、 γ_t の3つを用いている。

γ_b は冗長度係数であり、対象とする部材あるいは継ぎ手に疲労損傷が生じたときに、それが構造物全体の強度あるいは機能に及ぼす影響を考慮する係数である。1.00~1.10の値をとる。

γ_w は重要度係数であり、構造物が疲労限界に達したときの社会的影響を考慮する係数である。0.80~1.10とする。

γ_t はメンテナンス係数であり、メンテナンスの程度により0.90~1.10とする。

またすべての係数を乗じた値の下限と上限は0.80~1.25としている。

2の(1)で示したような問題については、たとえば板継ぎ溶接のような欠陥が影響するような継手は欠陥を所定のレベル以下となるようにすることが疲労設計の基本である。すなわち、疲労設計は施工での品質管理と一体となったものといえよう。2の(2)で示した問題は通常ディテールの改善で対処している。局部的に急激な剛性の変化が起きないようにする。応力集中を低減するなどです。

4、おわりに

いろいろ述べてきたが、構造物は人間と同じであり、使えば疲労するのである。英国溶接研究所のGurneyは、溶接構造物の損傷の90%は疲労に関係していると述べている。しかし、うまく使えば疲労はたまらないのも人間と同じである。もしも何らかの理由で損傷がでたら、早期発見、早期治療である。早期に発見する技術、また的確に対処する技術を確立していくことは、次から次に構造物を世の中に送り出している土木技術者の責務ではないだろうか。橋と、テレビや洗濯機や自動車やコンピュータとで、おかれている環境や社会的な責任などの違いを考えてほしい。橋が一度建設されると、それがいつか使えなくなることは誰も考えていないのである。橋があることを前提に社会が形づくられていくことを考えると、橋を使い捨ての製品にはならない。

参考文献

- 1) Miki, C., et al: Study on Estimation of Fatigue Strength of Notched Steel Members, Proc. of JSCE, No. 316, 1981-12.
- 2) J. W. Fisher 著, 阿部英彦・三木千寿監訳: 鋼橋の疲労と破壊, 建設図書
- 3) J. W. Fisher, 三木千寿: 米国の橋梁に生じた疲労被害例, 橋梁と基礎, 1982-10.
- 4) 土木学会、疲労変状調査小委員会: 鋼橋の疲労変状調査, 土木学会論文集, No. 368/1-5, 1986-4.
- 5) 日本鋼構造協会: 疲労設計指針(案), 1989-11.