

3-8 溶接構造物の疲労設計*

石川 敏之**, 金 裕哲***



石川 敏之



金 裕哲

Fatigue Design of Welded Structures*

by ISHIKAWA Toshiyuki** and KIM You-Chul***

キーワード 疲労設計, 鋼橋, 鋼床版, 疲労強度等級, T 荷重, 累積損傷度

1. はじめに

近年、鋼橋鋼床版に疲労き裂が多数発生していることが報告¹⁾されており、社会問題として顕在化してきている。鋼橋に疲労損傷が著しく増加していることを受け、2002年に改定された道路橋示方書・同解説²⁾に、鋼橋の設計に疲労設計が正式に取り入れられた。

ところで、溶接構造物に対する疲労設計の考え方は全て同じである。すなわち、作用荷重（道路橋では自動車荷重、鉄道橋では列車荷重、船舶では波浪荷重が各々対応する）と鋼材および溶接継手が有する疲労に対する特性値との大小関係によりき裂が生じるか否か、あるいは、疲労破壊するか否かが決まることになる。したがって、特性値よりも作用荷重が小さくなるように構造詳細も含め、設計するのが基本となる。

本稿では、鋼橋の疲労設計について紹介する。なお、鋼橋の疲労設計は、「鋼構造物の疲労設計指針・同解説³⁾」を基本としており、鋼材および溶接継手が有する疲労に対する特性値として、後述の疲労強度等級が用いられている。

2. 鋼橋の疲労設計の特徴

鋼橋では、2002年から道路橋示方書・同解説で疲労設計が導入された。鋼橋の疲労設計フローを図1に示す。図に示すように、構造計算で求められる応力と実際に生じる応力との関係が明確な場合には、応力による照査を行い、不明確な場合には、構造詳細による疲労照査が行われる。応

力による疲労照査は第3章で、構造詳細による疲労照査は第4章において、それぞれ説明する。ここでは、鋼橋の疲労設計に限定した規定について説明する。

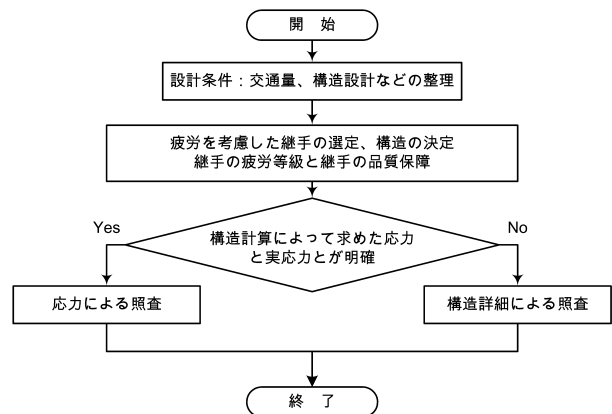


図1 鋼橋の疲労設計フロー

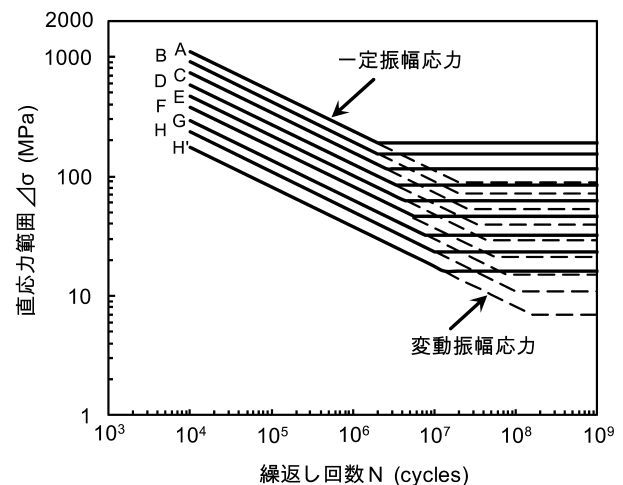


図2 鋼道路橋の疲労設計指針で与えられている疲労設計曲線

*原稿受付 平成22年5月11日

**正 員 京都大学 大学院工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, Kyoto University

***正 員 大阪大学 接合科学研究所 Member, JWRI, Osaka University

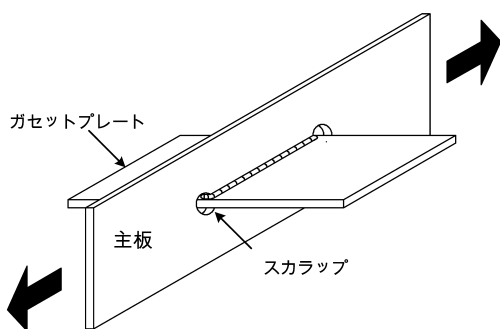


図3 主板にガセットを貫通させた継手

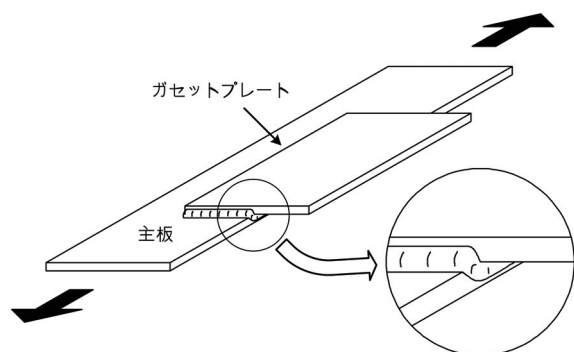


図4 重ねガセット継手

2.1 疲労強度等級

鋼道路橋の疲労設計指針⁴⁾では、「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」に記述されている疲労強度等級に加え、図2に示すように、疲労強度の低いH'等級(200万回基本許容応力範囲30MPa)が定められている。H'等級に該当する継手の種類は、図3に示すように主板にガセットプレートが貫通されている継手(完全溶け込み溶接にスカラップを伴う場合、あるいは、すみ肉溶接の場合)および図4に示すような重ねガセット継手(主板縁部でガセットプレート裏側へ廻し溶接された場合)である。

図3の構造は、横桁フランジを主桁ウェブに貫通させて溶接する場合に用いられる構造であり、スカラップの応力集中部に溶接止端が設けられるため、著しく疲労強度が低下する。2006年に一般報道された名阪国道(一般国道25号)の山添橋で発見された疲労き裂の発生箇所も主桁ウェブの横桁下フランジ貫通位置であった。山添橋では、図5に示すように、主桁ウェブのスリットに貫通された横桁フランジの片面のみが溶接された継手構造であり、図3の構造と同じく、疲労強度の著しく低い継手であった。

鋼道路橋の疲労設計指針では、「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」で与えられている幾つかの継手に対し、応力状態や溶接の仕方によって、疲労強度等級を詳細に分類している。そして、板厚効果や1980年代後半以降の疲労試験結果も反映させ、幾つかの溶接継手では、「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」よりも疲労強度等級が低く設定されている。

鋼橋の疲労設計では、これまでに疲労損傷が報告されている継手やそれに類似する継手を避けること、疲労強度等級が著しく低い継手(HおよびH'等級)や疲労強度

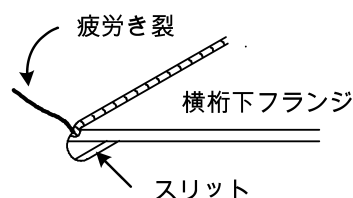


図5 山添橋の主桁ウェブの横桁フランジ貫通構造

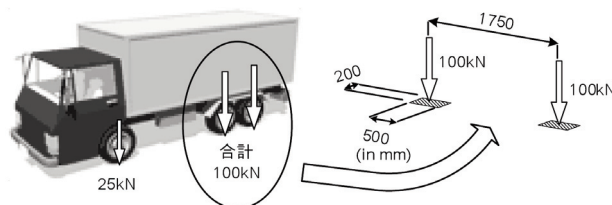


図6 T荷重

等級がE~G等級の継手など、溶接品質の確保が難しいと考えられる継手は使用しないのが望ましいとされている。

2.2 疲労設計荷重と疲労照査に用いる応力範囲

鋼橋を設計する際に用いられる荷重としては、T荷重(集中荷重)とL荷重(分布荷重)が「道路橋示方書・同解説」に規定されており、両者のうち不利な応力を与える荷重を用いて鋼橋は設計されるが、疲労設計に用いられている荷重は、T荷重である。なぜならば、L荷重は、鋼橋全体に分布荷重が载荷されている状態を想定しているため、疲労設計に対し、応力範囲が過大になってしまうからである。

道路橋の場合、図6に示すように、T荷重の大きさは、250kNの大型車(前輪1軸、後輪2軸)の後輪2軸の合計の分担荷重(片側100kN、合計200kN)である。合計一組のT荷重を車線の中央に載荷し、進行方向に移動させながら溶接継手に生じる変動応力を算出する。ただし、実橋においては、重量600kNを超える大型車の走行が確認されており、実働の荷重に合わせるため、変動応力に活荷重補正係数を乗じている。活荷重補正係数を乗ずることで、実働の荷重を考慮し、T荷重の3倍程度を対象に疲労設計されている。

なお、変動応力の算出には構造形式の違いなど種々考慮している。例えば、衝撃係数を乗じ、衝撃の影響なども考慮されている。

一方、疲労照査に用いる応力範囲の計数には、レインフロー法が用いられている。

3. 応力による疲労照査

鋼道路橋の疲労設計指針では、鋼上部工に対し、以下の3段階に分けて疲労安全性を確保している。

(1) 用いられる溶接継手や支間長、大型車交通量など勘案し、疲労き裂が発生しないと考えられる場合

疲労に対する安全性が確保されているとみなされる条件は、最小支間長が50m以上のコンクリート床版を有する鋼桁橋で、疲労強度等級A~Fに分類される継手が用い

られ、かつ、一方向一車線に対する一日の大型車交通量が1000台以下と定められている。

疲労強度と作用応力の繰返し回数から、疲労強度等級および大型車交通量が規定されている。一般的なコンクリート床版を有する鋼桁橋や箱桁橋では、「道路橋示方書・同解説」で規定される許容応力を満足するように設計された場合、支間が長くなると、鋼桁の断面が大きくなるため、許容応力範囲内に占める死荷重による応力の割合が大きくなる。したがって、疲労損傷に影響を及ぼす活荷重によって生じる応力の割合を抑制するため、支間長の長い橋が条件として設定されている。

(2) 疲労設計荷重によって生じる最大応力範囲が、一定振幅応力に対する打ち切り限界以下の場合

疲労に対する安全性が確保されているとみなされる条件は、疲労設計荷重に対し、疲労照査を行う継手に作用する公称応力範囲が、一定振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界 $\Delta\sigma_{ce}$ よりも小さい場合である。

一定振幅応力に対する打ち切り限界 $\Delta\sigma_{ce}$ は、一定振幅の繰返し応力作用下において、疲労き裂が発生しない限界の応力範囲であり、疲労試験から求められる。したがって、疲労設計荷重によって、継手に生じる公称応力範囲が $\Delta\sigma_{ce}$ よりも小さければ、疲労き裂は発生しないことになる。ただし、疲労照査においては、平均応力および板厚の影響を考慮している。

(3) 上記(2)を満足しないが、疲労安全性が確保される場合

疲労に対する安全性が確保されているとみなされる条件は、疲労寿命が、設計で考慮する期間（一般に100年）以上になる場合である。

変動振幅応力の最大応力範囲が一定振幅応力に対する打ち切り限界 $\Delta\sigma_{ce}$ を超えると、一定振幅応力下では存在していた打ち切り限界が存在しなくなる。このため、変動振幅応力に対する応力範囲の繰返し（ただし、変動振幅応力に対する打ち切り限界 $\Delta\sigma_{ce}$ よりも大きい応力範囲）に対して、各車線における累積損傷度 D が1.0以下となるように疲労照査が行われる。

累積損傷度 D の計算における、応力範囲頻度分布と疲労設計曲線との関係を図7に示す。

ところで、変動振幅応力の最大応力範囲が打ち切り限界 $\Delta\sigma_{ce}$ よりも大きい場合、一定振幅応力下では存在していた打ち切り限界 $\Delta\sigma_{ce}$ が見掛け上存在しなくなる。なぜなら

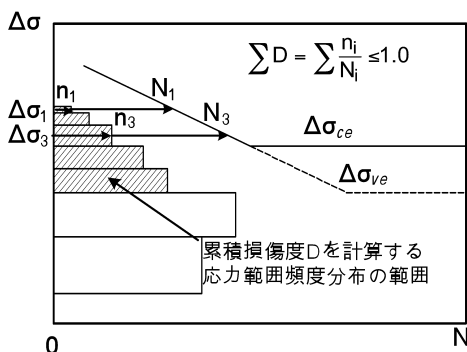


図7 応力範囲頻度分布と疲労設計曲線の関係

ば、作用する応力範囲が小さければ、き裂が存在していても、そのき裂は進展せず疲労破壊しない。したがって、き裂が進展しない限界の応力範囲は、一定振幅に対する打ち切り限界と同等であると考えられる。ただし、初期き裂が大きい場合、き裂が進展しない限界の応力範囲は低下する。一度、打ち切り限界を超えた応力範囲が作用すると、き裂は若干進展し、初期き裂よりも大きくなるため、き裂が進展しない限界の応力範囲も若干低下する。したがって、初期き裂に対する限界の応力範囲、すなわち、一定振幅に対する打ち切り限界 $\Delta\sigma_{ce}$ よりも小さな応力範囲の作用であっても一度 $\Delta\sigma_{ce}$ を超える変動応力が作用すると、き裂は進展することになる。

以上の理由により、鋼道路橋の場合、変動応力範囲の最大値が打ち切り限界 $\Delta\sigma_{ce}$ を超える場合を想定し、設計で考慮する期間内に疲労破壊しないよう、疲労設計が行われる。

4. 構造詳細による疲労照査

鋼道路橋の疲労設計指針では、設計計算から得られる応力範囲を用いた疲労安全性照査が困難な場合に対して、疲労耐久性が確保されているとみなされる構造詳細（鋼床版の構造詳細や溶接継手）を与えている。例えば、鋼床版を有する鋼橋において、以下に示す構造詳細を用いた場合、疲労耐久性が確保されているものとみなしてよいとしている。

(1) 閉断面リブとデッキプレートの溶接

閉断面リブとデッキプレートの縦方向溶接継手（図8）は、必要な厚を確保すると共に、リブ板厚の75%以上の溶け込み量を確保する。

(2) 縦リブと中間横リブまたは横桁の交差部

例えば、閉断面リブと横桁の交差部は、図9に示す構造を標準とし、閉断面リブとデッキプレートの縦方向溶接を連続させるために設けられる横桁のコーナーカット部には、埋戻し溶接を行うものとする。

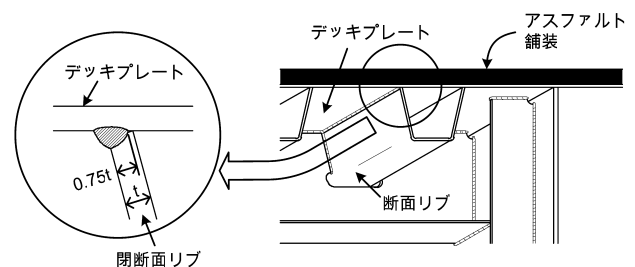


図8 閉断面リブとデッキプレートの溶接

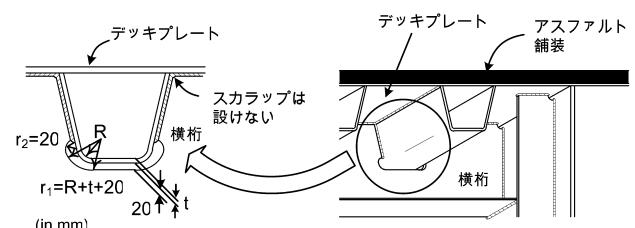


図9 閉断面リブと横桁の交差部

ところで、2000年以降、鋼床版の疲労損傷が顕著化し、その発生原因の解明や、発生を防止する方法の検討が盛んに行われている。その成果を受け、主桁の垂直補剛材上端をデッキプレートに溶接しない等、疲労対策が積極的に行われてきた。さらに、2009年12月の国土交通省の事務連絡では、鋼床版のデッキプレートの標準板厚を16mm以上とするなど、近年の疲労研究の成果が設計に反映され始めている。

5. まとめ

本稿では、鋼橋の疲労設計に限定し、現行の疲労設計についての考え方を解説した。詳細は鋼道路橋の疲労設計指針⁴⁾を参照して頂きたい。なお、第4章でも述べたように、2000年以降、鋼床版に多数の疲労き裂が発生していることを受け、その発生原因の究明や補修補強方法の開発が行われてきており、近い将来、これまで以上に疲労に強い構造詳細が規定されるものと考えている。

ところで、構造詳細を見直すばかりではなく、疲労き

裂を検知する技術、さらには、既に生じている疲労き裂が進展するか否かをモニタリングする技術が望まれる。この種の問題解決に向け、種々試みられているもの⁵⁾の、モニタリング範囲は局所的であり、橋梁一橋をモニタリングするなど、広範囲モニタリングの技術開発が急務である。これらが達成されれば、橋梁群の維持管理、さらには、補修補強の順位付けなどが可能となる。

最後に、本稿が鋼橋の疲労設計に対する理解の一助となれば幸甚である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：鋼橋の疲労，丸善（1997）.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I共通編，II鋼橋編，丸善（2002）.
- 3) (社)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技法堂出版（1993）.
- 4) (社)日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，丸善（2002）.
- 5) 溶接構造物の疲労健全性モニタリング（フォーラム），溶接学会全国大会講演概要集，第81集，pp.F1-F42（2007）.