

鋼道路橋の疲労設計

—疲労設計の導入による設計・構造イメージの変化—

FATIGUE DESIGN CONCEPT OF STEEL HIGHWAY BRIDGES

名取 暢*

Toru NATORI

ABSTRACT In the 1950's, welding began to be used as the most common method for fabrication. This had principal effects related to fatigue. For example, welding introduces a more severe initial crack situation than does rivets or bolting. Consequently, there were some examples of fatigue crack growth from welded details. So, it is proposed that fatigue design rules for steel highway bridges should be specified. The purpose of this paper is to provide the practicing engineer with the background required to understand and use the fatigue design concept of steel highway bridges.

KEYWORDS: 鋼道路橋、疲労破壊、疲労設計

steel highway bridges, fatigue cracking, fatigue design

1. はじめに

鋼部材に外力が繰返し作用すると、構造的な応力集中部、あるいは溶接形状や溶接欠陥などに起因する応力集中点からき裂が発生し、それが進展することがある。このような現象を疲労と呼んでいる。最終的には、き裂の進展に伴う断面減少により延性破断が生じたり、ある大きさにき裂が進展した段階で脆性的な破壊に移行したりし、部材あるいは上部構造の機能が損なわれることとなる。このようなことから、繰返し荷重の作用する鋼構造物においては、疲労を重要な限界状態の一つとして基準や指針が設けられている^{1)~4)}。

これまで、鋼道路橋においては、設計応力に占める活荷重応力の割合が小さく、またし荷重に相当する活荷重が載荷される頻度が小さいことから、鋼床版を除いて一般には活荷重による疲労の影響を考慮しなくてもよいとされてきた。しかし、既設橋においては、車両の大型化や交通量の増加および供用年数の増加に伴い、主要部材と二次部材の溶接接合部や主要部材でも特殊構造部位などに疲労損傷の発生が報告されている^{5)~7)}。このような部位での損傷の多くは、設計上想定していなかった二次応力や応力集中の発生、部材接合条件に対する設計仮定と実構造との相異などが原因で生じており、通常の設計計算で対象とするような主要部材の一次応力が直接的な原因の損傷例は現在までのところ報告されていない。しかし、溶接構造や高張力鋼材が本格的に取り入れられ、それらが標準仕様の橋梁として建設、供用されてから30年程度しか経過していないことを考えれば、今後、供用年数の増加に伴い、一次応力による疲労損傷が現れてくる可能性は否定できない。

したがって、既設橋梁に対しての疲労安全性を確保するための維持管理が重要であることは言うまでもないが、今後、新設される橋梁においては、将来における維持管理費や架替費用の低減を図る上

*(株)横河メンテック 技術第1部 次長 (〒273-0026 船橋市山野町27番地)

からも疲労耐久性の確保を考慮した計画、設計、施工が必要不可欠であると考えられる。また、最近、性能設計あるいは性能照査型規定について検討、議論が行われているが、耐久性は橋梁に要求される性能の中でも最も重要な項目の一つであり、鋼部材における耐疲労性の確保は基本的な要求事項と位置づけられる。

このようなことから、鋼道路橋の設計に疲労設計を導入することの検討が日本道路協会（鋼橋小委員会：鋼橋疲労設計W.G）において進められている。本報告は、疲労設計W.Gでの検討内容を参考として、鋼道路橋に疲労設計を導入する際の基本的な考え方、疲労照査の内容および鋼鈑桁橋を対象に試設計を行った結果などについて報告するものである。

2. 鋼道路橋における疲労損傷事例^{5)~7)}

交通条件の厳しい鋼道路橋では、1980年頃から局所的な応力集中に起因する疲労損傷が発見されるようになってきた。こうした鋼道路橋における疲労は、当初下路ランガー橋の吊材、プレートガーダーの桁端切欠き部などで報告されており、特定の橋梁形式の構造詳細に特有の損傷であると考えられていた。しかし、最近では、一般的な橋梁形式の標準的な細部構造に同種の疲労き裂が多数発見されたり、二次的部位に生じたき裂が主要部材に進展したり、あるいは主要部材の引張応力作用部位に製作時の欠陥からき裂の生じた事例も報告されている。

表-1にこれまで報告されている疲労損傷事例を示すが、これらのき裂に関する特徴は以下のようである。

- ①プレートガーダーでは、対傾構、横桁と主桁との接合部や桁端の切欠き部、ソールプレート溶接部などにき裂の発生が見られる。
- ②アーチ、トラス橋では、補剛桁あるいはトラス弦材と横桁との接合部、縦桁と横桁（床桁）の接合部やアーチ橋の垂直材上下端の接合部にき裂の発生が見られる。
- ③鋼床版では、輪荷重の走行位置直下の溶接部（垂直補剛材とデッキプレートとの溶接部、横リブと縦リブの交差部など）にき裂の発生が見られる。

これらの疲労損傷は主として橋梁の二次的な部材や構造細部に生じたものであり、損傷の原因となる応力も設計時のモデル化で無視される二次応力であることが多い。したがって、き裂の発生は直ちに橋梁の安全性を脅かすものではないが、発生位置やその近傍の応力状態によってはき裂が主要部材に進展し、部材の機能を損なう危険性がある。この種のき裂への対策は、構造詳細を改良して二次応力の発生を低減させる、あるいは疲労強度の高い継手形式を採用するなどであるが、疲労においては、局所的な応力の繰返しが支配的であり、一般的な静的耐荷力に対する常識、例えば平均的な応力（公称応力と呼ばれる）による評価があまり意味をなさないことが多い。また、材料強度についても材料強度が高ければ部材の強度も高くなるとの考えが疲労の場合には通用しない。溶接部のようにその形状自体に起因する応力集中が存在するような場合には、疲労強度は材料の静的強度にほとんど関係なく一定となり、むしろ、溶接継手の形式に強度が大きく左右される。このようなことから、二次応力による疲労に対し設計段階で対処するには、経験に基づく構造詳細の採用や過去における損傷部の補強対策のフィードバックなどが重要な要因となる。

疲労損傷の中で、最も危険なものは主要部材の一次応力による損傷であるが、これまで主構造部材に設計で配慮した一次応力に起因する損傷が生じた例は少ない。しかし、疲労に対してより敏感な溶接構造や活荷重応力の比率が高く、より疲労に対して厳しいと考えられる高張力鋼材が本格的に取り入れられ、それらが標準仕様の橋梁として建設、供用されてからまだ30年程度しか経過していないことや、一次応力による疲労寿命の大半が検出困難な微小なき裂の長期進展過程で占められていることなどを考えれば、今後、供用年数の増加、橋梁の高齢化が進むにつれ、一次応力による疲労損傷が現れてくる可能性は否定できない。主要部材の引張応力が繰返し作用する領域でのき裂の発生は、その長さと引張応力の大きさが一定の条件を満たすと一気に脆性的な破壊を引き起こすことにつながる。

表-1 既存の疲労損傷事例⁵⁾

| 形 式 | 着 目 部 位 | 損 傷 篠 所 |
|------------------------|---------|--|
| I げた 箱げた (RC 床版) | I げた | 主げた端部 |
| | | 横構ガセットプレート |
| | | 垂直補剛材、対傾構 ガセット、横げた端部 |
| | | 端横げた端部 |
| | | 枝げた |
| | | 下フランジ板継ぎ部 |
| | 共 通 | ソールプレート |
| アーチ、 トラス | 上路アーチ | 垂直材端部 |
| | | 補剛げた端部 |
| | 中路アーチ | アーチリブウェブ |
| | 下路アーチ | 吊材 |
| | 共通(床組) | 横げた、端横げた端部 |
| | | 縦げた端部 |
| | | 端横げた |
| | | 縦リブ |
| 鋼床版橋 | 鋼床版部 | 横リブ |
| | | 縦リブ(U リブ)どうしの突合せ溶接部 |
| | | デッキプレートと縦リブ(U リブ)の溶接部 |
| | | 端横リブ、ダイヤフラムと縦リブの端部のすみ肉溶接部 支点上ダイヤフラム垂直補剛材と縦リブの溶接部 |
| | | 横リブウェブと縦リブとの交差部 |
| | 箱げた部 | 端横リブと垂直補剛材との溶接部 |
| | | デッキプレートと垂直補剛材との溶接部 |
| | ゲルバーヒンジ | ダイヤフラム等隅角部 |
| | | 円弧状フランジを有するゲルバーヒンジ |
| | 吊 橋 | ハンガー定着部材 |
| | 橋 脚 | T型橋脚隅角部 |
| 付 属 物 | 標 識 柱 | 標識柱とその取付け部 |
| | 吊 金 具 | 吊金具の取付け部 |
| | | ①下フランジと切り欠いたウェブとの溶接部 ②支点上横構ガセットプレート取付部 ③対傾構、横げたの取付け垂直補剛材上端溶接部 対傾構弦材取付けガセットの溶接部、横げた端部 リベット孔部、横げたフランジの貫通部 ④端横げたの端部、支点上垂直補剛材の上下端溶接部 ⑤主げたとの溶接部、横げたとの連結部(リベット孔) ⑥下フランジ板継ぎ部の突合せ溶接部 ⑦支承ソールプレートの溶接部 ⑧垂直材の上下端の接合部 ⑨端支柱上の補剛げたの端部 ⑩アーチリブウェブと横げた接合部 ⑪吊材の上下端の接合部 ⑫横げたの端部(横げたウェブ面内力に起因) ⑬端横げたおよび横げたの端部(横げたウェブ面外力に起因) ⑭縦げた、補強縦げた端部 ⑮端横げたウェブと縦げたの接合部(横げたウェブ面外力に起因) ⑯縦リブ(U リブ)どうしの突合せ溶接部 ⑰デッキプレートと縦リブ(U リブ)の溶接部 ⑱端横リブ、ダイヤフラムと縦リブの端部のすみ肉溶接部 支点上ダイヤフラム垂直補剛材と縦リブの溶接部 ⑲横リブウェブと縦リブとの交差部 ⑳デッキプレートとの溶接部(現場継手部による 切欠き部) ㉑デッキプレートと垂直補剛材との溶接部 ㉒ダイヤフラム隅角部の溶接部 横リブと垂直補剛材、ガセットの溶接部 ㉓コーナープレートと下フランジ、ダイヤフラム の溶接部 ㉔下フランジと切り欠いたウェブとの溶接部 I 断面(I げた、上路アーチ側径間), 箱断面(トラス) ㉕ハンガーを補剛げたに定着する吊ボルト ㉖柱とはりの溶接部 ㉗箱げたウェブと標識柱基部および柱分岐部の溶 接部 ㉘I げた橋外げた吊金具取付け溶接部 |

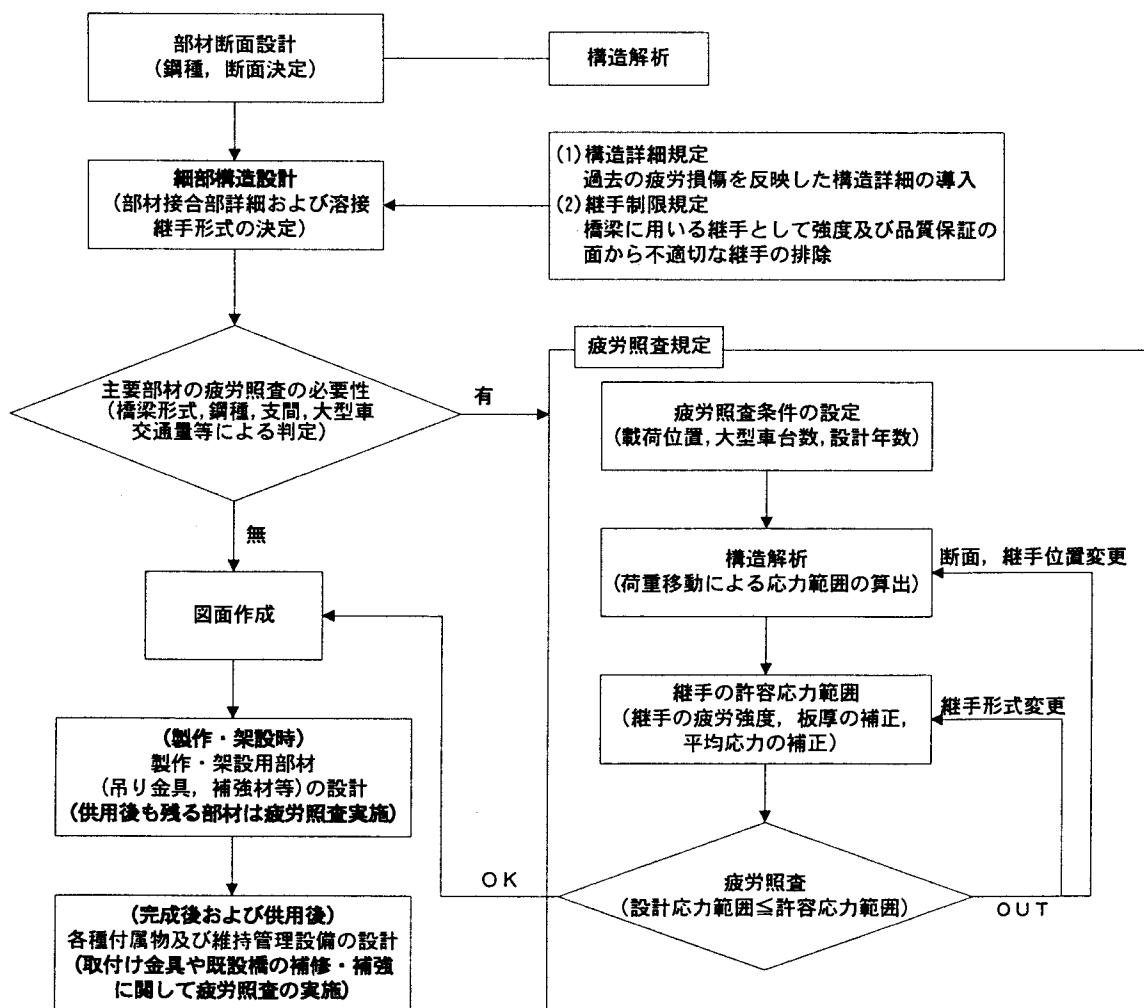
したがって、一次応力による疲労を防止することは重要であるが、後述するように一次応力に起因する疲労の対しては、構造解析と既存の試験データに基づく疲労設計により対処が可能であり、疲労設計の導入と適切な実施は、橋梁の疲労耐久性、長期安全性を確保する上で必要不可欠な要因であるといえる。

3. 疲労設計の基本的な考え方

鋼道路橋に対する疲労設計の基本的な考え方は以下のようである。また、現状の橋梁設計フローの各段階に基本的な考え方を導入した場合のプロセスを図-1に示す。

- ①過去に疲労損傷の生じた構造詳細については、損傷事例や補強事例を反映し細部構造の改善を行う。
- ②主要部材の継手として疲労強度の低い継手、溶接部の品質管理・品質保証が難しい継手を極力排除する。また、疲労強度の不明な新しい継手を採用する場合には、溶接残留応力などの内部応力の影響を含め実橋の応力状態を再現しうる大型供試体による疲労試験を実施し、その強度を確認する。
- ③上記①、②を行った上で、一次応力に支配される主要部材中の継手に関しては、交通車両の走行により生じる応力変動と疲労試験から求まる疲労強度を用いて疲労照査を実施する。
また、疲労設計の前提条件として、以下のような項目が考えられる。
- ④製作・架設においては、設計で想定した継手の疲労強度を確保しうる品質管理を実施する。
- ⑤製作、架設時に補強材や吊り金具などを設置する場合は、設計で想定していないような継手を使用しない、あるいは完成後も残置される部材の継手部に対しては、疲労設計を実施する。
- ⑥供用後における付属物の設置、各種の補修・補強においても設置部材の継手部に対して疲労設計を実施する。

一般に、疲労設計と言うと③における部材中の各種継手を対象とした疲労照査（応力度照査）をイメージするが疲労設計の基本は①、②であると行っても過言ではない。前節で述べたように過去にお



図—1 疲労設計を導入した場合の設計プロセスのイメージ

ける疲労損傷の多くは、通常の設計では計算対象外の部位に二次的な応力集中が原因で生じている。まずはこれらの損傷に配慮した構造詳細を採用することが重要であり、このことが疲労設計の第一歩と言える。次に、主要部材における疲労安全性を確保するには、疲労の観点から疲労強度の高い継手を選定する、あるいは疲労強度の低い継手を排除することが重要である。静的荷重の伝達機能の面からは同様の継手であっても疲労の観点からは強度の異なる場合がある。図-2はその事例としてガセットプレートの取付け継手（ガセット溶接継手と呼ぶ）を示したものである¹⁾。鋼橋においては、主桁間に横桁、対傾構、横構部材が配置される。これら部材と主桁との接合はガセットプレートを介して行われることが多い。ガセットプレートをフランジコバ面に取付けるとその継手は面内ガセット継手に分類され、ウェブ面に取付けると面外ガセット継手となる。また、フランジ表面に取り付けると重ねガセット継手となり、それぞれ疲労強度等級が異なる。また、同種の継手でも溶接端部の仕上げ処理の有無やフィレット形状の有無で等級が異なっている。最も疲労強度等級の高いものはE等級（100MPa）であり、最も低い等級はH等級（40MPa）とE等級強度の半分以下の強度となっている。

| 継手の種類 | | 強度等級 ($\Delta\sigma_f$) | 備考 |
|--------|---|---|--|
| 面外ガセット | 1. ガセットをすみ肉あるいは開先溶接した継手 ($l \leq 100$ mm) | (1) 止端仕上げ E (80) (2) 非仕上げ F (65) | 1., 3., 4. |
| | 2. フィレットを有するガセットを開先溶接した継手（フィレット部仕上げ） | E (80) | 2. $r \geq 40$ mm |
| | 3. ガセットをすみ肉溶接した継手 ($l > 100$ mm) | G (50) | |
| 面内ガセット | 4. ガセットを開先溶接した継手 ($l > 100$ mm) | (1) 止端仕上げ F (65) (2) 非仕上げ G (50) | 5. 6. |
| | 5. フィレットを有するガセットを開先溶接した継手（フィレット部仕上げ） | (1) $1/3 \leq r/d$ D (100) (2) $1/5 \leq r/d < 1/3$ E (80) (3) $1/10 \leq r/d < 1/5$ F (65) | 7. |
| 重ねガセット | 6. ガセットを開先溶接した継手 | (1) 止端仕上げ G (50) (2) 非仕上げ H (40) | ※ (1.(1), 2., 4.(1), 5., 6.(1)) 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とする。 ※ (1.(2), 3., 4.(2), 6.(2), 7.) 深さ 0.5 mm 以上のアンダーカットは除去する。 |
| | 7. 重ねガセット継手の母材 | H (40) | |

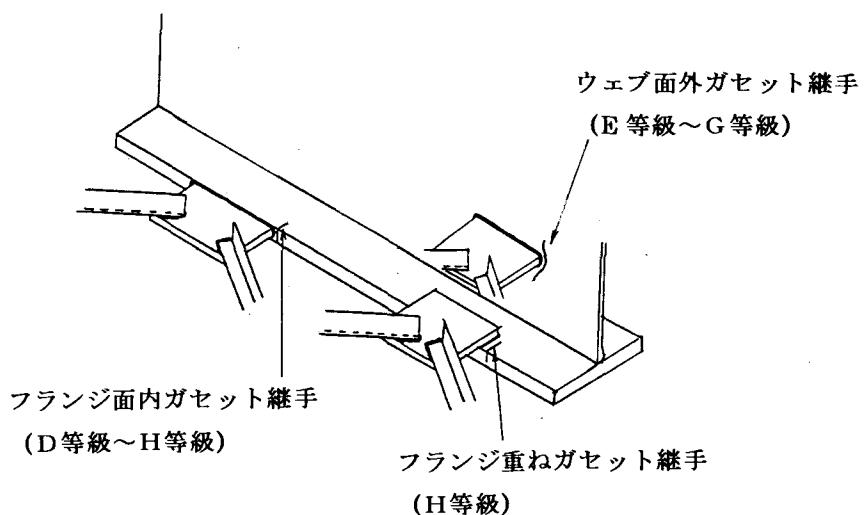


図-2 ガセット継手の疲労強度等級例¹⁾

したがって、設計時において具体的にどのような継手を用いるのかを明確にする、また、製作へ設計の意図するところを十分に伝達することが疲労設計では重要であり、反面、継手選定上の配慮で十分に耐疲労性に優れた構造の設計が可能であるともいえる。

製作時における溶接部の品質保証は疲労設計では必要不可欠の要因である。継手の強度等級に応じた許容欠陥の設定とそれを保証する溶接施工および品質検査がなされて初めて疲労設計が成り立つといえる。また、設計段階では考慮していなかった吊金具や各種補強材を製作および架設段階で設置することがあるが、疲労の観点からは、このような部材の接合も本体構造物の接合と同等であり、疲労設計の対象となる。さらに、供用後における各種付属物の添加や補修・補強においても同様であることは言うまでもない。

4. 疲労照査方法

主要部材中の各継手に対する疲労照査を行う上で最も重要なものは、一つは、作用外力（一般的には車両重量）の大きさと頻度（交通量）、それらによって生じる応力の変動範囲と繰返し回数であり、もう一つは、対象とする部材、継手部の強度である。図一1中に疲労照査の流れを例示した。基本的には従来の部材断面設計において決定された断面諸値に対して、疲労照査条件を設定し、構造解析により算出された応力範囲（車両の移動載荷による応力範囲）が継手の許容応力範囲を満足しているかどうかを照査するものである。照査の結果、満足されない場合には、条件を変えて再度、照査を実施することになるが、疲労照査の場合には、断面の変更を検討する前に、前節で述べたようにまずは、より疲労強度の高い継手形式に変更し許容応力範囲を高める、あるいは作用応力のより小さい部位に継手位置を変更する（橋軸方向、あるいは腹板の高さ方向に変更する）などの方策で対処が可能であり、かならずしも断面の変更が有効とは言えない。むしろ、このような対処が疲労照査の基本であり、やみくもに板厚を増加させる、断面を大きくするなどの対処は得策でないと言える。

以下に、疲労照査を行う上での主要な要素について概説する。

(1) 設計供用年数

疲労設計を行う上で、設計寿命あるいは設計供用年数に対応するものを規定することは必要不可欠である。日本の鉄道橋では、在来鉄道で60年、新幹線では70年を標準としており²⁾、本州四国連絡橋においては100年を想定している。また、アメリカのAASHTOでは、設計上長期的な検討を行う場合の期間として75年を想定している³⁾。日本の鋼道路橋の設計寿命、設計供用年数としてどの程度を考慮すれば良いかについては、疲労のみならず、LCCの考えを含め種々議論する余地があると思われるが、いずれにしても、設計寿命あるいは設計供用年数が経過した後に使用不能となり架替えを行うことを前提とした設定には無理があるようと思われ、このような観点から100年オーダーの十分に長い供用期間を想定した設定が必要と考える。

なお、設計供用年数として100年あるいはそれ以上の年数を想定した場合、現状の設計に比して過度な構造となることが危惧される。しかし、疲労現象そのものは座屈などと違い徐々に損傷が進行するものであり、通常の維持管理においてその進行を確認する、進行に対処することが十分に可能であることから、作用荷重あるいは継手強度に対する安全率の設定に際して過度に安全側にならないような配慮を行うことが必要と思われる。

(2) 疲労設計荷重とその頻度

現行の道路橋示方書での設計活荷重は終局状態を対象としたものであり、長い期間の交通荷重により繰返し生じる応力の変動とその繰返し回数に依存する疲労限界状態については別の観点から、それを照査するための荷重を検討する必要がある。

AASHTO (LRFD: 限界状態設計法に基づく道路橋設計基準) では、疲労を一つの限界状態と考え、設計自動車荷重1台が通過する際の応力範囲を設計応力範囲として用いている³⁾。これは、アメリカの高速道路での大型車の同時載荷の機会が少ないため、疲労は1台のトラックのみで評価すべきであるとの理由によっている。イギリスの鋼橋の設計基準であるB.S.5400では3段階の疲労照査法

を示しているが、その中で疲労設計用のトラック荷重を設定している。また、ユーロコード案では、疲労照査用の荷重として、5つの荷重モデルを設けている。

わが国においても疲労設計用の活荷重モデルに関しては種々の検討がなされてきている^{8)~10)}。三木らはコンピュータシミュレーションや交通荷重の実態調査などにより道路橋の疲労照査を行う場合の活荷重について検討を行っている。それらの研究を通じて、疲労設計のための活荷重として道路橋示方書のL荷重をそのまま用いることには実橋での大型車の載荷状態から考えて適切でないこと、しかしわが国の幹線道路ではかなりの時間帯において大型車の混入率が50%を越えるため、大型車の同時載荷の影響は、それほど大きくはないが無視できないこと、疲労に対する厳しさはおおよそ大型車の通行台数で評価できることなどが明らかにされてきた。また、全く新しい荷重を設定することはいたずらに設計を煩雑にするだけで好ましくないことから、疲労検討用荷重としては、旧道路橋示方書でのT-20荷重を基準に考えればよいとの提案もなされている²⁾。

このように、疲労設計においては、過度に重たい、極まれにしか通行しない車両荷重を設計荷重として設定する必要はなく、疲労に影響を及ぼす通常の交通荷重に近い載荷状態を考えた設計荷重の設定、あるいは設計荷重の走行による疲労損傷度と想定される通常の車両交通による損傷度ができるだけ等価となるような設定が好ましいと考えられる。このような観点からすると現行道路橋示方書で規定されているT荷重を基本として、実交通流、実車両との違いの影響や大型車の同時載荷の影響を考慮してT荷重を補正することにより設計荷重を算出する方法が適しているとも言える。図-3は、T荷重を設計荷重として用いた場合の補正係数（同時載荷およびT荷重と実車両との違いの影響に対しての補正係数）について検討した事例である。影響線の基線長が40m以下の場合には、T荷重（集中荷重）と実車両の違いにより補正係数は1.0以下となり、基線長が長くなるに従い、同時載荷の影響が大きくなり最大1.1程度の補正係数に収束する結果となっている。

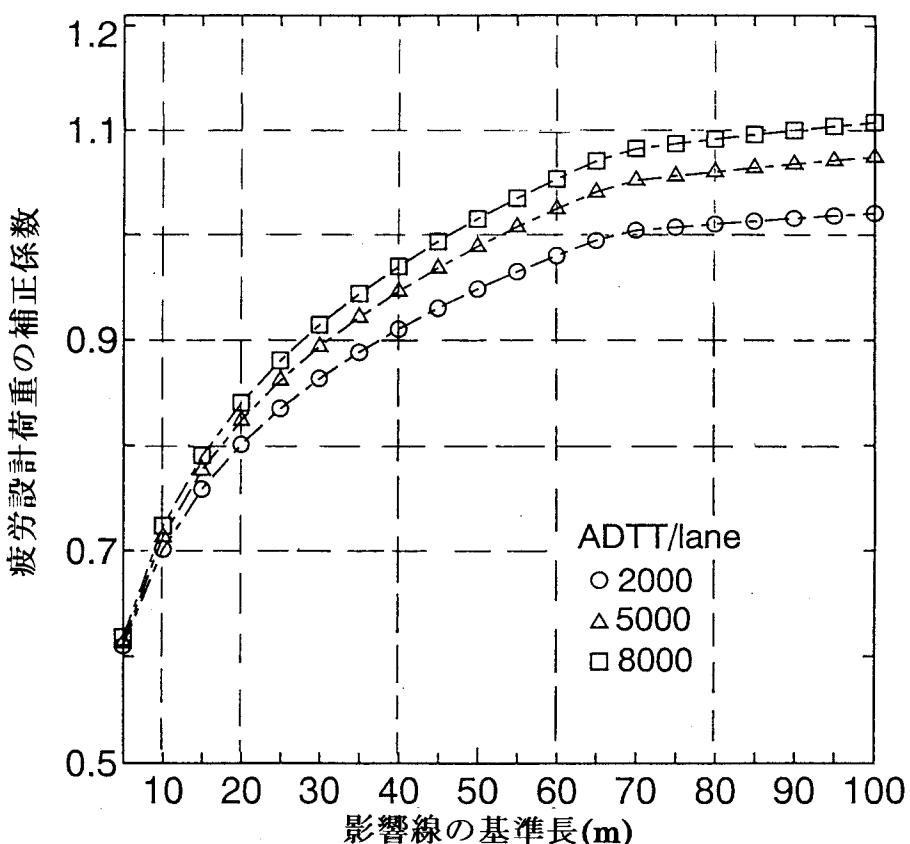


図-3 T荷重の補正係数に関する試算結果例
(森法政大教授の作成資料より)

なお、走行頻度については、乗用車などの小型車により生じる応力変動はダンプトラックなどの大型車に比べて小さくなるため、疲労設計荷重の頻度を大型車の走行頻度とすることが考えられる。

(3) 作用応力範囲の算出

上記の設計荷重を橋上に載荷させ着目部位に生じる応力範囲を格子解析などの構造解析により求めることとなるが、荷重の載荷位置については、各車線の標準的な走行位置に載荷すればよく、着目部位が最も不利となるような載荷状態を設定する必要はない。また、溶接部の疲労では、応力の絶対値より、その振幅（応力範囲）が重要であることから、橋軸方向に移動させて応力変動を求めることが必要である。なお、疲労の照査に用いる応力は、照査する断面における公称的な一次応力であり、局所的な切欠きや溶接ビードなどによる応力集中は含まないものである。

ところで、供用中の自動車荷重によって実際に橋梁に生じる応力は格子解析に基づく計算応力と異なる場合があり、主要部材においては、一般的に実応力は計算応力に比べて小さい。図-4は、実橋の載荷実験を行い、主桁に発生する実応力とその荷重載荷状態に対応した計算値とを比較したものである。実測値と計算値との比を実応力比と呼ぶが、一般に設計で用いられる格子解析に基づいた計算値に比べ実測値は0.5～0.8程度の値となっている。疲労は供用下での実応力によりそのダメージが蓄積されている現象であることから、その照査において重要なことは、実橋に生じるであろう応力を如何に正確に評価し得るかである。したがって、応力計算に際しては、実挙動を適切に評価できる計算モデルおよび解析法を用いることが基本であり、設計計算応力が実際の応力と異なることが明らかであるような場合には、適切に補正することが過度に安全側の設計とならないためにも必要である。

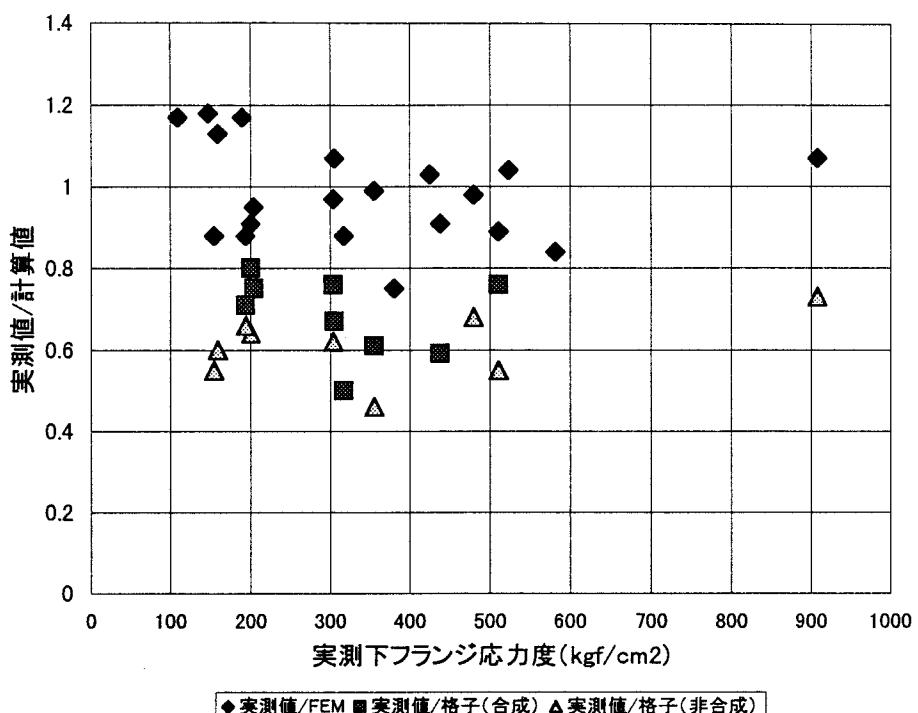


図-4 鋼桁橋の下フランジ応力に関する実測値と計算値との比較

(4) 継手の疲労強度

各種継手の疲労強度は、き裂発生部の応力集中の程度とき裂の進展する断面での応力分布に支配される。一般には継手の種類によりその度合いが異なることから、各種設計基準においては、継手形式毎に疲労強度（一般には $\Delta \sigma - N$ 関係として）が示されている。例えば、日本鋼構造協会の「溶接構造物の疲労設計指針・同解説」では以下のようである。対象とする継手の強度を考慮して、8つの Δ

σ -N曲線（強度等級 A~H）を設定しており、対象とする継手の疲労強度が過去における疲労試験結果からどの強度等級に対応するかを検討して、継手の強度等級を定めている。すなわち、疲労試験結果における疲労強度の下限あるいは非超過確率 97.7%の疲労強度と A~H の $\Delta \sigma$ -N 関係を比較し、最も近い関係をその継手の強度として分類している。ここで重要なことは前述したように同様な継手形式であっても、その細部の違いにより継手強度が異なることであり、設計においては、それら強度の違いについて十分に認識することが必要となる。例えば、下フランジと縦リブとのすみ肉溶接は D 等級(100MPa)に分類され比較的に疲労強度の高い継手であるが、部材添接部において縦リブを断続させた場合には、その断続点で疲労強度が決定され、強度等級は D 等級から一気に G 等級(50Mpa : 面外ガセット継手)に低下してしまうこととなる。一般的には、形状の変化が大きく、高い応力集中が生じると考えられる継手ほど低い疲労強度が与えられている。

5. 疲労照査事例

鋼鈑桁橋を対象として疲労照査を行った結果を以下に述べる。対象とした鈑桁橋の断面一般図を図-5に示す。道路橋示方書・同解説（平成8年）および建設省鋼道路橋設計ガイドライン（平成7年10月）に従い設計された橋梁である。なお、ここに示した照査結果は、下記に示す条件の設定内容により異なることから、結果の評価に際しては、定性的な比較検討にとどめることが必要である。

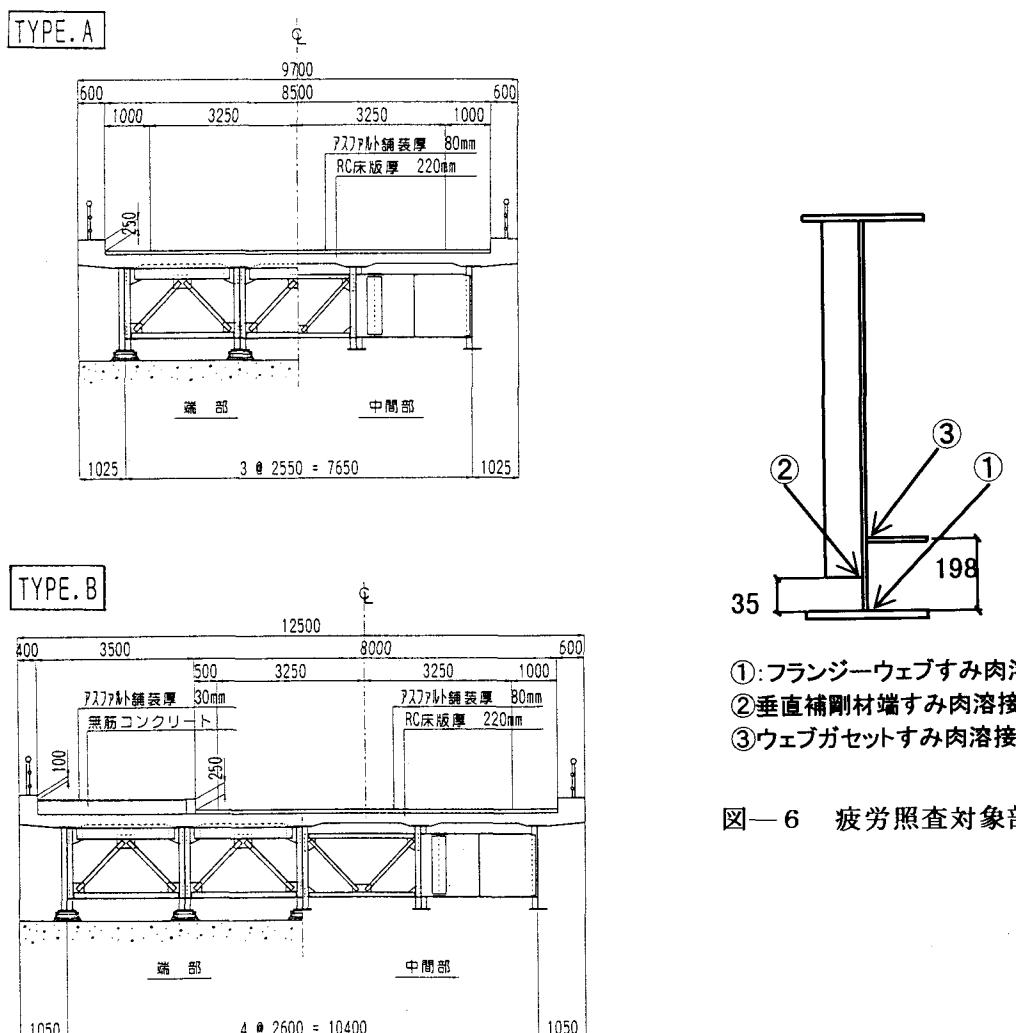


図-6 疲労照査対象部位

図-5 疲労照査で対象とした鈑桁橋の断面図

【照査条件】

- ①設計荷重については現行道路橋示方書に規定されているT荷重を用いた。
- ②設計供用年数を100年と設定した。また大型車の交通量を3000台/日・レーンと仮定した。
- ③照査対象部位としては、鋼桁橋に一般的に用いられている継手として、ウェブーフランジのすみ肉溶接（縦すみ肉溶接継手：D等級）、垂直補剛材のすみ肉溶接（リブ十字すみ肉溶接継手：E等級）、ウェブガセットプレート溶接（面外ガセット継手：G等級）の3つの部位（図-6参照）を取り上げた。また、支間中央にそれら継手が存在する場合を想定した。
- ④補正係数に関しては、荷重項に係わる係数として衝撃係数を（現行道路橋示方書に規定されている係数の1/2）を考慮するとともに、同時載荷の影響を考慮し、最大値として1.1の補正係数を設定した。また、作用応力範囲（等価応力範囲）については、構造解析係数（計算応力と実応力との比）を0.75、0.8、0.85、0.90の4種類に設定して算出した。
- ⑤継手の疲労強度等級は、日本鋼構造協会の「溶接構造物の疲労設計指針・同解説」に示されている等級分類に従い、疲労設計曲線における打ち切り限界（変動応力作用下での打ち切り限界）については考慮しないこととした。

（1）支間の違いによる影響と疲労に厳しい部位

図-7に単純合成鋼桁および単純非合成鋼桁に対する照査結果を示す。図中には照査で対象とした各継手の許容応力範囲を併記した。いずれの継手部においても支間の短い場合においてより疲労に厳しい結果となっており、短支間の橋梁について特に疲労耐久性への配慮が必要であることを示している。また、ウェブガセット継手部が最も疲労に厳しい部位であり、この部位における疲労安全性の確保が重要であると言える。

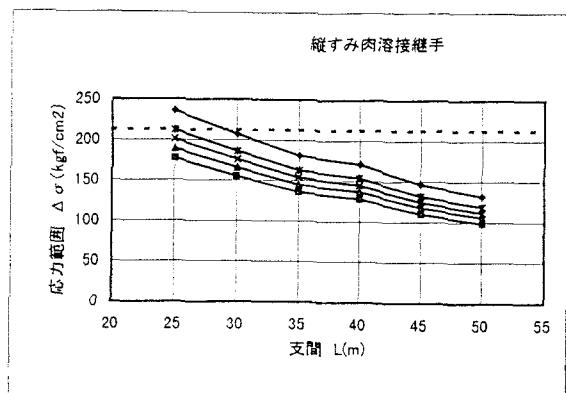
（2）橋梁形式および使用鋼材の違いによる影響

図-8は単純鋼桁と3径間連続非合成鋼桁のウェブガセット継手部に関して、使用鋼種をSM400材とした場合とSM490Y材とした場合の照査結果を比較検討したものである。図中の縦軸は、活荷重（B活荷重）応力度と死荷重応力度との比（活荷重応力/死荷重応力）を表したものである。また、照査の結果、okとなったケースを□で囲った。支間が短くなるに従い、活荷重応力比が大きくなり、疲労に対してより厳しい状況にあると言える。また、単純桁の場合と連続桁の場合を比較すると連続桁の場合の活荷重応力比は単純桁の場合より大きく、それに伴い疲労に対しの厳しさが増加している。使用材質の違いに関しては、疲労強度が材質によらず一定であることから、強度の低い材料を使用した方が疲労に対しては有利である結果となっている。

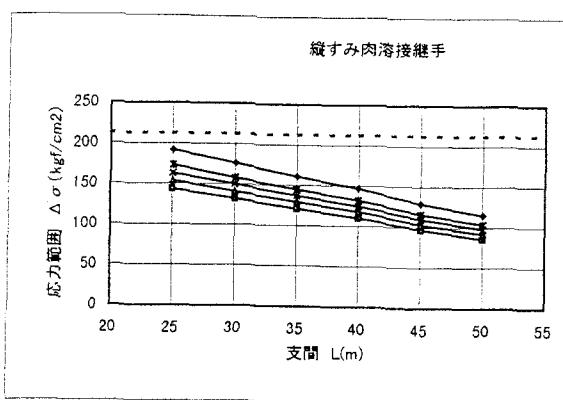
（3）2主鋼桁橋に対する照査結果

図-9に示すPC床版を有する5径間連続2主鋼桁橋に対しての疲労照査結果を図-10に示す。照査対象部位での使用鋼種はSM570材である。なお、2主鋼桁における疲労照査部位は前述した多主桁の場合と同様の3箇所であるが、その内、ウェブガセットプレートの取付け位置に関しては、横桁との取合いから下フランジ上面より900mmの位置とした。2主鋼桁橋における照査結果は図-7との比較において明らかのように、多主桁の場合に比べ疲労に対して優位な結果となっている。疲労設計荷重（基本的に单一車のレーン載荷を想定した荷重）による応力度とし荷重（満載状態を想定した荷重）による応力度との比が2主鋼桁の場合と多主桁との場合で異なること、適用支間が多主桁に比して大きく活荷重応力比が小さいこと、さらにはウェブガセットの取付け位置が作用応力の比較的小さな位置であることなどが影響しているものと考えられる。しかし、この結果は構造や形式を工夫することで疲労耐久性に優れた橋梁の設計が可能であること、より高強度の材料の使用が可能であることを示しているとも考えられ、むしろ、疲労設計の導入によりどのような橋梁形式、構造が鋼橋にとって有利であるのかが明確になるものとも言える。

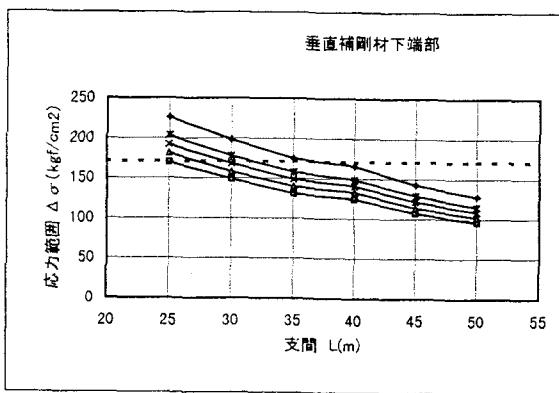
(a)単純非合成鋼桁



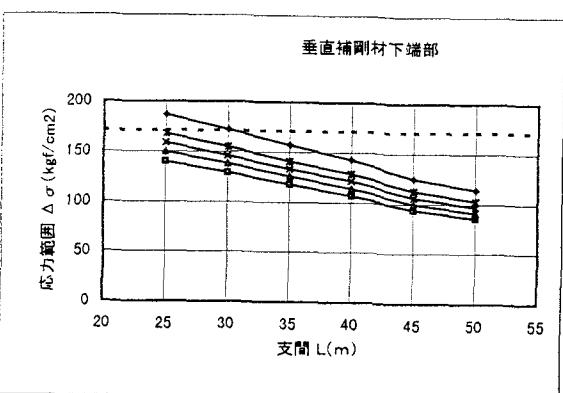
(b)単純合成鋼桁



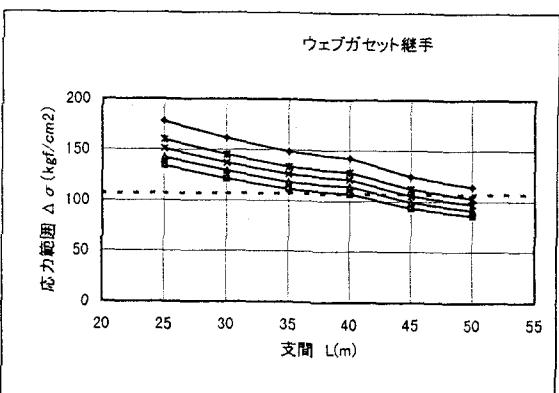
垂直補剛材下端部



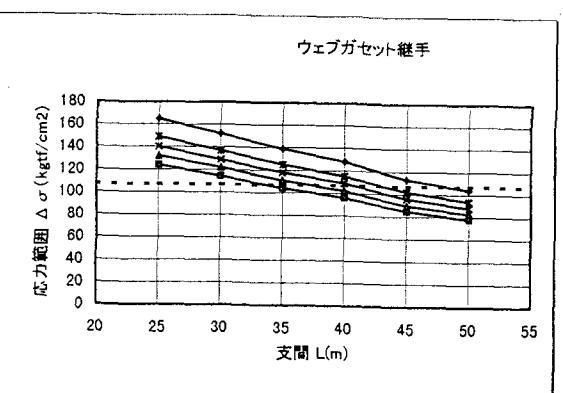
垂直補剛材下端部



ウェブガセット継手



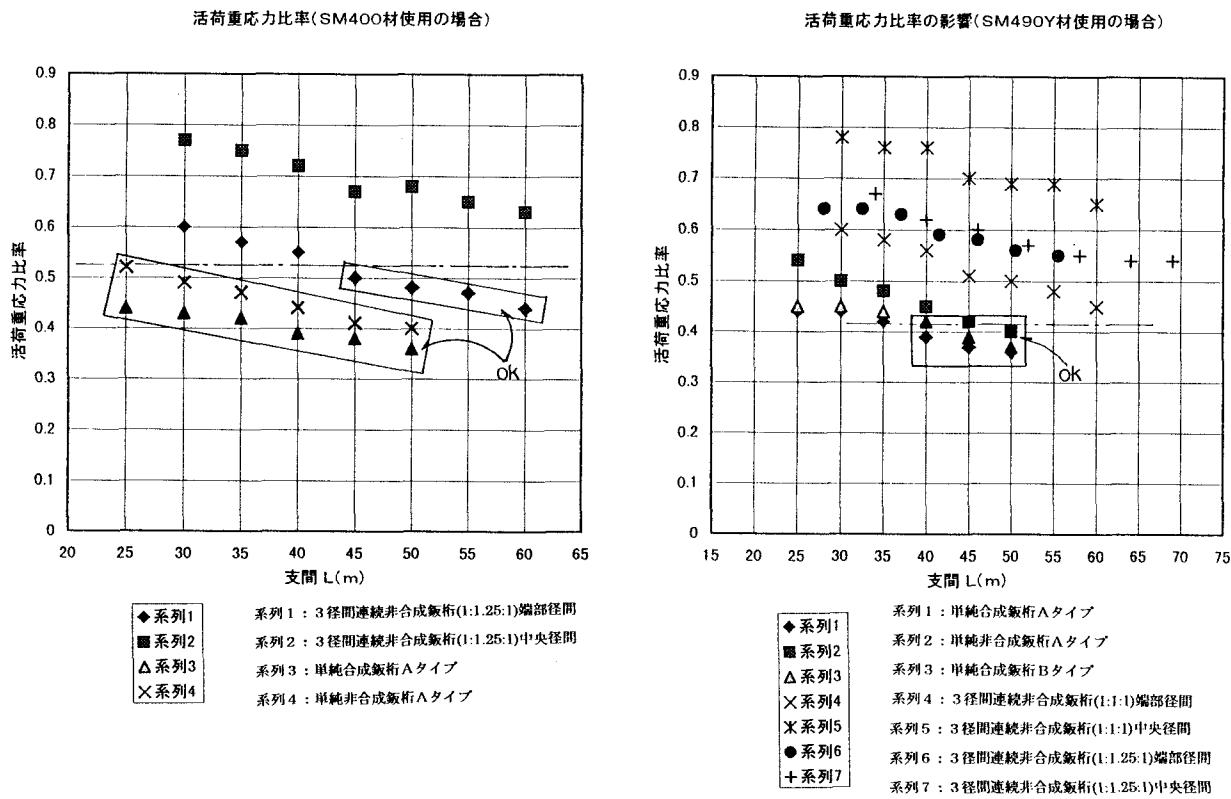
ウェブガセット継手



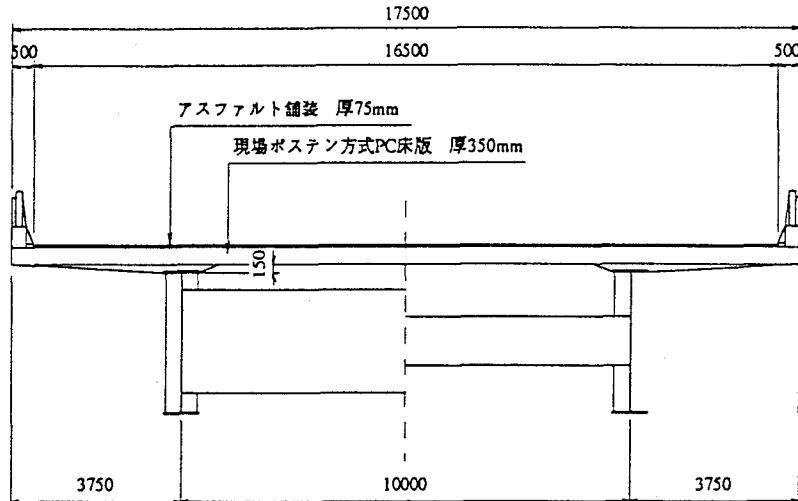
- 系列1
- 系列2
- 系列3
- × 系列4
- 系列5
- - - 系列6

| | |
|----------------------------------|----------------------------------|
| 系列1 : T荷重応力範囲 * i/2 * 1.1 | 系列4 : T荷重応力範囲 * i/2 * 1.1 * 0.85 |
| 系列2 : T荷重応力範囲 * i/2 * 1.1 * 0.75 | 系列5 : T荷重応力範囲 * i/2 * 1.1 * 0.90 |
| 系列3 : T荷重応力範囲 * i/2 * 1.1 * 0.80 | 系列6 : 許容応力範囲 (100年 3000台) |

図—7 単純鋼桁橋における疲労照査結果



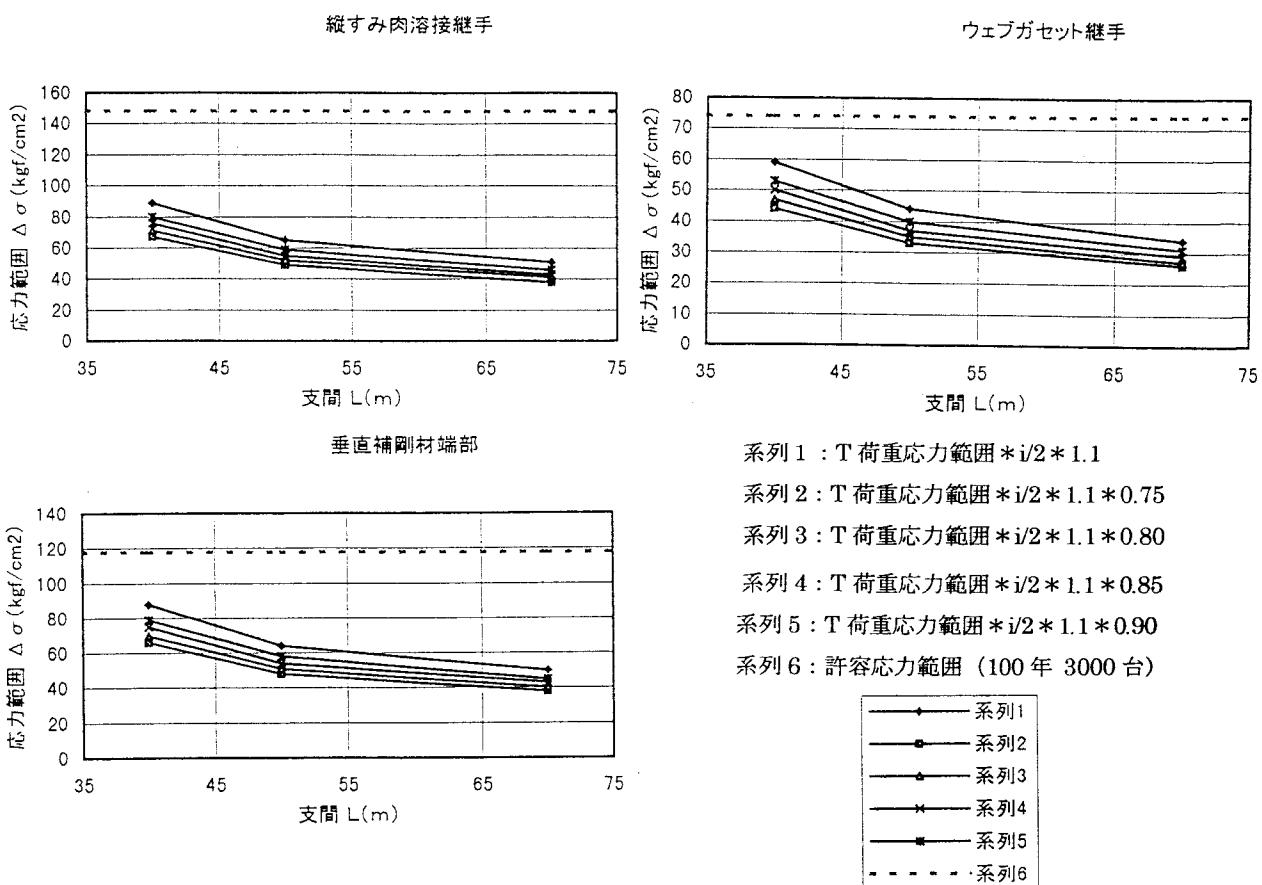
図—8 活荷重応力比の影響



図—9 5径間連続2主鋼桁の断面一般図

6. おわりに

鋼道路橋に疲労設計を導入するに際しての基本的な考え方、疲労照査の内容および鋼鉄橋を対象に試設計を行った結果などについて報告した。試算事例において示したように鋼橋の基本的な要求機能としての疲労耐久性に関して、どのような部位、形式が疲労に厳しくなるのかを知ることは、その限界を明確にする上で重要であり、逆に、どのような構造、形式が疲労に対して優位となるのかを知る上でのヒントとなり、高張力鋼の有効活用や新技術の開発を促進することにつながるものと期待する次第である。



図—10 5径間連続2主鋼桁の疲労照査結果

最後に、本報告は日本道路協会鋼橋小委員会：鋼橋疲労設計W.G（三木委員長：東工大教授）での種々の検討結果を参考にして作成したものであることを付記する。

参考文献

- 1) (社)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂、1993.4
- 2) 鉄道総合技術研究所編、運輸省鉄道局監修：鉄道構造物等設計標準・同解説、鋼・合成構造物、丸善、平成4年10月
- 3) AASHTO:AASHTO LRFD Bridge Design Specifications(1994)
- 4) ECCS:Recommendations for Fatigue Design of Steel Structures,1985
- 5) (社)日本道路協会：鋼橋の疲労、丸善、平成9年5月
- 6) 土木学会：鋼構造シリーズ7 鋼橋における劣化現象と損傷の評価、丸善、平成8年10月
- 7) 土木学会鋼構造委員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/I-5,1986.4
- 8) 三木、館石、杉本：道路橋の疲労照査のための活荷重に関する一考察、土木学会論文集、No.432/I-16,1991.7
- 9) 坂野、三上、宮川：大型車3乗平均重量と同時載荷係数を用いた道路橋設計荷重の設定、構造工学論文集、Vol.38A,1992
- 10) Fujino,Y.,Bhartia,B.K. and Ito,M.:A Stochastic Study on Effect of Multiple Truck Presence on Fatigue Damage of Highway Bridges,Proc.of JSCE,No.374/I-6,1986