

鋼材の疲労実験およびシミュレーション

穴見健吾・藤澤伸光

要旨：高度経済成長期以後、我が国では膨大な数の鋼橋が建設されてきた。これらの鋼橋では供用開始後 40 年～50 年経過し、様々な劣化現象が多く報告されている。鋼橋、特に鋼部材の劣化現象には腐食と疲労が挙げられる。特に、鋼部材の疲労は、近年特に多く報告されてきており、今後も益々増加するものと考えられる。本報告は、鋼橋に発生し得る疲労損傷に注目し、その維持管理を総合的かつ適切に行うことを目的として行った検討の現段階までに得られた結果を報告する。

本報告は以下の研究により構成されている。

- (1) 疲労を考慮した維持管理計画の検討
- (2) 高知県における鋼橋梁の疲労危険性の把握
- (3) 局部応力を用いた疲労評価法の検討

鋼橋に限らず構造物の維持管理の主なプロセスは、点検・評価・対策であるが、(1)では、現在、鋼橋の設計段階で応力照査を行っている一次応力に起因する疲労問題を対象として、疲労強度のばらつきを考えた適切な点検間隔を設定する手法について検討を行っている。しかしながら、実際の疲労損傷は、設計では考慮されない二次的な応力により、複雑に入り組んだ溶接ディテールから発生し、応力ベースでの疲労照査が困難な場合が多い。そこで、(2)では、実橋梁における疲労危険性の評価手法を整理した上で、これまで多くの報告がなされている我が国の基幹交通網の鋼橋梁の疲労損傷データから、高知県の疲労損傷の危険性について大まかな検討を行っている。(1)と(2)を組み合わせることにより、高知県における適切な疲労に関する鋼橋の点検計画などを立案することができるものと考えているが、この点は次年度以降に検討を行うこととする。実際に疲労に関する維持管理を行う際には、疲労損傷の危険性を評価した上で点検を行い、疲労損傷が発見された場合には、その進展性などを評価し、更に対策を行う場合には、その効果を事前・事後において評価しなければならない。前述したように、鋼橋梁の疲労損傷は、部材が複雑に入り組んだ領域に発生することが多く、疲労評価に一般的に使われる公称応力範囲が定義できない場合が多い。そのため、溶接部近傍の局部応力を用いた疲労評価法の確立が現在急がれている。そこで、(3)では疲労評価法に対する検討として、溶接ルート部から発生する疲労現象に対する局部応力を用いた評価法の検討を行っている。

ABSTRACT : In Japan, numerous numbers of fatigue cracks have been found to initiate and propagate at the weld connection between beam and column flanges of bridge steel piers, where not only in-plane stress is working but also out-of-plane bending is locally working. In present study, the influence of the combination of out-of-plane bending stress and membrane stress on fatigue strength of load carrying cruciform welded joint, which can be the model of the beam-to-column weld connection, was investigated experimentally and analytically. Main conclusions obtained are (1) the influence of the out-of-plane bending stress is not significant and it is necessary to be careful when using the stress measured at the surface to evaluate the fatigue strength of those cruciform welded joint subjected to the combination load, and (2) the locations of the maximum effective notch stress appears are different between under membrane stress and out-of-plane bending.

1. 疲労を考慮した維持管理計画の検討

1-1 序論 (システム構成及び目的)

昨年度までに、疲労を考慮した維持管理計画立案システムを構築した(昨年度報告書に記述しているために詳細は省略する)。そこでは、疲労強度のばらつきを考え、平均的に継手の疲労強度がばらついたと仮定し、補修・補強計画を立て、その補修間隔の中で、継手の疲労強度がばらついた場合に生じるリスクを最小とするような中間検査計画を導入し、供用期間中に生じる検査費用と補修費用の総和が最小となるように維持管理計画を決定している。図 2-1 に本システムにおけるリスク計算の概要を示す。

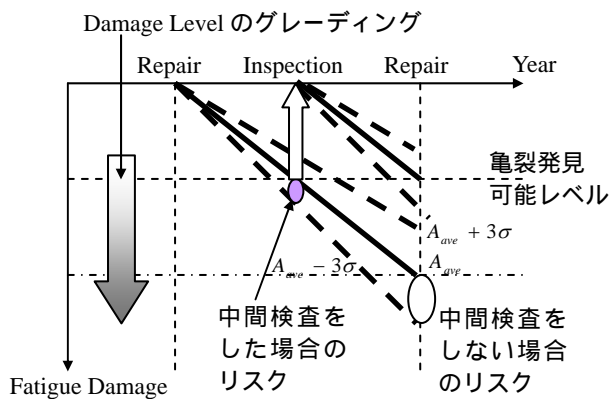


図 2-1 リスクの定義

本システムでは、疲労強度のばらつきについて、平均値から ± 3 (: 標準偏差)までを考慮しているが、この疲労強度のばらつきに関するデータは AASHTO LRFD を参照している。損傷レベルに関しては、実際の補修・補強手法を参考にして、表 1 - 1 に示すように定めている。

表 2-1 損傷レベルと対策手法

損傷レベル	対策手法
D1	亀裂発見可能レベルより小さい疲労亀裂であり発見できない
D2	亀裂が短く、グラインダーによる亀裂除去やストップホールにより対処可能
D3	亀裂が長く、添接板などの大掛かりの対策工事が必要
D4	疲労破壊により部材の破壊(または橋梁の崩壊)が生じるレベル

昨年度の検討では、補修費用と損傷レベルの関係、補修費用と検査費用との相対的な関係により、中間

検査の配置を含めた維持管理計画が大きく異なることを示した。疲労亀裂は、亀裂が短い間の進展速度は非常に小さいが、亀裂が大きくなるとともに、亀裂の進展速度は加速度的に大きくなり、また亀裂が短い間は非常に簡易な対策(グラインダーによる亀裂除去やストップホール工法など)で済むが、亀裂が大きくなると、大掛かりな対策が必要となり、またその橋梁を使用する交通に対して影響を及ぼす(通行止め、交通制限など)可能性も生じることがある。そのため、疲労亀裂は亀裂が短い間に発見する必要がある。しかし、疲労亀裂は部材の破壊に至るような大きな疲労亀裂を除いて、遠方からの目視では発見できず、近接目視による点検を基本とするため、特に足場設置がなくディテールへのアクセスが困難な場合には、検査に大きな費用を必要とすること、また、鋼橋において疲労亀裂の発生し易いディテールを理解し、生じている変状を疲労亀裂と正しく評価できる技術・人材の不足といった、点検に関する様々な問題点がある。

そこで、本年度は、特に疲労亀裂が発見できるレベル(損傷度)が維持管理計画にどのような影響を与えるか検討を行った。ここでは、点検における疲労亀裂の「見落とし」については考慮せず、技術的に発見できる亀裂長さ(損傷度レベル)をパラメータとして、そのレベル以上の疲労亀裂は、全て発見できるものとして検討を行った。

1-2 検査レベルの維持管理計画への影響

対象とする継手ディテールは図 2-2 に示す垂直補剛材下端部とした。このディテールは AASHTO・LTFD の疲労強度等級では Category-C に分類されており、そこに示される、平均及び分散に関する情報を用いて検討を行った。疲労損傷レベルを表すパラメータとして、ここでは累積損傷度 $D = \sum (n_i / N_i)$ (ここで、 N_i はある応力範囲が作用した時の疲労寿命、 n_i は、その応力範囲が実際に作用した回数)を用いている。

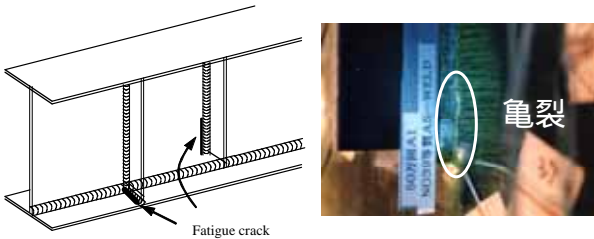


図 2-2 対象ディテール（垂直補剛材）

解析条件の概略を表 2-2 に示す。点検費用・補修費用は橋梁会社に対するアンケート結果を参考にして決定している。本報告では、D2 の補修費用が、損傷度に比例して大きくなる場合についてのみ報告する（D2 の補修費用が一定の場合、D3 の損傷度レベルに損傷度が到達する可能性が無い場合には、中間検査を必要としない<前年度報告>）。

表 2-2 解析条件

維持管理期間	40 年
対象部位数	1 つ
ADTT	3000 台
応力範囲	50MPa
点検費用	10,000 ~ 33,333 円
D2 の補修費用	100,000 円（D2 で一定の場合と損傷度に比例する場合）
D3 の補修費用	5,000,000 円
検査レベル	亀裂発見最低疲労損傷度 $D_{lim} = 0.1 \sim 0.55$

点検費用に関して、実際の点検費用に比して非常に小さな値段設定をしているが、これは橋梁には複数の疲労点検箇所が存在するため、対象とするディテール毎にその点検費用を分配しているためである。損傷度レベル D3 の補修費用は、損傷部位や疲労亀裂の大きさに大きく影響を及ぼすと考えられる。特に、作業員が手で持って運べる程度の添接板を必要とする場合と、重機を必要とする場合では大きく補修費が異なる。本年度の検討では、対象部位の損傷度が損傷度レベル D3 に疲労損傷が入らないように大きめの値段設定を行っている。また亀裂発見最低疲労損傷度 D_{lim} に関して、 $D_{lim}=0.4\sim0.55$ 程度が現在発見できる最低レベルであると考えられるが、今後、検査レベルをどの程度上げると、どのような効果が生じるか検討することを目的として、この値に設定している。

ここでは、まず D_{lim} で代表される検査レベルの中間検査計画への影響を検討するために、第 1 回目の補修を 14 年後と固定し、供用開始から 14 年後までの中間検査計画の必要性・時期について検討した結果を示す。検査費用を 10,000 円とした場合のリスク（図 2-1 に定義）の変化を図 2-3 に示す。図より明らかなように、最適に中間検査計画を導入する場合、 D_{lim} を小さくする、すなわち検査レベルを

上げることによりリスクを下げるができることが分かる。 D_{lim} が大きい場合には、最適中間検査計画でも中間検査を必要としないことが分かる。また、 D_{lim} が小さくても、最適に中間検査を配置していない場合には逆に中間検査費用も含むリスクが大きくなっていることが分かる。

同様に、中間検査費用を 10,000~33,333 円まで変化させたときの、リスクの変化を図 2-4 に示す。図より明らかなように検査費用が大きいと、リスク低減のための中間検査の有効性が小さくなることが分かる。換言すれば、検査レベルを上げるために検査費用が大きくなる場合には、その効果をリスク低減の面から十分な検討が必要である。

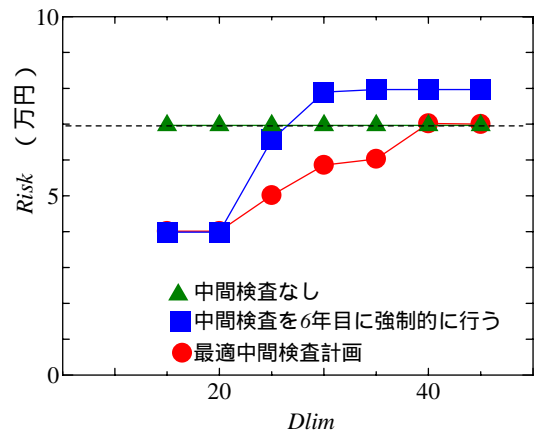


図 2-3 最適検査計画と D_{lim} の関係

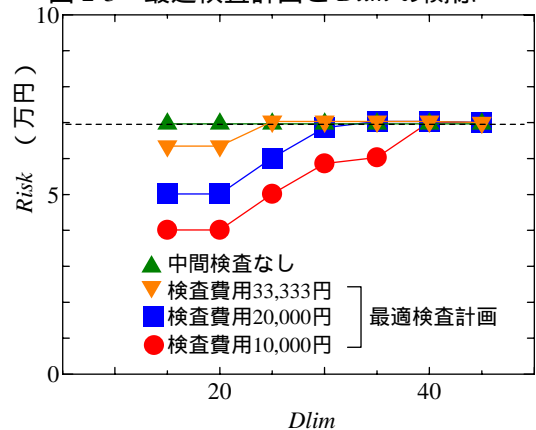


図 2-4 検査費用の最適検査計画への影響

1 - 3 維持管理計画への適用に向けて

前述の検討結果は、対象部位を 1 つとした場合の検討結果である。実橋梁では、疲労の可能性のある複数の溶接部位が存在し、部位毎に作用する応力範囲も異なるために、疲労強度のばらつき以外にも、疲労損傷の進行速度がばらつく原因がある。このよ

うな場合、昨年度報告書に示したように、一つの補修インターバル内に複数の中間検査を必要とする場合もあり、検査レベルや検査費用の中間検査計画への影響はより複雑なものになると考えられる。本システムでは複数の様々な継手を持つ橋梁全体に対して解析が可能であり、3章の結果と併せて、橋梁全体の解析を、今後試みる予定である。

2 .高知県における鋼橋梁の疲労危険性の把握

2 - 1 序論（疲労評価法の整理）

疲労危険性の把握、すなわち、どの程度の期間を経過した後に疲労損傷が発生するかを推定することは、維持管理計画を立案する上で、非常に重要なプロセスである。高知県では、疲労損傷が多く報告されている首都高速道路、東名高速道路などの重交通路線の橋梁と比較して、著しく交通量、特に疲労損傷に直接関連する大型車交通量が少なく、疲労損傷の危険性は、これらの重交通路線と比較して非常に小さいと考えられるが、橋梁の維持管理の中で、近接目視でしか発見できない疲労損傷に対して、どの程度配慮して管理計画を立てなければいけないか判断するためにも、その危険性について検討しておくことは重要であると考えられる。

また、現状で考えられる疲労評価手法について整理し、その評価のために、どのようなデータの蓄積が必要か、現状ではどの程度までの疲労評価が行われているかなどの技術的な整理を行っておくことも、今後、鋼橋の維持管理を行う際に重要であろうと考えられる。

図 3-1 は、実橋梁の疲労評価手法を評価レベルと必要とされるデータの種類により簡易に分類したものである。維持管理計画上で最も重要な疲労寿命は、一般的には、継手の疲労強度、作用する応力範囲、及び例えば 1 日の繰返し回数が分かれば推定することができる。疲労強度については様々な機関で提案されている疲労設計線を用いて検討することができ、また作用する応力範囲は構造解析や動的な測定を用いることにより、繰返し回数は応力測定など

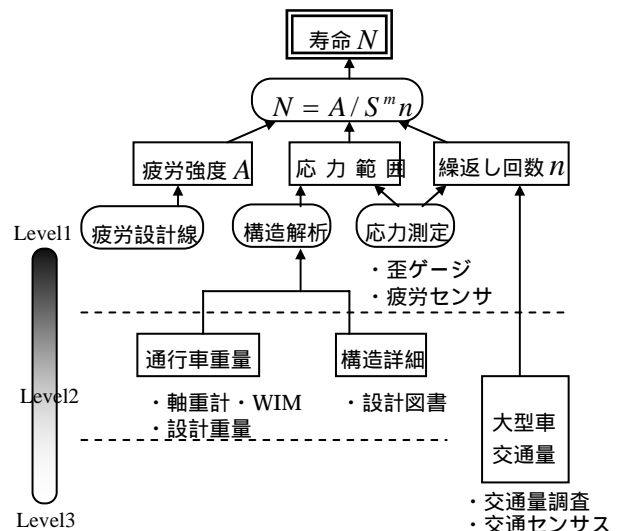


図 3-1 疲労評価レベルと必要データ

から求めることができる。近年では、コンピュータ技術の進歩により、十分な精度で橋梁全体をモデル化した解析が可能となっている。また、応力測定でも、長期間のデータ収集などが可能となっており、近年では疲労センサのような疲労危険度がモニタリングできるセンサも開発されている。しかしながら、前述したように、実橋梁における疲労損傷は、疲労設計線を規定している公称応力範囲が定義することが非常に難しい、複雑なディテールから発生していることが多く、どの位置での応力を使えば良いか、またその応力範囲を用いた場合、どの疲労設計線を使用すれば良いか明確ではない場合が多い。また、この Level-1 の疲労評価法は継手毎の評価であり、公称応力ベースで評価できる場合を除いて、存在する全ての橋梁の全ての部位に対して行うことは非現実的である。むしろ現状では、例えば疲労損傷の生じたある特定の溶接ディテールなどの、疲労発生メカニズムや疲労強度を検討するために用いられている。

Level-2 の疲労評価法では、通行車重量とその交通量のデータを収集し、過去の疲労損傷データと比較しながら、橋梁の疲労危険性を評価しようとするものであり、Level-1 の疲労評価法と異なり、応力ではなく荷重を用いて評価しているため、大まかな評価しかできない。近年、特に我が国の基幹交通網を構成する橋梁群では、軸重計や WIM (Weigh-in-Motion) などによる実車両重量の測定デ

ータの蓄積や、過去の疲労損傷データの蓄積がある程度行われるようになってきており、この手法により検討が開始されているところもある。

Level-3 の疲労評価方法は、疲労損傷に大きな影響を及ぼす大型車交通量のみを用いて評価しようとするものである。このデータは交通センサスや、高速道路などでは料金所データなどを基に推定することができる。近年では、実橋梁調査により、Level-3 の大型車交通量だけでは、実際に生じている疲労損傷を説明することはできず、実車両重量を用いた評価 (Level-2) を行う必要があることが指摘されている。高知県では、これまで軸重計や WIM などの車両重量データの蓄積がなされていない。そこで、ここでは Level-3 の評価を用いて、高知県内の橋梁の疲労危険性について検討することとする。

2 - 2 高知県の現状及び疲労危険性の評価

図 3-2 に平成 11 年度交通量センサスより得られた高知県内主要国道 (高速道路は除く) の 1 日平均大型車交通量 (ADTT) を示す。高知市中心部では ADTT は 3,000 ~ 4,000 台程度であり、その他の地域では更に ADTT は少ないことが分かる。高知市中心部の一日平均交通量 (ADT) は多い所で 30,000 ~ 40,000 台程度であり、大型車混入率は 10% 程度となっている。この区間の代表的な鋼橋梁としては、疲労損傷が多発している東名高速道路や首都高速道路といった橋梁と比較して同時期、もしくは若干送れて供用が開始された新葛島橋 (1971 年供用開始)、鏡川橋梁 (1972 年供用開始) など、供用開始から 35 年程度経過した橋梁がある。

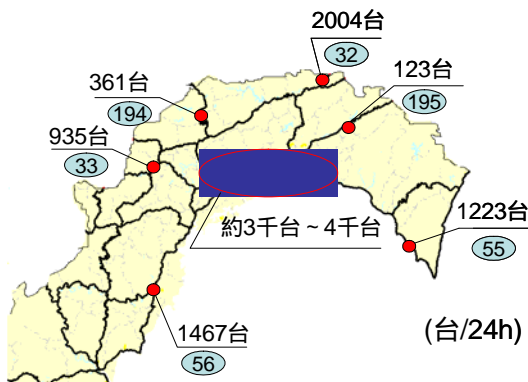


図 3-2 高知県の大型車交通量

ここでは、鋼桁橋の上部工に存在する溶接ディテールの中で、我が国で疲労損傷の発生報告が最も多い、対傾構位置での垂直補剛材と上フランジ取合部 (図 3-3) を対象として、最も ADTT が多い新葛島橋でどの程度疲労損傷の危険性があるかを検討する。

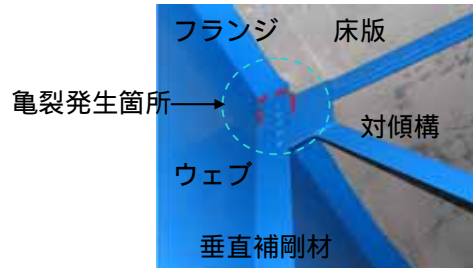


図 3-3 対象部位 (垂直補剛材取合部)

比較するデータとして、平成 3.4 年に行われた東名高速道路の点検データ (119 橋) を利用した。対象としている疲労亀裂は、隣接桁のたわみ差によって取合部に局部的に生じる応力を原因とする変位誘起疲労である。そのため、当該部の疲労損傷には横断面形状に影響される可能性があるが、上記東名高速道路の点検橋梁に対して、主桁間隔、主桁高さ、主桁本数、補剛材板厚・幅、Gap の 6 つのパラメータに対して、疲労亀裂の発生率のばらつきを照査した結果、明瞭なる形状依存性が見られなかったこと、新葛島橋のこれら形状パラメータが、点検橋梁の形状パラメータの範囲内であることから、ここでは、東名高速道路の点検データをそのまま活用することとした。

交通量の推定

表 3-1 には、交通センサスより得られる新葛島橋を通過する交通量データの有無を示す。

表 3-1 新葛島橋交通量データの有無

	昼間 12hr 交通量	24hr 交通量	昼間 12hr 大型車交通量	24hr 大型車交通量
H11				
H9		×	×	×
H6				×
H2		×	×	×
S58		×		×
S55		×	×	×

表からも分かるように、疲労危険性評価に用いる 1 日平均大型車交通量 (ADTT) のデータは、5 ~ 6 年程度おきに行われる交通センサスおよび中間的に

行われる交通量調査(両者ともが表 3-1 に記載されている)では、平成 11 年にのみ得られており、データの蓄積が殆どなされていないと言える。そこで、ここでは、表 3-1 に得られているデータから、供用開始から平成 11 年度までの ADTT の推移を以下の手法で推定した(図 3-4)。

- (1) 12 時間自動車交通量及び 12 時間大型車交通量の S.55~H.11 までの推移を内挿により計算
- (2) 推定した 12hr 自動車交通量データと 24hr 自動車交通量のデータがある年度との倍率を用いて 24hr 自動車交通量の推移を推測した。平成 6 年~平成 11 年については内挿により推測した。このデータと平成 11 年の ADTT データより S55~H11 の ADTT の推移を推定した。

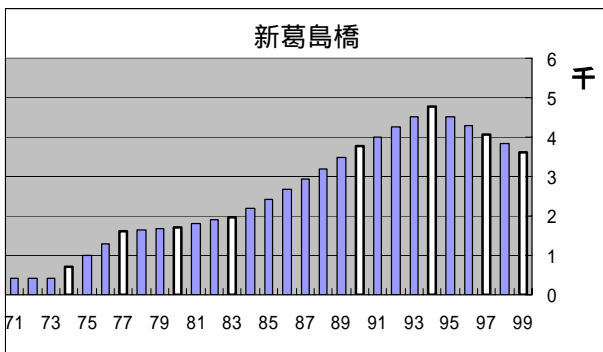


図 3-4 新葛島橋の ADTT 推移の推定 (塗潰し無しの年度は交通量調査が行われた年度)

比較対象とする、東名高速道路(対象区間:厚木 IC~袋井 IC)の ADTT の推定結果を図 3-5 に示す。ADTT は新葛島橋の約 10 倍程度となっていることが分かる。

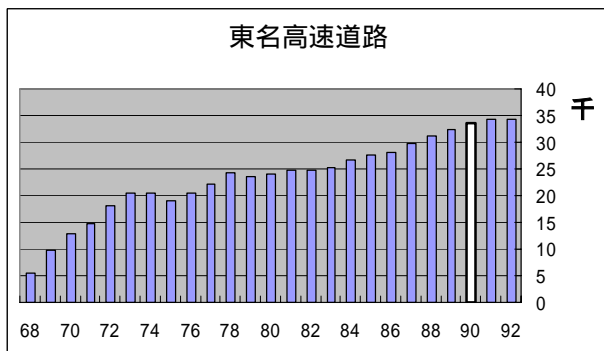


図 3-5 東名高速道路の ADTT 推移の推定 (塗潰し無しの年度は交通量調査が行われた年度)

新葛島橋における疲労発生年の推定
で行った ADTT の推定結果を基に、新葛島橋

の当該ディテールの疲労発生年の評価を行う。東名高速道路における平成 4 年度までにおける定期点検結果では、点検 119 橋梁中、44 橋梁で当該ディテールに疲労亀裂が発見されている。溶接継手部の疲労強度は様々な原因によりばらつくが、実際に疲労亀裂の発見された橋梁では、その疲労亀裂長さ、疲労亀裂の個数などが大きく異なる。そこで、これらのばらつきを考慮した疲労発生年の推定を行うこととする。一般に溶接継手部の疲労強度は対数正規分布に従うことが知られている。そこで、図 3-6 に示すように、119 橋梁中、疲労強度が低い方から 44 橋梁に疲労損傷が平成 4 年までに発見されたと考え、新葛島橋の疲労強度を安全側に平均から -2 の位置に相当する強度(一般的な設計曲線)と考える。疲労強度のばらつきは AASHTO・LRFD のデータを参照した。ここで、平成 11 年以後は ADTT が変わらないと仮定し、東名高速道路の交通量と等しくなった時に疲労亀裂が発生すると仮定すると、Category-C のばらつきを考えた場合 102 年、Category-E のばらつきを考えた場合 84 年後に疲労亀裂が発生するという試算となった。

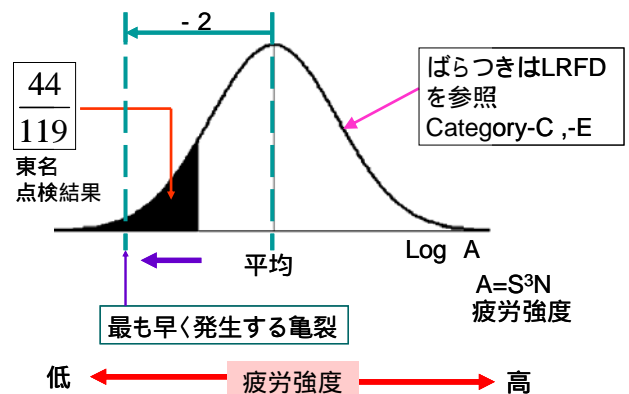


図 3-6 疲労強度のばらつきの考察

維持管理計画への適用に向けて

高知県の交通量データの蓄積自体が十分ではなく、今後よりデータ収集に努め、評価を更新していかなければならないが、高知県では疲労に対する危険性は非常に小さいと言える(但し、今回 AASHTO LRFD に示される分散を用いているが、今後、より現実的なばらつきを用いて評価する必要がある)。しかし、このように危険性が低いという試算結果が

得られた劣化現象に対して、如何に維持管理を行うか、特に高知県内の実橋梁における初期データをどのように取得すべきかについて、2章で述べた維持管理計画立案手法と併せて今後検討する必要があると考えている。

3. 局部応力を用いた疲労評価法の検討

3-1 序論(背景)

3章で述べたように、疲労寿命は、継手ディテールの疲労強度 A と作用応力範囲 S を明らかにすることにより求めることができる (A/S^3)。しかしながら、一般的に用いられる疲労強度 A は、公称応力範囲に対して定義されている。実橋梁における疲労亀裂は、公称応力が定義できない複雑なディテールや、二次的な応力が卓越し複雑な応力が作用するディテールに発生していることが多いために、上述の式を用いることが困難であることが多い。このようなディテールに関する疲労設計は、応力範囲による照査を行わず、一般的には構造(継手)ディテールで対処している。

しかし、鋼橋のライフサイクルに対する維持管理、すなわち点検、評価、対策といった基本的なプロセスを考える場合、疲労危険性を評価し、疲労亀裂を発見した場合には、その進展性を評価し、対策が必要であればその対策の効果を確認し実施することが不可欠となる。基本的にこれらの作業は、対象ディテール毎に、作用する応力範囲を実測・実験・解析などにより明らかにすることにより行われなければならないため、公称応力が定義できない場合に、どの位置のどの成分の応力範囲を用い、どの疲労強度等級を用いて対象ディテールの疲労強度を評価すれば良いか、といった問題点があり、その観点に立脚した多くの研究がこれまで行われてきている。

継手部から離れた公称応力範囲に代わり、継手部近傍の局部応力範囲を用いた疲労評価手法に関する研究がこれまで多く研究されている。その一つの

手法としてホットスポット応力範囲である。これまでホットスポット応力範囲の算出手法は数多く提案されており、未だ明確なる方法は確立されていないが、例えば我が国では、ホットスポット応力範囲を用いれば、付加物溶接継手の疲労強度は JSSC-E 等級で整理できることなどが提案されている(各機関・各国により若干規定が異なる)。このホットスポット応力範囲は、その計算手法に応じて、実測・解析などにより求めることができ、特に実橋梁の疲労評価に多く用いられている。しかしながら、この手法は溶接止端部より亀裂が発生する場合にのみ有効であり、溶接ルート部から疲労亀裂が発生する場合には適用することができない。

溶接ルート部から発生する亀裂に対しても適用できる局部応力評価法として、近年、Effective Notch Stress を用いた手法が提案されており、その適用性に関する研究が行われている。そこで、本節では、この手法を用いて、実橋梁において溶接ルート部から疲労亀裂が発生している溶接ディテールを対象に、局部応力を用いた疲労評価についての基礎検討を行った結果を報告する。

3-2 報告の概要

近年、鋼製橋脚隅角部の柱・梁溶接部に多くの疲労亀裂の発生が報告されている。その多くは柱・梁フランジ溶接ルート部に残る不溶着部先端を起点として亀裂が発生している。実応力測定や解析から、このディテールでは、梁全体の曲げに加え、隅角部近傍で局部的にフランジが面外に変形する挙動が見られており、面内力と面外曲げ応力が同時に作用する複雑な応力分布となっている。本研究では現場で実際に得られる情報から、当該ディテールの疲労強度(寿命)、対策後の疲労強度(寿命)を推定する手法を検討することを最終目標として、面内力と面外曲げが同時に作用する荷重伝達型十字溶接継手の疲労特性について、effective notch stress 法を用いて検討を行っている(報告は次ページ以後)。