

亀裂進展を考慮した道路橋の疲労信頼度評価

EVALUATION OF FATIGUE RELIABILITY OF HIGHWAY BRIDGES WITH CONSIDERATION OF CRACK GROWTH

白木渡* 松保重之**

By Wataru SHIRAKI and Shigeyuki MATSUHO

Reliability analyses of highway bridges are performed by the use of a probabilistic fracture mechanics model and Monte Carlo simulation technique. Two typical types of steel girder bridges are selected from existing bridges designed by both the former and current Japanese specifications for steel highway bridges. For the vertical stiffeners connecting the central transverse girder to the webs of the main girders risk evaluation of fatigue failure is performed. In evaluation the Paris's law for describing the crack growth rate is used, the uncertainties in the load data such as truck axle and gross weights, headways, impact, stress range and traffic volume are modeled by utilizing field data and simulation technique. The numerical calculations of risk of fatigue failure clarify the difference of reliability level between the former and current specifications.

Key Words: risk of fatigue failure, crack growth, highway bridge, vertical stiffener

1. まえがき

近年、我国の鋼道路橋において疲労が原因と考えられる損傷事例が数多く報告されるようになってきた¹⁾。これは、鋼橋に溶接構造が導入されて約50年が経過していること、輸送の効率化とともに大型車の重量が増加し、交通量も一昔前に比べ飛躍的に増大していること等が原因と考えられる。また、既設の鋼道路橋は設計当時予想もされなかった交通荷重の容量・重量の増大により、苛酷な変動応力を常時受けており、今後、新たな疲労損傷の発生も予想される。

現在、数多く報告されている疲労損傷事例としては、昭和53年に出版された『RC床版に関する建設省通達』以前の設計基準である旧標準鋼Ⅰ桁橋の主桁と荷重分配横桁、主桁と中間対傾構との取合部の損傷が挙げられる。損傷の発生している部位は取合部のうちでも局所的な箇所集中している。これらの箇所は、通常の設計計算では評価しきれない程の、複雑でかつ集中度の高い応力状態となっていることが損傷要因の1つであろうと考えられる。道路橋の疲労に関しては、十数年前から理論的・実験的研究が行われ、いくつかの疲労設計指針²⁾がまとめられている。しかし、これらの指針もまだ一般道路橋を対象にしたものではなく、また疲労信頼度のレベルを明確に規定したものとはなっていない。

そこで、本研究では、我国においてとくに交通量が多い旧標準鋼Ⅰ桁橋を対象に、損傷例が多く報告されている主桁と横構の取合部補剛材付近の溶接継手部に注目し、疲労亀裂進展則を用いて、それがどの程度の疲労信頼度を有しているかを評価する。疲労亀裂進展則による信頼度の評価においては、まず鋼Ⅰ桁橋の疲労損傷に影響を及ぼす不確定要因の簡易的なモデル化を行い、Parisによる破壊力学手法を用いた実用的な疲労信頼度評価式を誘導する。そして、その評価式を用いて、溶接継手の疲労信頼度を求める。さらに、本

* 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (〒680 鳥取市湖山町南4丁目101)

** 工博 鳥取大学助手 工学部土木工学科 (〒680 鳥取市湖山町南4丁目101)

研究では現在のところ疲労損傷が見られない新標準鋼 I 桁橋についても疲労信頼度の評価を行い、新・旧標準の信頼性レベルについて比較する。なお、本論文では、疲労信頼度とは疲労に対する限界状態を越えない確率という意味で用いる。

2. 疲労損傷度評価法

2-1 疲労損傷の発生原因

疲労設計は、疲れ現象による構造部材の耐力低下に対処するためのものであり、疲労設計を進めるにあたって一般に次の2つの方法が考えられる。まずは、疲れ強さに立脚した許容応力度体系を定める設計手法、つまり許容応力度法であり、二つ目は通常の静的荷重に対する許容応力度を使用するが、設計荷重を割り増しして、疲れによる耐力低下を補う設計手法(一種の荷重係数設計)である。

我国では許容応力度設計法が橋梁設計の大綱をなしていることと相まって、主として前者の方法に基づいて示方書の構成が行われている。特に我国の道路橋では、疲労現象を生じやすい構造ディテールを避けるような広い意味での疲労設計は行っているが、設計応力に占める活荷重応力の割合が小さいので直接輪荷重を受ける鋼床版以外の疲労強度の照査をしていない³⁾。疲労の検算については道路橋示方書⁴⁾では、鋼床版についてのみ疲労の影響を照査すればよく、T荷重1台(衝撃を含まない)による床版・床組としての最大応力度が許容応力度を超えないこととしている。

このような我国の橋梁設計においては、今までに多種多様の疲労亀裂が発生し報告されている。我国で発生した疲労損傷は、土木学会鋼構造委員会疲労変状小委員会の報告にまとめられている¹⁾。それによると、代表的ないくつかの損傷発生原因として、次の4項目が挙げられる。

- (1) 欠陥あるいは不十分なディテールからの疲労亀裂の発生
- (2) 荷重の横分配作用に起因する疲労発生
- (3) 予期せぬ振動による疲労亀裂進展
- (4) 腐食による疲労発生

実際の橋梁構造物の疲労信頼性レベルの評価を行うに際して、まず重要なことは、どのようなことが原因でどのような疲労損傷が発生したのかを分析し、疲労限界状態を設定することである。本研究では、上掲の疲労損傷発生原因のうちでも最も主要な原因と考えられている項目(2)の「荷重の横分配に起因する疲労発生」について考える。

主桁のウェブに取り付けられた横桁やダイヤフラムの荷重の横分配作用のため、負のモーメント域ではその取り付け材、あるいは垂直補剛材の端部とフランジの間のわずかなギャップに面外変形が生じ、それが疲労亀裂の発生原因となる。設計時にはこのような変形は想定しておらず、また実験による検討もされていなかった。しかし、この発生原因によって生じたと考えられる疲労亀裂が最近数多く検出され、この10年で最も一般的な疲労損傷の一つになっている。荷重の横分配作用による疲労亀裂は我国の道路橋においてもかなりの数が発生している。我国の道路橋では、垂直補剛材が上フランジに溶接されている場合が多く、その継手周辺に疲労亀裂が発生している例が多く見られる。

本研究では、我国の標準的な道路橋としてよく用いられている鋼 I 桁橋の主桁と横桁の取合部補剛材に注目し、その疲労信頼度の評価を行うことにする。

2-2 亀裂進展を考慮した疲労損傷度評価法

疲労による損傷は特別な場合を除いて、部材や桁の平滑部で起こることはまれである。過去の損傷例によると、亀裂や異常の発生した橋は、国内道路橋ではほぼ100%、鉄道橋や海外の橋では90%近くが溶接構造である⁵⁾。これは、溶接継手部の応力集中や溶接欠陥部から発生した亀裂によるものだと思われる。このような部分的な疲労を取り扱う手法として、疲労亀裂進展式を用いる解析法がある。

溶接継手に発生する疲労亀裂の進展寿命の解析には、初期亀裂が与えられた場合の破壊力学的手法の適用が有効である。この解析の基礎式は、次式で与えられる。

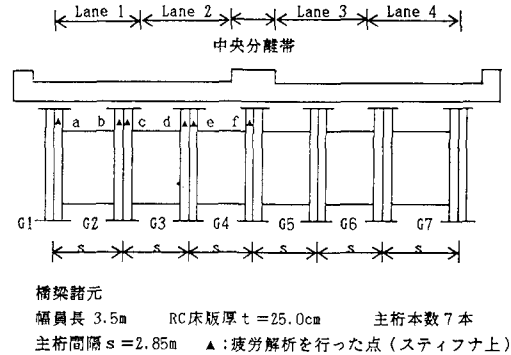
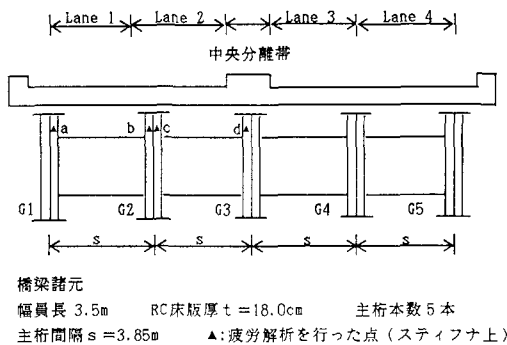


Fig. 1 旧標準鋼 I 桁 5 本主桁橋の支間中央部断面図

Fig. 2 新標準鋼 I 桁 7 本主桁橋の支間中央部断面図

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (\Delta K > 0) \quad (1)$$

ここに、 da/dN は疲労亀裂進展速度または亀裂成長率といい、1 応力サイクルの間の亀裂長さ a の亀裂の伸び率として理解される。また、 ΔK は応力拡大係数範囲で、亀裂先端付近に分布する応力の程度を示すパラメータで、次式によって定義される。

$$\Delta K = Y(a) \cdot S_r \cdot (\pi a)^{1/2} \quad (2)$$

ここに、 S_r は応力振幅、 a は任意の時点での亀裂長さである。また、 $Y(a)$ は亀裂の形状や亀裂の存在する部材の形状を考慮する項で、次式のように 4 つの補正係数の組合せにより表現される⁵⁾。

$$Y(a) = F_e \cdot F_s \cdot F_t \cdot F_g \quad (3)$$

ここに、 F_e は亀裂の形状の補正係数、 F_s は亀裂が表面にあることの自由表面補正係数、 F_t は亀裂進展方向に板幅または板厚が有限であることの補正係数、 F_g は応力集中の影響を考慮した形状補正係数である。このような形で $Y(a)$ を定義しておくことで問題によって補正係数を組合せることができ、パラメトリックな解析や、疲労亀裂進展寿命の近似解を求める際に便利である。

3. 鋼 I 桁橋の主桁と横桁の取合部補剛材の疲労信頼度評価

3-1 解析対象モデルの概要

解析の対象とするのは、現在阪神高速道路公団で供用されている旧標準 5 本主桁橋および新標準 7 本主桁橋である。モデルの概要を述べると、旧標準の場合は主桁間隔 3.85m、床版厚が 18cm、新標準の場合は主桁間隔 2.75m、床版厚が 25cm の橋梁である。それら双方の支間中央断面における概略図を Figs. 1 および 2 に、平面骨組構造としてモデル化した図を Figs. 3 および 4 に示す。また、諸寸法値を Tables 1 および 2 に示す。これらの構造モデルを対象とし、構造解析を行う。ただし、解析を行う点は、対

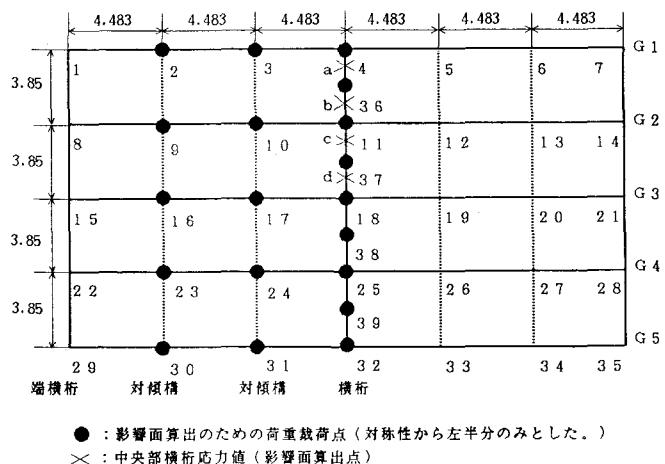


Fig. 3 旧標準鋼 I 桁 5 本主桁橋の基本骨組による構造解析図

称性を考慮して旧標準では、Figs.1および3 に示す a ～ d の 4 点、新標準 では、Figs.2および4 に示す a ～ f の 6 点とする。

3-2 トラック荷重による 応力の簡易算定法

各点の補剛材応力値あるいは荷重影響係数をすべて有限要素法などを用いた詳細解析により求めることも可能であるが、これには多大の計算労力を要する。ここでは、次のような簡易算定法を用いて計算の簡単化をはかる⁶⁾。

まず、旧標準の場合について述べるとFig.5 に示すような荷重状態に対して、有限要素法による詳細応力解析を実施し、G2主桁付補剛材応力値 σ_{dc} を求める。次に Fig.3 に示す平面骨組について、同様の荷重状態に対する平面骨組応力解析を実施し、中央横桁の G2 主桁との取合部（G1側）の曲げ応力 σ_{bc} を求める。両者の応力値より 補正係数 K_{tc} をつぎのように定める。

$$K_{tc} = \sigma_{dc} / \sigma_{bc} \quad (4)$$

新標準の場合は、主桁間隔 および床板厚を変化させて求めればよい。この補正係数を用いて、その他の荷重状態に対しても 補剛材応力 σ_{si} を、平面骨組応力解析による中央横桁の 主桁との取合部 での曲げ応力 σ_{bi} を基準として 次式のように求めることとする。

$$\sigma_{si} = K_{tc} \cdot \sigma_{bi} \quad (5)$$

また補剛材の局部隆伏あるいは座屈損傷評価や走行車両のシミュレーションにより補剛材応力値の時刻歴を求めるため、次式(6)に 示すように影響係数 α_{ij} の形に応力値を 算出した。 α_{ij} の算出点は、旧標準ではFig.3、新標準ではFig.4に示す点である。

$$\alpha_{ij} = K_{tc} \cdot M_{cij} / Z_{yc}$$

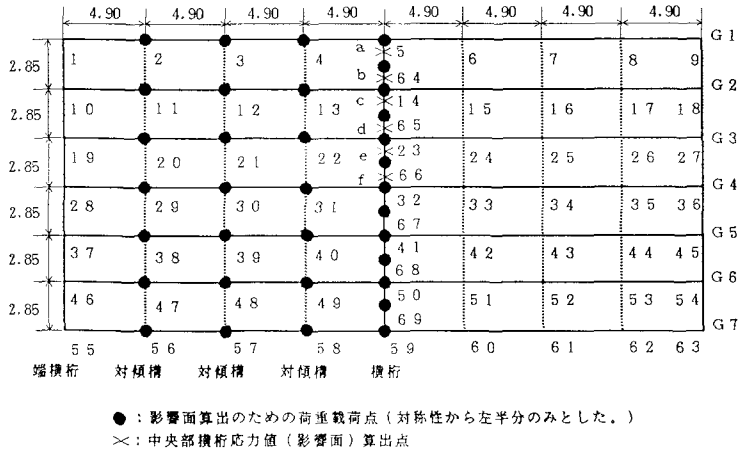


Fig.4 新標準鋼 I 桁 7 本主桁橋の基本骨組による構造解析図

Table 1 旧標準 5 本主桁橋構造解析モデルの諸寸法値

Element		Area	Moment of Inertia	Torsional Rigidity	Plastic Section Modulus	Reference Strength
Name		$A(m^2) \times 10^{-3}$	$I_z(m^4) \times 10^{-4}$	$GJ(kN \cdot m^2) \times 10^{-4}$	$Z_{yp}(kN \cdot m) \times 10^{-4}$	$R = \sigma_{yp} Z_{yp} \times 10^{-2}$
G1 G5	No. 1	112	447	361	383	138
	No. 2	109	413	334	349	126
	No. 3	106	369	298	307	86.0
G2 G4	No. 1	131	457	369	374	135
	No. 2	128	419	338	339	122
	No. 3	127	390	315	313	87.6
G3	No. 1	135	438	354	357	129
	No. 2	128	419	338	339	122
	No. 3	126	390	315	313	87.6
C.T.G		25.4	63.2	51.0	116	32.4
E.T.G		9.40	5.22	4.22	19.1	5.35
T.B		0.94	0.32	0.42	1.91	5.35

Table 2 新標準 7 本主桁橋構造解析モデルの諸寸法値

Element		Area	Moment of Inertia	Torsional Rigidity	Plastic Section Modulus	Reference Strength
Name		$A(m^2) \times 10^{-3}$	$I_z(m^4) \times 10^{-4}$	$GJ(kN \cdot m^2) \times 10^{-4}$	$Z_{yp}(kN \cdot m) \times 10^{-4}$	$R = \sigma_{yp} Z_{yp} \times 10^{-2}$
G1	No. 1	318	606	489	356	128
	No. 2	363	716	578	430	155
	No. 3	453	911	753	573	206
G7	No. 4	532	1062	857	689	247
	No. 1	318	598	489	346	125
	No. 2	351	700	565	407	147
G2	No. 3	431	872	704	521	188
	No. 4	504	1048	846	648	233
G6	No. 1	304	584	471	333	120
	No. 2	343	683	551	395	142
	No. 3	415	838	676	501	180
G5	No. 4	469	969	782	592	213
	No. 1	316	627	506	361	130
	No. 2	368	706	570	411	148
	No. 3	431	895	622	541	195
	No. 4	469	969	782	592	213
C.T.G		319	146	118	195	54.6
E.T.G		108	9.73	7.82	26.2	7.34
(T.B)		(9.4)	(0.52)	(0.42)	(19.1)	(7.34)

$$(6)$$

ここに

α_{ij} : 荷重影響係数(補剛材 i の節点 j における単位荷重による応力値)

M_{cij} : 補剛材 i 取付部の中央横桁の節点 j における単位荷重による曲げモーメント値

Z_{yc} : 中央横桁の断面係数
解析上の材料特性は下記の通り。

- ① 鋼材: ヤング率 2.1×10^6 kgf/cm², ポアソン比 0.03
- ② 床板コンクリート: ヤング率 3.0×10^5 kgf/cm², ポアソン比 0.16

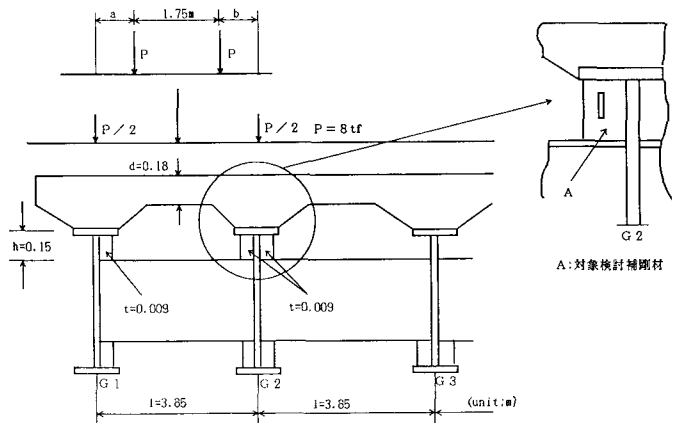


Fig. 5 中央横桁および検討対象補剛材 (旧標準)

上述の補正係数を用いて、補剛材応力に対する影響係数を計算した⁶⁾。その結果、旧標準橋梁に比較して新標準橋梁の応力度はかなり小さいことが明らかになった。

これらの解析によって得られた各補剛材の影響面を用いて、活荷重のシミュレーションを行うわけだが、文献7)では主桁と横桁との取合部補剛材を対象とした疲労実験が行われている。すなわち、旧標準と新標準の鋼I桁橋を対象としたモデルによる疲労実験を行っている。この実験で得られた応力は上述の解析値の約1/3~1/2倍になることが結果として報告されている。そこで、シミュレーションを行うに際しては、上記で得られた影響面の各点の応力値をすべて0.5倍とした影響面を用いて確率モデルを作成する。

シミュレーションは、比較的短スパンの橋梁の疲労損傷に大きな影響を及ぼすと考えられる総重量が20tf以上の重量トラックのみを対象として行う。重量トラックの混入率、重量分布はHDL報告書⁸⁾における芦屋での観測データを用いてモデル化する。また、トラックの交通量については、1車線あたり橋梁を横断する1日のトラック交通量として日トラック交通量 V (台)とし、シミュレーション期間を t (日)とする。日トラック交通量は現在まで多く観測されてきたが、ここではHDL報告書⁸⁾における芦屋での観測データを基に V の分布は対数正規分布でその平均値を3700(台/日)、標準偏差を370(台/日)と仮定する。

まず、モンテカルロ・シミュレーションにより20tf以上の車種を発生させる。解析の簡単化のため発生させたトラックの車幅はすべて1.75mとする。

次に各補剛材の影響面上に各トラックを1台載荷させる。これは、車頭係数比(H)のシミュレーション結果より橋軸方向のトラックの同時載荷はほとんど起こらないことが明らかになったためである。載荷方法は各走行レーン上に応力が最大となる最も厳しい状態に載荷する。このようにして載荷された1台の車両による応力範囲 S_i の3乗和の全トラックの走行量 Vt に対する平均値 S_0 を次式(7)で定義し、これを確率量として取り扱う。この応力範囲値 S_0 については対数正規分布に従うものとして平均値と標準偏差の推定を行った。

$$S_0 = \frac{1}{Vt} \sum_{i=1}^{Vt} S_i^3 \quad (7)$$

なお、衝撃の影響は、道路橋示方書⁴⁾に規定される衝撃係数をトラック荷重に掛けることにより考慮する。また、シミュレーション期間は、各レーンとも3日間 $3 \times 3700 = 11000$ 台のトラックを発生させ、これを1000回行って、 S_0 の平均値 μ と標準偏差 σ を求める。求めた結果は、Table 3 および Table 4 に示す。

3-3 解析対象とする溶接継手

解析においては、Fig. 6 に示すような横方向突き合わせ(BT)継手に関するデータを参考にして疲労信頼

Table 3 トラック i の通過による個々の点における応力範囲値 S_o 。(旧標準)

a) Lane 1 載荷の場合

(単位: $(\text{kgf}/\text{cm}^2)^{1/2}$)

解析点		a 点	b 点	c 点	d 点
S_o	μ	-0.63214E+08	0.24371E+08	-0.34468E+08	0.13511E+09
	σ	0.10958E+06	0.44994E+07	0.23875E+07	0.24929E+07

b) Lane 2 載荷の場合

解析点		a 点	b 点	c 点	d 点
S_o	μ	0.11283E+08	-0.88835E+08	0.47766E+08	-0.29936E+08
	σ	0.20820E+06	0.74563E+07	0.82027E+06	0.52679E+06

c) Lane 3 載荷の場合

解析点		a 点	b 点	c 点	d 点
S_o	μ	0.75116E+07	0.39025E+07	0.42916E+08	-0.13072E+09
	σ	0.13858E+06	0.54353E+05	0.79190E+06	0.67202E+07

d) Lane 4 載荷の場合

解析点		a 点	b 点	c 点	d 点
S_o	μ	0.11229E+07	0.26244E+07	0.39396E+08	0.11229E+08
	σ	0.20716E+05	0.15912E+06	0.72682E+06	0.20722E+07

Table 4 トラック i の通過による個々の点における応力範囲値 S_o 。(新標準)

a) Lane 1 載荷の場合

(単位: $(\text{kgf}/\text{cm}^2)^{1/2}$)

解析点		a 点	b 点	c 点	d 点	e 点	f 点
S_o	μ	-0.27139E+05	-0.77140E+05	-0.79508E+07	0.40191E+07	-0.34618E+08	-0.50456E+05
	σ	0.37286E+03	0.26681E+04	0.19814E+05	0.53180E+05	0.79123E+06	0.88135E+03

b) Lane 2 載荷の場合

解析点		a 点	b 点	c 点	d 点	e 点	f 点
S_o	μ	-0.95503E+06	-0.38002E+06	0.11468E+06	0.21504E+08	-0.13505E+07	-0.40129E+07
	σ	0.10579E+05	0.75685E+04	0.16496E+04	0.36582E+07	0.27880E+05	0.85657E+06

c) Lane 3 載荷の場合

解析点		a 点	b 点	c 点	d 点	e 点	f 点
S_o	μ	0.97968E+06	0.19138E+04	0.23776E+07	0.15821E+05	0.58180E+07	-0.10483E+06
	σ	0.22212E+05	0.45461E+03	0.55625E+05	0.26962E+03	0.13663E+06	0.27212E+04

d) Lane 4 載荷の場合

解析点		a 点	b 点	c 点	d 点	e 点	f 点
S_o	μ	0.76182E+06	0.74823E+05	0.47528E+07	0.42620E+06	0.14667E+08	0.35469E+06
	σ	0.16997E+05	0.17211E+04	0.10711E+06	0.10126E+05	0.33635E+06	0.72786E+04

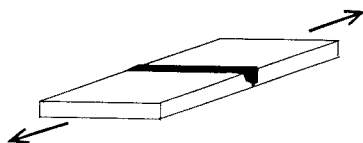


Fig. 6 横方向突き合わせ継手

度の評価を行う。参考にした横方向突き合わせ継手は、余盛りを削除したものである。ただし完全とけ込み溶接で、溶接部が健全であることを前提とし、仕上げ路にアンダーカットが残らないように仕上げ、仕上げの方向は、応力の方向と平行のものを対象とした。

JSSCレポート²⁾では、溶接継手疲労等級を大きく分けて強度の強い順にAからHまで8段階に分けている。

本研究で解析する横方向突き合わせ継手は、疲労等級Bと設定されており、溶接継手の中でもかなり強度を持った溶接継手と言える。

しかしながら、この研究で対象としているのは鋼I桁橋の主桁と横桁の取合部補剛材であり、このような場合、継手は十字溶接継手または縦方向溶接継手だと考えられる。この2つの継手の疲労等級は、上述の分類ではDと設定されており、本研究で取り扱う横方向突き合わせ継手より低い強度を有している。しかし、この2つの継手については亀裂形状等の補正係数に関する簡便式はなく、この研究で解析を行う横方向突き合わせ継手の解析を参考にして、その疲労信頼性を推測してみる。したがって、推測された信頼性は、実際のものより高めの値となることに注意する必要がある。

3-4 亀裂進展則による疲労限界状態関数

疲労亀裂進展則については、2-2節で説明したが、ここでは実際に疲労亀裂進展則を用いて鋼I桁橋に適用できる疲労破壊基準関数の設定を行う。

まず、疲労亀裂進展則において最も大切であるとも言える応力拡大係数範囲 ΔK の決定を行う。本研究では、3-3節で説明した各種溶接継手の溶接部表面に生じた半楕円形状の亀裂が発生していると仮定する。これより、式(3)の各補正係数のうち、 F_e 、 F_s 、 F_t は次式(8)～式(10)で表される⁹⁾。

$$F_e = 1 / \sqrt{1 + 1.464(a/b)^{1.65}} \quad (8)$$

$$F_s = 1.12 - 0.12(a/b) \quad (9)$$

$$F_t = (1 - 0.025\lambda^2 + 0.06\lambda^4) \sqrt{\sec(\pi\lambda/2)} \quad (10)$$

ここに、 b は亀裂表面長さ、 λ は a/T (T :板厚)である。亀裂形状比 a/b は、表面の応力集中がないために $a/b=1$ と仮定した。なお、 F_s については、突き合わせ継手では応力集中が生じないため1とした。

これより、式(8)～式(10)を考慮して式(3)の Y を求め、これを式(2)に代入することにより、式(1)が定義できる。そこで、式(1)を変数分離し、初期亀裂深さ a_0 から任意亀裂深さ a まで積分すると

$$\psi(a) = \int_{a_0}^a \frac{1}{Y(\xi)^m \cdot (\pi\xi)^{m/2}} d\xi \quad (11)$$

また、 $\psi(a)$ は次のように表される。

$$\psi(a) = C \cdot S_r^m \cdot N \quad (12)$$

ここに、 S_r は一定応力振幅、 N は応力繰返し数である。

上式によると $\psi(a)$ は a に関する単調増加関数となる。また式(11)によれば亀裂の深さ a が破壊に至る最終亀裂長 a_f になったときに部材が破壊すると考えると、式(12)は次のように表される。

$$\psi(a_f) = \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{Y(\xi)^m \cdot (\pi\xi)^{m/2}} d\xi = C \cdot S_r^m \cdot N_f \quad (13)$$

ここに、 N_f は破壊に至るまでの応力繰返し数である。式(13)は、次のようにまとめられる。

$$S_r^m \cdot N_f = \psi(a_f) / C \quad (14)$$

この関係はS-N曲線における関係と同じ関係を示しており、マイナー則における累積損傷度 D を用いると次のように表される。

$$D = \psi(a) / \psi(a_f) \quad (15)$$

したがって式(15)を用いると、式(1)における疲労損傷度は各応力サイクル数において0から1までの間を変動する。

また、疲労亀裂進展則に基づく道路橋の疲労信頼性解析を行う場合、次の2つの破壊基準関数が定式化できる。

$$a_f - a(N) < 0 \quad (16)$$

$$N_f - N(a) < 0 \quad (17)$$

ここに式(16)においては、 a_f は部材が疲労破壊したと見なされる最終亀裂長であり、 $a(N)$ は N 回の繰返し応力を受けた後の部材内部あるいは、表面に存在する亀裂長である。また、式(17)においては、 N_f は、疲労亀裂長がその最終亀裂長に達するまでの応力振幅の繰返し数であり、 $N(a)$ は任意の疲労亀裂長に達するまでの繰返し数のことである。

これまでに 確率論的破壊力学手法により疲労の問題を取り扱った研究は いくつかある。その中で、まず Lidiard¹⁰⁾ が式(1)における材料定数 m を一定値とし、もう一つの材料定数 C を確率変数としたモデルを用いて解析している。そして Engesvik¹⁰⁾ は、逆に C の方を一定値とし、 m を確率変数としたモデルを解析している。そして、VaransiとWhittaker¹⁰⁾ は C 、 m の両方とも確率変数とするモデルでそれぞれ解析している。

本研究では、Lidiardの手法に従い、材料定数 C を平均値 9.69×10^{-9} 、変動係数10%の対数正規分布に従うものとし、 m は3.0の確定値とした。さらに 初期亀裂深さは、疲労破面の亀裂発生位置で観察したファセット状破面の深さ⁸⁾を参考に、安全側として平均値0.1mm、変動係数10%の対数正規分布に従うものとしてモデル化する。また、限界亀裂深さは板の厚さ T として仮定する。

ここで、前節で述べたことを踏まえて亀裂進展則に基づく各溶接継手部分の疲労限界状態関数は、限界亀裂長を a_f 、任意亀裂長を a とすると

$$g_f = a_f - a \quad (18)$$

よって、

$$g_f = \psi(a_f) - C \cdot S_o^m \cdot V \cdot t \quad (19)$$

さらに応力振幅モデル S_o に関して走行車線 4 車線すべてに独立载荷を考え、各レーン i ($i=1, 2, 3, 4$) における応力振幅モデル S_o を $S_{o,i}$ とおくと最終的に疲労限界状態関数は次式ようになる。

$$g_f = \int_{a_0}^{a_f} \frac{d\xi}{Y(\xi)^m \cdot (\pi\xi)^{m/2}} - C \cdot V \cdot t (S_{o,1} + S_{o,2} + S_{o,3} + S_{o,4}) \quad (20)$$

上式(20)で示す亀裂進展則による疲労破壊基準関数を用いて、本研究における疲労信頼度を破壊確率で評価する。その算出手法は、Adaptive Sampling 手法の一種である I F M (Iterative Fast Monte-Carlo) 手法^{11), 12)}を用いる。この手法は、破壊確率が非常に小さい場合にも、精度の良い結果が得られることで知られている。

4. 数値計算結果および考察

最近報告されている鋼 I 桁道路橋の損傷例の中で数多いものとして鋼 I 桁橋と荷重分配横桁 あるいは主桁と中間対傾構との取合部補剛材の亀裂損傷が挙げられる。これらの損傷は特に床版支間長が3.85mと長く、床版厚が18cmと薄い阪神高速道路公団の旧標準設計による鋼 I 桁橋に集中している。この章では、3-4節で設定した疲労亀裂進展則による疲労限界状態関数を用いて溶接継手の疲労信頼度を計算することにより、新旧両標準の信頼性レベルを比較検討する。

本研究の亀裂進展則による疲労解析では、道路橋供用開始時にスラグの巻き込みやブローホール、アンダーカット、マイクロ割れ等の初期欠陥により 3-4節でモデル化したような対数正規分布に従う初期亀裂が存在するものとする。解析の際、亀裂長が限界亀裂長に達したときを破壊として定義する。限界亀裂長としては、主桁と横構との取合部補剛材の板厚を考え、旧標準で9mmと18mm、新標準で25mmとした。解析点は、3-1節で述べたように 旧標準鋼 I 桁橋で a 点～d 点の 4 点とし 新標準においても a 点～f 点の 6 点とする。

まず、旧標準における各点の破壊確率の計算結果をFig. 7に示す。ただし、旧標準での板厚を9mmとすると、各点の破壊確率がほとんど1に近くなり、また、各点の破壊確率の差が不明確になるので、補修時の板厚としてよく用いられる18mmの板厚の場合を結果に示している（以下の計算においても、同様の理由により、18mmの板厚の場合を示すことにする）。この図から d 点、c 点、b 点、a 点の順に破壊確率が高いことがわか

る。そして、d 点、c 点では約5～10年で、a 点、b 点においては約10～15年で、それぞれ破壊確率が0.1以上となり、破壊つまりほとんどの部材の亀裂長さが限界亀裂長である板厚に達する可能性が高いと言える。

文献7)では、阪神高速道路の旧標準鋼 I 桁橋に関して昭和60年3月までのクラック発生状況についてまとめているが、それによれば阪神高速道路大阪西宮線では供用開始の昭和56年から60年までの4年間で25ヵ所の亀裂の損傷が報告されている。このことは、ここで解析したような旧標準鋼 I 桁橋の破壊確率が高いことから伺える。このような現状において、昭和53年、RC床版に関する建設省通達により 新標準鋼 I 桁橋として設計が始まった。

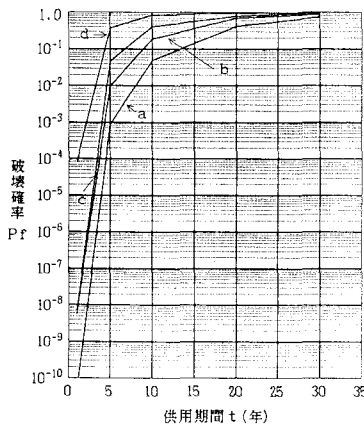


Fig. 7 亀裂進展則による旧標準
BT継手の疲労破壊確率

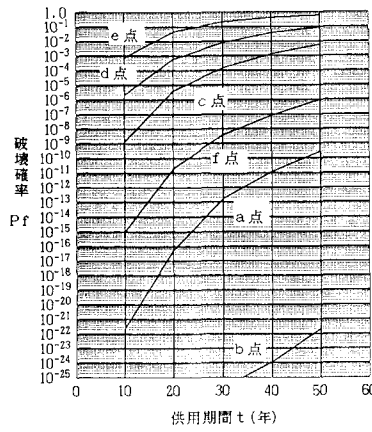


Fig. 8 亀裂進展則におけるBT継手各解
析点の疲労破壊確率(新標準)

そこで、つぎに 新標準で設計された鋼 I 桁橋において、それらが どの程度信頼度を持っているか検討し、設計標準の改訂が適切なものであったかどうかについて考察する。新標準の疲労亀裂進展則による B T 継手の解析結果を、Fig. 8 に図示する。その結果、破壊確率が高い順に e、d、c、f、a、b 点となる。新標準における供用期間 $t = 50$ 年の場合についてみると、e 点の破壊確率が最も大きく 1 に近い値を示し、次いで d 点で 10^{-1} のオーダー、c 点で 10^{-2} のオーダーとなっている。しかし、その他の解析点 a 点、b 点、f 点では、破壊確率は 10^{-6} 以下の非常に小さい値を示している。新標準でも破壊確率の最も高い e 点では 20～30 年で 破壊確率が 0.1 以上となり、 疲労破壊の可能性が高くなる。したがって、e 点は、今後 新標準道路橋の疲労調査・点検を行う上で注目すべき箇所といえる。また、各点において疲労信頼度の差がかなり異なっていることもわかる。

そこで、旧標準および新標準の疲労信頼度を詳しく比較するために、旧標準において最も破壊確率の高い d 点と新標準において最も破壊確率の高い e 点を比較してみる。両方の供用期間 t を変化させた図を Fig. 9 に図示する。供用期間 10 年を比べてみると 旧標準 d 点の破壊確率は ほとんど 1 であるが、新標準 e 点は 10^{-3} のオーダーで低くなっ

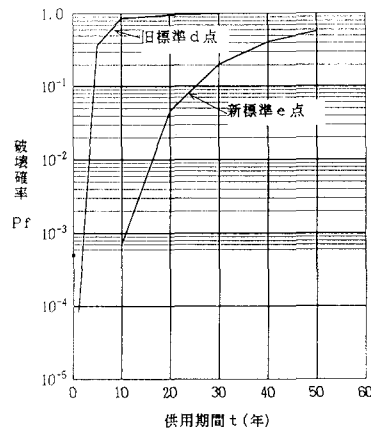


Fig. 9 亀裂進展則におけるBT継手の
疲労破壊確率(新標準 e 点と
旧標準 d 点についての比較)

ており全体を見ても新標準は旧標準と比べてかなり信頼性が高いことがわかる。以上の結果を総合すると新標準への改訂は概ね適切であったと判断できる。

5. あとがき

本研究では、疲労亀裂進展則による疲労損傷度解析を行い、現在供用されている新旧両標準に基づいて設計された鋼 I 桁橋の疲労信頼度評価を行った。その結果、旧標準鋼 I 桁橋では、損傷事例が多く発生している事実どおり、疲労信頼度が低く、また、新標準では、破壊確率が小さくなり改善されているが、まだ注意すべき箇所があることがわかった。

本研究では、亀裂進展則による横方向突き合わせ継手の疲労解析に、応力拡大係数中の補正係数の簡易式を用いた。しかしながら、実際は、継手の形状や亀裂の形状などを考えると、応力集中等を考慮した補正係数 F は、局所的な位置のズレなどにより異なってくると考えられる。そのため、その他の継手を解析する上でも有限要素法や境界要素法などを用いた 3 次元的な解析により求めるのが望ましい。また、亀裂進展則に関しては、本研究では 20tf 以上のトラックのみを考えたが、文献 9) で述べられているようにかなり低い応力でも疲労損傷が考えられる。そのため、20tf 以下の車両についても考慮にいたれた研究も今後必要と考えている。

最後に、本研究は阪神高速道路公団の材料学会信頼性部門委員会への委託研究（橋梁構造物の実用的信頼性設計手法の開発）の一部として行われたものである。関係各位に お礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 中井博：都市高速道路橋の疲労損傷事例，橋梁と基礎（1990.2），pp.23-31，1990-3.
- 2) 日本鋼構造協会：疲労設計指針(案)，JSSC レポート，1989-11.
- 3) 小西一郎編：鋼橋基礎編 I，丸善，pp.178-196，1977-7.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書，同解説(共通編)，丸善，1990-2.
- 5) 三木千寿・坂野昌弘：鋼橋の疲労解析損傷事例のデータベースの構築とその分析，土木学会論文集，I-10，No.398，pp.385-394，1988-10.
- 6) 白木渡・松保重之・山路良隆・美濃岡武志：鋼 I 桁橋の疲労信頼度の評価，土木学会第47回年次学術講演会概要集，I-534，pp.1242-1243，1992.
- 7) 阪神高速道路公団・川崎重工業(株)：合成 I 桁橋の主桁および横桁の取合部検討業務(その2)，1986-3.
- 8) 阪神高速道路公団・(社)システム総合研究所：都市高速道路の荷重評価と設計規準の最適化に関する研究報告書，pp.108-146，1984-3.
- 9) 三木千寿・坂野昌弘：疲労亀裂進展解析による疲労設計曲線の検討，構造工学論文集，Vol.36A，pp.409-416，1990-3.
- 10) 阪神高速道路公団・(社)日本材料学会：橋梁構造物の実用的信頼性設計手法の開発業務報告書(その1)，1990.
- 11) C.G.Bucher: Adaptive Sampling - An Iterative Fast Monte-Carlo Procedure, Structural Safety, Vol.5, pp.119-126, 1988.
- 12) 白木渡・G.I.Schuëler：条件付き破壊確率を用いた繰り返し高速モンテカルロ法とその構造物の動的信頼度評価への応用，構造工学論文集，Vol.35A，pp.467-477，1989-3.

(1993年9月16日受付)