

交通荷重特性の変化が鋼道路橋の疲労信頼度に及ぼす影響評価

Influence of Change of Vehicle Loads on Fatigue Reliability of Steel Highway Bridges

白木渡*

松保重之**

Wataru SHIRAKI and Shigeyuki MATSUHO

* 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)

In the new version of Japanese Highway Bridge Specifications revised in February, 1994, the design vehicle load is changed from 20tf to 25tf according to revision of the standard of traffic vehicles. The change of design vehicle load is considered to be concerned with the reduction of fatigue reliability of existing highway bridges designed the old version specifications. In this study, the influence is estimated by fatigue reliability analysis of typical types of steel girder bridges. The analysis is performed for the vertical stiffeners connecting the central transverse girder to the web of the main girders by the use of a probabilistic fracture mechanics model and Monte-Carlo simulation technique.

Key Words: design vehicle loads, fatigue reliability, steel highway bridges, crack growth

1. まえがき

平成5年に行われた車両制限令の改訂により大型車両の重量制限等が緩和され、それに伴い平成6年2月に道路橋示方書¹⁾の改訂が行われた。この改訂により設計自動車荷重が一律25トンになり、従来の1等橋、2等橋の区別がなくなった。また、活荷重を大型車の交通状況に応じてA活荷重とB活荷重の2つに区分されるようになった。この改訂は設計自動車荷重を大幅に上回る車両が通行している現状を認識し、これに対処しようと実施されたものであるが、これにより既設橋梁がどのような影響を受けるのか明確にされていない。

長沼ら²⁾は、車両制限令の改訂による交通荷重特性の変化が既設橋梁の主桁の最大応答評価に及ぼす影響を調べるために、実態荷重の車両重量分布を平均値で5トン増加させて、活荷重シミュレーションを実施している。その結果、渋滞時においては、主桁の支間中央曲げモーメントや支点せん断力の最大値分布にほとんど影響が見られないとの結論を得ている。しかし、この改訂による影響は、主桁の最大値応答よりもむしろ、疲労等による累積損傷に対して大きいと考えられている。

本研究では、著者らがこれまで行ってきた研究成果³⁾をもとに、今回の交通荷重特性の変化が既設の標準的な鋼I桁橋の疲労信頼度にどのような影響を及ぼすのかについて検討する。解析対象部位は、損傷例が多く報告されている主桁と荷重分配横桁との取合部補剛材付近の溶接継手部とし、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について、改訂以前と改訂以降の両方について求め、比較検討する。

2. 解析モデルの概要と応力の簡易算定法

本研究で解析の対象とする鋼I桁橋は、文献³⁾で用いた昭和53年の「RC床版に関する建設省通達」以前の設計基準で設計された旧標準5本主桁橋およびその通達以降の基準で設計された新標準7本主桁橋と同じものである。文献³⁾と重複するが説明の都合上、以下、モデルについて簡単に説明する。旧標準の場合は支間長27m、主桁間隔3.85m、床版厚が18cm、新標準の場合は支間長39m、主桁間隔2.75m、床版厚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。これら2つのモデルの諸寸法値については文献³⁾を参照されたい。

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。

各点の応力の評価は、有限要素法による詳細な応力解析とFigs. 3および4に示すモデルを用いた平面骨組解析による簡易的な応力解析を組み合わせた手法³⁾により行った。具体的には、次式に示す影響係数 α_{ij} (補剛材iの節点jにおける単位荷重による応力値)の形で評価する。

$$\alpha_{ij} = K_{tc} \cdot M_{cij} / Z_{yc} \quad (1)$$

ここに、 M_{cij} は補剛材i取合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、 K_{tc} は有限要素法による詳細解析と平面骨組解析による応力の補正係数、 Z_{yc} は中央横桁の断面係数である。

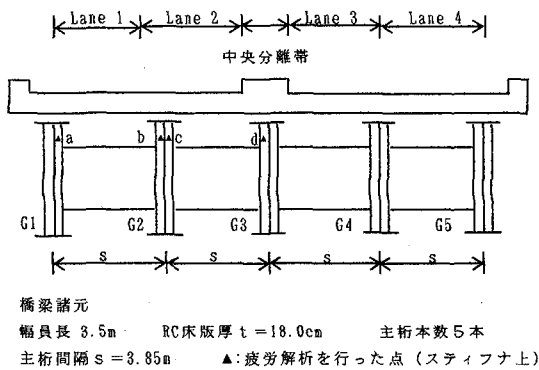


Fig. 1 旧標準鋼 I 桁 5 本主桁橋の支間中央部断面概略図

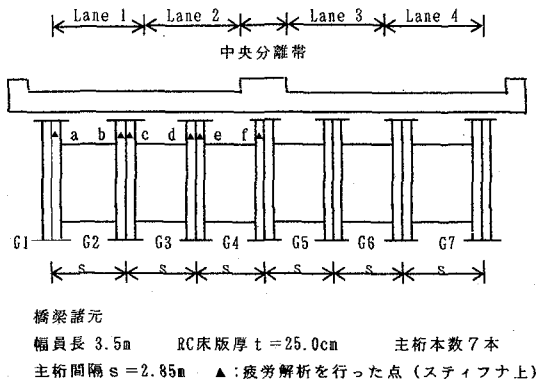


Fig. 2 新標準鋼 I 桁 7 本主桁橋の支間中央部断面概略図

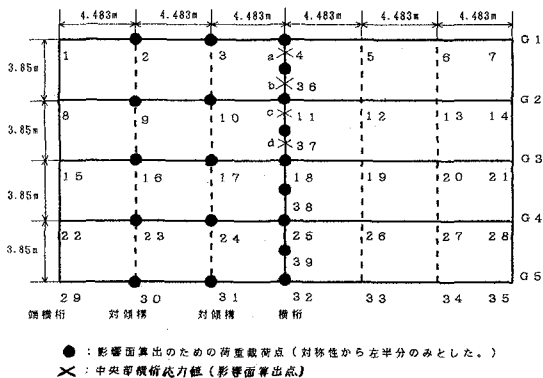


Fig. 3 旧標準鋼 I 桁 5 本主桁橋の基本骨組による構造解析図

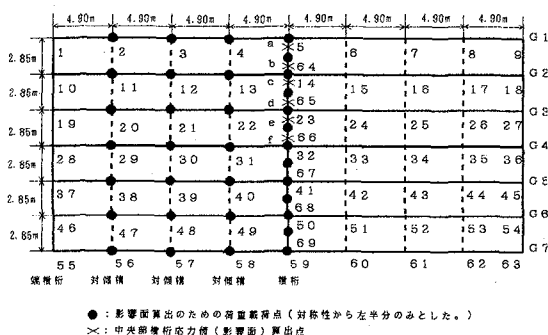


Fig. 4 旧標準鋼 I 桁 7 本主桁橋の基本骨組による構造解析図

3. 亀裂進展則に基づく疲労破壊基準関数

疲労亀裂進展則に基づく疲労破壊基準関数 g は一定振幅応力の場合は式 (2) のように表され、変動応力の場合は式 (3) のように表される³⁾。

$$g = \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{F(x)^m \cdot (\pi x)^{m/2}} dx - C \cdot S_r^m \cdot n \quad (2)$$

$$g = \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{F(x)^m \cdot (\pi x)^{m/2}} dx - C \cdot \sum_{i=1}^n S_i^m \quad (3)$$

ここに、 S_r は一定応力範囲、 S_i は 1 台の車両による応力範囲、 C および m は材料定数、 n は応力繰り返し数、 a_0 は初期亀裂深さ、 a_f は最終亀裂深さ、 $F(x)$ は亀裂の形状や部材の形状を考慮する補正係数である。

さらに、式 (3) の変動応力の場合について、次式で定義される等価応力 S_0 の考え^{3), 4)} を適用する。

$$S_0^m = \frac{1}{Vt} \sum_{i=1}^{Vt} S_i^m \quad (4)$$

ここに、 V は日交通量 (台)、 t は期間 (日) である。

いま、 $n = Vt$ とすると、式 (3) は、

$$g = \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{F(x)^m \cdot (\pi x)^{m/2}} dx - C \cdot Vt \cdot S_0^m \quad (5)$$

のように定義できる。上記の式は変動応力について述べたが、式 (2) の一定振幅応力については、等価応力 = 一定振幅応力となり、式 (5) と同様な式となる。

4. 交通荷重特性の変化を想定した走行荷重シミュレーション

今回の活荷重モデルも先の研究³⁾と同様、阪神高速道路で実施された活荷重実態調査報告書⁵⁾における芦屋集約料金所での車種別の時間交通量の実測値に基づいて作成した。まず車種は、乗用車類、中型車類、大型車類、トレーラー類の 4 種類とし、さらに大型車類において軸重あるいは空車、積載車、過積載車の 3 つに細かく分類したものをを用いた。各車種の車両総重量は正規分布、対数正規分布、指数分布のいずれかに従うものとし、車幅は車種ごとに一定とする。また、車長は、乗用車類、中型車類、大型車類、トレーラー類の 4 種類とし、さらに大型車類においては軸重により細かく分類したものをを用いた。各車種の車幅は β 分布に従うものとした。

本研究では、平成 6 年 2 月に実施された設計荷重の改定¹⁾に伴い交通車両の大型化が予想されるため、トレーラー類・積載車の重量分布の平均値を 5t 増加の方向に移行させた場合のものと、これまでの調査で得られている実測値に基づいた場合の 2 ケースについて、活荷重列のシミュレーションを行った。なお、実際には車長などの車両構造特性の変化も予想されるが、それらについては、将来的な変化予測が困難なため、今回のシミュレーショ

ンでは、車両構造特性の変化は考慮していない。

シミュレーションにより得られた活荷重列を、2章で求めた α_{11} を用いて求められる影響面上に載荷することにより着目補剛材の時系列変動を求め、実働応力範囲 S_1 と等価応力範囲 S_0 を求める。今回の研究では疲労損傷の影響をより正確に把握するために、先の研究³⁾で実施した20tf以上の車種に限定したシミュレーションでなく、全車種を対象としてシミュレーションを行った。具体的には、1時間当たり1車線の交通量を平均値600台(1日交通量57600台、6時間交通量14400台)、標準偏差60台が発生するものとし、6時間分のシミュレーションを行う。これは車種別混入率に平均的な値を用いて交通量を適切に設定すれば、6時間程度のシミュレーション解析を行うことにより、補剛材の疲労信頼度は推定できるからである。

今回の研究でも比較のため、先の研究³⁾と同様20tf以上の重量トラックのみの載荷シミュレーションも併せて実施している。この場合のシミュレーションの諸条件は先の研究³⁾で示したものと同一ものを用いた。

なお、シミュレーションでは走行状態を再現しているため、衝撃の影響を考慮する必要があり、道路橋示方書に規定されている衝撃係数算定式を用いて、スパン長が新標準橋:39m、旧標準橋:27mより、衝撃係数(新標準橋:0.22, 旧標準橋:0.26)を考慮する。また、実働応力範囲は、時系列変動をレインフロー法を用いて求めるものとし、それぞれの荷重条件で算出された実働応力範囲 S_1 は指数分布、等価応力範囲 S_0 は対数正規分布に従うものとした。

5. 交通荷重特性の変化を想定した

鋼Ⅰ桁橋の疲労信頼度評価

1章のまえがきにおいて示したように最近、報告されている鋼Ⅰ桁橋の損傷例の中で数の多いものとして、鋼Ⅰ桁橋の主桁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、旧標準設計による鋼Ⅰ桁橋に集中している。それは、交通量が予想以上に多くかつ重車両の多いこと、あるいは補剛材が高応力状態にあることなどが、直接的な要因であるが、間接的には、次のような構造的特性、つまり、床版支間長が3.85mと大きく、床版厚が18cmと薄すぎることがあげられる。一方、新標準7本主桁橋においては、旧標準5本主桁橋よりも床版支間長が2.85mと短くなり、床版厚も25cmと厚くなって剛性の面で改善されており、まだ旧標準5本主桁橋で問題となっているような損傷は発生していない。しかしながら、旧標準5本主桁橋と同じ構造を有することから、今回の車両制限令の改訂に伴う交通荷重特性の変化が疲労に対する安全性に及ぼす影響についての検討が望まれる。

この章では、2章で述べた亀裂進展則による疲労信頼

性評価法を用いて疲労信頼度の評価を行う。具体的には、以下に示す2つの項目について検討する。

- (1) 交通荷重特性の変化による疲労信頼性への影響評価
- (2) 20tf以上のトラック荷重および全車種荷重載荷による疲労信頼度評価

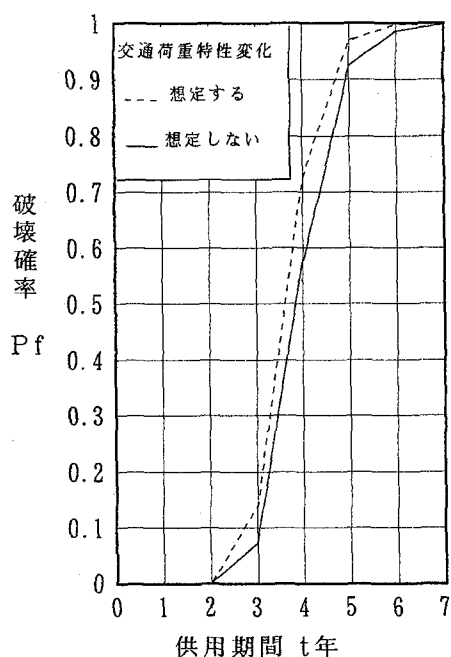
5.1 交通荷重特性の変化による疲労信頼性への影響評価

まず、車両制限令(設計自動車荷重)の改訂に伴う交通荷重特性の変化による疲労信頼性への影響評価を行う。全車種載荷で交通荷重特性の変化を想定した場合と、そうでない場合とでの道路橋に与える疲労信頼性への影響を比較することにより、交通荷重特性の変化による影響の大きさを評価する。

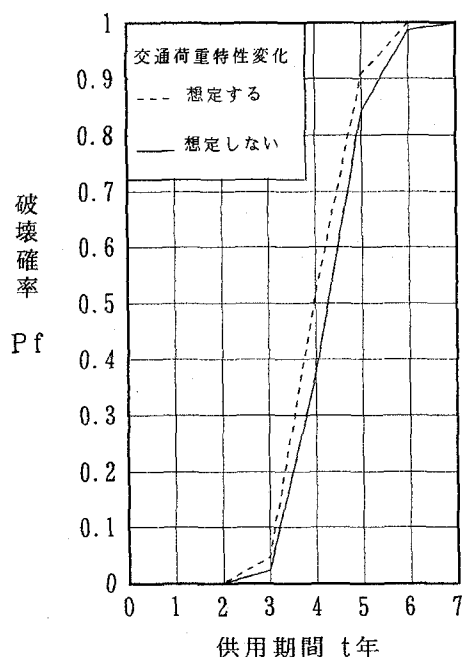
先の研究³⁾においても指摘したように、旧標準5本主桁橋については疲労破壊確率は大きく、解析点c、d両点ともに供用期間約10年での疲労破壊確率は1.0となっており、交通荷重特性の変化を考慮した場合としない場合の詳細な比較ができない。そこで、両ケースでの破壊確率の推移をより詳しく調べるために、解析年数を1年間隔に狭めて表したものを、Fig. 5に示す。この結果より、供用期間1~3年といった比較的早い段階における破壊確率は、交通荷重特性の変化を想定した場合の方が約2倍ほど高い値を示している。また、b点において供用期間10~30年における破壊確率を5年間隔で示したものを、Fig. 6に示す。ここで明らかのように、交通荷重特性の変化を想定した場合の破壊確率の増加率が想定しなかった場合より大きく、亀裂発生から限界亀裂長に達するまでの期間が短くなっている。なお、限界亀裂長としては、先の研究³⁾と同様に当該板厚の80%とした。

このことは、Fig. 7に示す新標準7本主桁橋における解析点eの供用期間10~40年までの破壊確率の推移を見ても明らかである。供用期間が約25年までのe点の破壊確率は、交通荷重特性の変化を想定した場合と、変化を想定しなかった場合を比較すると約2倍ほど大きくなっている。また、破壊確率が0.5を超えるのは、交通荷重特性の変化を想定した場合は供用期間約27年目で、変化を想定しなかった場合は供用期間約31年目であり、変化を想定した場合の方が約4年早くなっている。新標準7本主桁橋でのe点や、旧標準5本主桁橋でのc、d両点の解析結果を見ると、交通荷重特性を想定した場合の疲労破壊は、交通荷重特性の変化を想定しない場合に比べ数年早く生じる。また、亀裂が発生してから破壊すなわち亀裂が限界亀裂長に達するまでの期間も短くなってくる。

本研究においては、車両大型化に伴う交通荷重特性の変化に対し、トレーラ類・積載車の平均重量が単純に5tf増加した場合を想定したものであり、またこの車種の交通量は全交通量の1.74%にすぎない。これが、車種混入率が多い大型車類・タンデム軸・積載車等の平均重量が増加したとしたら、疲労破壊はもっと供用期間の早い時期に発生することが予想される。また、昭和53年に『RC



c 点の破壊確率



d 点の破壊確率

Fig.5 c 点, d 点の破壊確率の推移 (旧標準橋)

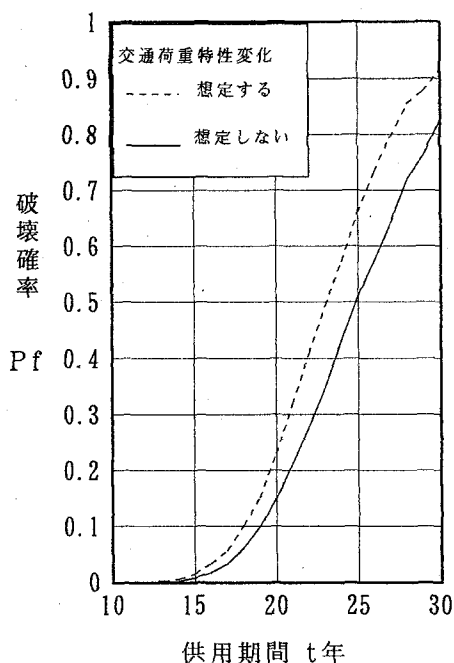


Fig.6 b 点の破壊確率の推移
(旧標準橋)

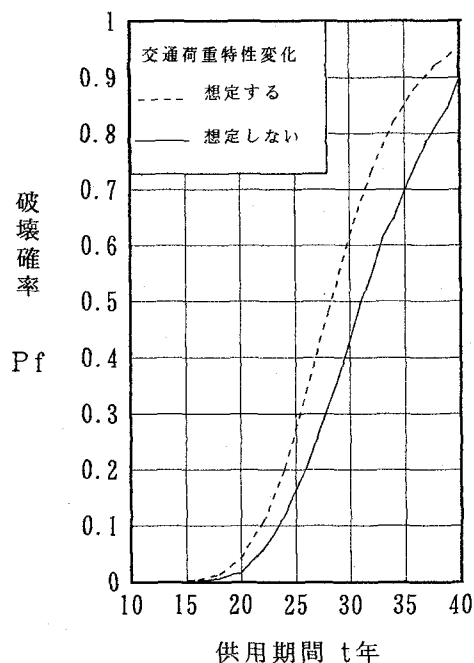


Fig.7 e 点の破壊確率の推移
(新標準橋)

床版に関する建設省通達』以降、旧標準5本主桁橋から新標準7本主桁橋に移行して15年以上過ぎている。今回の解析によると、交通荷重特性の変化を想定した場合も、想定しない場合も、新標準7本主桁橋のe点における破壊確率が供用期間10～20年の間に急激に上昇している。新標準によって建設された道路橋は現在この状況にあり、

亀裂の成長時期にあたっている。この時期に交通荷重が増加することは、亀裂の進展を早め限界亀裂長に到達する期間をかなり早くすることとなり、構造物（道路橋）の供用年数を短くすることとなる。そのため、今後の通行車両の大型化を考慮した上で、疲労調査、点検を行い適切な補強や補修といった維持管理が必要である。

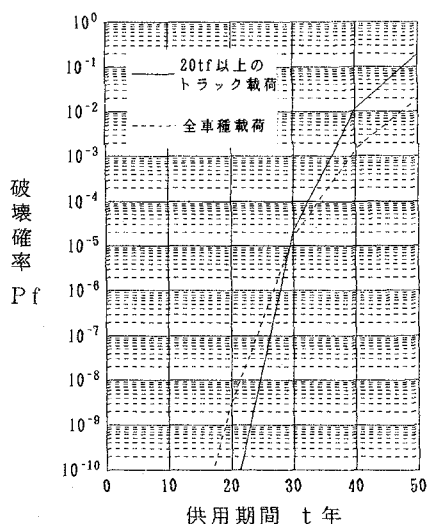
5.2 20tf以上のトラック载荷および全車種

荷重载荷による疲労信頼度評価

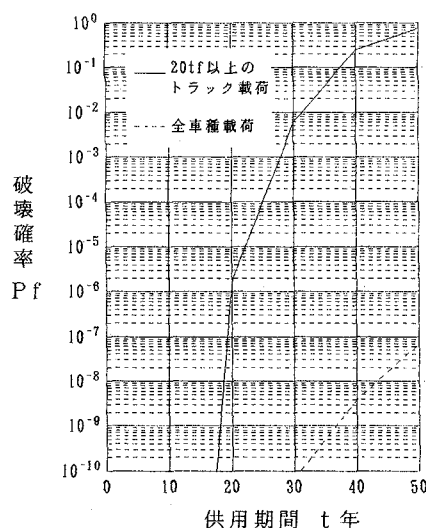
先の研究³⁾では、疲労損傷に影響を及ぼすのは主に重量トラックであるという研究結果⁴⁾より、総重量が20tf以上のトラックのみを対象とした場合についてのみ解析を行った。しかし、文献⁶⁾で述べられているように、かなり低い応力でも疲労損傷に影響を及ぼすという考えから、実際の道路で走っている全ての車種を対象とした場合(これ以後、全車種とする)も含めた2つの条件のもとで、道路橋がどの程度の疲労信頼度を有しているのか、あるいは走行荷重の違いによる信頼度から理解できることは何かを、検討する。2種類の荷重条件による解析の

対象として、新標準7本主桁橋に着目し、両条件による破壊確率の計算結果の違いについて述べることにする。ただし、いずれの荷重条件の場合も交通荷重特性の変化の影響は考慮していない。

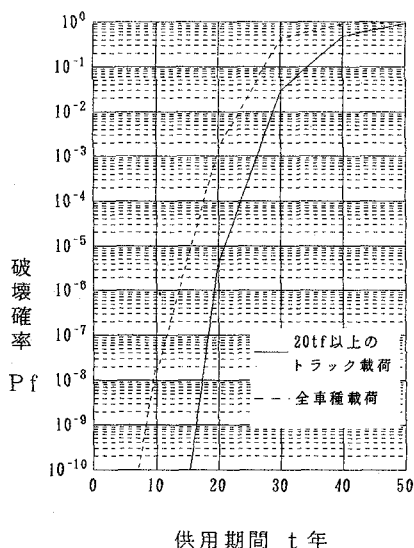
20tf以上のトラック载荷のみの場合と全車種载荷の場合の破壊確率をFig.8に示す。なお、解析点a、b两点では供用期間50年の破壊確率は0.0であるため省略する。Fig.8からわかるようにe、f点では、20tf以上のトラックのみの载荷での破壊確率は全車種载荷の破壊確率に比べて疲労信頼性が高い値となっている。c点においては、破壊確率が20tf以上のトラックのみの载荷の方が供用期



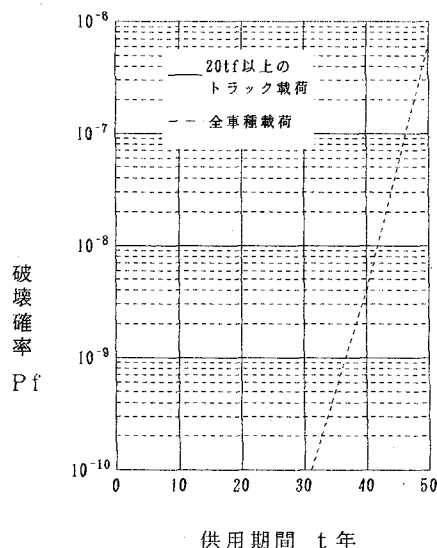
c点に関する破壊確率



d点に関する破壊確率



e点に関する破壊確率



f点に関する破壊確率

Fig.8 20tf以上のトラック载荷の場合と全車種载荷の場合の破壊確率

間 $t = 30$ 年付近までは全車種載荷に比べて小さな値となっているが、30 年をこえると逆に疲労信頼性は低い値をとっている。d 点においては、破壊確率が全車種載荷における破壊確率に比べてかなり疲労信頼度が低くなっている。これは、20tf 以上のトラックのみの載荷では、活荷重列を各レーンの影響線上に独立に載荷させて実働応力範囲を求め、その中で一番厳しい載荷状態での値を用いて等価応力範囲を推定する方法をとっているためであると思われる。また、e 点、f 点で全車種載荷の破壊確率が 20tf 以上のトラック載荷のみの場合の破壊確率を上回っている理由としては、以下のように考えられる。すなわち、全車種載荷と 20tf 以上のトラック載荷の等価応力範囲には、大きな開きが見られるが、実際の自動車交通量のうち 20tf 以上のトラックの交通量は約 5.7% であり、交通量全体に占める割合は決して大きいものではない。そのため破壊確率を求める際に用いる 20tf 以上のトラックの交通量と全車種の交通量に大きな差がこの破壊確率に影響を与えているものと考えられる。

以上の考察を基に、解析は 20tf 以上のトラックのみの載荷と、全車種載荷のどちらの載荷条件を用いて行うべきかについて考えてみることにする。実際の道路橋では、20tf 以上のトラックだけでなく中型車以下の車も走っており、またそれらが全交通量の約 94% を占めている。そのため、橋の疲労信頼度に対しては中型車以下の車を考慮に入れた解析が必要だと考えられている⁶⁾。しかし、中型車以下の車種かつ 20tf 以上のトラックを含めた全車種載荷によるシミュレーションには、多大な計算と時間を必要とする。その点、20tf 以上のトラック載荷のみの解析だと、全車種載荷の解析に比べて計算も簡単であるため、これまでこの 20tf 以上のトラック載荷の条件による解析が行われてきている。本研究の解析から、取合部補剛材における破壊確率を見ると、解析点 a、b 点では両載荷条件とも 0.0 を示しており、どちらも高い信頼性を有している。c、d 点においては、20tf 以上のトラック載荷での破壊確率は全車種に比べ大きくなり、安全側に評価されることになる。それとは逆に、e、f 点においては、20tf 以上のトラック載荷での破壊確率が小さくなり、危険側の評価となっている。従って、20tf 以上のトラック載荷で疲労信頼性解析を行う場合は、破壊確率が全車種載荷の場合より小さい値をとる解析点 e、f 点に対して注意を要する。

6. あとがき

旧標準橋ならびに新標準橋の主桁と荷重分配横桁の取合部補剛材を対象として交通荷重特性の変化を想定した場合の疲労解析を、亀裂進展則に基づく疲労破壊基準関数を用いて行った。その解析結果を以下にまとめる。

(1) 交通荷重特性の変化を想定した場合の疲労破壊確率は、変化を想定しない場合に比べ、新・旧標準とも若干高くなっている。また、破壊確率の増加率も大きく、

亀裂発生から限界亀裂長に達する期間も短いため急激に破壊が進行するものと思われる。今後、想定したトレーラ類積載車のみの車両重量の増加だけでなく、他の車両重量が増加されるとしたら、本研究での解析結果よりも早い時期での疲労破壊が予想される。また、既設の新標準橋も建設されてから 10 年以上経ち、亀裂発生時期にあたるため、今後の調査が必要である。

(2) 新標準 7 本主桁橋についても、今回の解析結果より、注意すべき解析点があり、この解析点における補強を考慮に入れた調査が必要と考えられる。なぜなら、道路橋示方書の改訂に伴う車両の大型化に伴い新標準 7 本主桁橋においても、疲労損傷が発生し、またそれが急激に進行すると考えられるからである。今後の補修・補強といった、維持管理を考慮に入れた調査が必要となってくるものと思われる。

(3) 20tf 以上のトラック荷重のみの載荷と全車種荷重載荷の 2 つの載荷条件に対して疲労信頼性解析を行った結果、解析点によっては両者の結果の間に大きな差異が生ずる場合があった。さらに、全車種載荷時に比べ破壊確率が小さい値をとる場合もあるため、そのような解析点の疲労信頼性をどのように評価するのかが問題となってくるものと思われる。

なお、本論文では今回の車両規制の変化に伴う車両重量モデルとして、簡単のために平均値を一律に 5 tf 増加させたものを考えた。しかし、今後精度の良い解析結果を得るためには、より合理的な重量分布モデルの作成が必要であると考えられる。その際、今回の車両制限令の改訂のように例えば、車両長さ、軸距に応じたモデルを考えると、疲労への影響が大きいと考えられる重量車両の上限が今回の車両制限令の改訂で変わっていない影響をどのように考えるか、または、道路交通法等の改正による過積載車に対する取り締まりの強化の影響をどのように考えるか等の点を考慮する必要があると考えられる。

本研究を実施するにあたり鳥取大学工学部上田茂教授には貴重な御意見を頂いた。また、鳥取大学工学部大学院生山本宏君には数値計算等ご協力頂いた。ここに感謝の意を表す。なお、本研究は文部省科学研究費一般研究 (C) (課題番号 07650546) の補助を受けて実施したものである。関係各位にお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（共通編），丸善，1994-2.
- 2) 長沼敏彦ら：実態活荷重を用いたシミュレーションによる主桁の最大応答評価，土木学会第 49 回年講，I-395，p. 788，1994-6.
- 3) 白木渡・松保重之：亀裂進展を考慮した道路橋の疲労信頼度評価，構造工学論文集，Vol. 40A，pp. 619-628，1994-3.
- 4) W. E. Nyman and F. Moses: Calibration of Bridge Fatigue Design Model, J. of Struc. Eng., ASCE, Vol. 111, No. 6, p. 1251, 1985-6.
- 5) 阪神高速道路公団（財）阪神高速道路管理技術センター-HDL 委員会報告書，阪神高速道路における活荷重実態調査と荷重評価のための解析，実態調査資料集，1984-3.
- 6) 三木千寿ら：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，p. 409，1990-3. (1995 年 9 月 18 日受付)