

走行荷重による鋼アーチ橋の 疲労損傷照査に対する動的立体解析の適用

APPROACH OF DYNAMICAL SPACE ANALYSIS TO FATIGUE DAMAGE ASSESSMENT
OF STEEL ARCH BRIDGE DUE TO TRAFFIC LOADS

梶川 康男*・織田 一郎**・杵本 正信***

By Yasuo KAJIKAWA, Ichiro ODA and Masanobu SUGIMOTO

In this paper, an assessment method to fatigue damage of steel structural members of highway arch bridges was proposed with the dynamical space finite elements.

Some results on the fatigue damage were obtained as follows.

- (1) The presented method was able to simulate the stress level of actual bridge members due to test loads.
- (2) A dynamical fatigue coefficient to indicate the ratio of dynamical fatigue damages to statical damages was defined.
- (3) By proposed methods with monte-carlo simulations to traffic loads, the stress histograms of members were able to be similar in the field observation.

1. はじめに

主要幹線道にある道路橋は、通行する車両の大型化と台数の増加により、設計当時には予想もしなかった高応力振幅の繰返しを受けており、橋梁形式によっては疲労破損の問題が持ち上がっている¹⁾。そのため、各方面で、損傷状態の実態調査^{2), 3)}、疲れ試験結果のデータベース化⁴⁾、実交通下における構造部材の応力頻度の計測および疲労亀裂進展寿命の評価法⁵⁾や疲労照査に用いる荷重⁶⁾に関する研究が進められている。疲労損傷に関する照査については、図-1に示すような流れ⁷⁾に沿って行われるのが望ましいが、自動車荷重の実態調査⁸⁾や解析による疲労損傷度の予測などはあまり進められていないのが現状である。

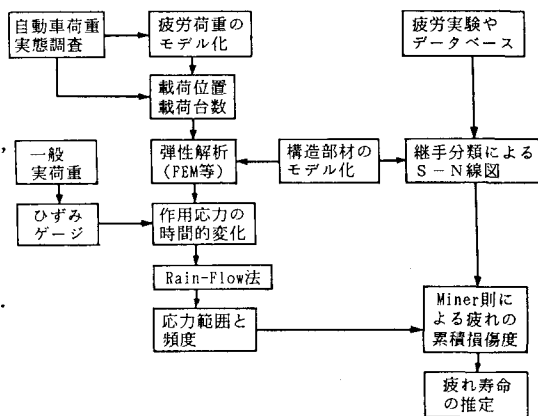


図-1 疲労照査の流れ

* 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野2丁目40-20)

** 工修 鹿島建設(株) 土木設計本部設計技術部 (〒107 東京都港区元赤坂1丁目2-7)

*** 工修 (株)フジエンジニアリング 調査設計部 (〒530 大阪市北区中崎西4丁目3-27)

ところが、最近の解析手法の発達は、数値計算によって動的影響を含めた道路橋の3次元挙動を把握することを可能にしているが、今までのところ損傷原因の究明や保守、補修方法の合理化等に生かされているとは言い難い。そこで、本研究では、疲労に関する研究成果のより有効な活用のため、モーダルアナリシスに基づく3次元解析手法を開発し、実際に損傷が見られた橋を参考にして、モデル橋を対象にシミュレーション解析を実施することによって、本解析法の妥当性の検証を行い、応力の動的成分による繰返しが疲労損傷に及ぼす影響を求めるとともに、荷重列モデルに対する橋梁部材の損傷度を求め、大型車の存在が疲労損傷に与えている影響について定量的な検討を行った。

2. 立体骨組構造の動的応答解析

大規模な橋梁構造を立体解析しようとする、特性行列の元数が増加して計算機の記憶容量を圧迫する。しかも、車両の移動を考えるため、載荷位置が時間的に変化するため、外力ベクトルの扱いが複雑になる⁹⁾。このような理由から多自由度の運動方程式を直接積分法によって解くことは不適當であるため、固有モードの直交性を用いてモード座標系への変換を行い、モーダルアナリシスを用いることとした¹⁰⁾。

まず、解析の対象としたのは、アーチ径間 54m、橋長 61.6m の実在する2ヒンジアーチ(図-2)を参考^{11), 12)}にして部材断面を決め、アーチリブ・補剛桁・縦桁・横桁・垂直材はFEMによって立体骨組(図-2参照)にモデル化し、コンクリート床版については2次元三角形薄板要素として考慮した。このモデル橋の固有値と固有モードについてはサブスペース法¹³⁾によって求めた。図-3に固有振動数と振動モードを示したが、比較的良好に類似した値が得られている。

つぎに、橋梁構造を有限要素法によって離散化し、変位ベクトル $\{u\}$ で変形を表す。また、剛性、減衰、質量の特性を表すマトリックスをそれぞれ $[K]$ 、 $[C]$ 、 $[M]$ とし、車両による外力ベクトルを $\{f\}$ とすると、多自由度系(仮に自由度 N とする)の運動方程式が得られる。

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{f\} \quad \text{--- (1)}$$

一方、固有ベクトル $\{\phi_i\}$ の直交性より、橋梁の変位、速度および加速度はつぎのように表わすことができる。すなわち、

$$\{u\} = \sum_{i=1}^n q_i \{\phi_i\} \quad \text{--- (2)}$$

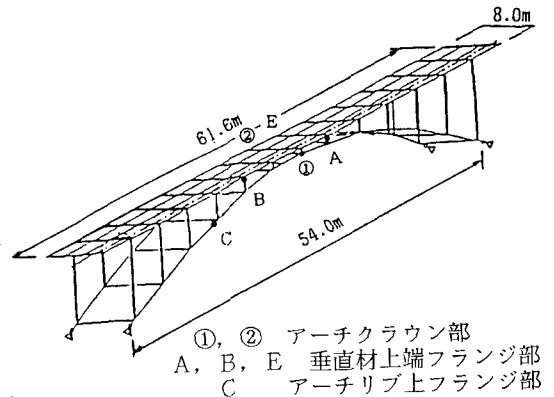


図-2 対象としたアーチ橋

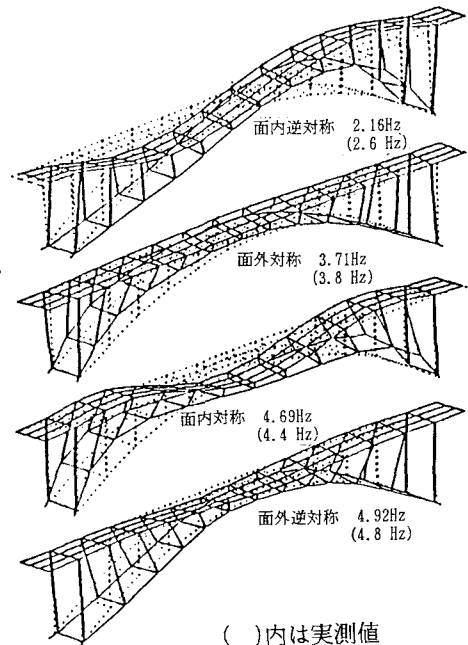


図-3 固有振動モードと振動数

$$\{\dot{u}\} = \sum_{i=1}^n \dot{q}_i \{\phi_i\} \quad \text{--- (3)}$$

$$\{\ddot{u}\} = \sum_{i=1}^n \ddot{q}_i \{\phi_i\} \quad \text{--- (4)}$$

ただし、 q_i 、 $\dot{q}_i$ 、 $\ddot{q}_i$ は i 次モード座標であり、それぞれのモードの物理座標系での変位、速度、加速度に対する影響度を示す。

路面凹凸と自動車の走行の影響を考慮し、以上の運動方程式をニューマークの β 法によって数値積分することによって、任意時刻の橋梁のモード応答量を表わす q_i を得ることができる。よって q_i を用いると、任意の着目点の動的な影響を考慮した応力 σ_{sd} は次式で求められる。

$$\sigma_{sd} = \sum_{i=1}^n q_i \sigma_i \quad \text{--- (5)}$$

ここに、 σ_i は固有ベクトルが $\{\phi_i\}$ で与えられた場合の基準点の応力である。動的応答計算の流れを図-4に示す。

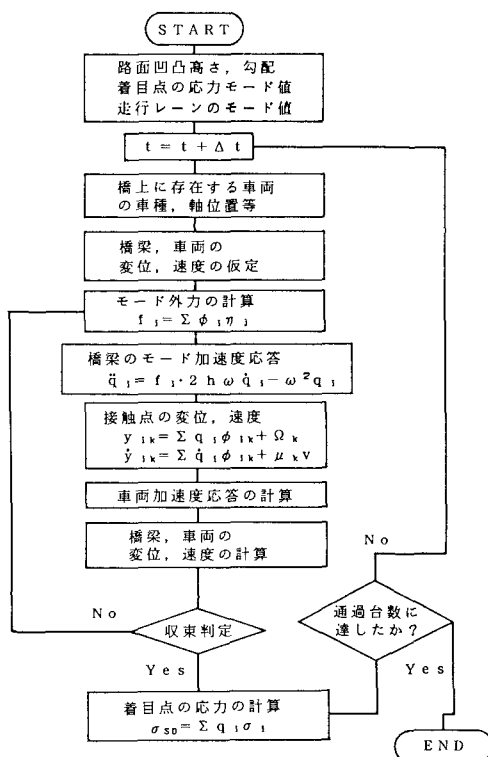
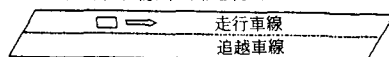


図-4 動的応答の計算の流れ

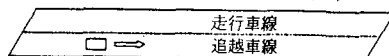
3. 解析モデルの妥当性と数値解析例

モデルとした橋梁では試験車（後軸にタンデム2軸、総重量21トン）による走行試験（試験車の走行状態は図-5参照）が実施されているので、試験車走行時の条件に従って応答解析を行い、解析結果と測定結果との比較を行った。試験車は図-6に示したように後軸にタンデム2軸を考慮したモデルとした。解析での車両走行位置が縦桁間であるので、走行位置でのモード値として両縦桁の平均値を用いた。路面凹凸についてはモデルとした橋梁では計測されていないので、阪神高速道路で実測されたデータを用い、橋梁の加速度値が実測値とほぼ一致するように凹凸高さを調整して用いた。応答解析には10次までの固有モードを考慮し、各モードの減衰定数として0.015を用いた。アーチクラウン付近の最大変位と垂直材上端の最大応力を、解析結果とともに図-7、8に示した。なお、Caseは試験車の走行状態を示しており、図-5の3ケースである。Case-1とCase-2では計測結果と解析結果はよく一致しており、Case-3では3台の自動車の走行状態や載荷状態を忠実に表していないためか解析値が計測値

Case 1 走行車線単独走行 (47km/h)



Case 2 追越車線単独走行 (46km/h)



Case 3 3台並行連行走行 (47km/h)

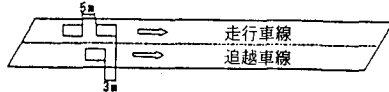


図-5 試験車走行時の走行パターン

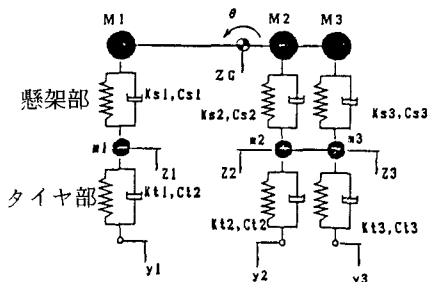


図-6 解析に用いた車両モデル

よりも大きくなっている。しかし、おおむね十分近似した結果が得られており、本解析法が実橋の応力状態を十分シミュレートしているものと言えよう。

4. 疲労損傷に及ぼす振動の影響

車両が走行したときの動的応答解析により、橋梁主要部材（例えば、垂直材とアーチリブなど）の軸力と曲げによる応力（図-9）の履歴を求めることができる。その結果、あらかじめ、着目箇所の継手形式に対応するS-N線図が分かっているれば、レインフロー法¹⁴⁾によって動的応力波形の応力範囲と頻度をカウントし、マイナー則に基いて、疲労損傷度を計算することができる。ここでは、まず、大型車両（20トン）が走行車線を通過したときの垂直材とアーチリブの疲労損傷度（S-N線¹⁵⁾については、垂直材にはECCS71をアーチリブにはECCS80を用い、動的な影響が最も大きく現れることになる修正マイナー則を使用、図-10参照）を求めることとした。

まず、動的な応力を含めた全応力 σ_{SD} ならびに静的な応力 σ_s に対して求めた損傷度を、それぞれ全疲労損傷度 D_{SD} 、静的疲労損傷度 D_s と定義し、しかも、 D_{SD}/D_s を動的疲労係数 D_F と定義した。ここでは、疲労損傷度の動的割増率を示す動的疲労係数がどのようなパラメータに影響されるかを検討した。

図-11 (a) には路面凹凸高さを標準高さの1, 2, 3倍に変化させた場合を示した。路面の凹凸が大きくなるに従って動的疲労係数が大きくなり、路面凹凸が疲労損傷に影響を及ぼしていることがわかる。図-11 (b) には、走行速度による影響を示したが、低速の場合にはその影響が少ないことを示している。図-11 (c) には車両バネ上固有振動数による影響を示したが、ほとんど影響していない。図-11 (d) は車頭間隔を15mとして、連行台数を変化させた場合の結果であるが、垂直材ではその影響を受けないが、アーチリブでは台数の増加に従ってその影響も大きくなっている。

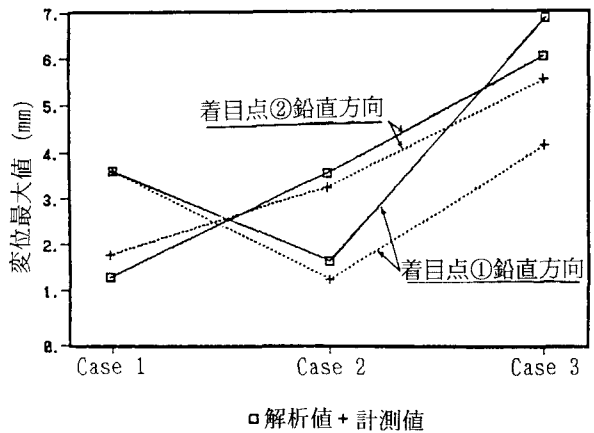


図-7 変位最大値の解析値と計測値の比較

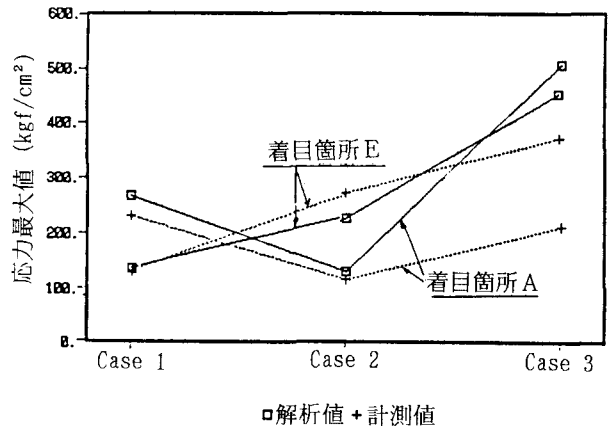


図-8 応力最大値の解析値と計測値の比較

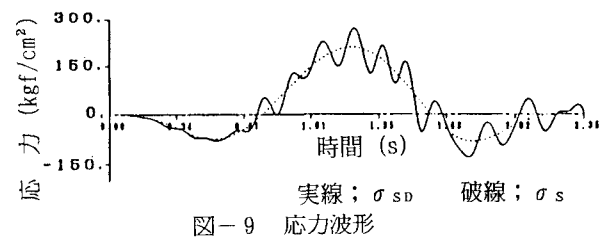


図-9 応力波形

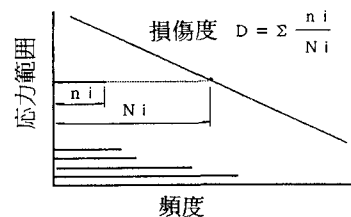


図-10 S-N線図とマイナー則（概念図）

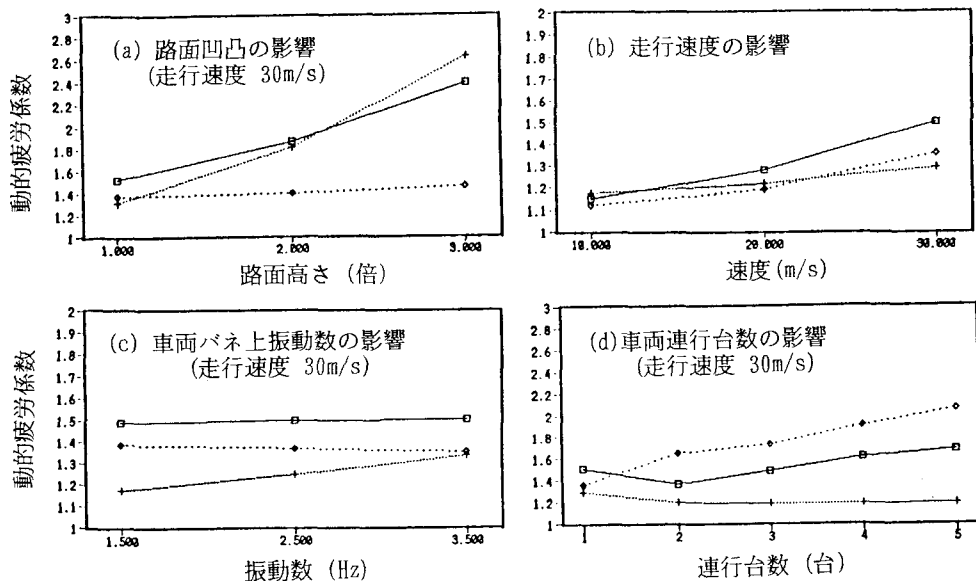


図-1-1 動的疲労係数への影響 □ 着目箇所A・着目箇所B ◇ 着目箇所C

動的疲労係数をそのまま設計係数として用いることはできないが、何らかの形で動的な影響係数が設計上必要ではないかと考え、その一例を示した。

5. 自動車荷重列による疲労損傷度の推定

ここでは、実交通下での道路橋の疲労損傷度を推定するため、従来の研究^{5)~7)}を参考にして、モンテカルロ法によって移動車両列のサンプルを作成して解析を行った。

1) 自動車荷重列の作成

まず、大型車（最大積載時の総重量が10tf以上、モデル橋での混入率26%）を代表的な5タイプに分類して（図-1-2参照、懸架バネ定数は基本総重量時に3Hzあるいは2Hzになるように設定）、それぞれのタイプの混入率、軸種、軸距、車両重量分布などを阪神高速道路での活荷重の調査結果¹⁶⁾、ならびに自動車諸元表¹⁷⁾を参考にして決定することとした。表-1に示した各大型車についての空車・積載車・過積載車の比率によって一様乱数から車種を定めた。そして、表-2に示した車両重量の確率分布形（図-1-3のように空車には正規分布、積載車には対数正規分布、過積載車には指数分布）から乱数によって重量を求めた。ただし、表-2に示した重量の上限と下限値を設けた。さらに、求められた重量を図-1-2に示した軸重の比によって各軸に振り分けた。

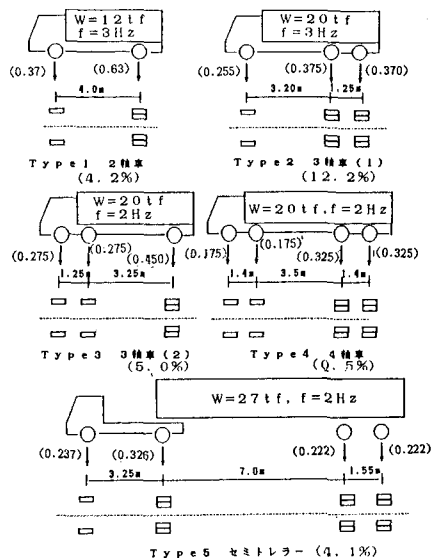


図-1-2 損傷計算に用いた大型車のモデル

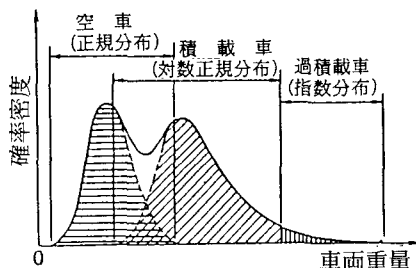


図-1-3 積載による重量分布の概念

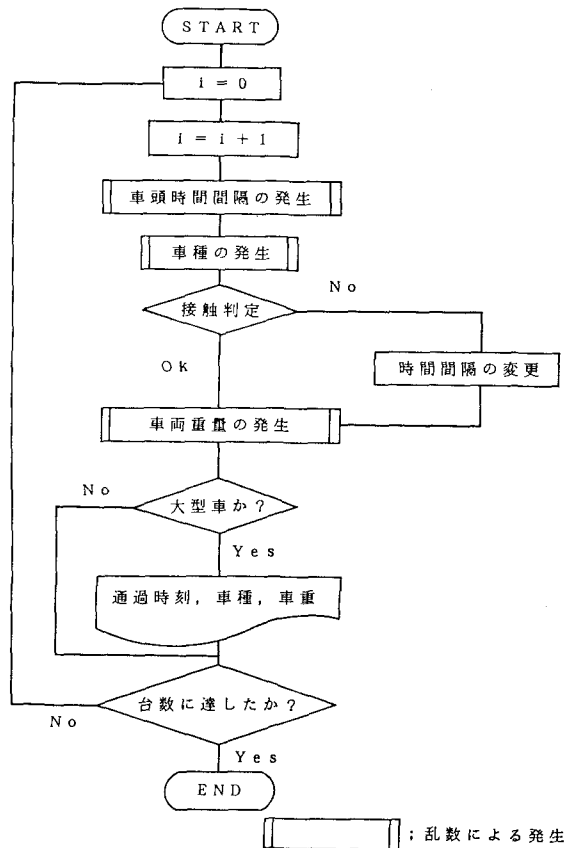
表－1 各車種の混入率と重量分布形

車 種 分 類		混入率	分布形	平均値	標準偏差	上限値	下限値
大型車 2 軸 (Type 1)	空 車	2.40%	正規	7.5tf	2.13tf	14.0tf	3.5tf
	積載車	1.78	対数正規	14.2	2.61	20.0	7.6
	過積載車	0.01	指数	22.2	2.20	40.0	20.0
大型車タンデム軸 (Type 2-4)	空 車	6.20%	正規	11.5tf	2.11tf	17.8tf	5.8tf
	積載車	11.42	対数正規	20.3	3.37	30.0	11.5
	過積載車	0.09	指数	32.3	2.29	60.0	30.0
トレーラー (Type 5)	空 車	1.60%	正規	13.7tf	2.97tf	22.6tf	5.2tf
	積載車	2.50	対数正規	25.6	10.67	79.0	13.7

また、走行車線と追越し車線の独立な流れを考え、交通量は1600台/時/車線とし、車頭時間間隔には、位相が3のアーラン分布を用いた。以上の仮定に基づき、図－1 4 に示したフローに従って、表－1 に示す3種類の自動車荷重列を1時間分（2車線で3200台/時、モデル橋での交通量は77000台/日であるのでその時間平均交通量）を作成した。そのうち、①は対象とした橋梁の実際の交通流を想定したものであり、②は軸重違反車の影響を調べるため、すべての車種の車両重量の上限値を20tfとしたものである。そして、③は①の交通流が渋滞した場合を想定したものであり、走行速度を40km/hとし、平均車間距離も半分とした。①～③の自動車荷重列の作成には同一の乱数の初期値を与えることによって、全く同じ特性を有するサンプルを得た。

2) 応力頻度分布に関する考察

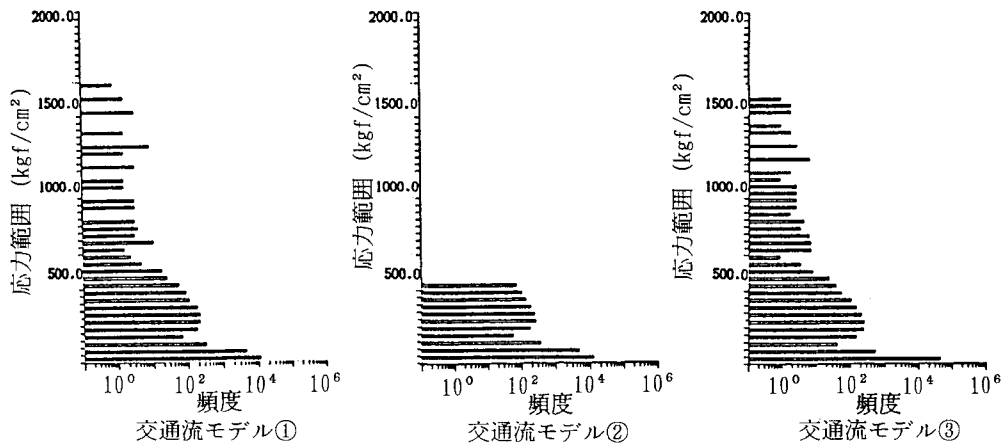
以上の移動荷重列サンプルが走行した場合の応答解析を行い、疲労損傷度の計算をした。計算結果の一例として着目箇所A（垂直材、S N線図ECCS71）の応力ヒストグラムを図－1 5 に示した。荷重の重量特性が同じである、①と③では類似のヒストグラムとなっている。②はすべての車種の車両重量の上限値を20tfとしたものであり、①との違いは明白であり、荷重列の車両の到着特性が全く同一であることを考慮すると、①と③における500kg/cm²を超える高応力振幅の繰り返しは、20tfを超える大型車両の影響であることがわかる。



図－1 4 自動車荷重発生の流れ

表－2 自動車荷重の交通流モデル

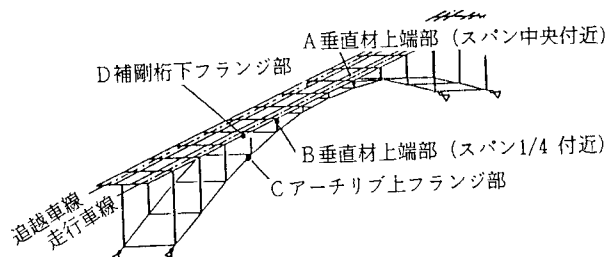
	走行速度	平均車頭間隔	重量の上限値
交通流モデル①	80km/h	50m	79tf(トレーラー)
交通流モデル②	80km/h	50m	20tf
交通流モデル③	40km/h	25m	79tf(トレーラー)



図－1 5 解析による垂直材上端（A点）の応力ヒストグラム

3) 疲労損傷度に関する考察

各荷重列モデルに対する着目箇所（図－1 2 参照）の1時間分の疲労損傷度と動的疲労係数をまとめて表－3に示した。疲労損傷度について、20tfを超える車両が疲労に与えている影響は大きく、損傷度が3倍以上になっていることがわかる。そして、③の交通流が渋滞を想定した場合であり、①の通常の交通流を想定した場合とでは損傷度に大きな差異はなく、走行速度の違いによる動的な影響を考えると渋滞によって大型車が同時に载荷することの影響は小さく、実際の交通流と渋滞時の交通流による動的疲労係数は最大で約1.4であり、動的な成分による損傷度の割増しは0.4程度であることがわかる。一方、②の交通流に対する動的疲労係数はみかけ上、大きくなっているが、これは大振幅の応力成分が生じない分、損傷度が小さく、動的振幅の影響が相対的に大きく現れるためである。



図－1 6 疲労損傷着目箇所

表－3 荷重列（1時間）による疲労損傷度と動的疲労係数

(a) 着目箇所A（垂直材）

	損傷度（/時）	動的疲労係数
交通流モデル①	81×10^{-6}	1.32
交通流モデル②	27×10^{-6}	1.79
交通流モデル③	63×10^{-6}	1.00

(c) 着目箇所C（アーチリブ）

	損傷度（/時）	動的疲労係数
交通流モデル①	6.9×10^{-6}	1.37
交通流モデル②	2.0×10^{-6}	1.76
交通流モデル③	6.3×10^{-6}	1.27

(b) 着目箇所B（垂直材）

	損傷度（/時）	動的疲労係数
交通流モデル①	52×10^{-6}	1.08
交通流モデル②	17×10^{-6}	1.30
交通流モデル③	57×10^{-6}	1.04

(d) 着目箇所D（補剛桁）

	損傷度（/時）	動的疲労係数
交通流モデル①	0.96×10^{-6}	1.30
交通流モデル②	0.29×10^{-6}	1.61
交通流モデル③	1.01×10^{-6}	1.43

6. まとめ

走行荷重による道路橋の立体応答解析の手法を開発し、モデル橋に対して解析を実施することによって本解析法の妥当性を検証した。さらに、そのモデル橋に対して走行荷重に対する疲労損傷解析を行い、疲労損傷に及ぼすパラメータを求めるとともに、疲労損傷に及ぼす振動の影響を求めた。まだまだ、この種の検討は始まったばかりであり、今後、さまざまな形式橋についても疲労損傷解析シミュレーションを実施し、本手法の確立を計るとともに、新しい疲労設計法の一つとして提案していきたいと考えている。

最後に、本解析を進めるに際しまして、種々の御助言を下さいました名古屋大学の山田健太郎教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) 福島・上村・岩竹・高田：名神高速道路鋼アーチ橋（蟬丸橋）の改良計画，
橋梁と基礎，23巻10号，pp.23-29，1989.
- 2) 土木学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，第 368号，pp.1-12，1986.
- 3) 三木・坂野・館石・福岡：鋼橋の疲労損傷例のデータベース構築とその分析，
土木学会論文集，第 392号，pp.403-410，1988.
- 4) 坂巻・山田：疲れ試験データベースの作成とその利用，土木学会論文集，pp.547-553，1985.
- 5) 山田・篠田：実働応力を考慮した道路橋の破壊力学による疲労損傷程度の推定，
構造工学論文集，Vol.36A，pp.967-974，1990.
- 6) 三木・杉本・宮崎・森：鋼道路橋の疲労照査のための荷重に関する研究，
構造工学論文集，Vol.36A，pp.975-984，1990.
- 7) 山田・梶川：橋梁の疲労設計，土木学会中部支部昭和63年度技術講習会テキスト，
「構造物の新しい設計法の考え方」，pp.75-96，1988.
- 8) 梶川・西沢・杵本：可搬式自動車交通流自動観測システムの開発，
土木学会論文集，第 391号，pp.107-114，1988.
- 9) 川谷・小松・佐々木：走行自動車荷重を受けるプレートガーダー橋の動的応答特性に関する研究，
土木学会論文集，第 392号，pp.351-358，1988.
- 10) 前田・米田・西土・磯：走行車両による立体骨組構造物の動的応答解析と留意点，
川田技報，第6巻，pp.115-119，1987.
- 11) 福島・岡・岩竹・竹中：名神高速道路蟬丸橋（鋼2ヒンジアーチ橋）の架換え工事，
橋梁と基礎，24巻4号，pp.2-8，1990.
- 12) 西星・山田・岡・寺田・杵本：アーチ橋の疲労損傷に対する補強効果について，
構造工学論文集，Vol.37A，1991.
- 13) K.J.Bathe・E.L.Wilson著・菊池文雄訳：有限要素法の数値計算，科学技術出版社，1979.
- 14) 遠藤・井上：レインフロー法の考え方とその応用ー疲労の累積被害評価法，
日本溶接学会誌，第 706号，1988.
- 15) ヨーロッパ鋼構造協会連合(ECCS)TC-6：鋼構造物の疲労設計指針（日本鋼構造協会訳），1985.
- 16) 阪神高速道路公団：阪神高速道路における活荷重実態調査と活荷重評価のための解析，1984.
- 17) 自動車技術会：自動車諸元表，昭和57年度版.

(1990年10月12日受付)