

道路橋疲労照査支援のための応力変動シミュレーションプログラムの開発

AN INTERACTIVE SIMULATION PROGRAM FOR STRESS VARIATIONS IN AID OF FATIGUE CHECK OF EXISTING HIGHWAY BRIDGES

森 猛*、山下 清明*、長谷川 洋介*、石井 竜太**

Takeshi MORI, Kiyooki YAMASITA, Yohsuke HASEGAWA, Ryuta ISHII

【抄録】既設橋梁の疲労照査を支援する目的で、一般の橋梁技術者が車両の走行により橋梁部材に生じる応力変動の解析を容易に行なうための対話型プログラムをパーソナルコンピュータをベースとして開発した。本プログラムは、車両を形式により8種類に分類し、各車両の構成比・時間交通量・走行速度を確定値、車両の走行順序・車両の間隔と車線幅方向に対する走行位置・車両の重量を確率変量とした荷重列のモンテカルロシミュレーションを行ない、それが橋上を走行する際に生じる応力変動を応力の影響面を利用して解析するものであり、1車線および2車線（同一方向、対面方向）の橋梁に適用できる。車両の走行とそれに伴う応力変動は同時にグラフィック画面上に表示される。

【Abstract】 We have developed an interactive program by using personal computer for bridge engineers to do analysis of stress variations caused by actual traffic flow, which effectively support fatigue check for existing highway bridges. In this program, the traffic flow is simulated, in which vehicles are divided into eight types, the constitution of vehicle types and the traffic volume are input data, and the vehicle weight and the array and headway of vehicles are considered as random variables. The stress variations are then analyzed by using the stress influence plane. The passing of vehicles and stress variations can be graphically visualized at the same time. The program can apply to one-lane and two-lanes bridges.

【キーワード】 既設橋梁、疲労照査、変動応力シミュレーション、対話型プログラム、応力範囲頻度分布

【Keywords】 existing bridge, fatigue check, simulation of stress variations, interactive program, stress range histogram

1. はじめに

我が国の道路橋においては、繰返し応力の原因となる活荷重が死荷重に比べて小さいとされ、疲労設計は鋼床版を除いて行なわれていない。しかし、近年の車両の重量化や大型化、交通量の増加および高張力鋼の使用や設計技術の進歩に伴う橋梁の軽量化などの結果、道路橋においても疲労が原因と考えら

れる損傷事例が数多く報告されはじめている¹⁻³⁾。このため、既設の道路橋の疲労に対する安全性の照査および疲労寿命・余寿命の予測を精度よく行なうための手法の確立が望まれている。

疲労照査あるいは疲労寿命・余寿命の予測は、対象とする部位に生じる応力変動に対してレインフロ

* 法政大学工学部土木工学科、小金井市梶野町 3-7-2、TEL 0423-87-6114

** 大成建設東京支店土木部設計室、新宿区西新宿 1-25-1、TEL 03-5381-5477

一法などの応力計数法を適用し応力範囲の大きさとその数（応力範囲頻度分布）を求め、それをモデル試験体の疲労試験結果などから求められる疲労寿命曲線と比較することにより行なうのが合理的とされている。疲労寿命曲線については、数多くの試験や解析が行なわれ、その成果は日本鋼構造協会の『鋼構造物の疲労設計指針・同解説』⁴⁾などの疲労設計基準類に反映されている。一方、道路橋部材に生じる応力の変動は、乗用車、トラック、バス、トレーラートラックなどの様々な大きさおよび重さの車両が走行することにより生じるため、非常に複雑となり、実測により求められることが多い。

三木および著者の一人らは、荷重列としての車両走行のモンテカルロシミュレーションと断面力の影響線を利用した応力変動の解析方法を提案し⁵⁾、その手法が有効であることを実測結果と比較することにより確かめる⁶⁾とともに、道路橋の疲労設計荷重について検討している^{7,8)}。また、梶川らは、三木らと同様の荷重列のモンテカルロシミュレーションと応力の動的解析を組合せた応力変動解析を行ない鋼アーチ橋の疲労照査に利用している⁹⁾。このように、荷重列のモンテカルロシミュレーションを利用した応力変動の解析は、道路橋の疲労に対する安全性を照査する上で非常に有効と考えられる。しかし、このような応力変動の解析は、一部の研究者が特定の目的のために利用しているにすぎず、道路橋の維持管理に携わる一般の技術者が利用するには至っていないのが現状である。

そこで著者らは、既設橋梁の疲労照査を支援する目的で、一般の技術者が車両の走行により橋梁部材に生じる応力変動の解析を容易に行なうための対話型プログラムをパーソナルコンピュータをベースとして開発した。ここでは、その概要と使用例について報告する。

2. 応力変動シミュレーションプログラム

2.1 プログラムの概要

本プログラムは、三木らの応力変動解析方法⁵⁾を一般の橋梁技術者が容易に、また種々の条件下で行なえるように改良したものである。主な改良点は、

- ①対話形式のプログラムとした、
- ②断面力の影響線ではなく、応力の影響面を利用

- することにより、影響線では求めることのできない位置の応力変動も解析できるようにした、
 - ③車両走行とそれに伴う応力変動をグラフィック画面上で視覚的に捉えることができるようにした、
 - ④1および2車線道路橋を対象とし、2車線道路橋については同一方向の車両走行に加え、対面方向の解析もできるようにした、
- などである。なお、プログラムの言語は BASICである。

図1にプログラムのフローチャートを示す。本対話型プログラムでは、まず走行車線を選択し（単車線、複数車線・同一方向あるいは複数車線・対面方向）、車両データや影響面データ等を入力して、それらの車両が橋上を通過する時の応力変動を影響面を利用して解析する。さらに求めた応力変動にレインフロー法を適用することにより、疲労照査あるいは寿命予測に必要な応力範囲の頻度分布を求める。

2.2 荷重列のシミュレーション

荷重列のシミュレーションは図2に示す手順で行なう。すなわち、車両を図3に示すように8つの形式に分類し、車両の走行順序、車両の間隔と車線幅方向に対する走行位置、車両の重量を確率変量としたモンテカルロ法により荷重列をシミュレートする。

車両の走行順序は、8形式に分類した車両の構成比にしたがってシミュレートする。走行間隔は、車頭時間間隔 $f(t)$ が(1)式で示される自由度3のアーラン分布に従う¹⁰⁾ものとしてシミュレートする。

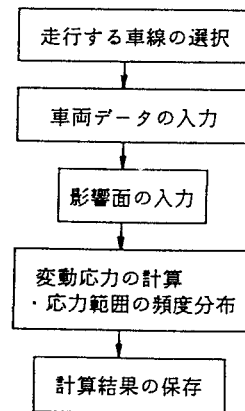


図1 プログラムの流れ図

$$f(t) = \lambda \cdot \exp[-\lambda t] \cdot (\lambda t)^{n-1} / (n-1)! \quad (n=3) \quad (1)$$

$\lambda = n / E(t)$ t : 平均車頭時間間隔 (秒)
 $E(t) = 3600 / Q$ Q : 時間交通量 (台/時間)

車線幅方向に対する車両の走行位置は、車線中央を中央値とする標準偏差13.5cmの正規分布に従うとした¹¹⁾。8形式に分類したそれぞれの車両の重量は正規分布あるいは対数正規分布に従うとし、その分布のパラメータとなる平均値・分散値・最大値・最小値を与えることにより重量分布を定める。しかし、これらの値をすべて入力することは使用者にとってかなり煩雑な作業となると思われる。そこで本

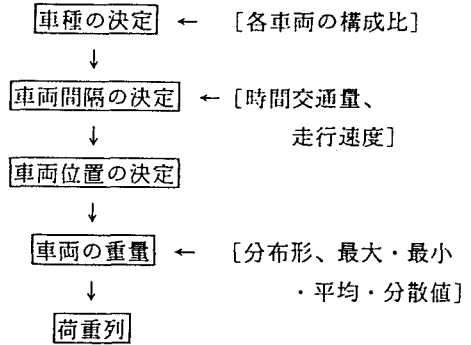


図2 荷重列シミュレーションの流れ図

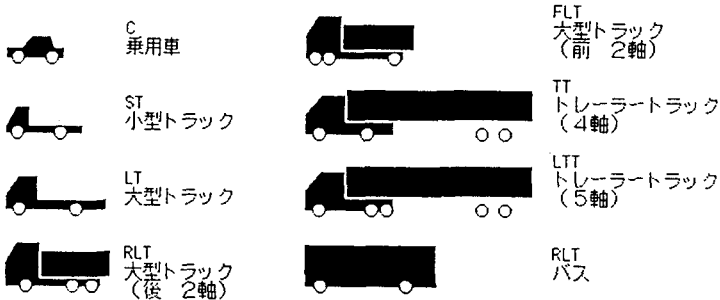


図3 荷重列シミュレーションに用いる車両の形式

プログラムではあらかじめ実測値に基づいたデータ^{11,12)}を入力しており、そのデータを必要に応じて変更するという方法を取っている。

2.3 影響面の作成

モンテカルロシミュレーションにより定めた荷重列が橋上を通過する際の応力の変動を求めるため、応力の影響面を作成する。影響面は、橋軸方向に60等分 (61行、0~60行)、橋軸直角方向に20等分 (21列、0~20列) しており、それぞれの位置 (61x21箇所) に対する縦距を入力することにより作成する。影響面の縦距は、応力が曲げモーメントや軸力等の断面力と弾性範囲内では比例関係にあるので設計に通常用いられる断面力の影響面から求めることができ、また試験車両を用いた応力測定の結果を利用することも考えられる。縦距の大きさは 1tfの

単一荷重を載荷した時のものとし、単位はMPaとした。縦距の値の入力は、まず0列目に対して行なう。すなわち、0列目で橋軸方向に60等分したそれぞれの位置に対応する値を入力する。数値を入力しないでリターンキーを押せばその区間は直線近似される。これにより入力作業を簡略化している。0列目の入力が終われば、入力値が正しいかどうかをグラフィック画面上で確認する。確認が終われば自動的につぎの列、すなわち1列目に移り縦距の値を入力する。この作業を20列目まで繰り返す。ただし、前列での値を変更する必要がない場合には、リターンキーを押すだけで前列と同じ値が入力される。この作業が終了すると影響面の画面が表示され、視覚的に影響面を確認することができる。

任意の位置での縦距の値は、以下のように求めた。縦距値を入力した 21x61の点を節点として三角形に

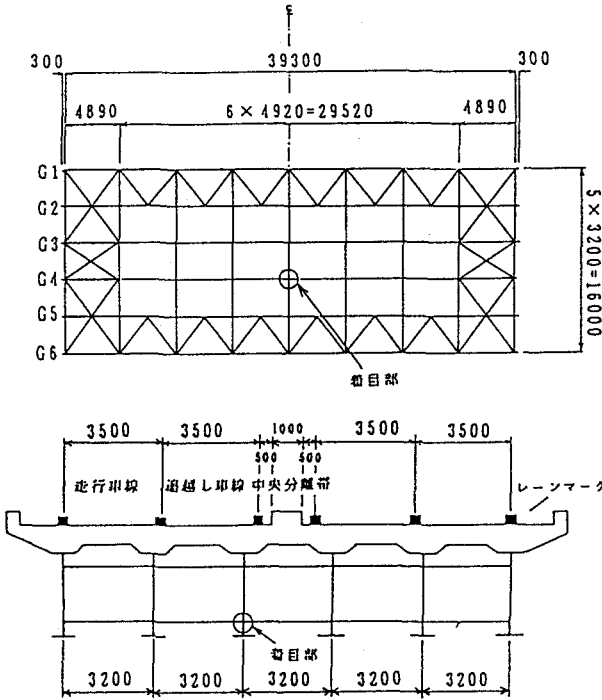


図4 解析対象とした橋梁モデル

要素分割する。荷重点がどの三角形に含まれるかを判断し、その三角形を構成する3つの接点での縦距値を基に線形補間する。

2.4 応力変動の解析

2.2節で設定した荷重列が橋上を通過する際の応力変動は、2.3節で設定した応力の影響面を利用して解析する。その際、車両の走行状態を画面上に表示するとともに、それに伴う応力変動もリアルタイムに表示する。応力変動波形から応力範囲頻度分布への変換はレインフロー法を用いた。この方法は、応力変動の極値数列を短縮し、計算機の記憶容量と計算時間を節約させる効果をもつ。

応力範囲頻度分布を求める際、応力範囲の刻み幅を設定する必要がある。文献⁴⁾によれば、刻み幅は最大応力範囲の1/20以上とすることが望ましいとされている。本プログラムでは、設定した荷重の内最大の重量の車両により生じる応力範囲を予め算出し、その値を同時載荷の影響を考慮して3倍し、さらにそれを1/100とした値を刻み幅とした。計算された応力範囲頻度分布はヒストグラムとして画面上

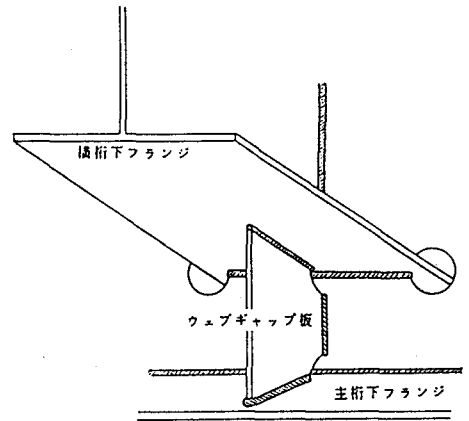


図5 主桁・横桁交差部の詳細

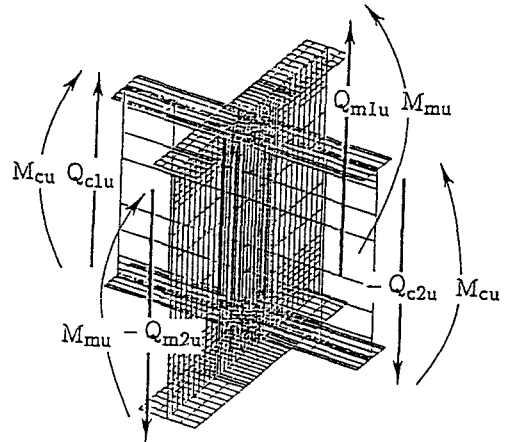


図6 交差部の有限要素解析モデル

に表示されその画面をハードコピーする事もできる。また、解析条件および応力範囲頻度分布はファイルに保存され、必要に応じて読み出すことができる。

3. 主桁・横桁交差部の応力変動シミュレーション

ここでは、疲労損傷の発生が懸念されている鉄桁橋の主桁と横桁の交差部¹³⁾の応力変動を求めために行なったプログラムの実行例をグラフィック画面を使って示す。

3.1 解析対象および応力影響面の解析

対象とする橋梁は図4に示す一般的な6本主桁単純鉄桁橋である。本橋は、中央分離帯で上り車線と下り車線に分けられた4車線道路橋である。対象と

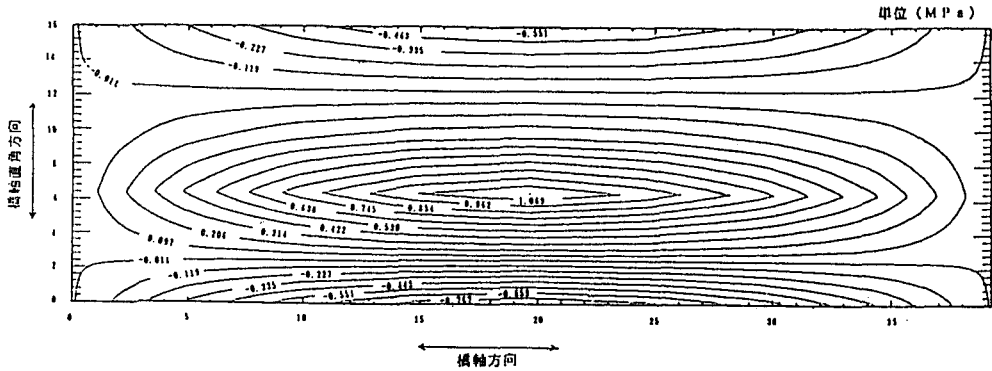


図7 横桁下フランジの応力の影響面

する交差部は図4に○印で示す位置である。図5は交差部の詳細を示したものであるが、ここでは主桁と横桁の溶接部近傍（ウェブギャップ板のスカラップの内部で横桁下フランジ面）に生じる応力変動を対象とする。

着目部の応力の影響面を求めるために有限要素解析を以下の手順で行なった。まず、主桁と横桁のみを対象として梁要素を用いた格子解析を行ない、着目する交差部を構成する梁に生じる断面力（曲げモーメント、せん断力）を求める。次に、図6に示すように交差部の部分モデルを板要素を用いて作成し、単位の断面力（ M_m 、 M_c 、 Q_{m1} 、 Q_{m2} 、 Q_{c1} 、 Q_{c2} ）が作用した場合の応力を求める。荷重点を変化させて行なった格子解析の結果と板要素を用いた応力解析の結果を組合せ、応力の影響面を求める。

以上の手順で求めた応力の影響面を図7に示す。応力は荷重が着目部直上に載った場合に最も大きくなっている。応力の値は荷重が着目部から離れるにしたがって小さくなっており、さらに離れると応力の符号が逆転し、その値は増加している。応力が正となる領域の応力の等高線は着目部を中心とした楕円形となっており、応力が負となる領域での等高線は横桁端部を中心とした楕円形となっている。

3.2 解析条件

応力の影響面の解析結果より、着目部に生じる応力に対しては中央分離帯で分けられた着目部側の2つの車線における車両の走行が支配的と考えられる。そのため、着目部側の2車線を車両が走行すること

により生じる応力の変動を解析することとした。車線幅は3500mmとし、その位置は図4に示すように仮定した。

時間交通量および走行速度は、走行車線および追越し車線で、それぞれ1000台・70km/hr、800台・80km/hrとした。

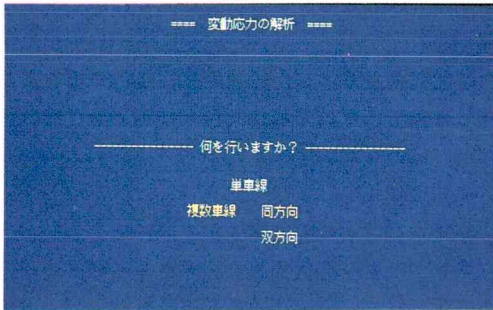
3.3 プログラムの実行情例

プログラムを実行すると、メニュー形式の画面1が表示される。カーソルを[複数車線・同一方向]に合わせ、リターンキーを押せばそれが選択される。次に車種構成比に関する画面（画面2）が表示される。ここで示されている値は都市間高速道路での実測値¹²⁾に基づいた値であるが、[これではよろしいですか Yes No]の[No]を選択すれば、構成比を変更することができる。この設定が終ると、各種車両の軸配置・重量に関するデータの入力が必要される。画面3は大型トラック（後2軸）の例を示している。既に述べたように、ここでも入力作業を省力化するため、代表的な値が既に入力されているが、必要に応じて画面4（トレーラートラック）に示すように変更したい項目の番号を入力すれば容易にデータを変更することができる。次に、交通条件に関するデータの入力が必要される（画面5）。以上で荷重列のシミュレーションに関する入力が終了する。

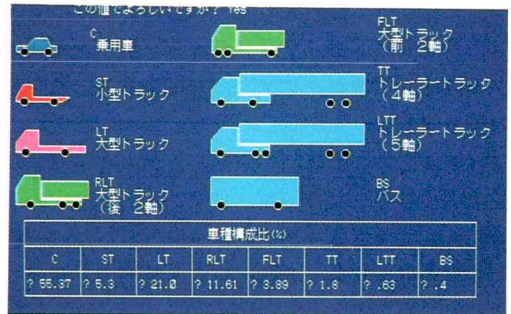
次に、影響面の入力方法の説明画面（画面6）が表示される。リターンキーを押すと、0列目の影響線の入力画面が表示される。画面7は橋軸方向中央（位置30に相当）まで入力した時の画面である。

0 列目の入力終了すると、入力値の確認画面が表示される。確認が終れば、1 列目の入力値が表示される（画面 8）。ここには 0 列目と同じ値が自動的に入力されており、必要に応じて変更する。条件より 1 列目では 0 列目とは異なる値が必要となる。このような場合には、カーソルを [No] に合わせ、リターンキーを押せば、画面 7 と同様な画面が表示され 0 列目と同じように縦距の入力を行なう。20 列目までの入力終了すると、影響面のグラフが表示される（画面 9）。これにより影響面形状を視覚的に確かめることができる。

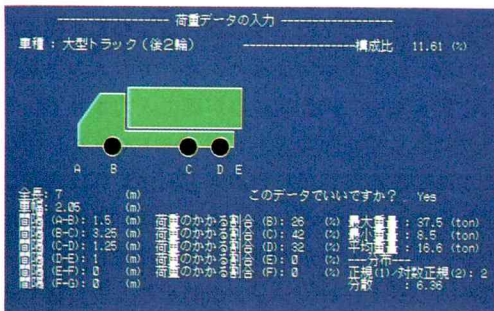
以上で入力終了、応力変動の解析が行なわれ、車両の走行状態およびそれに伴う応力変動がグラフィック画面に表示される（画面 10）。ただし、走行状態のグラフィック表示は 80 台目の車両走行までである。応力変動の解析を所定の台数（時間）まで行なうと、応力範囲頻度分布が表示される（画面 11）。必要に応じて、本画面をプリンタに出力するとともに、本データがファイルに保存される。この応力範囲頻度分布を利用することにより、着目部の疲労照査および寿命・余寿命の評価が可能となる。



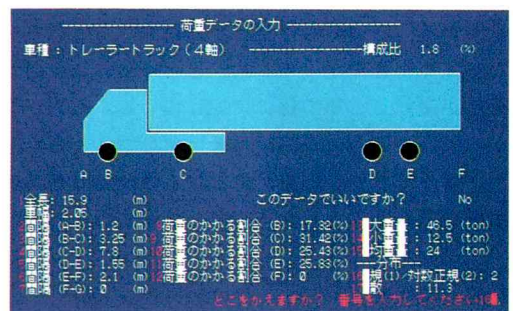
画面 1 走行車線の選択



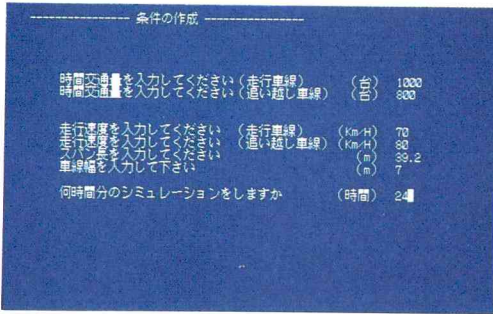
画面 2 車種構成比の入力



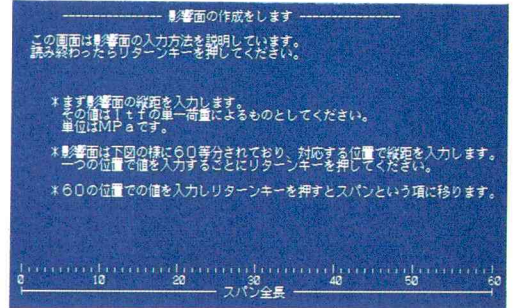
画面 3 車両データ（大型トラック、後 2 軸）



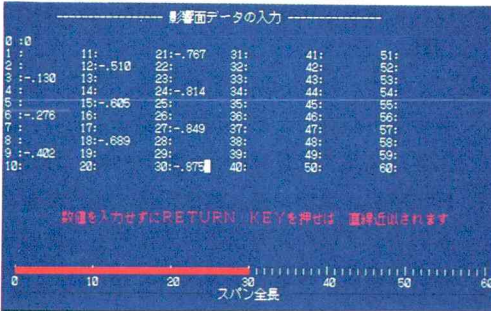
画面 4 車両データの変更（トレーラートラック）



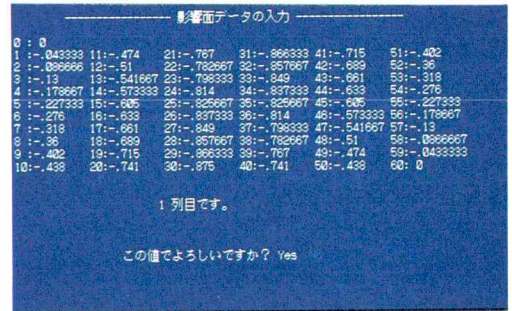
画面5 交通条件の入力



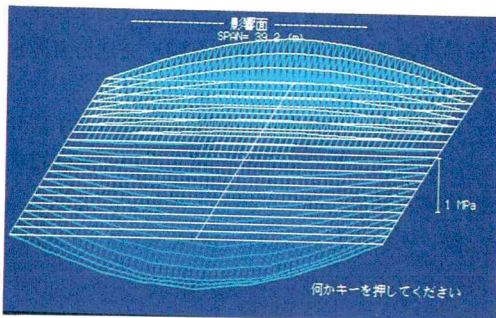
画面6 影響面データ入力方法の説明



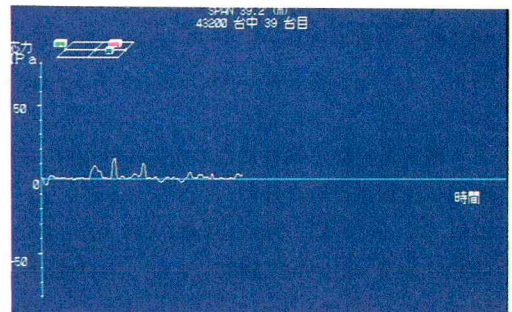
画面7 影響面データの入力(0列目)



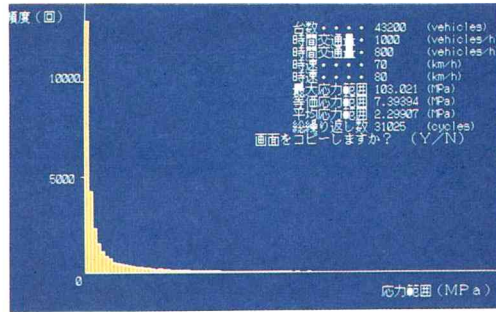
画面8 影響面データの入力(1列目)



画面9 影響面のグラフィック表示



画面10 荷重列の走行と応力変動



画面11 応力範囲頻度分布

4. おわりに

既設橋梁の精度の高い疲労照査あるいは疲労寿命・余寿命評価に不可欠な応力範囲頻度分布を、維持管理に携わる一般の技術者が荷重列のモンテカルロシミュレーションと応力の影響面を利用して容易に解析するための対話型プログラムをパーソナルコンピュータをベースとして開発した。しかし、本プログラムを実務で利用するためには改良すべき点が多々あるかと考えている。改良のためのご意見をお聞かせ願えれば幸いである。

参考文献

- 1) 西川和広：道路橋における疲労問題と補修・補強、橋梁と基礎、Vol. 17, No. 8, pp19~23, 1983.
- 2) 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, pp. 1~12, 1986.
- 3) 三木千寿、坂野昌弘、館石和雄、福岡良典：鋼橋の疲労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、No. 392, pp. 403~410, 1988.
- 4) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂出版、1993.
- 5) Miki, C., Goto, Y., Yoshida, H. and Mori, T. : Computer Simulation Studies on Fatigue Load and Fatigue Design of Highway Bridges, 土木学会論文集、No. 356, pp. 37~46, 1985.
- 6) Miki, C., Sakano, M. and Murakoshi, J. : A Parametric Study on Fatigue Design Curves

for Steel Highway Bridges, 土木学会論文集、No. 398, pp. 31~39, 1988.

- 7) 三木千寿、後藤祐司、村越潤、館石和雄：シミュレーションによる道路橋の疲労設計活荷重の研究、構造工学論文集、Vol. 32A, pp. 597~608, 1986.
- 8) 三木千寿、杉本一郎、宮崎早苗、森猛：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.
- 9) 梶川康男、織田一郎、杉本正信：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、構造工学論文集、Vol. 37A, pp. 1089~1096, 1991.
- 10) 田村洋一、樗木武：自動車・追従車に着目した車頭時間分布モデルに関する研究、土木学会論文報告集、No. 336, pp. 159~168, 1983.
- 11) 関西道路研究会・道路橋調査研究委員会：疲労小委員会報告書、1989.
- 12) 日本道路公団東京第一管理局・大日本測量：東名高速道路（東京~三ヶ日間）交通荷重測定調査報告書、1983.
- 13) 富沢修次、小暮深、山田実、岩崎雅紀、新井弘：予防保全を目的とした鋼 I 桁橋の疲労損傷に対する補修・補強に関する検討、構造工学論文集、Vol. 37A, pp. 1141~1149, 1991.