

# 鋼道路橋の疲労照査のための荷重に関する研究

A STUDY ON THE FATIGUE DESIGN LOAD OF STEEL HIGHWAY BRIDGES

三木千寿\* 杉本一朗\*\* 宮崎早苗\*\*\* 森 猛\*\*\*\*

By Chitoshi MIKI, Ichiro SUGIMOTO, Sanae MIYAZAKI and Takeshi MORI

Fatigue design load of highway bridges are studied by means of the simulation of variable amplitude sectional forces in bridge components. The differences of fatigue damages due to various parameters; the shape and length of influence line, the number of girders in a bridge, the number of lanes and lateral load distribution, are discussed. It is showed that these fatigue damage differences are mainly caused by multi-presence of vehicles on a bridge. For evaluating the multi-presence effect, a coefficient  $\gamma$  is proposed.

## 1. はじめに

近年わが国の鋼道路橋においても疲労損傷事例がかなりの数報告されはじめ<sup>1)</sup>、疲労による損傷が無視出来なくなってきたおり、今後、疲労も設計時に照査すべき限界状態の1つになると思われる。現行の道路橋示方書での設計活荷重は終局限界状態を想定したものであり、疲労は繰り返し応力の大きさとその繰り返し数に依存するので疲労設計活荷重については別の観点から検討する必要がある。

英国の鋼橋の設計基準である BS5400 では疲労設計用にトラック荷重を設定している。米国の示方書 (AASHTO) では通常の活荷重と交通荷重の厳しさから決めた荷重繰り返し数を用いて疲労設計を行っている。また、米国でも最近 F. Moses<sup>2)</sup> が疲労設計用標準トラック荷重を提案している。これは大型車の同時載荷の機会是非常に少ないため、疲労は1台のトラックのみで評価すべきであるとの理由によっている。米国の高速道路での大型車混入率は10~15%であることを考慮するとこの提案は妥当であろう。しかし、わが国では路線や時間帯によっては、大型車混入率が70~80%にもなることもあり、また交通量も多いため同じ疲労設計手法を用いることは必ずしも適当ではない。さらに新しく荷重を設定することは既存橋梁に対する照査の問題等、様々な障害を生ずる。また著者らのこれまでの研究<sup>3), 4)</sup> では橋の疲労被害は概略大型車の通過台数で評価できることが示されている。そこで本研究ではT-20荷重を疲労設計荷重として用いることを試み、その際に問題となるであろう橋梁部材の影響線形状の影響、同時載荷の影響および多主桁間の荷重分配作用の影響について検討した。

\* 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒152 目黒区大岡山 2-12-1)  
 \*\* 東京工業大学大学院 工学部土木工学科 (〒152 目黒区大岡山 2-12-1)  
 \*\*\* 東京工業大学工学部 土木工学科 (〒210 川崎市幸区堀川町 66-2)  
 \*\*\*\* 工博 東京工業大学工学部助手 土木工学科 (〒152 目黒区大岡山 2-12-1)

## 2. 荷重列のシミュレーションと解析方法

### (1) 荷重列のシミュレーション

荷重列のシミュレーションの流れを図-1に示す。シミュレーションの方法は既報<sup>3), 4)</sup>と同じである。シミュレーションは1車線当りの時間交通量Qを500, 1000, 1500台とした3ケースについて行い、車種構成は表-1に示すA、C、Eの3タイプとした。車種構成Aは東名高速道路のような都市間高速道路で深夜に生じるような大型車が非常に多い状態、Cは都市間高速道路の昼間の交通状態、Eは都市内高速道路で生じるような乗用車の比率の高い交通状態をモデル化したものである。

シミュレーションに用いた車両数は2万台である。車頭時間間隔は自由度3のアーラン分布、車速は70km/hrと仮定した。車種は図-2に示す5種類とした。表-2に実測結果に基づいて設定したそれぞれの車種での車両重量の確率密度関数およびそれらの最大値と最小値を示す。

### (2) モーメント範囲の頻度解析

シミュレーションにより求めた荷重列が橋上を通過する際のモーメントの変動を影響線を用いて計算し、これに対してレインフロー法を適用してモーメント範囲の頻度分布を求めた。

### (3) 疲労被害

線形被害則に基づけば疲労被害Dは次のように表される。

$$D = \sum (M_i)^m n_i$$

$M_i$ : モーメント範囲,  $n_i$ :  $M_i$ の頻度

溶接継手部のS-N線の勾配は-1/3程度になることが多いこと、また最近の疲労設計基準での疲労設計曲線の勾配は-1/3を用いていることからここでは $m=3$ とした。

複雑な変動荷重により生じる疲労被害がT荷重やL荷重のようなある一定の荷重が何回繰り返されたこと

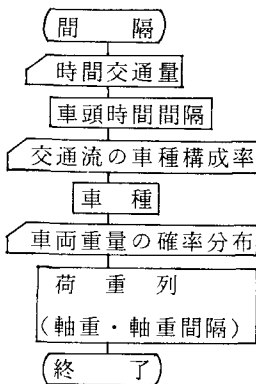


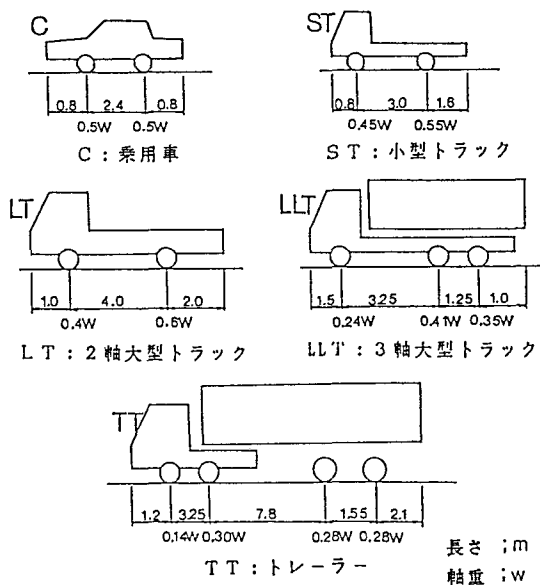
図-1 荷重列のシミュレーション

表-1 車種構成 (%)

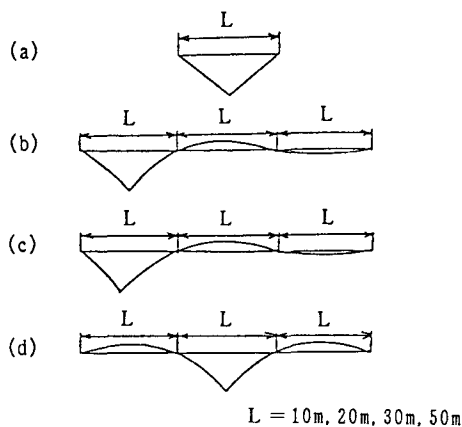
| 交通流モデル | C  | S T | L T | L L T | T T |
|--------|----|-----|-----|-------|-----|
| A      | 10 | 5   | 25  | 50    | 10  |
| C      | 50 | 5   | 20  | 20    | 5   |
| E      | 75 | 12  | 10  | 2     | 1   |

表-2 車種別重量分布 (tonf)

| 車種     | 確率分布関数 | 平均   | 標準偏差 | 最大値  | 最小値 |
|--------|--------|------|------|------|-----|
| 乗用車    | 正規分布   | 1.2  | 0.8  | 4.0  | 0.5 |
| 小型トラック | 正規分布   | 3.1  | 1.8  | 9.0  | 0.8 |
| 2軸トラック | 正規分布   | 8.1  | 3.2  | 30.0 | 1.0 |
| 3軸トラック | 正規分布   | 17.7 | 6.1  | 45.0 | 2.0 |
| 4軸トラック | 対数正規分布 | 22.2 | 9.6  | 66.0 | 6.0 |



図－2 車両のモデル



図－3 影響線の形状

に相当するかを求めておくことは便利である。ここでは前述のようにT-20を基準荷重として検討を行う。車両1台の通過による疲労被害が T-20トラック載荷の何回に相当するかを示す値としてT-20換算載荷回数比を次章以降の検討で用いるが、その定義は以下の通りである

$$\text{T-20換算載荷回数比} = \frac{\text{シミュレーション荷重による疲労被害}}{\text{T-20トラックをジョーシヨンと同じ台数通したときの疲労被害}}$$

### 3. 影響線形状の影響

橋梁各部の影響線は概略図－3の(a)～(d)のような形状で代表できる。(a)は単純桁の支間中央の点に対するモーメントの影響線、(b)は3径間連続桁の側径間中央点での影響線、(c)は側径間の端から4:6の点での影響線、(d)は中央径間の中央点に対しての影響線である。これらの形状の影響線の基線長(L)を10、20、30、50mとして疲労に対する影響度を検討した。

図－4に疲労の被害度を示す量としてT-20換算載荷回数比を1日大型車交通量に対して示す。同じ車種構成の交通荷重が載荷された場合、ほとんどのケースで単純桁が大きな疲労被害となる。しかし連続桁との比は50mとしたときに最大で1.25程度になるに過ぎず、連続桁の影響線(b)(c)(d)でのT-20換算載荷回数比には影響線の形状による違いも見られない。よって影響線の形状は疲労被害度にはほとんど影響していないといえる。また基線長が長くなると、時間交通量の増加によってT-20換算載荷回数比が影響線(a)では増加し、(b)(c)(d)では減少する傾向を示しておりこれは4.に示す同時載荷の影響である。ただし全体的にみて疲労被害度は同じ基線長の単純桁とさほど差はなく、疲労に対する厳しさは基線長が同じであれば影響線の形状にはよらないといえる。

### 4. 1車線での同時載荷の影響

1車線での同時載荷の影響を考慮するにあたっては、同時載荷の全く生じない状態での疲労被害を求める必要がある。同時載荷がなく単独に車が通過するときの疲労被害は、以下のようにして求められる。

図-2に示す5種類の各車種において各平均重量の車を1台、橋上を通過させる。このとき部材の着目点のモーメントの影響線よりモーメントの時間変動波形が得られ、モーメント変動範囲とその繰り返し数が求められる(図-5)。例えば、30mの単純桁では、どの車種の車を通して1つのモーメント変動幅が生じる。

次に、橋上にのる車の重量とモーメントは線形関係にあることを利用して、各車種毎の重量分布をモーメントの変動幅の分布に変換する。このときの車両の重量分布として表-2を用いる。この分布をシミュレーションで想定した各車種の通過台数だけ乗じる。こうして求まった各車種に対するモーメント範囲頻度をたし合わせ、分布の変動幅と回数をカウントすることにより同時載荷の影響を全く含まないモーメント範囲の頻度分布を求めることができ、またこれに基づいて疲労被害を計算することができる。これを線形重ね合わせ法による疲労被害と呼ぶことにする。重ね合わせによる疲労被害を求めるための流れを図-6に示す。

同時載荷の影響を、シミュレーションにより得られた疲労被害と、線形重ね合わせ法により求められる疲労被害との比の3乗根( $\gamma_1$ )を用いて検討する。ここで3乗根をとるのは同時載荷の影響を荷重係数として表現するためである。ここでは $\gamma_1$ を1車線橋での同時載荷係数と呼ぶ。

$$\gamma_1 = \sqrt[3]{\frac{\text{シミュレーション荷重による疲労被害}}{\text{線形重ね合わせ法による疲労被害}}}$$

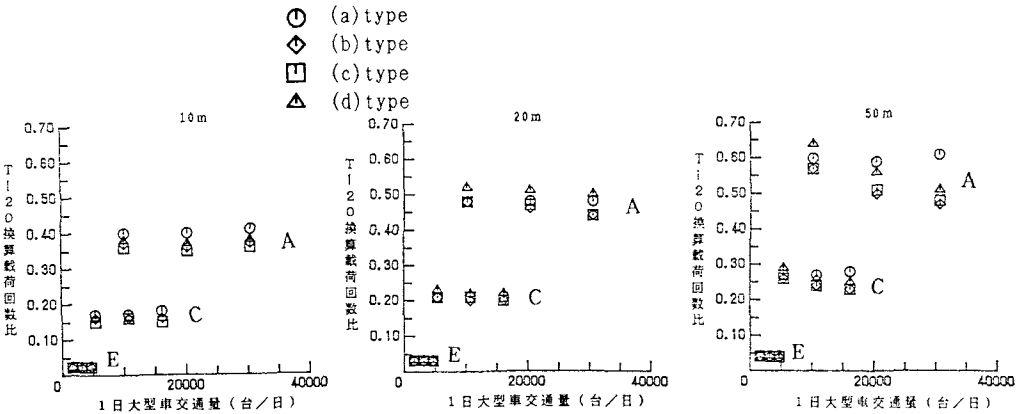


図-4 疲労被害に対する影響線形状の影響

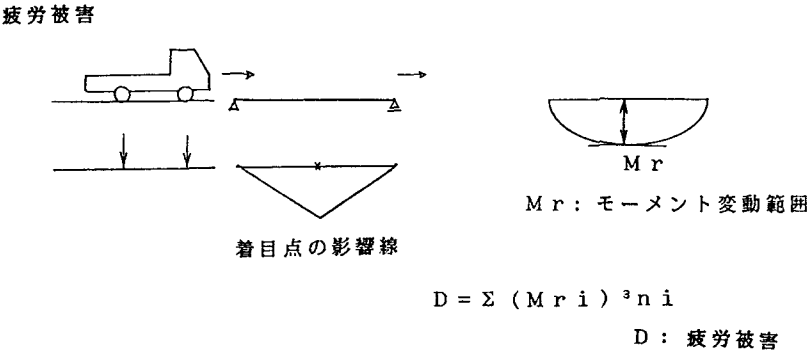


図-5 車両1台の疲労被害

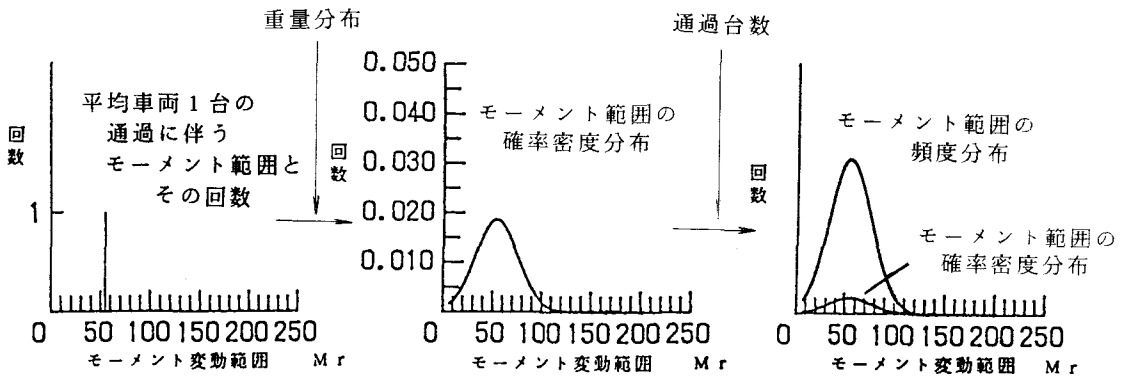


図-6 重ね合わせによる疲労被害の求め方

図-7 に単純桁と連続桁のスパン別の1車線同時載荷係数を示す。 $\gamma_1$  は単純桁では、全てのケースではほぼ1.0であり、今回のシミュレーションの条件内(車速70Km、時間交通量500,1000,1500台/時)では、基線長50mまでの橋において同時載荷の影響は非常に小さいことがわかる。一方、連続桁においては時間大型車交通量の増加に伴い $\gamma_1$ が若干減少する傾向がみられる。これは同じ基線長を考えたとき連続桁は単純桁の3倍の橋長になっており、同時載荷の可能性が高くなっているためである。そして、連続桁の影響線を考え

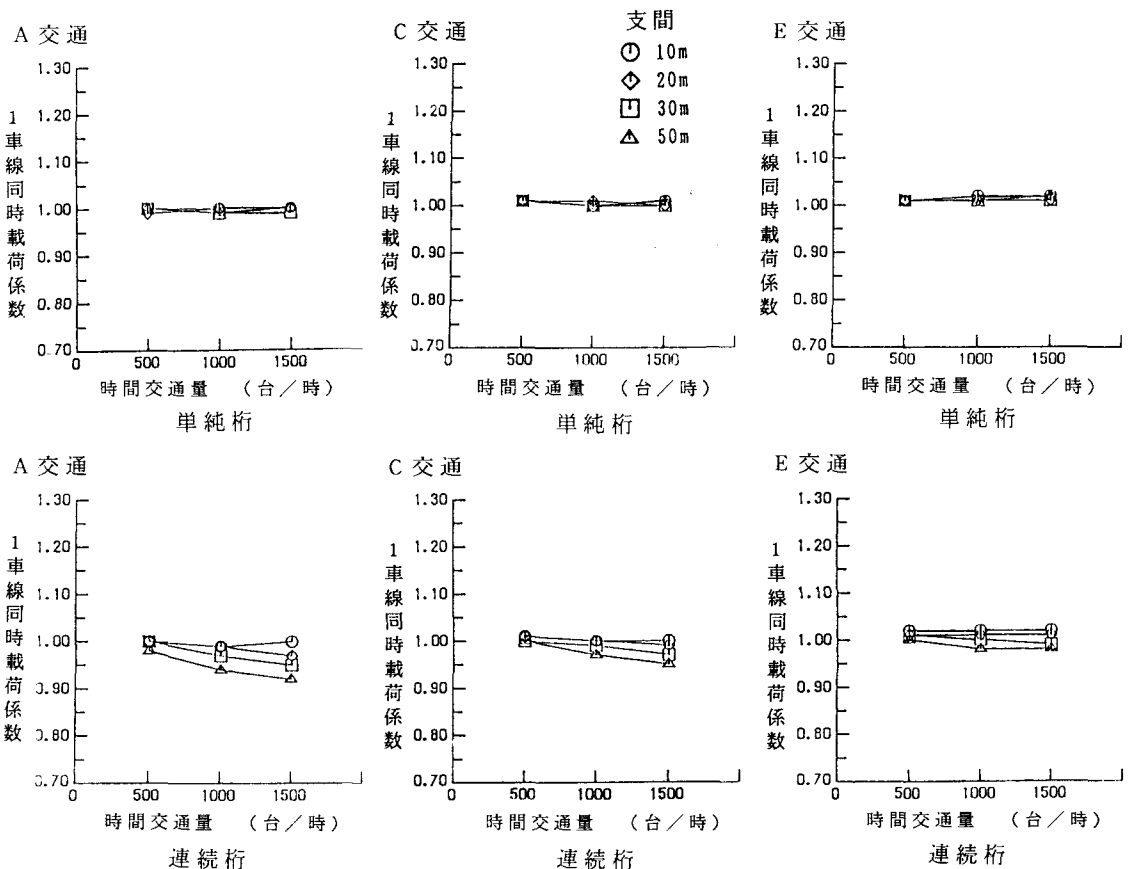


図-7 1車線での同時載荷の影響

たとき負の影響線部分にも車が載る可能性が高くなるためと考えられる。この傾向は基線長が長くなるほど、また大型車混入率の高い車種構成（A）ほど顕著に現れている。

5. 荷重分配作用の影響

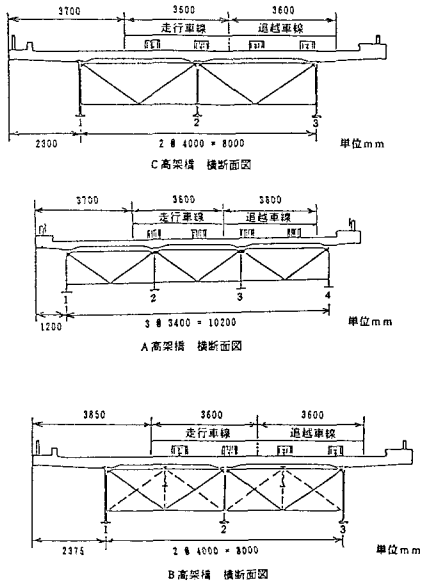
(1) 荷重分配率

複数車線の橋梁では同時載荷の機会が増す。そのため複数車線の多主桁橋に対しては荷重の横分配作用を考慮しなければならない。設計時には多くの場合、主桁構造に対して格子計算を行いそこから得られる断面力を用いて荷重分配率が計算されている。しかし、実際の荷重分配作用は床版との合成作用や対傾構などの二次部材による荷重分配作用により設計時の仮定と異なる。このため実橋での荷重分配作用に基づいて、複数車線のシミュレーションを行い、荷重分配作用が各主桁の疲労被害に及ぼす影響について検討することとした。

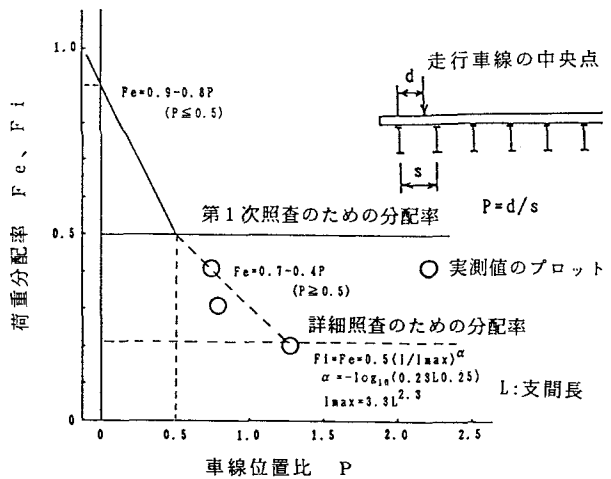
図－8 に示す断面の3本主桁及び4本主桁の連続桁橋を試験トラックが通過した時の実測ひずみから計算した荷重分配率<sup>5)</sup>を表－3 に示す。図－9 はSchilling<sup>6)</sup> により提案された疲労設計を行う際に用いる主桁間隔と車線位置から主桁の荷重分配率を決定するための図である。図－9 中にはわが国の高速道路橋での実測ひずみに基づく分配率も示したが米国の橋梁の傾向とはほぼ同様と言える。表－3 にSchilling の方法（第1次照査のための必ず安全側の予測値となる分配率）によって求めた分配率も併せて示す。

(2) 2車線での同時載荷の影響

2車線載荷（走行車線＋追越車線）のシミュレーションはスパン30m の4本主桁の橋梁と、3本主桁の橋梁を対象とする。構造形式は単純桁と3径間連続桁とし、それらの影響線形状は図－3 に示した通りである（連続桁に対しては影響線(b)のみを用いた）。また、いずれの場合も表－3 に示した荷重分配率を用いた。シミュレーションでの発生交通量は走行車線で20000台とし、追越車線では走行車線の75%に当たる15000台とした。車種構成はAとEを用い、これと車速（70km/h）は走行車線と追越車線で同じとした。モーメント変動の計算は、各々の車線を通過する荷重列に対してそれぞれ主桁の荷重分配率を乗じ、1つの荷重列とし



図－8 荷重分配率を測定した橋梁の断面図



図－9 Schilling の提案による疲労設計のための荷重横分配率

表-3 1台のトラック載荷時の荷重横分配率

| 橋名<br>主桁本数      | 測定方法                  | 主桁番号(外側から) |      |      |      | 分配率タイプ |
|-----------------|-----------------------|------------|------|------|------|--------|
|                 |                       | 1          | 2    | 3    | 4    |        |
| A 高架橋<br>(4本主桁) | 実測ひずみ<br>による          | 0.22       | 0.39 | 0.27 | 0.12 | A 1    |
|                 |                       | 0.05       | 0.13 | 0.40 | 0.42 |        |
|                 | 図-9(Schilling)<br>による | 0.19       | 0.39 | 0.39 | 0.39 | A 2    |
| B 高架橋<br>(3本主桁) | 実測ひずみ<br>による          | 0.32       | 0.43 | 0.25 |      | B 1    |
|                 |                       | 0.08       | 0.34 | 0.58 |      |        |
| C 高架橋<br>(3本主桁) | 実測ひずみ<br>による          | 0.40       | 0.39 | 0.21 |      | C 1    |
|                 |                       | 0.18       | 0.36 | 0.46 |      |        |

各主桁においてその荷重列を通しどちらかの車線の車軸が影響線の変化点上に載った時にモーメントを計算することによって行った。分配率は表-3に示した値を用いている。

2車線橋での同時載荷の影響をシミュレーションより求められた各主桁の疲労被害と前章で記した重ね合わせによる疲労被害との比の3乗根( $\gamma_2$ :2車線同時載荷係数と呼ぶ)を用いて検討する。なお、重ね合わせによる疲労被害は、走行車線と追越し車線の両方を別々に車両が通過した時の各々の分配率に相当した疲労被害をたしあわせたものを基準としている。この2車線同時載荷係数は、橋上のある車に着目したときにその前後に車が載ることおよび隣の車線に別の車が載ることの影響を考慮したものである。

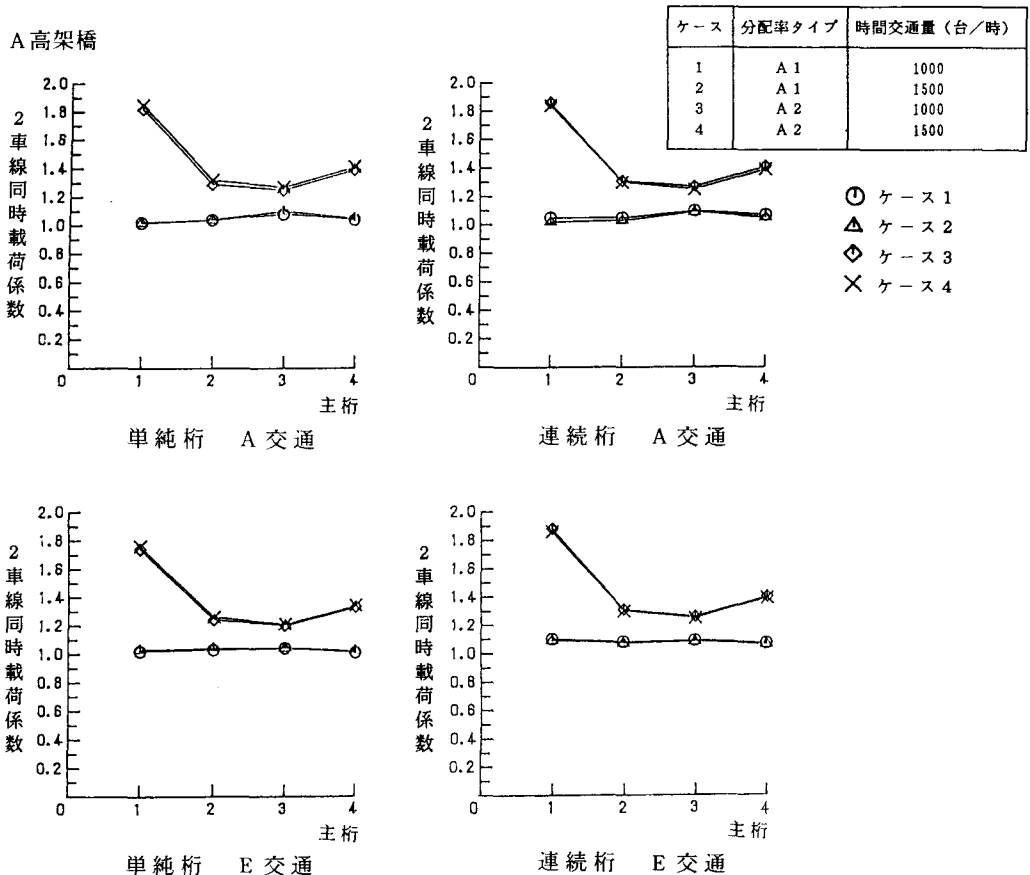


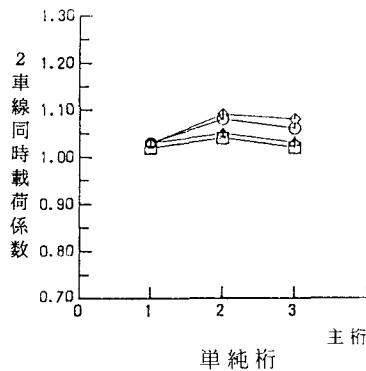
図-10 2車線、4本主桁での同時載荷の影響

$$\gamma_2 = \sqrt[3]{\frac{\text{シミュレーションによる疲労被害 (2車線)}}{\text{線形重ね合わせ法による疲労被害}}}$$

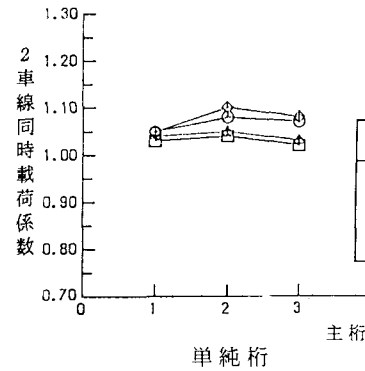
図-10に4本主桁の場合の各主桁の2車線同時載荷係数を、また図-11に3本主桁の場合の2車線同時載荷係数を示す。図-10では実測値に基づく荷重分配率を用いて計算した $\gamma_2$ に加え、Schillingの提案する第1次照査のための荷重分配率を用いて計算した $\gamma_2$ もプロットしている。図-11では実測値による分配率を用いて計算した $\gamma_2$ の値を単純桁と連続桁別に表している。4本主桁では実測値に基づく荷重分配率を用いた場合の $\gamma_2$ は外側から3番目の内桁が大きく、3本主桁では中央の桁で $\gamma_2$ が最も大きい。これらの桁では、走行車線に対する荷重分配率と追越車線に対する荷重分配率が最も近いためであり、当然の結果ではあるが、各主桁での2車線同時載荷係数は荷重分配率の比に著しく影響されることが分かる。また図-11の比較より明らかなように単純桁では大型車混入率の高い車種構成Aの方がEよりも $\gamma_2$ が少し大きい。これは1車線の時よりも、さらに近接して大型車が橋上に載りやすいためと考えられる。これに対して連続桁では車種構成Eの方がAよりも $\gamma_2$ が少し大きい。連続桁では1車線の時と同様に負の影響線部分に車が載りやすく、その影響は大型車の方が大きいからである。但し、いずれの場合も疲労被害は車種構成Aの方が高く、疲労に対して厳しいのはあくまでも大型車混入率が高いケースである。

実測に基づく荷重分配率を用いて計算した2車線同時載荷係数 $\gamma_2$ の上限は単純桁、連続桁ともにおよそ1.1である。これに比べ、Schillingの提案する分配率を用いて求められた $\gamma_2$ は非常に高く、特に外桁において大きい。これはSchillingの提案する分配率は確実に安全側の予測となるように桁の分配率の合計が

B 高架橋



C 高架橋



| ケース | 車種構成 | 時間交通量 (台/時) |
|-----|------|-------------|
| 1   | A    | 1000        |
| 2   | A    | 1500        |
| 3   | E    | 1000        |
| 4   | E    | 1500        |

- ケース 1
- ◇ ケース 2
- ケース 3
- △ ケース 4

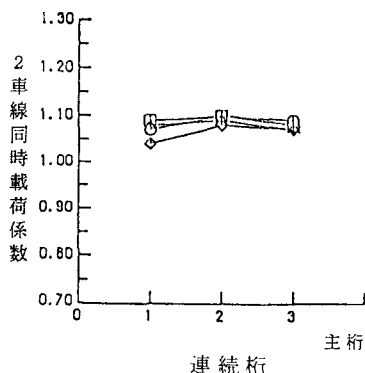
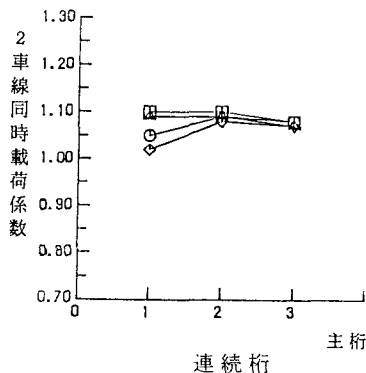


図-11 2車線、3本主桁での同時載荷の影響

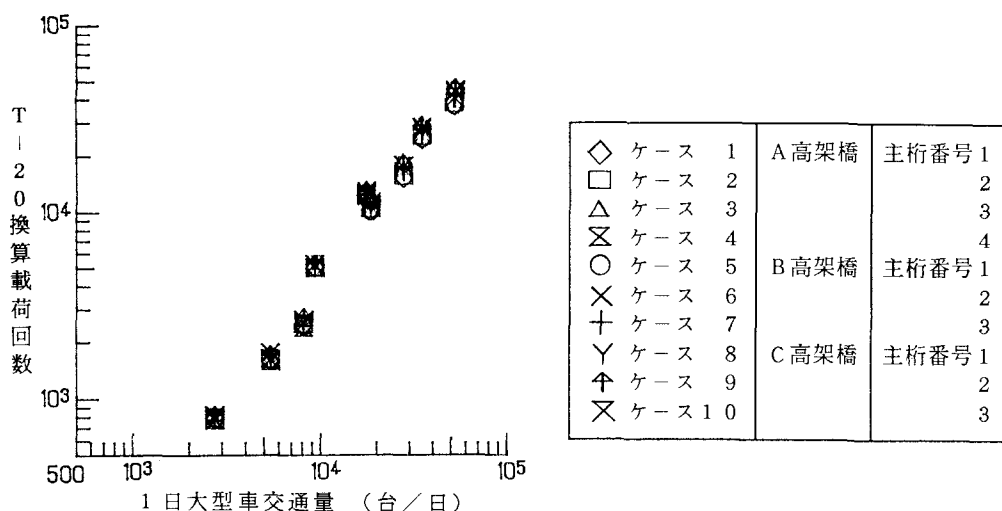


図-1.2 T-20換算載荷回数と1日大型車交通量の関係

1 をかなり上回るようになっているためである。

図-1.2 に単純桁の時の4本主桁および3本主桁でのT-20換算載荷回数（T-20換算載荷回数比×交通量）と1日当りの大型車交通量の関係を示す。1日当り大型車交通量に対する各主桁のT-20換算載荷回数は、荷重分配率の影響を受け、それぞれの桁における走行車線載荷に対する荷重分配率と追越車線載荷に対する荷重分配率が近い場合に多くなる傾向が認められる。しかし、各主桁ごとにみれば、T-20換算載荷回数と1日当りの大型車交通量の関係は両対数軸上でほぼよい相関がある。従って複数車線多主桁橋においても、1日大型車交通量により疲労被害のおおよその値を推定できるといえる。

## 6. 提案する疲労設計活荷重

以上を整理すると次のようになる。スパン50m 程度までの橋では通常の使用状態で、大型車が同時に載荷することはさほど多くなく、またその影響は小さい。従ってここではT-20を疲労設計荷重を基準に考える。1日大型車通過台数が得られれば $r_1 \cdot r_2$ の影響の無いデータ（線形重ね合わせ法による）からT-20換算載荷回数が求まり、T-20トラック1台が橋上を通過することにより求められるモーメント範囲と併せて橋梁内の部材、部位の疲労被害を推定することができる。このとき1車線であれば $\gamma_1=1$ よりT-20荷重をそのまま用いてよく、複数車線であれば $\gamma_2=1.1$ をT-20に乗じたものを基準トラック荷重として用いればよい。ただし $\gamma_2$ は道路橋示方書で対象とされている200mまでの基線長に適用する場合は $\gamma_2=1.25$ を用いる必要があることが確かめられている。T-20換算載荷回数は最大で1日大型車交通量の0.8倍程度である。また連続桁では等しい基線長の単純桁に基準トラック荷重を通したときのモーメント範囲を使用することが可能である。ただし、限られた範囲の解析結果であり、特に複数車線の多主桁での荷重分配作用の影響についてはさらに多くの検討が必要である。

## 7. まとめ

本研究では、影響線と荷重列のシミュレーションを用いたモーメント変動の解析により、T-20荷重を疲労設計活荷重として用いる際に問題になると考えられる、影響線の形状、1車線橋での車両の同時載荷および2車線橋での車両の同時載荷が疲労被害に及ぼす影響について検討し以下の結果を得た。

(1) 種々の形式の橋梁の影響線を代表すると考えられる単純桁の支間中央でのモーメントの影響線、3 径間連続桁の中央径間中央でのモーメントの影響線、3 径間連続桁の側径間中央および中央より若干離れた位置でのモーメントの影響線を用いて影響線の形状が疲労被害に及ぼす影響について検討したが、その影響は顕著ではない。

(2) 疲労被害に対する 1 車線橋の同時載荷の影響を表すパラメータ  $\gamma_1$  を提案し、それを用いて同時載荷の影響について検討した。同時載荷の影響は、影響線の基線長が長くなるにしたがって若干大きくなるが、影響線の形状・基線長の長さ、車種構成および交通量によってはさほど変化しない。

(3) 3 本主桁と 4 本主桁の標準的な橋梁に対して、2 車線同時載荷の影響を表すパラメータ  $\gamma_2$  を提案した。同時載荷の影響に対しては荷重分配率の影響が支配的であり、それに比べて影響線の形状、交通量の影響は小さい。

(4) 疲労設計活荷重として T-20 荷重を設定することを提案し、繰返し回数は 2 車線橋においても良い相関が得られた 1 日大型車交通量より T-20 換算載荷回数が求められることを示した。この 2 つと  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  を組み合わせて考慮することにより対象部材、部位の疲労照査を行うことが可能である。

本研究で用いた疲労被害の計算方法は、主桁だけではなく、横桁など橋梁中の様々な部材についても、着目点の影響線がわかれば適用できる。

本論文は疲労照査のための活荷重の考え方を示すことを主目的としている。ここでの結果を一般的なものにするにはさらに多くの解析が必要である。

本研究は文部省科学研究費補助金試験研究(1)(代表、三木千壽、62850083)により実施したものである。

#### 参考文献

- 1) 三木千壽、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, 1-9, pp.403-410, 1988.
- 2) Moses, F., Schilling, C.G., and Raju, K.S. : Fatigue Evaluation Procedures for Steel Bridges, National Cooperative Highway Research Program Report 299, 1987.
- 3) Miki, C., Goto, Y., Yoshida, H., and Mori, T. : Computer Simulation Studies on the Fatigue Load and Fatigue Design of Highway Bridges, Proc. of JSCE, Vol.2, No.356, 1-3, pp.37-46 1985.
- 4) 三木千壽、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.
- 5) 日本道路公団東京第一管理局 : 昭和60年度、東名高速道路、東京 I C - 三ヶ日 I C 間、構造物変状対策工検討報告書、1986-3
- 6) Schilling, C.G. : Lateral-Distribution Factors for Fatigue Design, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.108, No.ST9, pp.2015-2033, 1982.

(1989年10月 2日受付)