

(5) 実働荷重による合成桁橋の部材力

シミュレーションについて

CHARACTERIZATION OF MEMBER FORCES OF COMPOSITE GIRDER

BRIDGE UNDER STATISTICALLY SIMULATED LIVE LOADS

中原俊之*

渡邊英一**

中井 博***

黒山泰弘****

Toshiyuki NAKAHARA, Eiichi WATANABE, Hiroshi NAKAI, Yasuhiro KUROYAMA

The local stress analysis of steel bridge details related to fatigue failure has been carried out extensively in the past. However, the load transfer mechanism of live loads acting on the deck has not been fully taken into consideration.

In this study, 3D-finite element frame analysis for composite four-girder bridge with cross beams, lateral bracings and sway bracings has been carried out to compute member forces and deformations due to computer simulated live loads considering the probabilistic characteristics from field measurements. From these results, the load distribution of the composite girder, namely, the forces and deformations of bridge members are found to be statistically characterized.

1. まえがき

これまでに、鋼橋部材のディテール部分についてはその静的応力集中問題の解析や、定常繰返し荷重をかけた場合の疲労強度に関する実験的研究が数多く行われてきた。しかし、橋全体を対象として考えると、実際の交通活荷重によって橋梁部材にどのような部材力が生じ、どのような変形が惹起されるかは、実のところあまりよく判っていない。そこで、本研究では、都市高速道路における交通荷重の実態調査結果を踏まえて、活荷重のモンテカルロシミュレーション並びに骨組み構造の有限要素解析によって合成桁橋部材の断面力および変形のシミュレーションを行い、これらの統計学的特性を明らかにした。

2. 活荷重モデル

本研究では、活荷重モデルとして、昭和61年度に阪神高速道路公団（以下、阪公と呼ぶ）の設計荷重委員会（HDL）によりまとめられた報告書のモデルを用いた¹⁾。このモデルでは大型車から乗用車までを10種の車種に分割し、それぞれの車種に車種混入率および車重の確率分布モデルが与えられている。ここで用いた車種混入率は、阪公の調査による芦屋集約料金所での混入率を用い、昼夜の混入率の変化を

* 京都大学大学院 ** Ph.D. 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

*** 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 **** 工修 大阪市技術協会

考えて大型車種とトレーラー類の車種混入率の合計が20%となるようにモデル化されたものである。また、車重の確率分布には尼崎・住之江・芦屋集約料金所3地点での平均の確率分布モデルを用いた。

また、本研究では上述の10種の車種とは別に、さらに50ton～80tonという重量級のトレーラー類の車種を設定した。(この車種の確率分布モデルは10種のうちの1つであるトレーラー類積載車の対数正規分布に従うものとした。)このトレーラー類は、後述するように、構造モデルに苛酷な状態を与えるためにモデル中央部に常に載荷するよう設定したものである。シミュレーションにおいては、まず各車種を0から1までの値の範囲内で区間幅を与えることにより対応させた。この区間幅は、前述の車種混入率を踏まえて決定されており、区間(0, 1)における一様乱数に対応させることによって10種の車種をランダムに発生させ、この発生させた車種に対して対応する確率分布を用いて車重を乱数発生させた。

3. 解析

3-1 解析モデル

解析に用いた構造モデルとして、Fig. 1に示すような、合成桁橋の主桁・横桁・横構・対傾構を組み合わせた骨組み構造を考えた²⁾。ここで、モデルの端部(図中●印の8点)はすべてを固定支点とし、変位、回転とも拘束したが、片側4支点のX軸方向のみは可動と仮定した。また、各部材断面をFig. 2に示しておく。(横構・対傾構の断面2次モーメントの計算においては、この断面を重ねばりとして扱った。)

なお、対傾構については、斜材(75x75x9mmの山形鋼)を含めた際のせん断特性についても考慮を加えた。すなわち、斜材に生じるせん断力Qと変位vが既知の係数で関係付けられるので、この係数を剛性マトリックスの要素の中に加えることによって解析を行った。

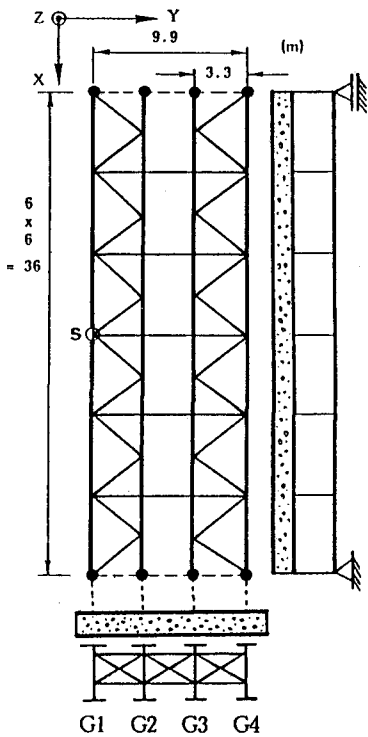


Fig. 1 解析モデル

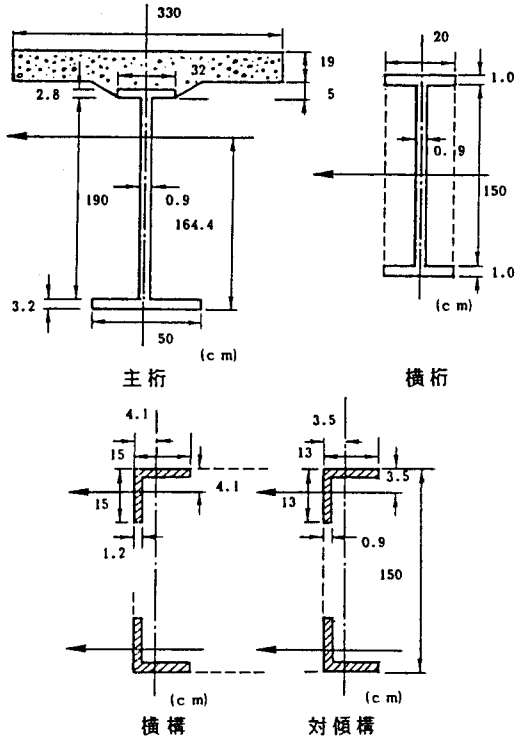


Fig. 2 各部材断面

3-2 荷重の載荷方法

前述した活荷重モデルを、解析においては輪重として床版上に作用させ、それが主桁上へ分配されるものとした。この輪重の載荷位置をFig. 3に示す。また、車重の輪重への分配についても同時にFig. 3に示しておく。Fig. 3に示すように、車両は3台を1組としA、Bには前述の10種の車種、Tには重量級のトレーラー類が載荷されるものとした。これらの輪重の載荷位置は、朝夕の通常渋滞時の車間距離（8 m前後）および中央部のトレーラー類の車長（10 m前後）を考慮に入れて設定した¹⁾。（一般に、高速道路における車両の走行形態には、通常走行・通常渋滞・突発渋滞が考えられるが、ここでは通常渋滞のみを対象とした。）

また、中央部に重量級のトレーラー類を載荷したのは、文献[1]に記載されている一定期間内最大応答値を求めるための効率化シミュレーションを参考とし、本シミュレーションで注目した Fig. 1 に示す G1 桁中央部に不利な状況のみを想定したためである。

以上のような床版上に作用する輪重が、解析においては主桁上に分配されるものとしたが、この主桁上に分配される荷重は以下のような簡易の手法により求めた^{3), 4)}。

- (1) まず、床版をFig. 4に示すように周辺および節線 $b-b'$ 、 $c-c'$ で変位拘束・回転支持された長方形板であると仮定する。
- (2) このような床版に任意の集中荷重 P が、Fig. 4のような位置に作用した際の節線 $a-a'$ 、 $b-b'$ 、 $c-c'$ 、 $d-d'$ における反力を平板理論を用いて便宜的に求める。その際、節線 $b-b'$ 、 $c-c'$ に沿った不静定曲げモーメントを算出する。
- (3) (2) で求めた反力が、そのままFig. 1に示す主桁 G1～G4 に作用すると考えて、Fig. 3に示す各輪重についてこの操作を繰り返し主桁上に分配される荷重（辺に沿って分布すると仮定する。）を求めた。

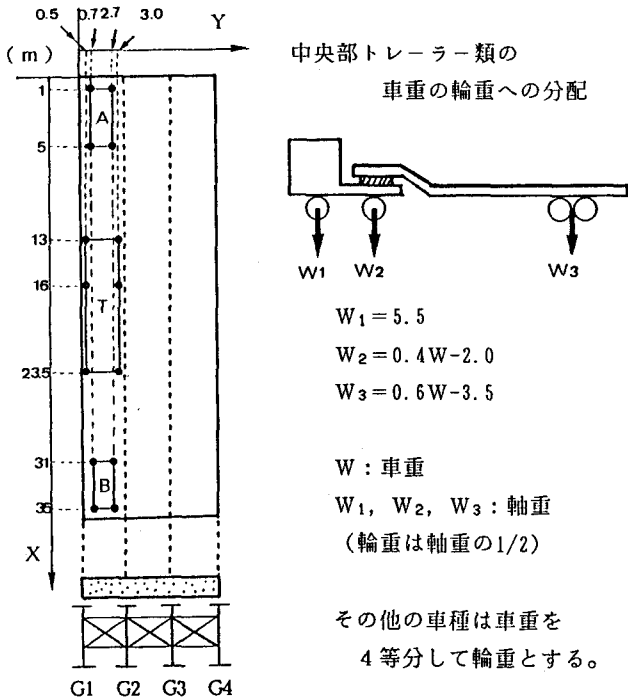


Fig. 3 輪重の載荷位置

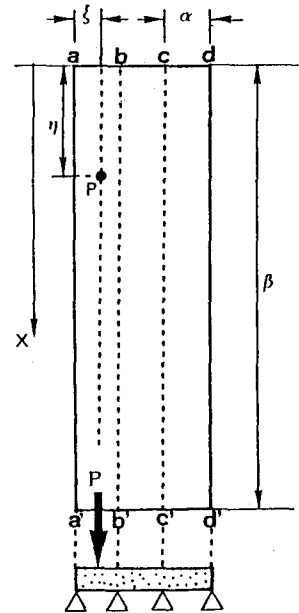


Fig. 4 床版のモデル化

参考までに $a - a'$ の反力の式は

$$V = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{4P}{\alpha\beta\pi^4} \sin \frac{m\pi\xi}{\alpha} \sin \frac{n\pi\eta}{\beta} + \frac{2}{\alpha^2\pi^3} \frac{4\alpha P}{3m\beta\pi \cos m\pi} \sin \frac{m\pi\xi}{\alpha} \sin \frac{n\pi\eta}{\beta} m \cos m\pi \right) \times F(x) \quad \text{となり}$$

$b - b'$ の反力の式は

$$V = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left(-\frac{4P}{\alpha\beta\pi^4} \sin \frac{m\pi\xi}{\alpha} \sin \frac{n\pi\eta}{\beta} \cos m\pi + \frac{2}{\alpha^2\pi^3} \frac{2\alpha P}{3m\beta\pi} \sin \frac{m\pi\xi}{\alpha} \sin \frac{n\pi\eta}{\beta} m \cos m\pi \right) \times F(x) \quad \text{となる。}$$

ただし

$$F(x) = \frac{1}{\left(\frac{m^2}{\alpha^2} + \frac{n^2}{\beta^2}\right)^2} \left\{ \left(\frac{m\pi}{\alpha}\right)^3 + (2-\nu) \frac{mn\pi^3}{\alpha\beta^2} \right\} \sin \frac{n\pi x}{\beta}$$

(ν ; ポアソン比) である。

なお、Fig. 4の $a - a'$ に沿った反力 V の収束性をFig. 5に示す。この結果から反力 V は70～80項で収束することが判ったので、シミュレーションにおいては、100項までとって計算することとした。

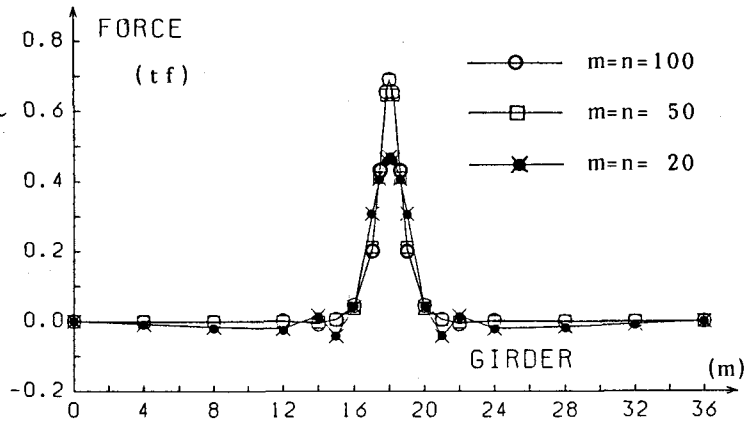


Fig. 5 反力の分布曲線

3-3 有限要素解析⁵⁾

($\alpha=3.3\text{m}$, $\beta=36\text{m}$, $\xi=1\text{m}$, $\eta=18\text{m}$, $P=1\text{tf}$ の場合の例)

このようにして、Fig. 3に示す3台の車両を1組と考慮して10,000組発生させ、それらを載荷した際の、Fig. 1におけるG1桁中央部S点の以下の量のシミュレーションモデルを求めた。

- (1)主桁断面Y軸まわりの曲げモーメント
- (2)横桁断面Z軸方向のせん断力
- (3)Z軸方向の変位(鉛直変位)

この解析においては、主桁上に分配される荷重を等価節点力に置き換え、Fig. 1に示すモデルを44節点79要素に分割して3次元骨組みの有限要素法を用いた。

4. 結果と考察

以上の解析により求めた曲げモーメント、せん断力、鉛直変位の平均値、標準偏差、変動係数、最大値、最小値をTable 1 (Table 2, 3, 4とともに6ページに示す。)にまとめて示し、さらにこれらのヒストグラムをFig. 6～8に示す。

ここで求めた主桁の曲げモーメントについては、参考までに設計荷重による主桁の曲げモーメントとの比較を行った。設計荷重による主桁の曲げモーメントは、TL-20荷重を用いて、格子剛度 $Z=20$ と仮定して計算すると379.87tf・mとなる。従って、シミュレーションにより求めた主桁の曲げモーメントの平均値112.96tf・mと最大値158.32tf・mの設計曲げモーメントに対する比は、それぞれ0.30、0.42となる。

しかし実際の交通状態においては対向車線にも車両が走行することなどを考えれば、このような値よりも大きな曲げモーメントが発生していることは明らかであろう。また、Fig. 6～8 に示したヒストグラムについては、確率分布モデルへのあてはめを正規分布、対数正規分布、指数分布、ワイブル分布に対して行った。この適合の度合は、 χ^2 値を計算することによって比較したが、いずれのヒストグラムも対数正規分布への適合がよかったようである。

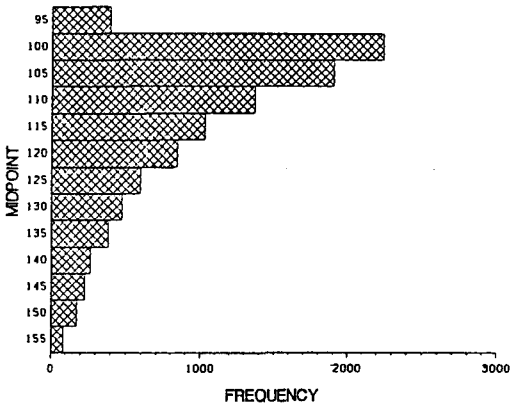


Fig. 6 主桁断面Y軸まわりの曲げモーメント

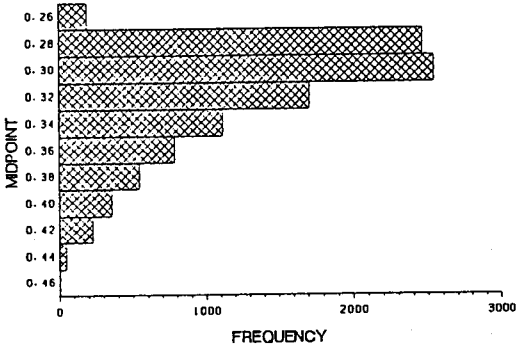


Fig. 7 横桁断面Z軸方向のせん断力

なお、補足的検討事項として横構・対傾構が活荷重に対して、どれほどの影響を持つかについてもふれてみた。その方法として、Fig. 9に示す3つのcaseについて同様のシミュレーションを行った。この図に示すように、case-1は主桁・横桁（1本）、case-2は主桁・横桁（1本）・横構、case-3は主桁・横桁（1本）・対傾構を組み合わせた構造とした。

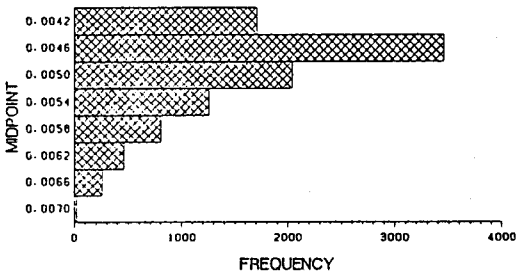


Fig. 8 Z軸方向の変位（鉛直変位）

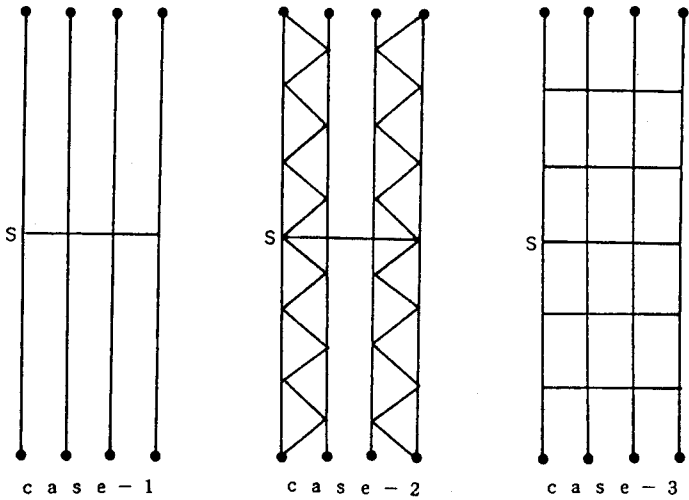


Fig. 9 横構・対傾構の影響

シミュレーション結果をTable 2~4に示す。(この表中、せん断力の(-)はTable 1の結果と向きが逆であることを表す。)この結果から、横構・対傾構は曲げモーメント、鉛直変位に対してはほとんど影響を持たないが、せん断力に対しては対傾構を入れることによってかなり有利になることが分かった。

Table 1 分布の特性値

	曲げモーメント (tf・m)	せん断力 (tf)	鉛直変位 (cm)
平均値	112.96	0.318	0.494
標準偏差	13.74	0.0380	0.0595
変動係数	0.122	0.119	0.120
最大値	158.32	0.460	0.703
最小値	96.12	0.267	0.418

Table 2 case-1の結果

	曲げモーメント (tf・m)	せん断力 (tf)	鉛直変位 (cm)
平均値	114.67	-2.942	0.535
標準偏差	13.95	0.355	0.0645
変動係数	0.122	0.121	0.120
最大値	160.82	-4.211	0.763
最小値	97.56	-2.482	0.453

Table 3 case-2の結果

	曲げモーメント (tf・m)	せん断力 (tf)	鉛直変位 (cm)
平均値	114.53	-2.883	0.535
標準偏差	13.93	0.348	0.0645
変動係数	0.122	0.121	0.120
最大値	160.63	-4.124	0.763
最小値	97.43	-2.433	0.452

Table 4 case-3の結果

	曲げモーメント (tf・m)	せん断力 (tf)	鉛直変位 (cm)
平均値	113.17	0.301	0.493
標準偏差	13.77	0.0360	0.0595
変動係数	0.122	0.119	0.120
最大値	158.61	0.435	0.704
最小値	96.30	0.253	0.418

5. 結論

本シミュレーションの結果から、ここで仮定したような苛酷な載荷状態における曲げモーメントなどの分布は、対数正規分布に近い傾向を示すことが判った。このようなシミュレーションを、より現実的な条件下で行えば橋梁全体を対象とした場合の変形特性などが明らかとなってくる。そしてさらに、こういったシミュレーション結果は局所的な応力集中や、疲労亀裂成長の解析を行う場合の有益な資料として用いられる可能性があらう。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：阪神高速道路の設計荷重体系に関する調査研究, 1986. 12.
- 2) 日本道路協会：建設省道路局監修, 道路橋標準設計図集, 1963.
- 3) Stephen P. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger: THEORY OF PLATES AND SHELLS, SECOND EDITION, McGRAW-HILL, 1970.
- 4) 成岡昌夫, 丹羽義次, 山田善一, 白石成人：構造力学第Ⅲ巻, 丸善, 1970. 10.
- 5) 小堀為雄, 吉田博：有限要素法による構造解析プログラム, 丸善, 1980. 12.
- 6) 亀田弘行, 池淵周一, 春名攻：新体系土木工学2 確率・統計解析, 技報堂出版, 1981. 11.
- 7) 高田和彦, 藤野陽三：道路橋最大活荷重評価のためのコンピュータシミュレーションの効率化, 構造工学論文集, Vol. 32A, 1986. 3.