

荷重の横分配の影響を考慮した道路橋 主桁の信頼性解析

RELIABILITY ANALYSIS OF MAIN GIRDERS OF HIGHWAY BRIDGE CONSIDERING CROSS BEAM EFFECT

白木 渡*・松保重之**・高岡宣善***

By Wataru SHIRAKI, Shigeyuki MATSUHO and Nobuyoshi TAKAOKA

In this study, the reliability analysis of main girders of highway bridge considering cross beam effect is performed. A simply supported bridge which has seven main girders, one cross beam and four traffic lanes is considered. Vehicular loads for three traffic stream states (sudden congestion, ordinary congestion and ordinary traffic stream states) are modeled considering the randomness of vehicular load intensity along the direction of the bridge axis as well as the axis perpendicular to it. The probabilistic characteristics of the maximum bending moment for each girder during the lifetime of bridge are evaluated by using an efficient simulation method, and its reliability is calculated. The effect of cross beam upon the reliability of each main girder is discussed.

1. まえがき

近年、大都市圏における都市内ならびに都市間を結ぶ高速道路では、交通量の増大、通行車両の大型化に伴う車両重量の増大により、高速道路の大部分を占める高架橋の維持、管理が非常に困難な状況になってきている。このような状況下において、既存の道路橋の安全性の再評価ならびに新たに建設される道路橋を合理的に設計するための新しい設計規範の策定を目的として、道路橋の荷重評価と信頼性解析に関する種々の研究がなされてきている^{1)~19)}。

道路橋の信頼性解析に関する研究としては、上部構造に関するもの^{1)~3), 5)~16), 18)~19)}と下部構造に関するもの^{1), 4), 13), 15), 17), 19)}に大別ができるが、上部構造に関するものが多くみられる。上部構造に関する研究においては、一車線の単純支持橋から始まって、最近では複数車線を有する実道路橋を対象とした研究が行われるようになってきている^{13), 15), 18), 19)}。著者らも数年前からこの複数車線を有する道路橋を対象とした研究を開始し¹³⁾、道路橋の信頼性評価に際してより現実に近いモデル化を行うために、橋軸ならびに橋軸直角方向の不規則特性を考慮した活荷重のモデルを提案している¹⁶⁾。しかし、そのモデル化は、横桁による荷重の横分配は考慮したものとなっていない。通常の設計計算において横桁による荷重の横分配を考慮した場合としない場合とでは主桁に生ずる断面力に10~20%の違いがあるといわれている²⁰⁾。

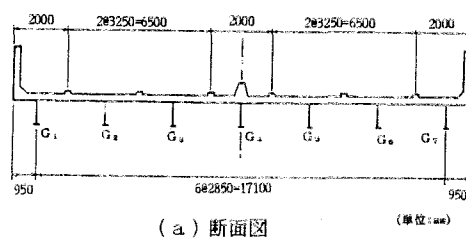
* 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (〒680 鳥取市湖山町南4-101)

** 工修 鳥取大学 助手 工学部海洋土木工学科 (〒680 鳥取市湖山町南4-101)

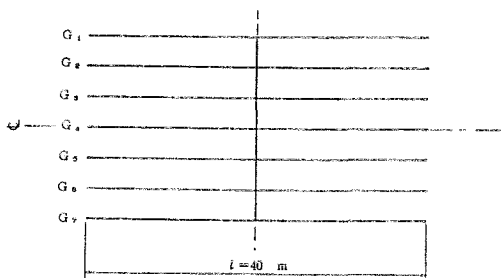
*** 工博 鳥取大学 教授 工学部土木工学科 (〒680 鳥取市湖山町南4-101)

本研究では、道路橋の信頼性解析において、この横分配の影響がどの程度あるのかを評価し、より実際の解析モデルに基づいて道路橋の信頼度を評価することを考える。そのために、実際に阪神高速道路で供用されている、Fig. 1で示す4車線7本主桁1本横桁の道路橋を対象として、橋軸ならびに、橋軸直角方向の活荷重の不規則特性を考慮した走行状態別の活荷重をモデル化し、そのモデル化された活荷重が横桁により横分配された時の主桁部の信頼性解析を行なう。

具体的には、阪神高速道路公団の活荷重実態調査結果²⁾を基に、橋軸ならびに橋軸直角方向の活荷重の不規則特性を考慮した走行モード別活荷重のモデル化を、モンテカルロ・シミュレーション法を用いて行なう。このシミュレーションに際しては、極値を効率よく推定するように効率化したシミュレーション手法^{5), 10)}を用いる。現実に近いシミュレーションをすることにより実際の交通環境における横桁の動きや横分配の特性を明らかにするとともに、道路橋を構成する各主桁の信頼度の評価や横分配の効果が主桁の信頼度に及ぼす影響についても検討を行なう。



(a) 断面図



(b) 平面図

Fig.1 道路橋モデル

2. 効率化シミュレーション手法による最大曲げモーメントの評価法

2. 1 効率化シミュレーション

主桁の信頼性解析において必要な供用期間内における主桁の最大応答値(最大曲げモーメント)の算出には、一般に長時間のシミュレーションを要する。そこで効率化を行なったシミュレーション手法を用いることによってその最大曲げモーメントを効率よくかつ精度よく推定することを考える。本研究で用いる効率化のシミュレーション手法は、文献5)および10)の方法と同じものを用いる。以下にその方法を簡単に紹介する。

実際に数多くのシミュレーションを行ない、曲げモーメント値のサンプルを得たとしても確率分布の最大値側の裾部に関して得られるサンプル数はわずかである。重要なのは値の大きいサンプルだけで、大部分のサンプルは値としてはあまり意味がない。そこで大きい値のサンプルだけを抽出することにより、必要な情報を数少ない繰り返しによって求めることを考えれば効率のよいシミュレーションが可能である。

桁に大きな断面力(曲げモーメント)が発生するのは、注目断面に関する影響線関数の絶対値が大きくなる箇所に、大きな力を加えた時である。単純桁の中央部に生ずる曲げモーメントを考えると、桁中央付近に大きな力、すなわち重い大型車両が載った時である。この状態を(A)とし、状態(A)を以下の2条件により規定する。

- 1) 大型車 n 台が連続して、桁中央をはさんで載っている。
- 2) 上記1)で載っている大型車の重量は X_a ton以上である。

状態(A)が生じる確率を P_a とすると、(A)の状態のみを抽出するという制限のもとでの $N \times P_a$ 回の繰り返しシミュレーションと、 N 回の繰り返しの通常シミュレーションで得られる曲げモーメント値のサンプルを、それぞれ大きい順に並べると両者の上位の値はほぼ同じはずである。たとえば $P_a = 1/100$ とすると状態

(A)を抽出するという制限付きのブロック渋滞のシミュレーションを10⁴回繰り返して得られる裾部の情報と、通常のシミュレーションを10⁴回繰り返して得られる裾部の情報とは、ほぼ同じであると考えられる。この状態(A)が生ずる確率P_aは、次のようにして求めることができる。

大型車、中型車、乗用車の混入率をそれぞれ p_{v1} , p_{v2} , p_{v3} , 車長を l_{v1} , l_{v2} , l_{v3} とし、平均車両間隔を s 、大型車の重量の累積確率を $F_{v1}(x)$ とすると、上述の状態(A)の2条件1), 2)が生ずる確率は、次のようにして決めることができる。

条件1): 渋滞列の先頭より十分に離れたある地点上にある車両が、大型車である確率は

$$\frac{l_{v1} p_{v1}}{\sum_{i=1}^3 l_{vi} p_{vi} + s} \quad (1)$$

である。これは、長い渋滞列中に大型車が占める長さの比である。桁上にブロック渋滞が載る時、注目点に大型車が載っている、また自動車と自動車の間に注目点があるが、1番注目点に近い自動車が大型車である確率は、平均車両間隔が s であることを考えて

$$\frac{p_{v1}(l_{v1} + s)}{\sum_{i=1}^3 l_{vi} p_{vi} + s} \quad (2)$$

と近似できる。注目点に大型車があり、さらにその後に大型車が $(n-1)$ 台続く確率 P_1 は

$$P_1 = \frac{p_{v1}(l_{v1} + s)}{\sum_{i=1}^3 l_{vi} p_{vi} + s} p_{v1}^{n-1} \quad (3)$$

で表わすことができる。上述の注目点は、連続する大型車の台数 n で固有に決まる点である。

条件2): ある大型車が X_a ton以上である確率は

$$1 - F_{v1}(X_a) \quad (4)$$

である。従って大型車 n 台が X_a ton以上である確率 P_2 は

$$P_2 = (1 - F_{v1}(X_a))^n \quad (5)$$

と表わすことができる。

式(3), (5)より状態(A)の生じる確率 P_a は

$$P_a = P_1 \times P_2 = \frac{p_{v1}(l_{v1} + s)}{\sum_{i=1}^3 l_{vi} p_{vi} + s} p_{v1}^{n-1} (1 - F_{v1}(X_a))^n \quad (6)$$

となる。

以上で扱った車両は、大型車・中型車・乗用車の3種類であり、車線も1車線を対象としたものである。しかし、実際には車両構成はもっと複雑で、車線数も多いと考えられる。したがって、実際問題としては、さらに多くの車種ならびに車線数を考える必要が出てくる。本研究では、ここで示した効率化手法を車種を10種類、車線を4車線と考えた場合に拡張して用いている。その方法については、2.2～2.4節および3.3節において随時説明している。

2.2 走行モードの設定

比較的長いスパンの高架橋を対象とすると、最大曲げモーメントは渋滞によって引き起こされる可能性が高く、これまでも、このモードを対象としたランダム解析が広く行なわれてきた。しかし車両重量により

生ずる高架橋の断面力(最大曲げモーメント)の供用期間内での最大値を生じさせる走行モードとしては、種々のモードが考えられる。どのような走行モードが最大値を与えるかは、スパン(影響線長)、高架橋上の交通流特性によって異なると考えられる。短スパンであれば最大重量+動的効果、中程度のスパンであれば重量車両+動的効果、さらに長いスパンであれば信号停止などによる渋滞あるいは都市内高速道路でよく見られる渋滞列の低速での移動で決まる要素が強い。また中程度の高架橋では、これらとは別に事故、工事による渋滞の可能性も考慮にいれる必要がある。また、車線数が増えるとこれらのモードの組合わせで決まる場合もあり、最大曲げモーメントの正確な評価は難しい。

一般に考えられる走行状態としては、突発渋滞、通常渋滞、通常走行の3つが考えられるが、本研究で使用する構造モデルである4車線の道路橋を考える場合、その走行モードは次の3つとする。1つは片側車線が突発渋滞でもう一方の車線は通常走行である。これを「突発渋滞モデル」と呼びFig.2(a)で示す。2つめはFig.2(b)で示すように片側車線が通常渋滞でもう一方の車線は通常走行である。この状態は「通常渋滞モデル」と呼ぶ。3つめはFig.2(c)で示すように両側車線とも通常走行とする。これは「通常走行モデル」と呼ぶ。ここで、「突発渋滞モデル」と「通常渋滞モデル」において片側車線を通常走行としているが、通常走行についても車種の混入率の違いにより日中・夜間と深夜のモデルに分けることができ、ここでは日中・夜間のモデルとする。これは、突発渋滞や通常渋滞が日中・夜間におきるためである。また、ここで両側車線ともに突発渋滞や通常渋滞になる場合を考えないのは、調査データの不足から求めることが困難であるためである。両側車線とも通常走行の「通常走行モデル」において、車種の混入率の違いより、日中・夜間における「通常走行モデル」と深夜における「通常走行モデル」とを別々にシミュレーションを行ない、その結果を1つにまとめるものとする。

シミュレーションにおいては、走行モードが「突発渋滞モデル」および「通常渋滞モデル」の場合は車線、主桁ともに桁番号の大きい方を通常走行側であるとした。すなわち、Fig.1(a)で示される断面モデルを例にとると、第3、4車線が通常走行となり、それらの車線の下にある主桁は G_5 、 G_6 、 G_7 桁となることを表わしている。また、効率化を行なうに際して重量車を発生させ着目点に乗せるのは突発渋滞および通常渋滞となる車線側とする。よって、「突発渋滞モデル」、「通常渋滞モデル」、「通常走行モデル」において効率化を行なう車線をFig.1(a)で示す断面モデルで表わすと第1、2車線側となる。

2. 3 シミュレーション・パラメーターのモデル化

本研究では、2. 1 節で示した効率化シミュレーション法によって2. 2 節で分類した走行モード別に橋軸方向ならびに橋軸直角方向の荷重列の不規則性を考慮した最大曲げモーメントを評価し、信頼性解析を行なう。ここでは、その際用いる自動車荷重列をモデル化するための各シミュレーション・パラメータのモデル化について述べる。道路上の活荷重の不規則要因としては、車種、車重、車長、車幅、車両の配置、車間距離および走行位置の不規則性を挙げることができる。本研究では、これらの確率特性値として昭和58年6月に阪神高速道路公団によって高速道路上で行なわれた活荷重実態調査の観測データ²⁾に基づき決定されたものを利用する。ただし、扱う車両は乗用車類・中型車類・大型車類・トレーラ類の4種類であるが、効率化

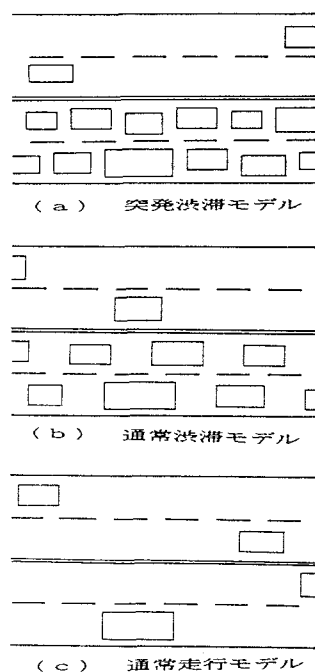


Fig.2 走行モード別荷重パターン

を行なうに際してある程度の細かな車両構成が必要のため、阪神高速道路公団設計荷重(HDL)委員会の昭和61年10月の報告書¹⁵⁾よりTable 1に示すように大型車類は軸重モデルで2軸とタンデム軸とに分け、また積載の状態によってさらに空車、積載車、過積載車の3つに分類することにした。トレーラ類においては積載の状態を空車と積載車の2つに分類した。

その他に通常走行の車間距離についても、調査データより期待値20m、標準偏

差10mの対数正規分布と仮定される確率量としてモデル化した。また、衝撃係数についても調査データより期待値0.2、標準偏差0.1の負の部分を無視した正規分布でモデル化した。ただし、最小値に関し車間距離は10m、衝撃係数は0の制限を従来の研究では設けていたが、最大値については制限を行なっていなかったため本研究においては、 $\mu + 3\sigma$ を最大値と仮定した。

シミュレーションに際しては、橋軸直角方向の不規則性も考慮するわけであるが、その不規則性の要因として車幅と車線中心からの変動量がある。

車幅については、資料が少なく、それぞれの車類において、そのばらつきは車長に比べて小さいと

考えられる。したがって、Table 2で示されるような確定量とする。車線中心からの走行位置の変動量は、調査データより期待値0m、標準偏差0.3mの正規分布に従うものとした。さらに、活荷重のモデル化において考えなければならないこととして、一台の車両をどのような載荷モデルと考えるかということがある。ここでは、より現実に近い載荷モ

Table 1 車重のモデル化

車種分類	分布形	特性値		上限値 (ton)	下限値 (ton)
		μ (ton)	σ (ton)		
乗用車類	LOG	1.37	0.37	3.2	0.5
中型車類	LOG	4.97	2.99	20.0	0.9
大型車類 2軸空車	NOR	7.64	2.13	14.0	3.5
" " 積載車	LOG	14.18	2.61	20.0	7.6
" " 過積載車	EXP	22.20	2.20	40.0	20.0
" タンデム軸空車	NOR	11.51	2.11	17.8	5.8
" " 積載車	LOG	20.30	3.37	30.0	11.5
" " 過積載車	EXP	32.29	2.29	57.0	30.0
トレーラ類 空車	NOR	13.67	2.97	22.6	5.2
" 積載車	LOG	25.60	10.67	80.0	13.7

注) NOR: 正規分布 LOG: 対数正規分布 EXP: 指数分布

Table 2 車種別の車幅

車種別	車幅
乗用車	1.4 m
中型車類	1.6 m
大型車類	2.0 m
トレーラ	2.0 m

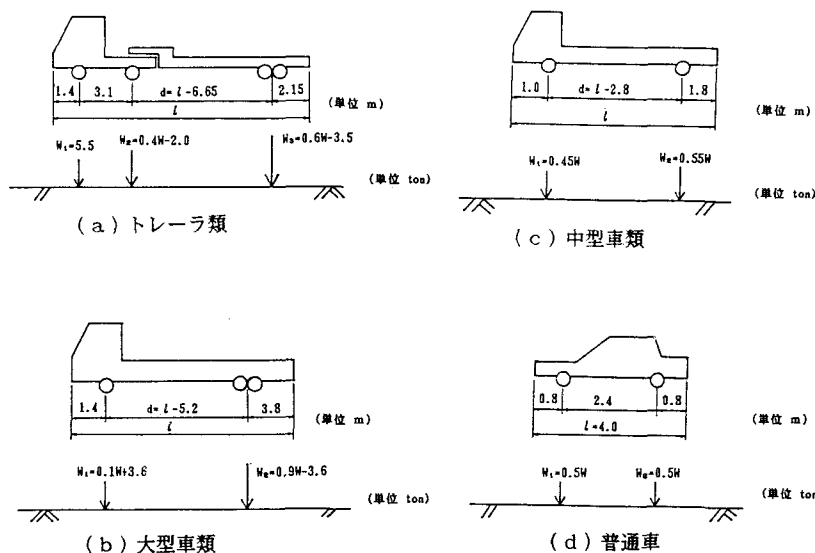


Fig.3 軸位置を考えた集中荷重モデル

Fig.4 軸位置を考えた集中荷重モデル

デルとして車重を輪重に分配し載荷させるモデルを考える。
より現実に近い載荷モデルを考えるとといっても、実際の車両
においては、2軸とタンデム軸とに別れている大型車種に見
られるように、同一の車種でも形態がかなり違うものもある。
本研究のシミュレーションにおいては、車種特性をつかんだ
荷重モデルで十分であるためFigs.3および4で示す荷重モデル
とする。図における w_1 、 w_2 および w_3 は車両の左右の輪
重を合わせた値であるのでシミュレーション時には各輪重と
して2で除した値を用いる。実際のシミュレーションでは、
Fig.5で示すような輪重の載荷モデルを考える。

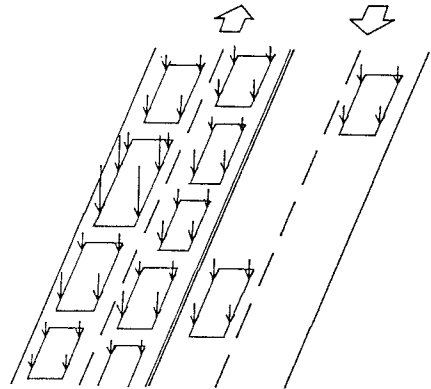


Fig.5 荷重列のモデル化

先に述べたように車重については同じ車種でも車重の特性
が大きく変わるため10種類の車重モデルに分けたが、車長に
ついては車重の場合とは違って直接各車種とかわるもので
はないので乗用車類・中型車類・大型車類・トレーラ類
の4種類に分類する。また車長は車重と同様に確率変量
とする。その確率特性値をTable 3に表わす。シミュレ
ーションの際には、他のパラメータ同様ヒストグラムに
変換して用いる。ただし、乗用車の車長については、観
測されていないので4 mの定数とする。そして4車種の
混入率については通常渋滞および通常走行(日中・夜間)
は、次の値とする。

Table 3 車長の確率特性値

車種別	平均(m)	分散(m ²)	最大値(m)	最大値(m)
乗用車	4.0	—	—	—
中型車類	6.45	2.72	12.5	3.5
大型車類	10.63	2.59	15.0	5.0
トレーラ	14.12	4.63	20.0	8.0

乗用車 : 62.55% 中型車類 : 17.45%
大型車類 : 17.14% トレーラ類 : 2.86%

また、突発渋滞および通常走行(深夜)の4車種の混入率は、次の値とする。

乗用車 : 31.28% 中型車類 : 8.72%
大型車類 : 51.42% トレーラ類 : 8.58%

2.4 最大曲げモーメントの評価

ここでは、効率化シミュレーションの手法を用いて主桁に生じる最大曲げモーメントの確率特性を評価する
方法について述べる。

シミュレーションの効率化を行なうに際して、注目点に乗せる車種、荷重を考える必要がある。本研究で
は、走行モードとして「突発渋滞モデル」、「通常渋滞モデル」および「通常走行モデル」の3つの場合を考えて
おり、また通常走行は日中・夜間と深夜とに別れ計4種類についての効率化を考えることになる。

2.1節で述べた効率化の手法における状態(A)の条件、すなわち着目点に乗せる車重が X_a ton 以上で
あるという条件を満たす車種が1車種だけであればシミュレーションや計算が容易になる。したがって、こ
こではTable 1のデータを参考にして $X_a=50$ tonとする。Table 1のデータにおいて、大型車種のタンデム軸・
過積載車とトレーラ類の積載車の2種類の上限值が50 ton以上となっているが、そのうち大型車種のタン
デム軸・過積載車については、50 ton以上の車重が発生するのはわずか 0.018%の確率しかなく、今回行な
うシミュレーションにおいては、無視できるものと考えられる。したがって、50ton 以上となる車種はトレ
ーラの積載車のみとなり、各走行モードにおける効率化は、積載トレーラで50ton以上の車両とする。

次に走行モードごとの効率化確率 P_a を求めるわけであるが、効率化を行なうに必要なパラメータとして

必要なものは、通常渋滞および通常走行においては1日当たりの全車種の発生台数、突発渋滞においては発生頻度と1回の渋滞における平均台数である。これらの数値としては、以下に示す阪神高速道路公団が昭和58年度に芦屋で行なった調査値^{2)・15)}を用いることにする。

突発渋滞時 : 1年間の1車線当りの全走行台数=4600台
 通常渋滞時 : 1ヶ月間の1車線当りの全走行台数=249780台
 通常走行時(日中・夜間) : 1ヶ月間の1車線当りの全走行台数=377280台
 通常走行時(深夜) : 1ヶ月間の1車線当りの全走行台数=108466台

車間距離については、突発渋滞では車両の走行速度0～2km/hの時の期待値2.71mを、通常渋滞については期待値8.05mを確定量として用いる。通常走行においては期待値20m、標準偏差10mの対数正規分布とモデル化されているが、この場合の効率化確率 P_a を求めるにおいては期待値20mを確定量として使用する。

以上、効率化シミュレーションを行なう際に必要なパラメータについて述べたが、効率化を行なう車線は1車線であり、「突発渋滞モデル」の突発渋滞車線や「通常渋滞モデル」の通常渋滞車線はそれぞれ片側車線つまり2車線となっている。そこで効率化を行なう車線をFig.1で示される1車線目つまり外側車線で行なうか2車線目の内側車線について行なうかで各主桁の安全性、信頼性の評価が変わってくることになる、どちらの車線にどれだけの台数を乗せるかが問題となる。先に述べた効率化した時の50ton以上の積載トレーラの台数は、1車線におけるものであり2車線で考えると、その2倍の積載トレーラの台数を考える必要がでてくる。しかし、50ton以上の積載トレーラが内側車線と外側車線をどのような比率で走るのかといった調査データがないため、ここではその比率が内側車線および外側車線で同じになるものと考えて、各走行モードにおいて先に求めた1車線における50ton以上の積載トレーラの台数を外側車線と内側車線に同じように載荷することにした。また、比較のために外側車線あるいは内側車線にのみ効率化を行った場合についても考えている。外側車線と内側車線での注目車種の発生確率は、独立とみなすため外側車線の効率化確率 P_a と内側車線の効率化確率 P_a は同じ値であり、またその複数車線の効率化確率 P_a も同じ値となる。

以上の考察のもとに、シミュレーションの効率化手法を適用して活荷重の作用によって主桁に生じる最大曲げモーメントの確率特性の評価をFig.6に示すフローチャートに従って行なう。図中の は乱数の発生を表す。

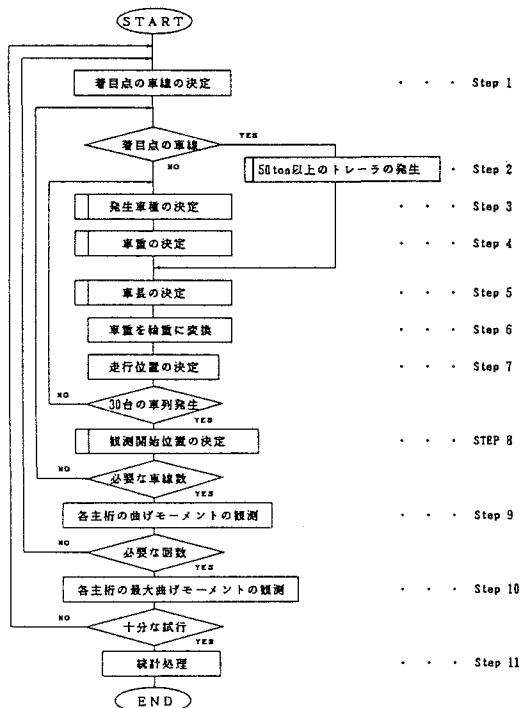


Fig.6 フローチャート

3. 1 荷重の横分配の考慮

現在供用されている橋桁の構造は立体的であり、合成桁、PC 桁、箱桁、鋼床版桁等の上路橋形式が多く荷重の横分配のための剛度は高くなっている。したがって、実際の橋梁では荷重の横分配がよく行なわれていると考えられる。道路橋の信頼性解析を行なう際にもこの荷重の横分配を考慮することは意義があることと考えられる。

道路橋に作用する荷重の横分配の計算法としては、本研究では比較的容易でかつ正確に横分配の影響を取り入れた計算が行なえるLeonhardtの簡易計算法を用いる²⁰⁾。

本研究で使用する7本主桁1本横桁のモデルにおいて、荷重 P の横分配の影響を考慮した時の G_1 桁の最大曲げモーメントすなわち G_1 桁中央部の曲げモーメントは、Fig.7で示すようにして求める。すなわち、Leonhardtの方法では、 G_1 桁の曲げモーメントを図(c)のような単純桁の曲げモーメントと図(d)のような仮想の連続桁の曲げモーメントに分解して考える。その時の単純桁および連続桁への横分配率 k_1 、 k_1' は、Leonhardtの算出式よりそれぞれ図(a)、(b)のように求められる。すなわち、 G_1 桁について横分配された荷重 P は単純桁に対し Pk_1 、連続桁に対し Pk_1' となる。ここで単純桁および連続桁の曲げモーメントの影響線 M^0 、 M' の値 η^0 および η' を図(c)、(d)のように求めると、 G_1 桁の桁中央部の曲げモーメントは

$$M_1 = P k_1 \eta^0 + P k_1' \eta' \quad (7)$$

となる。ただし、各主桁の注目点を主桁中央部としているため、 M^0 、 M' 線は桁中央部の曲げモーメントの影響線となっている。その他の桁についても同様に計算できる。

これに対し、横分配を考慮しない場合の算出法はFig.8を用いて次のように説明できる。すなわち、橋軸

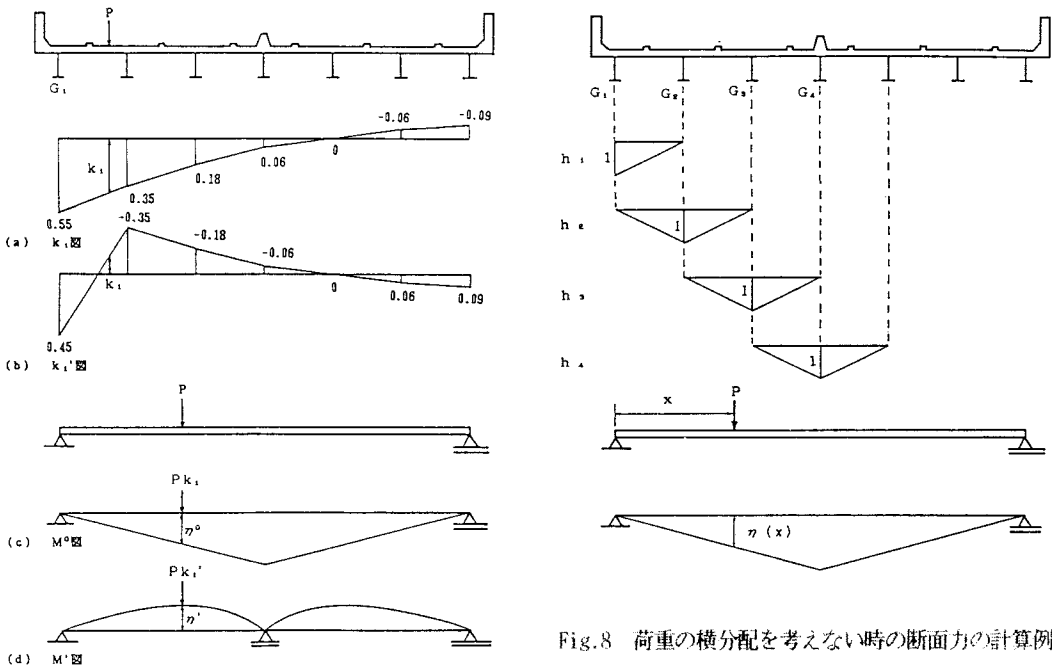


Fig.8 荷重の横分配を考えない時の断面力の計算例

Fig.7 荷重の横分配を考慮した時の断面力の計算例

方向に x 、橋軸直角方向に y の位置に集中荷重 P が作用する場合の第 k 番目の主桁 G_k の主桁中央部の曲げモーメント M_k は次式のように与えられる。

$$M_k = P h(y) \eta(x) \quad (8)$$

ここに、 $h(y)$ は k 番目の桁 G_k の反力の影響関数であり、 $\eta(x)$ は x 点における桁中央の曲げモーメントの影響線値である。

3. 2 最大曲げモーメントの確率特性の評価

道路橋に作用する活荷重は時間的に変動する不規則過程であると考えられる。したがって、道路橋の信頼度を評価するためには、耐用期間内での活荷重の変動を考慮した解析を行なうことが必要となる。ここでは、べき乗則を用いることにより耐用期間内での道路橋主桁の信頼性解析を行なう。従来の研究より、主桁に生ずる曲げモーメントの確率分布としては正規分布よりむしろ極値 I 型分布の方がよく当てはまることが明らかにされている^{1)~3), 5), 10), 15)}。そこで、本研究では、曲げモーメントは極値 I 型分布に従う不規則過程であると考えて解析を行なうことにする。

N 個の独立な不規則変数 $X_1, X_2, \dots, X_N$ が同一の分布関数 $F_X(m)$ に従うならば、それらの N 個の確率変数のうちの最大値 $X_{\max}$ が X_0 以下である確率は、次式で与えられる。

$$P[X_{\max} < X_0] = \prod_{i=1}^N P[X_i < X_0] = F_X^N(X_0) \quad (9)$$

いま、各走行モードで仮定するシミュレーション期間に発生する最大曲げモーメントの分布関数を $F_M(m)$ とする。また、それぞれのシミュレーション期間における曲げモーメントが独立とすれば、各走行モードで N 期間内において発生する最大曲げモーメントの分布関数 $F_{\max}(m)$ は次のように表わすことができる。

$$F_{\max}(m) = F_M(m)^N \quad (10)$$

これより、許容レベル M_a に対する信頼度 R^* および破壊確率 Q^* は、次式で表わされる。

$$R^* = F_{\max}(M_a) = F_M(M_a)^N \quad (11)$$

$$Q^* = 1 - R^* = 1 - F_M(M_a)^N \quad (12)$$

ここで、曲げモーメントは極値 I 型分布に従うものとしているので、その分布関数 $F_M(m)$ において α, m_0 を極値 I 型分布のパラメータとして $s = \alpha(m - m_0)$ とする規準化変量を考えれば、

$$s = -\ln(-\ln F_M(m)) \quad (13)$$

という関係が成り立つので式(10)は上式を代入することによって、次のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} F_{\max}(m) &= [\exp(-\exp(-s))]^N \\ &= \exp[-N \cdot \exp(-s)] \\ &= \exp[-\exp(-s + \ln N)] \end{aligned} \quad (14)$$

すなわち、 N 期間のべき乗によってパラメータ s が $\ln N$ だけシフトすることになる。

以上示したべき乗則により、Fig. 1 に示す道路橋の各主桁 $G_1 \sim G_4$ の最大曲げモーメントの確率分布を評価し、極値 I 型分布にあてはめた。本研究では、耐用期間 T としては、 $T=1$ 年と $T=50$ 年の 2 つの場合を考えた。ただし、シミュレーション期間としては、突発渋滞時、通常渋滞時ともに 1 年間とした。

主桁の信頼度の評価

ここでは、前節3.2で示した各主桁 $G_1 \sim G_4$ の最大曲げモーメントの確率分布を用いて式(11)および(12)により各主桁の信頼度の評価を行なう。まず式(12)を用いて、各主桁に生ずる最大曲げモーメントをTable 4に示す各主桁の設計曲げモーメント・レベル「 $1.7 \times L-20i$ 」(道路橋示方書²¹⁾の $L-20$ 荷重に衝撃を考慮した曲げモーメント・レベルに1.7の安全率をかけたもの)あるいは「 $L-20i$ 」(道路橋示方書²¹⁾の $L-20$ 荷重に衝撃を考慮した曲げモーメント・レベル)を超えた時に破壊が生じると仮定して、耐用期間 $T=50$ 年とした場合の各主桁の破壊確率 Q^* を求めた。その結果をTable 5に示す。表において突発渋滞モデル(横分配なし)というのは、突発渋滞モデルと同じ活荷重モデルを用いて、横桁が組み込まれていない道路橋の各主桁に対する解析結果である。また、突発渋滞モデル(外側車線)というのは、横分配を考慮した「突発渋滞モデル」において外側車線にのみ効率化を行なった時の各主桁に対する解析結果である。そして突発渋滞モデル(内側車線)は、内側車線にのみ効率化を行なった時の各主桁に対する解析結果である。これらの表示は後出のTables 6および7の場合も同じである。

Table 4 各主桁の許容曲げモーメントレベル
および設計曲げモーメントレベル
(単位 $t \cdot m$)

	モーメント レベル	主 桁 番 号			
		G_1	G_2	G_3	G_4
横分配 考慮	$1.7 \times L-20i$	630.19	497.76	459.34	461.04
	$L-20i$	370.7	292.8	270.2	271.2
横分配 考慮せず	$1.7 \times L-20i$	476.34	710.09	710.09	710.09
	$L-20i$	280.2	417.7	417.7	417.7

Table 5 耐用期間50年後の各主桁の破壊確率 Q^*

モード	モーメント レベル	主 桁 番 号			
		G_1	G_2	G_3	G_4
突発渋滞 モデル	$1.7 \times L-20i$	7.498E-05	4.794E-05	1.166E-06	5.143E-07
	$L-20i$	0.9282	0.7473	0.2465	0.1621
通常渋滞 モデル	$1.7 \times L-20i$	4.685E-09	5.440E-07	3.946E-07	8.996E-06
	$L-20i$	0.7608	0.8787	0.7460	0.9319
通常走行 モデル	$1.7 \times L-20i$	2.363E-05	1.514E-04	6.081E-05	7.601E-06
	$L-20i$	— *	— *	— *	— *
突発渋滞 モデル 横分配なし	$1.7 \times L-20i$	6.831E-08	3.5569E-02	5.850E-02	1.485E-08
	$L-20i$	9.999E-03	— *	— *	2.248E-03
突発渋滞 モデル 外側車線	$1.7 \times L-20i$	7.910E-05	8.908E-05	5.073E-06	4.810E-07
	$L-20i$	0.9265	0.7591	0.2740	5.483E-02
突発渋滞 モデル 内側車線	$1.7 \times L-20i$	2.419E-06	4.593E-08	3.608E-07	8.173E-07
	$L-20i$	0.1102	5.929E-02	0.1077	0.1680

注) — *は、計算上ほぼ破壊する。

ここで荷重の横分配を考慮した場合としない場合とで各主桁の破壊確率がどのように異なるかを比較してみる。比較に際しては、Table 5で示した「突発渋滞モデル」で荷重の横分配を考慮した場合としない場合の結果を用いる。Table 5から分るように、荷重の横分配を考慮した場合には、外側の桁ほど破壊確率が高くなっているが比較的均一な値となっている。それに比べて荷重の横分配を考慮しない場合では、各主桁の破壊確率のバラツキは大きくなっている。すなわち、 G_1 、 G_4 桁の破壊確率に比べ、 G_2 、 G_3 桁の破壊確率がかなり大きくなっている。これは、 G_2 桁および G_3 桁が走行車線のほぼ真下にあたるため、直接その影響を受けた形となっているからである。Table 4に示すように G_2 、 G_3 桁の設計曲げモーメント・レベル(ここで仮定した破壊レベル)は荷重の横分配を考慮しない場合の方が荷重の横分配を考慮した場合よりも大きく見積もられており、桁の設計断面が大きくなっているにもかかわらず破壊確率がかなり高くなっている。したがって、信頼性、経済性ともに荷重の横分配を考慮しない方が不利であり、荷重の横分配の考慮が桁の信頼性と経済性に有効であることが認められる。

次に、荷重の横分配を考慮した場合で、各走行モデルの違いが各主桁の信頼性に及ぼす影響について考察

する。先に示したTable 5から明らかなように、現在供用されている高架橋の主桁の破壊確率の評価を設計曲げモーメント・レベル「 $1.7 \times L-20i$ 」で行なうと、「通常渋滞モデル」では Q^* が 10^{-9} の非常に小さな値となり破壊がほとんど起こらないと言える。また、「突発渋滞モデル」と「通常走行モデル」とでは各主桁ともほぼ同じ信頼度を有している。この結果からでは、各主桁の信頼度に影響を及ぼすのはどの走行モデルであるかは、一概に言えない。しかし、主桁の信頼性評価においては、渋滞時のみを対象としたこれまでの考え方だけでは十分とは言えないことが分る。表から分るように設計曲げモーメント・レベル「 $L-20i$ 」で設計された桁に対する信頼度は、「 $1.7 \times L-20i$ 」のレベルに比べてかなり低くなっている。とくに「通常走行モデル」においてその傾向が強い。これは、現行の設計活荷重の規定法に問題があるのではないと思われる。活荷重の実態にあった設計活荷重の規定が望まれる。

つづいて、効率化を行った車線位置が各主桁に及ぼす影響について考察する。「突発渋滞モデル」の各桁の破壊確率は、いずれの桁に対しても「突発渋滞モデル（外側車線）」の破壊確率にほぼ等しくなっている。そして、これらの値は、外側の桁ほど危険性が高い。したがって、その外側の桁の安全性を支配している1車線目の載荷モデルが、主桁の信頼性を評価する際に重要となると思われる。

そこで、特に破壊確率を $Q^*=10^{-3}$ とした時の各主桁の曲げモーメントを例にとって考察する。各主桁の耐用期間 $T=1$ 年と $T=50$ 年間の曲げモーメントを算出した結果をTable 6に示す。Table 6から分るように、荷重の横分配を考慮したモデルでは、曲げモーメントの値は内側から外側の桁へ、つまり G_4 桁から G_1 桁へいくに従って大きくなっている。特に、 G_1 桁はかなり大きな値になっていることが分る。このことは、各主桁の破壊確率を $Q^*=10^{-3}$ におさえるためには G_4 桁より G_1 桁の方が大きな曲げモーメントに対して設計することが必要であることを示している。また、荷重の横分配を考慮しないモデルでは桁によってはかなり大きな差となって表われている。突発渋滞モデル（内側車線）、つまり重量車が内側車線に発生する場合においては、各主桁の曲げモーメントの均一性は高くなっている。それに比べて外側車線に重量車が発生する場合では各主桁の曲げモーメントの、偏りは大きくなっている。よって、荷重の横分配の特性の一つとして、載荷荷重が内側車線であるほど各主桁への分配がよいと言える。

Table 6 破壊確率 $Q^*=10^{-3}$ 時の曲げモーメント
(単位 $t \cdot m$)

モード	耐用期間 (年)	主 桁 番 号			
		G_1	G_2	G_3	G_4
突発渋滞 モデル	T=1	468.96	358.97	296.63	290.00
	T=50	565.95	437.09	356.30	348.26
通常渋滞 モデル	T=1	415.24	343.35	311.77	331.18
	T=50	467.20	396.20	360.90	390.08
通常走行 モデル	T=1	514.60	419.24	375.68	363.11
	T=50	573.66	472.20	424.44	406.68
突発渋滞 モデル 横分配なし	T=1	253.74	698.28	717.29	341.68
	T=50	318.23	841.29	868.42	437.57
突発渋滞 モデル 外側車線	T=1	469.33	363.70	301.97	273.15
	T=50	566.90	446.54	368.91	336.78
突発渋滞 モデル 内側車線	T=1	391.08	295.71	282.49	291.26
	T=50	485.21	352.56	340.92	351.52

Table 7 $Q^*=10^{-3}$ に対応する曲げモーメント・レベルの設計曲げモーメント・レベルに対する比率 α

モード	耐用期間 (年)	主 桁 番 号			
		G_1	G_2	G_3	G_4
突発渋滞 モデル	T=1	0.744 (1.265)	0.721 (1.226)	0.646 (1.098)	0.629 (1.069)
	T=50	0.898 (1.527)	0.878 (1.493)	0.776 (1.319)	0.755 (1.284)
通常渋滞 モデル	T=1	0.659 (1.120)	0.689 (1.172)	0.678 (1.153)	0.718 (1.221)
	T=50	0.741 (1.260)	0.796 (1.353)	0.786 (1.335)	0.846 (1.438)
通常走行 モデル	T=1	0.816 (1.388)	0.842 (1.431)	0.817 (1.390)	0.788 (1.338)
	T=50	0.910 (1.547)	0.949 (1.612)	0.924 (1.570)	0.882 (1.500)
突発渋滞 モデル 横分配なし	T=1	0.533 (0.906)	0.983 (1.672)	1.009 (1.717)	0.481 (0.818)
	T=50	0.668 (1.136)	1.185 (2.014)	1.223 (2.079)	0.616 (1.048)
突発渋滞 モデル 外側車線	T=1	0.745 (1.266)	0.731 (1.242)	0.657 (1.118)	0.592 (1.007)
	T=50	0.899 (1.529)	0.897 (1.525)	0.803 (1.365)	0.730 (1.242)
突発渋滞 モデル 内側車線	T=1	0.621 (1.055)	0.594 (1.010)	0.615 (1.045)	0.632 (1.074)
	T=50	0.769 (1.309)	0.708 (1.204)	0.742 (1.262)	0.762 (1.296)

さらに、この破壊確率 $Q^*=10^{-6}$ とした時の各主桁の曲げモーメント・レベルを比較してみる。ここでは、Table 6で示す各主桁の曲げモーメントをTable 4で示される曲げモーメント・レベル「 $1.7 \times L-20i$ 」および「 $L-20i$ 」の値で除した相対的な割合を示す値 α を用いて比較を行なう。この α の値が小さければ桁の安全性が高いことになる。この値をTable 7に示す。表中、()内の値が「 $L-20i$ 」の設計曲げモーメント・レベルで除した値を示している。このTable 7を用いて各走行モデルの違いが各主桁に及ぼす影響について考察する。ここでは、先に、横分配の影響を考慮する場合には、外側の桁が道路橋の安全性を考える上で重要となることについて触れたので、特に G_1 、 G_2 桁について考察する。 G_1 、 G_2 桁については「渋滞モデル（突発・通常）」よりも「通常走行モデル」の方が、また、同じ渋滞モデルでは「通常渋滞モデル」よりも「突発渋滞モデル」の方が α が大きくなり危険側となっている。「通常走行モデル」の方が「渋滞モデル（突発・通常）」よりも危険な値となっているのは「通常走行モデル」では衝撃を考慮しているためだと考えられる。このことは40mのスパン長では満載状態よりも桁中央に重量車が1台載る状態の方が支配的な載荷状態であることを示しているものと思われる。また、同じ渋滞モデルでも「通常渋滞モデル」よりも「突発渋滞モデル」の方が危険な値となっているのは、「突発渋滞モデル」の方が車間距離が短くまた車種混入率では大型車の発生率が高くなっているために危険側になるものと思われる。

4. あとがき

本研究では、効率化したシミュレーション手法を用いて、荷重の横分配の影響を考慮した複数車線を有する道路橋主桁の信頼性解析を行なった。また、活荷重を走行モード別にモデル化し、走行モードが主桁の信頼性におよぼす影響を評価した。その結果をまとめると以下のようである。

- (1) 荷重の横分配を考慮しない場合、主桁の信頼度は主桁と走行車線の位置との関係によってかなり影響を受ける。これに対し、荷重の横分配を考慮する場合は、安全性の均一性がみられ、また荷重の横分配を考慮しない場合に比べて信頼度の増加がみられる。したがって、荷重の横分配を考慮した方が経済的にも安全性確保の点でも有利であると思われる。
- (2) 本研究で使用した構造モデルにおいては、各主桁の信頼性に最も影響を及ぼす走行モードは「突発渋滞モデル」と「通常走行モデル」であった。
- (3) 本研究で重要となった走行モードの「突発渋滞モデル」と「通常走行モデル」では外側の主桁ほど危険性が高くまた外側車線の活荷重の影響を大きく受けている。したがって、荷重の横分配を考慮する構造形式では外側の主桁の安全性を高める必要があり、また信頼性解析においては外側車線の活荷重のモデル化が問題となり重要である。

以上が本研究で得られた結果である。本研究では、主桁の信頼性の観点から荷重横分配の考慮の有効性と荷重の横分配の効果の特性を明らかにすることができた。しかし、これは一つの構造モデルについて行なった評価であり、今後種々のスパン長、車線数あるいは種々の構造形式などを有する道路橋に対しての検討が必要である。

最後に、本研究を遂行するにあたり貴重な資料ならびに有益御助言を賜った阪神高速道路公団設計荷重(HDL)委員会の関係各位に深く感謝の意を表わす次第である。また、本研究における数値計算、その他に御協力いただいた鳥取大学院生 土屋誠氏、および同学部生 長谷川三男氏（現兵庫県庁勤務）に感謝を表わす次第である。

参考文献

- 1) 亀田・白木・藤野・古田：都市高速道路の荷重評価と設計基準の最適化に関する研究報告書、阪神高速道路公団・(社)システム総合研究所、1984-3.
- 2) 阪神高速道路公団(HDL)委員会：HDL委員会報告書、第2編活荷重分科会報告(別冊-1)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、第4編実態調査資料集、阪神高速道路公団・(財)阪神高速道路管理技術センター、1984-3.
- 3) 藤野・高田：自動車列のフローを考慮した活荷重の確率論的解析法、構造工学論文集、Vol.31A, pp.301-311, 1985-3.
- 4) 白木・高岡・松保・山本：都市高速道路高架橋におけるラーメン橋脚の信頼性解析、構造工学論文集、Vol.31A, pp.313-326, 1985-3
- 5) 亀田・白木・藤野：都市高速道路の荷重評価と信頼性解析に基づく構造設計規範の策定に関する研究、阪神高速道路公団・(社)システム総合研究所、1985-3
- 6) 関西道路研究会・道路橋調査研究委員会：限界状態設計法の基礎理論に関する調査研究、1985-3.
- 7) 白木・高岡・松保・山本：都市高速道路橋における渋滞時活荷重のモデル化、土木学会論文集、No. 362/I-4, pp.239-248, 1985-10.
- 8) 久保・中島・亀田：道路橋活荷重の実態調査とその確率モデルによる検討、橋梁と基礎、Vol.20, No.1, pp.1-10, 1986-3.
- 9) 杉山・藤野・伊藤：道路橋設計活荷重の規定方法に関する確率論的考察、構造工学論文集、Vol.32A, pp.539-549, 1986-3.
- 10) 高田・藤野：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, pp.551-559, 1986-3.
- 11) 白木・松保・高岡：変換過程を用いた道路橋の信頼性解析、構造工学論文集、Vol.32A, pp.561-570, 1986-3.
- 12) 白木・松保・高岡：シミュレーション法による道路橋床版の信頼性解析、構造工学論文集、Vol.32A, pp.571-581, 1986-3.
- 13) 亀田・藤野・家村・古田・白木：阪神地域における都市高速道路の荷重条件と設計荷重に関する基礎的研究、阪神高速道路公団・(社)システム総合研究所、1986-3.
- 14) 白木・松保・山本・高岡：道路橋における2径間連続主桁の信頼性解析、土木学会論文集、No.368/I-5, pp.225-234, 1986-4.
- 15) 阪神高速道路公団設計荷重(HDL)委員会：HDL委員会報告書、阪神高速道路の設計荷重体系に関する調査研究、阪神高速道路公団・(財)阪神高速道路管理技術センター、1986-12
- 16) 白木・松保・高岡：橋軸・橋軸直角方向の荷重の不規則性を考慮した道路橋の信頼性解析と設計活荷重モデルの検討、構造工学論文集、Vol.32A, pp.749-759, 1987-3.
- 17) 北沢・久保・白木・亀田：鋼製橋脚における荷重組合せの解析と荷重係数の試算、構造工学論文集、Vol.32A, pp.761-773, 1987-3.
- 18) 藤野・バルティア・三木・伊藤：車両の同時載荷が道路橋の疲労損傷に及ぼす影響、構造工学論文集、Vol.32A, pp.775-785, 1987-3.
- 19) 亀田・黒田・古田・藤野・白木：都市高速道路の設計荷重と耐用年数評価における信頼性概念の導入に関する研究、阪神高速道路公団・(社)システム総合研究所、1987-3.
- 20) 高島：道路橋の横分配実用計算法(前編)、現在社、1969-4.
- 21) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編、丸善、1980-2.

(1987年10月16日)