

都市高速道路高架橋における渋滞時活荷重のモデル化

MODELING OF VEHICULAR LOADS IN A FULLY CONGESTED TRAFFIC STREAM STATE ON URBAN EXPRESSWAY BRIDGES

白木 渡*・高岡宣善**・松保重之***・山本克之****

By Wataru SHIRAKI, Nobuyoshi TAKAOKA,

Shigeyuki MATSUHO and Katsuyuki YAMAMOTO

In this study, a modeling of vehicular loads in a fully congested traffic stream state on urban expressway networks is presented. The statistical analysis of randomly space-varying vehicular loads is performed by using the simulation technique and the observed data on traffic streams, provided by the Hanshin Expressway Public Corporation. The parametric analysis for the statistical nature of vehicular loads is done for the various cases of the traffic stream conditions. To demonstrate the effectiveness of the present model, the probabilistic characteristics of the response of a continuous two-span girder to random vehicular loads are calculated numerically by using the correlation theory of random processes and compared with the simulation results.

1. ま え が き

大都市圏における自動車交通の基幹を担う都市高速道路は、都市が果たすべき機能、役割の高度化、広域化に伴って、近年ますますその社会的重要性が認識され、路線の延長、拡大の要求とともにその安全性・信頼性に対する要求が高まってきている。都市高速道路の安全性・信頼性を考える場合、その大部分を構成する高架橋の安全性・信頼性の評価が不可欠である。都市高速道路高架橋における荷重環境は、年々増加する交通量ならびに貨物車の大型化に伴いますます過酷な状況になってきているが、高架橋の安全性・信頼性を評価するには、まずこのような活荷重環境を正確に把握する必要がある。

ところで、高架橋の信頼度を正しく評価しようとする場合、本来空間的にも時間的にも不規則であるという荷重の性質に加えて、一般道路のように交差点や信号がないことによって生ずる都市高速道路独特の荷重状況を踏

まえなければならない。しかし、作用する活荷重を確率・統計的に取り扱った従来の研究^{1)~6)}には、一般の道路を対象としたものはあるが、都市高速道路橋の作用荷重に対して確率・統計解析を行った例は、適切な観測データの不足ということにも起因して、篠塚らの論文⁷⁾およびHDL委員会資料⁸⁾以外ほとんどみられない。そこで、本論文では、都市高速道路の独特の荷重環境、すなわち通行量の多さ、渋滞列の長さ、渋滞頻度の高さ、車種構成の多様さ等の把握に力点をおいて、活荷重のモデル化を行うことにする。

さて、高架橋の信頼性を考える場合、高架橋を構成する主桁、床版、橋脚等の各構造部分の信頼性を総合的に考える必要があるが、ここではそのうち活荷重の影響を大きく受け設計上も重要な主桁部分に注目することにする。主桁部分の信頼度を評価する場合、それが最も危険と考えられる渋滞時活荷重のモデルを考える必要がある。本論文では、このような渋滞時活荷重のモデル化のために、先に一般道路橋の渋滞時活荷重をモデル化するために提案した不規則分布荷重モデル⁹⁾を用いることにする。高速道路における渋滞について考えれば、これは一般道路のように交差点や信号によって交通が遮断されて生ずる単発的なものではなく、定常的にしかも長い区間にわたると考えられるので、不規則分布荷重による渋

* 正会員 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)

** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科(同上)

*** 正会員 工修 鳥取大学助手 工学部海洋土木工学科
(同上)

**** 正会員 工修 (株)総合技術コンサルタント
(〒101 千代田区内神田1-15-16, 東光ビル)

滞時活荷重のモデル化は、都市高速道路高架橋においてより有効である。

不規則分布荷重モデルとは、渋滞時活荷重を車両進行方向の座標を助変数とする不規則関数と考えたもので、その期待値、分散および自己相関関数といった確率特性値によって特徴づけられる⁶⁾。その特性値の評価は不規則関数論⁸⁾を用いて行うが、その際より実際のモデル化を行うために、本論文では、阪神高速道路公団設計荷重 (HDL) 委員会が1982年6月に実施した活荷重実態調査結果⁹⁾を用いることにする。ところで、このようにモデル化を行う際には、都市高速道路における渋滞時車列を特徴づける要因の扱い方、あるいは地域・時間差による交通状況の変化などの条件によって、いくつかの荷重モデルが考えられる。このため、本論文では、これらの条件が分布荷重モデルに与える影響について調べ、都市高速道路における渋滞時車列を特徴づける種々の要因をできるだけ詳細に反映させたモデルを考える。しかし、これらの条件が分布荷重のモデル化に与える影響については、他の条件との相対的な比較のみが可能であり、どの程度の違いが重大でまたどの程度なら無視し得るかという絶対的な評価は、各条件下での分布荷重モデルの差が高架橋の断面力あるいは信頼度に与える影響を調べることによって行う必要がある。そこで、本論文では、2径間連続はり形式の高架橋を例にとり、その断面力の評価を解析的に行い、各荷重モデルの差が断面力に与える影響を評価することにする。先にも述べたように、不規則分布荷重は不規則関数と考えられるので、高架橋に生ずる断面力もまた不規則関数であり、その評価には、不規則関数論の援用が必要である。先の論文⁹⁾では、荷重と断面力との間の微分関係式を用いた手法によって断面力を評価したが、本論文では、影響関数による荷重と断面力との間の積分関係式を用いた手法¹⁰⁾によって解析的に評価する。この手法によれば、境界条件の処理が容易であり、任意の構造系についての静的応答を評価することができる^{7), 11), 12)}。本論文では、この手法の有効性も合わせて示す。

2. シミュレーション手法による渋滞時活荷重のモデル化

本論文においては、渋滞時の活荷重を Fig. 1 に示すように、車両進行方向の座標 x を助変数とする不規則関数とみなすことができるとして、それを不規則分布荷重 $\bar{q}(x)$ (上付き記号 $\bar{\cdot}$ はその量が不規則量であることを示す) でモデル化し、その確率特性値 (期待値・分散・自己相関関数) を評価する。Fig. 1 (b) に示すように、このモデルは、一般によく用いられる自動車荷重を1つの集中荷重で置き換えるモデル^{1)-5), 7), 9)}と等分布荷重⁹⁾に

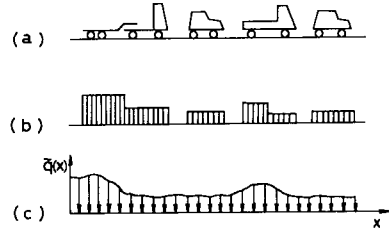


Fig. 1 Modeling of Vehicular Loads in a Fully Congested Traffic Stream State by Randomly Distributed Load $\bar{q}(x)$.

より置き換えるモデルとの中間的なモデルで、現実により近いモデルであると考えられる。これらの確率特性値は、実際に渋滞時の交通を長期間にわたって観測し、統計処理することによって決定されるべきものであるが、一般にこれは非常に困難である。したがって、ここでは、モンテ・カルロ法¹⁴⁾に基づくシミュレーションにより不規則分布荷重の確率特性を評価することにする。シミュレーションに用いるデータとしては、阪神高速道路公団の活荷重実態調査結果⁹⁾によることにする。

不規則分布荷重 $\bar{q}(x)$ の確率特性値をモンテ・カルロ・シミュレーションによって決定するために必要なパラメーターを次のように選ぶ。まず、車両に関するものとして、車重、車長、前後荷重比という3つのパラメーターを考える。また、渋滞時の交通流を特徴づけるものとして、車種別混入率、車間距離というパラメーターを考える。ここでは、これらのパラメーターを総称してシミュレーション・パラメーターとよぶことにする。

(1) 車種の分類および車両のモデル化

観測データに基づいて、ここでは渋滞時における車列を構成する車両を、(a) 乗用車 (Light Vehicles), (b) 中型車類 (Medium Vehicles), (c) 大型車類 (Heavy Vehicles), (d) トレーラー (Trailer) の4つに分類する。

各車種の重量は、不規則分布荷重の不規則性を特徴づける基本的なパラメーターであるから、これは確率変量

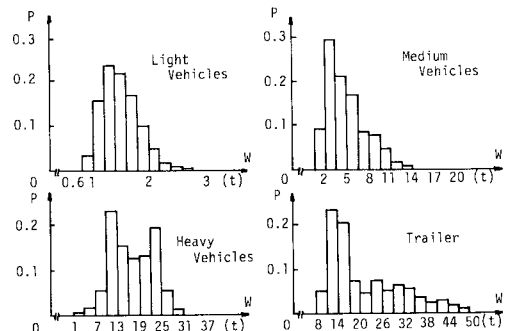


Fig. 2 Histograms of Weight of Vehicles (P =Relative Frequency, W =Weight of Cars)⁹⁾. [1 t=9.8 kN]

とする。観測データに基づく車種別重量のヒストグラムおよび確率特性値は、それぞれ Fig. 2 および Table 1 に示すとおりである。このような統計量は一般に測定期間の影響を受けるが、ここで示した値は測定場所と日時の選定にあたって得られるデータが地理的・時間的に特異でないことを考慮して得られたもので数値そのものには十分一般性があると考えられる。本研究では、これらのヒストグラムを直接使ってシミュレーションを行う。

車長については、活荷重の大きさに直接かわる量ではないために、従来の研究においては確定量として扱うことも多かったが、本研究では、車重を車長で除した分布荷重のシミュレーションを意図しているため、重量と同様車長も確率変量とする。車種別車長のヒストグラムおよびそれらの確率特性値を、それぞれ Fig. 3 および Table 1 に示す。ただし、乗用車の長さについては観測されていないので定数とする。また、後のパラメーター解析では、この車長を全車種確定量とする扱い方も考える。

次に、前後荷重比というパラメーターについて説明する。シミュレーションにおいては、Fig. 1 (b) のような長方形の分布荷重へモデル化する。このとき、乗用車以外の 3 車種については、前半分と後半分を 2 つの異なる

大きさの長方形分布荷重で表わす。この高さの比を与えるのがこの前後荷重比である。観測結果⁹⁾によれば、平均的に後半分の重量が前半分の約 2 倍という比が観測されているので、乗用車以外の車種については、この比を 1:2 とする。

車列に関するパラメーターについては、まず車間距離について検討する。これは、サンプル車列に荷重強度ゼロの空白の長さを規定するという意味で、シミュレーション結果に大きな影響をもつことが予想される。したがって、平均走行速度と関連づけて観測されているこの車間距離を確率変量と考えることにした。観測より得られた車間距離の確率特性値を Table 2 に示す。また、その確率分布は、これらの特性値を有する対数正規分布によって近似することにした。

もう 1 つの車列に関するパラメーター、車種別混入率とは、4 つに分類された各車両がどのくらいの割合でシミュレーション・モデルに入るかを規定するパラメーターである。観測結果に基づき、Table 3 に示すような時間帯別の混入率をそれぞれシミュレーションに用いることにする。表中、Pattern I, II および III とは、それぞれ 0~24 時、2~6 時および 8~9 時の平均混入率を示す。

(2) シミュレーションの方法

前節において説明したパラメーターを用いて、モンテ・カルロ法によるシミュレーションを Fig. 4 に示すフローチャートに従って行う。この図において [] は、乱数の発生を表わす。まず、車種別混入率に従って車種を決定する (STEP 1)。次に、決定された車種について重量 (STEP 2) および車長 (STEP 3) を決定する。決定された車重と車長さらに車種別の前後荷重比の条件とによって、長方形分布荷重の前後の荷重強度を計算する (STEP 4)。ただし、発生車種が乗用車の場合は、確定車長 4 m で重量を除してその商を等分布荷重とする。次に、車間距離の分布に従って車間距離を発生させ、次の車の前端を決定する (STEP 5)。以上、STEP 1

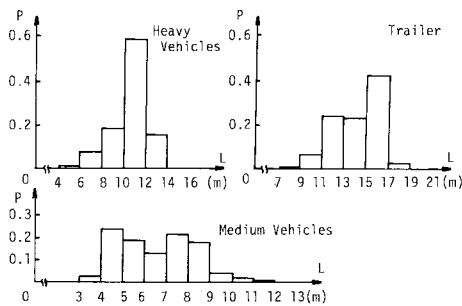


Fig. 3 Histograms of Length of Vehicles (P =Relative Frequency, L =Length of Cars)⁹⁾.

Table 1 Probabilistic Characteristics of Weight and Length of Vehicles⁹⁾.

Type of Vehicle	Weight of Vehicles				Length of Vehicles			
	Mean(t)	Variance(t^2)	Maximum(t)	Minimum(t)	Mean(m)	Variance(m^2)	Maximum(m)	Minimum(m)
Light	1.50	0.13	3.3	0.7	4.0	—	—	—
Medium	4.91	7.67	22.3	1.3	6.45	2.72	12.5	3.5
Heavy	17.06	34.34	38.5	2.5	10.63	2.59	15.0	5.0
Trailer	21.27	102.80	48.5	9.5	14.12	4.63	20.0	8.0

Table 2 Probabilistic Characteristics of Vehicular Headways versus Various Mean Speeds of Traffic Stream⁹⁾.

Speed of Traffic Stream	Mean	Variance	Maximum	Minimum
v (km/h)	(m)	(m^2)	(m)	(m)
$0 \leq v \leq 2$	2.71	2.22	11.0	1.0
$0 \leq v \leq 4$	3.05	2.96	12.0	1.0
$0 \leq v \leq 6$	3.48	4.12	13.0	1.0
$0 \leq v \leq 10$	4.34	7.08	18.0	1.0
$0 \leq v \leq 30$	6.38	15.05	22.0	1.0

Table 3 Vehicle Composition (%)⁹⁾.

Pattern	Type of Vehicle			
	Light	Medium	Heavy	Trailer
I	73.76	17.03	7.39	1.82
II	38.87	8.97	41.85	10.31
III	87.49	8.28	3.49	0.74
Supplementary Pattern	64.99	15.01	16.05	3.95
Supplementary Pattern	54.43	12.57	26.48	6.52
Supplementary Pattern	47.93	11.07	32.90	0.81

～5の手続きを繰り返して約30台の車列をつくる。

次に、この車列の前部をランダムに切り捨て (STEP 6), その後部から100mにわたる区間について十分細かい間隔で荷重強度を観測してゆく (STEP 7), 以上で1回の試行が終了する。

これを十分な回数だけ繰り返した後, STEP 7の観測結果をアンサンブル的に統計処理し, 不規則分布荷重 $\bar{q}(x)$ の期待値 $\bar{q}(x)$, 分散 $D_q(x)$ および自己相関関数 $K_q(x_1, x_2)$ を求める¹⁵⁾。シミュレーション回数は, 1万回とした。

(3) 数値計算例

各シミュレーション・パラメータの扱い方が不規則分布荷重モデルの特性値にどの程度影響するのか, さらに, 混入率や車間距離のように地域あるいは時刻によって差があると考えられるパラメータについては, それらの変化に対して不規則分布荷重モデルの特性値がどう

変わるかを調べる。このような目的のために, Table 4 に示すような比較パターンを設け, 各条件に従ってそれぞれシミュレーションを行う。以下, 比較パターンを説明するとともに, 順次計算例を示すことにする。

まず, Table 4 における Basic I ~ III というパターンについてであるが, この区分は Table 3 に示す車種別混入率 I ~ III に対応するものである。このように混入率を基本として比較パターンを設けたのは, 地域および時刻によって最も大きく変化するのは車種別混入率であるという予想によるものである。

Basic I という条件によるシミュレーションより得られた結果をアンサンブル統計処理して, 先の論文⁶⁾と同様この場合も不規則分布荷重の定常性を確認した。その期待値, 分散はそれぞれ一定値 $\bar{q}(x)=\bar{q}=0.4586$ (t/m) [4.494 (kN/m)], $D_q(x)=D_q=0.4064$ (t²/m²) [39.03 (kN²/m²)] であった。また, 自己相関関数は, Fig. 5 に示すように2地点 x_1, x_2 の距離の差 $\tau=x_2-x_1$ のみの関数 $K_q(\tau)$ で与えられることが確かめられた。この図において合わせて示されている曲線は, シミュレーション結果の正の部分を重視して次式の指数関数の形に回帰近似したものである。

$$K_q(\tau) = D_q \exp(-\alpha|\tau|) \dots \dots \dots (1)$$

ここに, α は $[m^{-1}]$ の次元をもつ正の定数である。この図をみれば, 不規則分布荷重の自己相関関数は式 (1) の指数関数によくあてはまることがわかる。回帰近似の結果, $\alpha=0.3164 [m^{-1}]$ を得た。

他のパターンについても定常性が確認されたので, 以下, シミュレーション結果を \bar{q}, D_q, α の3つの特性値と Fig. 5 のような自己相関関数の形によって示すことにする。

さて, 次に, 混入率が不規則分布荷重の確率特性値に及ぼす影響について示す。Basic I ~ III の3つのパターンのシミュレーションによって得られた \bar{q}, D_q, α を Table 5 に示す。また, Fig. 6 にこれら3つのパターンの自己相関関数を比較して示す。Fig. 7 は Basic I ~

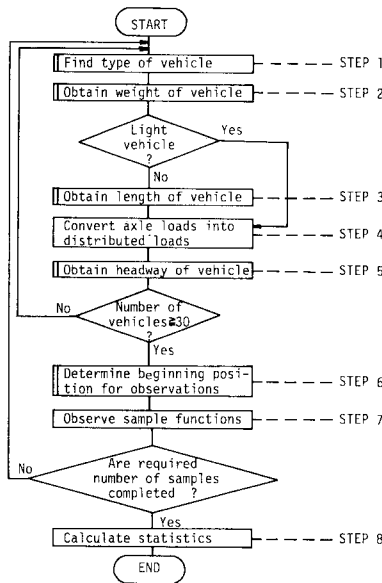


Fig. 4 Flow Chart of Vehicular Load Simulation.

Table 4 Patterns of Simulated Traffic Stream.

Items of Comparison	Pattern Name	Vehicle Composition(%)					Length of Vehicles	Headway of Vehicles(m) [v:Speed of Traffic Stream(km/h)]
		Light	Medium	Heavy	Trailer			
Vehicle Composition	Basic I	74	17	7	2	Random (Independent of Weight)	Deterministic, 2.71 [0svs2]	
	Basic II	39	9	42	10			
	Basic III	88	8	3	1			
Length of Vehicles	A	74 17 7 2					Deterministic	Random, (2.63) [0svs2]
	A2						Random (Dependent upon Weight)	
Headway of Vehicles	B	74 17 7 2					Random (Independent of Weight)	Random, (2.63) [0svs2]
								Deterministic, 3.05 [0svs4]
								Random, (2.98) [0svs4]
								Deterministic, 3.48 [0svs6]
								Random, (3.40) [0svs6]
								Deterministic, 4.34 [0svs10]
								Random, (4.31) [0svs10]
								Deterministic, 6.38 [0svs30]
								Random, (6.23) [0svs30]

Note 1 : Assumed that the ratios of the front to rear axle loads are for light Vehicles 1, for medium vehicles, heavy vehicles and trailer 1/2, respectively.

Note 2 : In the column of "Headway of Vehicles", the values in () are the means of simulation results.

IIIの結果を \bar{q} , D_q , α の3つの特性値を乗用車混入率に対してプロットしたものである。ただし、IとIIの間では問題になる大型車混入率が7.39%と41.85%というように大きく異なるので、Table 3に示す補間パターンを考えた。Fig. 7から、不規則分布荷重の期待値 \bar{q} と分散 D_q は乗用車混入率の増加に対してほぼ直線的に減少し、また、 α は乗用車混入率の変化によって大きな影響を受けないことがわかる。

次に、車長の扱い方という比較パターンAについて考察する。Basicパターンでは、車長は車重に対して独

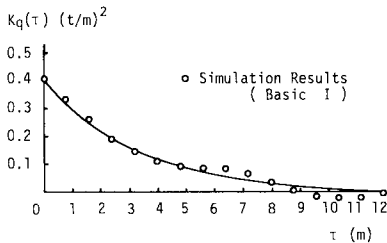


Fig. 5 Autocorrelation Function $K_q(\tau)$ of Stationary Stochastic Process $\bar{q}(x)$. [1 t=9.8 kN]

Table 5 Probabilistic Characteristics of Randomly Distributed Loads Acting on and Bending Moments Developed in a Continuous 2-Span Beam. [1 t=9.8 kN]

Pattern	\bar{q} (t/m)	D_q (t ² /m ²)	α (m ⁻¹)	M_{max} (tm)	M_{max}^+ (tm)	D_{Mmax} (t ² m ²)
Basic I	0.4586	0.4064	0.3164	-160.5	133.9	6297.8
Basic II	0.9691	0.9463	0.4010	-339.2	283.0	11710.7
Basic III	0.3431	0.2389	0.3130	-120.1	100.2	3740.0
A 1	0.4624	0.3929	0.2770	-161.8	135.0	6890.5
A 2	0.4618	0.3439	0.2816	-161.6	134.8	5940.2
B 1	0.4659	0.4152	0.3057	-163.1	136.0	6644.7
B 2	0.4393	0.3963	0.3107	-153.8	128.3	6246.8
B 3	0.4472	0.4071	0.3018	-156.5	130.6	6593.6
B 4	0.4171	0.3857	0.3098	-146.0	121.8	6096.2
B 5	0.4238	0.3917	0.3066	-148.3	123.8	6251.4
B 6	0.3790	0.3651	0.3154	-132.7	110.7	5674.6
B 7	0.3832	0.3713	0.3052	-134.1	111.9	5951.2
B 8	0.3125	0.3219	0.3250	-109.4	91.3	4864.2
B 9	0.3197	0.3339	0.2942	-111.9	93.4	5538.0

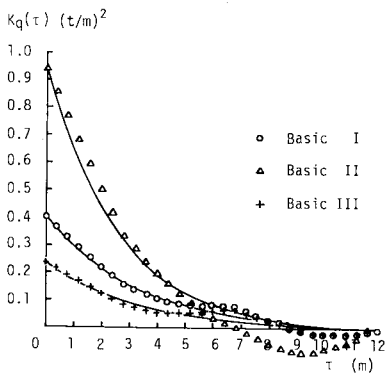


Fig. 6 Effect of Vehicle Composition on Autocorrelation Function $K_q(\tau)$. [1 t=9.8 kN]

立な確率量として扱っている。これに対してA1では車長を平均値に固定した場合を考え、A2では車重との間に相関関係を有する確率量として扱う場合を考え、それぞれの結果をBasicパターンの結果と比較する。A2の場合は、Fig. 4のフローチャートのSTEP3の車長を決定するとき、車重の決定のために発生させた乱数をそのまま用いることによって車重と車長に相関性をもたせた。このシミュレーション結果をTable 5およびFig. 8に示す。Table 5よりわかるように、 \bar{q} は車長の扱い方によってほとんど変化しないが、分散は多少変化している。

つづいて、比較パターンBにおいては、Table 2に示す走行速度と関係づけた車間距離の違いによる影響を調べる。Basic IおよびB2, B4, B6, B8は車間距離を確定量とし、その値としてはそれぞれの走行速度に対応する車間距離の期待値を用いた。また、B1, B3, B5, B7においては、車間距離をTable 2に示す確率特性を有する対数正規分布に従う確率量とした。この場合のシミュレーション結果をTable 5およびFig. 9に示す。Fig. 9においては、横軸に平均車間距離(確率量としたものはシミュレーション結果の平均)をとり、縦軸に \bar{q} と D_q をそれぞれ示している。Fig. 9のいずれの図においても、○印は車間距離を確定量、+印は確率量としたものである。Fig. 9より、車間距離が大きくなるに

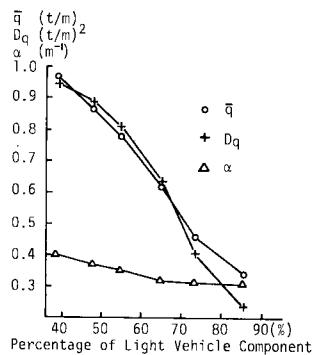


Fig. 7 Probabilistic Characteristics of Randomly Distributed Loads versus Light Vehicle Component in Traffic Stream. [1 t=9.8 kN]

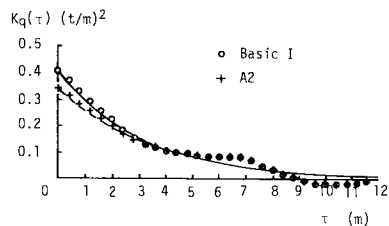


Fig. 8 Effect of Treatment for Vehicular Length on Autocorrelation Function $K_q(\tau)$. [1 t=9.8 kN]

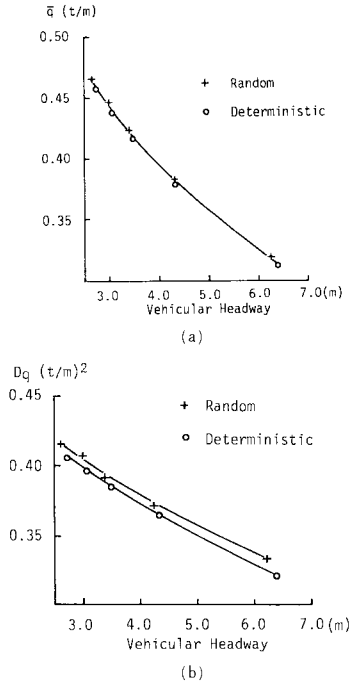


Fig. 9 Probabilistic Characteristics of Randomly Distributed Loads versus Vehicular Headway. [1 t=9.8 kN]

従って \bar{q} および Dq は小さくなるのがわかる。また、車間距離を確定量とする場合と確率量とする場合との違いによる影響は、 \bar{q} にはほとんど現われないが、 Dq にわずかにその影響が現われ、確率量として扱った場合の方が Dq がわずかに大きくなる傾向があることがわかる。

3. 不規則分布荷重を受ける2径間連続桁の静的応答解析

本章では、不規則分布荷重を受ける2径間連続桁を例にとりその断面力の確率特性値を不規則関数の相関理論によって解析的に評価することにより、前章で評価した不規則分布荷重の特性値の差が構造物の断面力の特性値に与える影響について調べる。

(1) 断面力の評価方法

分布荷重 $\bar{q}(x)$ とそれによって引き起こされる断面力 $\bar{M}(x)$ との間には構造力学の理論によって、式(2)のような積分関係式が成立する。

$$\bar{M}(x) = \int_{\Omega} \bar{q}(s) G_M(x, s) ds \quad \dots \dots \dots (2)$$

上式中、 $G_M(x, s)$ は単位荷重が断面 s に作用したときの断面 x の断面力 $\bar{M}(x)$ の影響値 (影響関数) である。また、積分は荷重作用位置 s に関して全載荷領域 Ω において行う。

まず、式(2)の期待値をとると、断面力の期待値 $\bar{M}(x)$ は、荷重の期待値 $\bar{q}(x)$ を用いることによって

$$\bar{M}(x) = \int_{\Omega} \bar{q}(s) G_M(x, s) ds \quad \dots \dots \dots (3)$$

で与えられる。式(2)、(3)を比較すると、断面力の期待値 $\bar{M}(x)$ の評価は、確定論での断面力 $M(x)$ の評価と完全に対応することがわかる。次に、断面力の自己相関関数 $K_M(x_1, x_2)$ は、積分関係式(2)が成立する場合、不規則関数の相関理論により荷重の自己相関関数 $K_q(x_1, x_2)$ を用いて次式で求めることができる。

$$K_M(x_1, x_2) = \iint_{\Omega} G_M(x_1, s_1) G_M(x_2, s_2) K_q(s_1, s_2) ds_1 ds_2 \quad \dots \dots \dots (4)$$

式(3)、(4)を用いれば、任意の構造形式の桁に生ずる任意の断面力の確率特性値を評価できるが、ここでは、Fig. 10に示すような等断面の2径間連続桁の曲げモーメントを例にとりその評価手順を示す。まず、2径間連続桁の場合、式(4)中の影響関数 $G_M(x, s)$ は注目断面 x が中間支点 $x = l_1$ より左か右かによって表式が異なるので、 $x_1 \leq l_1, x_2 \leq l_1$ と $x_1 \leq l_1, x_2 > l_1$ と $x_1 > l_1, x_2 \leq l_1$ と $x_1 > l_1, x_2 > l_1$ の4つの場合に分けて式(4)の積分を計算する必要がある。しかし、相関関数の性質 $K_M(x_1, x_2) = K_M(x_2, x_1)$ を用いれば、Fig. 11に示すような3つの領域(①, ②, ③の部分)についてのみ積分を計算することにより $K_M(x_1, x_2)$ の値を決定することができる。ここでは、①の領域における $K_M(x_1, x_2)$ の計算手順のみを示すが、②, ③の部分についても同様に計算することができる。式(4)は荷重載荷位置 s についての積分であるが、式中の影響関数 $G_M(x, s)$ は、2径間連続桁の場合注目断面 x のみならず載荷位置 s の大小関係 ($x \leq l_1$ の①の場合、 $0 \leq s \leq x, x \leq s \leq l_1$ および $l_1 \leq s \leq l_1 + l_2$) によっても表式が異なる。さらに、荷重の自己相関関数 $K_q(x_1, x_2)$ は式(1)で与えられ、 $|\tau|$

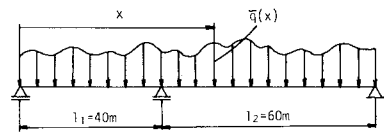


Fig. 10 Continuous 2-Span Beam Subjected to Randomly Distributed Load $\bar{q}(x)$.

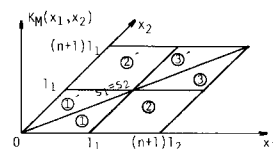


Fig. 11 Division of Domain in which Autocorrelation Function $K_M(x_1, x_2)$ is Defined.

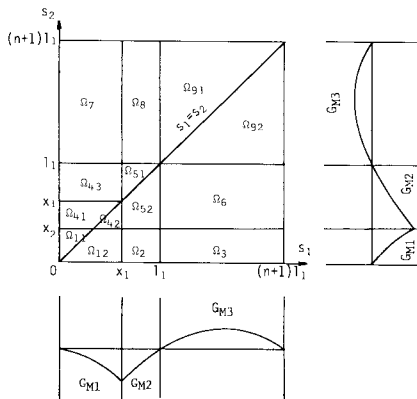


Fig. 12 Division of the Domain of Integration by Eq. (4). [$x_2 < x_1 < l_1$]

= $|s_1 - s_2|$ であることに注意すれば、 $s_1 \geq s_2$ と $s_1 < s_2$ とでその表式が異なる。以上の諸点に注意して、式(4)の全積分領域 Ω を Fig. 12 に示すように 14 個に分割すると、式(5)によって $K_M(x_1, x_2)$ を決定することができる。ただし、Fig. 12 中の $G_{M1}(x, s)$ 、 $G_{M2}(x, s)$ および $G_{M3}(x, s)$ は、それぞれ $0 \leq s \leq x$ 、 $x \leq s \leq l_1$ および $l_1 \leq s \leq l_1 + l_2$ の場合に対する 2 径間連続桁の曲げモーメントの影響関数の概形を示したものである。

$$K_M(x_1, x_2) = D_q(J_{11} + J_{12} + J_2 + J_3 + J_{41} + J_{42} + J_{43} + J_{51} + J_{52} + J_6 + J_7 + J_8 + J_{91} + J_{92}) \dots (5)$$

ここに、

$$\begin{aligned}
 J_{11} &= \int_0^{x_2} \int_0^{s_2} G_{M1}(x_1, s_1) G_{M1}(x_2, s_2) e^{-\alpha(s_2 - s_1)} ds_1 ds_2 \\
 J_{12} &= \int_0^{x_2} \int_{s_2}^{x_1} G_{M1}(x_1, s_1) G_{M1}(x_2, s_2) e^{-\alpha(s_1 - s_2)} ds_1 ds_2 \\
 J_2 &= \int_0^{x_2} \int_{x_1}^{l_1} G_{M2}(x_1, s_1) G_{M1}(x_2, s_2) e^{-\alpha(s_1 - s_2)} ds_1 ds_2 \\
 J_3 &= \int_0^{x_2} \int_{l_1}^{n+1} G_{M3}(x_1, s_1) G_{M1}(x_2, s_2) e^{-\alpha(s_1 - s_2)} ds_1 ds_2 \\
 J_{41} &= \int_{x_2}^{x_1} \int_0^{s_2} G_{M1}(x_1, s_1) G_{M2}(x_2, s_2) e^{-\alpha(s_2 - s_1)} ds_1 ds_2 \\
 J_{42} &= \int_{x_2}^{x_1} \int_{s_2}^{x_1} G_{M1}(x_1, s_1) G_{M2}(x_2, s_2) e^{-\alpha(s_1 - s_2)} ds_1 ds_2 \\
 J_{43} &= \int_{x_1}^{l_1} \int_0^{x_1} G_{M1}(x_1, s_1) G_{M2}(x_2, s_2) e^{-\alpha(s_2 - s_1)} ds_1 ds_2 \\
 J_{51} &= \int_{x_1}^{l_1} \int_{s_1}^{l_1} G_{M2}(x_1, s_1) G_{M2}(x_2, s_2) e^{-\alpha(s_2 - s_1)} ds_2 ds_1 \\
 J_{52} &= \int_{x_1}^{l_1} \int_{x_2}^{s_1} G_{M2}(x_1, s_1) G_{M2}(x_2, s_2) e^{-\alpha(s_1 - s_2)} ds_2 ds_1 \\
 J_6 &= \int_{x_2}^{l_1} \int_{l_1}^{n+1} G_{M3}(x_1, s_1) G_{M2}(x_2, s_2) e^{-\alpha(s_1 - s_2)} ds_1 ds_2 \\
 J_7 &= \int_{l_1}^{n+1} \int_0^{x_1} G_{M1}(x_1, s_1) G_{M3}(x_2, s_2) e^{-\alpha(s_2 - s_1)} ds_1 ds_2 \\
 J_8 &= \int_{l_1}^{n+1} \int_{x_1}^{l_1} G_{M2}(x_1, s_1) G_{M3}(x_2, s_2) e^{-\alpha(s_2 - s_1)} ds_1 ds_2 \\
 J_{91} &= \int_{l_1}^{n+1} \int_{l_1}^{s_2} G_{M3}(x_1, s_1) G_{M3}(x_2, s_2) e^{-\alpha(s_2 - s_1)} ds_1 ds_2
 \end{aligned}$$

$$J_{92} = \int_{l_1}^{l_1+l_2} \int_{s_2}^{l_1+l_2} G_{M3}(x_1, s_1) G_{M3}(x_2, s_2) e^{-\alpha(s_1 - s_2)} ds_1 ds_2$$

式(5)において、 $x_1 = x_2 = x$ とすれば、断面 x における曲げモーメントの分散 $D_M(x) = K_M(x, x)$ を求めることができる。ここでは、曲げモーメントの確率特性値についてのみ示したが、その他の断面力、たとえばせん断力 $\tilde{Q}(x)$ についてもその確率特性値を同様に求めることができる。さらに、ある断面力と他の断面力、たとえば曲げモーメントとせん断力との相互相関関数 $K_{Mq}(x_1, x_2)$ についても同様に求めることができる。

(2) 数値計算例

前項に示す諸式を用いて不規則分布荷重 $\bar{q}(x)$ が載荷された連続桁の曲げモーメント $\tilde{M}(x)$ およびせん断力 $\tilde{Q}(x)$ の確率特性値を計算する。まず、Table 4 における Basic I の不規則分布荷重が作用する場合を考える。

まず、本論文での解析法の有効性を示すために、Fig. 10 において $l_1 = 40$ m、 $l_2 = 60$ m の等断面連続桁に生ずる曲げモーメントをシミュレーションによって直接求め、これを統計処理して得られた分散と本解析法によって得られた分散とを比較した。これが Fig. 13 (b) であり、実線が本解析法によって得られた結果、○印がシミュレーションによって得られた結果である。図中の横軸 x の一目盛は 10 m である。図より、両者はよく一致していることがわかる。このことは、ここで提案している不規則分布荷重モデルが渋滞時活荷重をよくモデル化している、かつ本解析法の有効性を示しているものと思われる。

Fig. 13 には、曲げモーメントの分散 $D_M(x)$ の解析結果のみならず、同じ桁に対する種々の解析結果も示している。曲げモーメントおよびせん断力の各期待値 $\bar{M}(x)$ および $\bar{Q}(x)$ は、それぞれ等分布荷重 \bar{q} が桁に作用する場合の曲げモーメント図およびせん断力図であり、構造力学において周知のとおりである。曲げモーメントとせん断力の各分散 $D_M(x)$ および $D_Q(x)$ については、それらの期待値の絶対値の大きいところで大きくなる傾向を示している。しかし、その極値をとる点は必ずしも $\bar{M}(x)$ が極値あるいはゼロをとる点とは一致していないことがわかる。これは、 $\tilde{M}(x)$ 、 $\tilde{Q}(x)$ が不規則関数であるので、それらが極値あるいはゼロをとる点の位置および値がばらつくからである。 $\tilde{M}(x)$ と $\tilde{Q}(x)$ の相関係数 $\rho(x) = K_{Mq}(x, x) / \sqrt{D_M(x) \cdot D_Q(x)}$ ($K_{Mq}(x, x)$ は $\tilde{M}(x)$ と $\tilde{Q}(x)$ との同一断面における相互相関関数) については、大体の傾向として $\bar{M}(x)$ と $\bar{Q}(x)$ がともに正であるような x の範囲では正の値を、また、 $\bar{M}(x)$ と $\bar{Q}(x)$ の符号が異なるような x の範囲では負の値をそれぞれとり、 $\bar{M}(x)$ あるいは $\bar{Q}(x)$ がゼロとなるような x 点の近くにおいては $\rho(x)$ もゼロとなることわかる。また、この桁

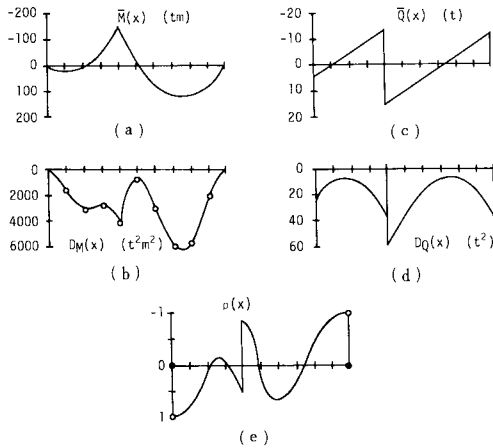


Fig. 13 Probabilistic Characteristics of Responses of a Continuous 2-Span Beam Subjected to Vehicular Loads of Basic I Pattern. [l t=9.8 kN]

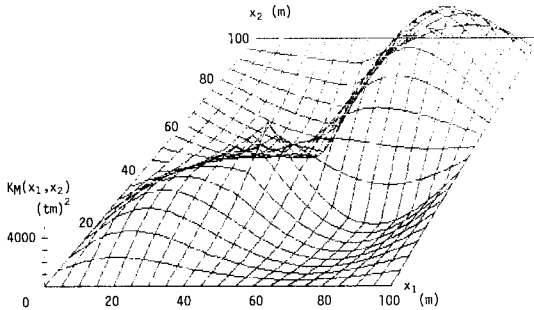


Fig. 14 Autocorrelation Function of Bending Moment of a Continuous 2-Span Beam. [l t=9.8 kN]

に生ずる $\tilde{M}(x)$ の自己相関関数 $K_M(x_1, x_2)$ を x_1, x_2 平面上に描くと Fig. 14 となる。この図をみると、中間支点と長い方の径間の中央付近との間では負の相関が大きくなっていることがわかる。さらに、一方の径間の中央付近ともう一方の径間の中央付近の間では負の相関が現われる。このことは、右径間の $\tilde{M}(x)$ が大きくなる傾向があるとき左径間の $\tilde{M}(x)$ は小さくなる傾向があることを示している。このことに関連し、同一径間の中央付近どうしの $\tilde{M}(x)$ の相関性は正となることもわかる。

さて、次に、不規則分布荷重 $\tilde{q}(x)$ の特性値の差が断面力の特性値に与える影響について考察する。

Fig. 15 は、Basic II の $\tilde{q}(x)$ が作用する場合の断面力の特性値を示す。この図と Fig. 13 を比較すると、特性値の絶対値は異なるがその形状はほとんど変わらないことがわかる。このことは、他の荷重モデルによる断面力の特性値と比較してみても同様に見える。そこで、その絶対値がどのように変わるのか考察することにする。同一の桁であれば、 $\tilde{M}(x)$ は \bar{q} のみに比例する (式 (3))

参照)。したがって、各荷重モデルの差が $\tilde{M}(x)$ へ与える影響は、 $\tilde{q}(x)$ の期待値 \bar{q} への影響と同じであるといえる。また、 $D_M(x)$ は同一の桁であれば、 D_q と α のみの関数であり、そのうち D_q については全くの比例関係にある (式 (4) 参照)。したがって、Table 4 に示すような α にあまり変化のない各荷重モデルの差が $D_M(x)$ へ与える影響は、 D_q への影響とほぼ同じであると考えられる。Table 5 は、Table 4 における各荷重モデルに対する \bar{q}, D_q, α および $\tilde{M}(x)$ と $D_M(x)$ の最大値をまとめて示したものである ($\tilde{M}_{\max}^+, \tilde{M}_{\max}^-$ はそれぞれ正、負の $\tilde{M}(x)$ の最大値であり、Fig. 13 (a) あるいは Fig. 15 (a) の $x=76$ m における値が \tilde{M}_{\max}^+ 、 $x=40$ m における値が \tilde{M}_{\max}^- となる。 $D_{M \max}$ は $D_M(x)$ の最大値であり、Fig. 13 (b) あるいは Fig. 15 (b) の $x=76$ m における値である)。この表より以上示した考察の妥当性がわかる。以上の考察は $\tilde{Q}(x)$ の特性値についても同様にいえる。また、 $\tilde{M}(x)$ と $\tilde{Q}(x)$ の相関係数 $\rho(x)$ は、同一の桁であれば x のほかには α のみの関数となり、Table 4 に示すような α にあまり変化のない各荷重モデルの差が $\rho(x)$ へ与える影響はあまりないと考えられる。

なお、Fig. 16 (a) および (b) はそれぞれ以上の桁と同じ桁に生ずる $\tilde{M}(x)$ の最大値と \bar{q} との関係および $D_{M \max}/D_q$ と α との関係を示したものである。この図よ

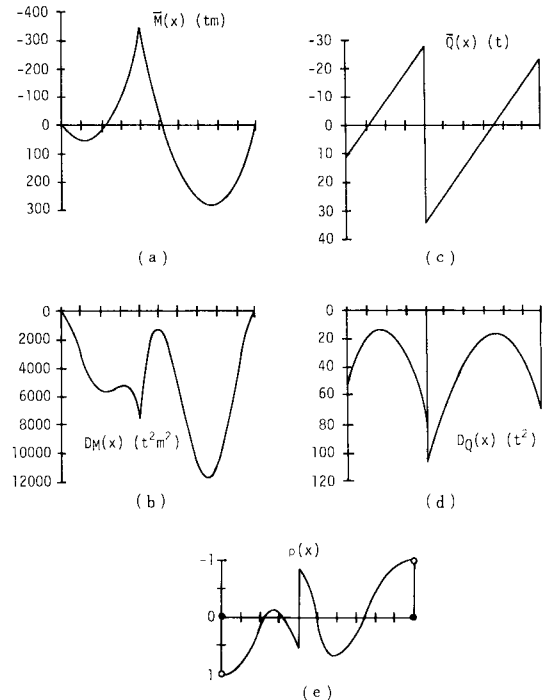


Fig. 15 Probabilistic Characteristics of Responses of a Continuous 2-Span Beam Subjected to Vehicular Loads of Basic II Pattern. [l t=9.8 kN]

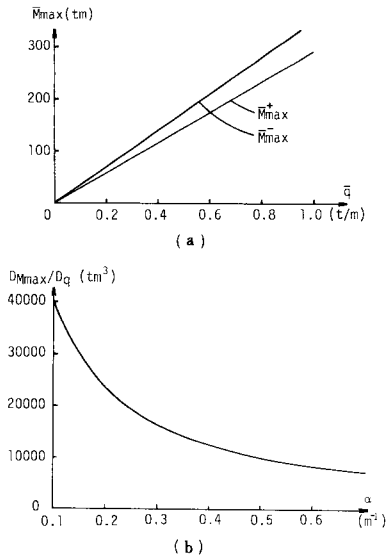


Fig. 16 Probabilistic Characteristics of the Maximum Bending Moment versus the Characteristics of Randomly Distributed Load. [1 $t=9.8$ kN]

り、荷重の特性値がわかると桁に生ずる曲げモーメントの特性値の最大値を知ることができる。 $\tilde{Q}(x)$ と $D_q(x)$ についても同様の図を描くことができる。

4. あとがき

都市高速道路高架橋における渋滞時活荷重のモデル化ならびにそのモデル化された活荷重の作用を受ける主桁の断面力の評価をシミュレーション手法および不規則関数論を用いて行った。その結果をまとめると以下のようである。

(1) 都市高速道路における渋滞時活荷重を不規則分布荷重としてモデル化し、その確率特性値をシミュレーション手法によって決定した。シミュレーション・パラメーターとしては、車種、車重、車長、車種別混入率、渋滞時車間距離等を考え、これらのパラメーターが不規則分布荷重の確率特性値に与える影響を調べた。その結果を簡単にまとめると次のようである。

- 車長と車重との相関性の考慮といったパラメーターの取り扱い方によって、若干ではあるが不規則分布荷重の分散に影響が現われる。
- 渋滞時における車間距離を確率変数として取り扱うか確定量として扱うかの違いは、若干ではあるが不規則分布荷重の分散に影響を及ぼす。
- 渋滞時における車間距離の平均値の設定は、不規則分布荷重の平均値と分散に大きな影響を及ぼす。
- 車種別混入率の設定は、不規則分布荷重の特性

値に大きな影響を及ぼし、大型車の混入率を大きくすると不規則分布荷重の平均値、分散がかなり大きくなる。

(2) シミュレーション・パラメーターが高架橋の断面力の確率特性値に与える影響を調べるために、2径間連続桁の曲げモーメントおよびせん断力の確率特性値を不規則関数の相関理論を用いて解析的に求めた。その結果を簡単にまとめると次のようである。

- 断面力の解析結果をシミュレーション手法によって得られる断面力の確率特性値と比較し、不規則分布荷重によるモデル化および不規則関数論に基づく解析方法の妥当性を示した。
- (1)の各項において「不規則分布荷重の平均値、分散」とあるところを、それぞれ「断面力の平均値、分散」とそのまま書き直した事柄が、各シミュレーション・パラメーターが高架橋の確率特性値に与える影響としていえる。

以上が本論文で得られた結果であるが、不規則分布荷重の時間的変化を考慮していない点、シミュレーション・パラメーターが高架橋の信頼度に与える影響が考慮されていない点など、まだ問題は多い。しかし、都市高速道路橋の信頼性解析を行うのに必要な都市高速道路上における渋滞時活荷重を詳細にモデル化し、さらにそのモデル化された活荷重の作用を受ける桁の断面力の確率特性値を評価した本研究の意義は大きいものと思われる。これらの結果をもとに高架橋の信頼性解析を行うことが可能であるが、それについては次の機会に検討する。なお、Figs. 7および9などの図を用いれば、新しく得られた観測データに対して改めてシミュレーションを行わなくても不規則分布荷重の確率特性値を求めることができ便利である。また、Fig. 16のような図を種々の桁に対して作成しておけば、その桁に生ずる断面力の特性値の最大値を求めることが可能となる。

本研究における数値計算には、京都大学計算機センターのFACOM M 200を用いた。

最後に、本研究を遂行するにあたり貴重な資料を提供していただいた阪神高速道路公団設計荷重(HDL)委員会の関係各位に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 西村 昭：荷重列としての自動車交通流の二、三の解析、土木学会誌、第46巻2号、pp. 37~42, 1961-2.
- 小堀為雄・吉田 博：電子計算機による自動車交通流模型の作成について、金沢大学工学部紀要、第3巻3号、pp. 228~235, 1964-6.
- 星谷 勝・日野虎彦：道路橋活荷重の検討、土木学会第30回年次学術講演会概要集、I-296, pp. 607~608, 1975-10.
- 藤野陽三・伊藤 学・遠藤元一：シミュレーションに基

- づく道路橋設計活荷重の評価, 土木学会論文報告集, 第 286 号, pp.1~13, 1979-6.
- 5) 佐伯彰一・金井道夫・佐藤和徳：橋梁活荷重の実態, 土木技術資料, 24-10, pp.511~516, 1982-10.
 - 6) 高岡宣善・白木 渡・松保重之：不規則関数論に基づく道路橋の空間領域での信頼性解析, 土木学会論文報告集, 第 334 号, pp.79~88, 1983-6.
 - 7) 篠塚正宣・松村駿一郎・久保雅邦：道路橋における活荷重応答の確率論的一算定法, 土木学会論文集, 第 344 号, I-1, pp.367~376, 1984-4.
 - 8) 高岡宣善：工学のための不規則関数論, 共立出版, 1975.
 - 9) 阪神高速道路公団設計荷重 (HDL) 委員会：活荷重分科会資料, 第 1~13 回, 資料 No.21~69 号, 1982~1984.
 - 10) ルジャニーツィン著, 高岡宣善訳：構造物の信頼性解析, 丸善, 1980.
 - 11) 岡林隆敏：不規則な分布荷重を受けるはりの解析, 土木学会論文報告集, 第 316 号, pp.11~21, 1981-12.
 - 12) 高岡・白木・松保：“不規則な分布荷重を受けるはりの解析”への討議, 土木学会論文報告集, 第 327 号, pp.167~172, 1982-10.
 - 13) Ove Ditlevsen: Extremes and First Passage Times, Doctoral Thesis, Technical University of Denmark, Copenhagen, 1971.
 - 14) 松本嘉司・伯野元彦：土木解析法 (2), 技報堂, 1975-1.
 - 15) J.S. ベンダット・A.G. ピアソル共著, 徳丸・添田・柴田・中溝・秋月・山川共訳：ランダムデータの統計的処理, 培風館, 1980-5.

(1984.8.2・受付)