

実態活荷重のモデル化と

シミュレーションによる応答解析

工務部 設計課 江 見 晋
 同部 工務第一課 中 島 裕 之
 同部 設計課 山 内 幸 裕

まえがき

本報告は技報第3号「活荷重実態調査報告」に引き続き行うものである。ここでは、前回報告した活荷重の実態調査結果に基づき、①活荷重の確率モデルの作成、②作成された確率分布モデルを用いたシミュレーション法による橋梁の応答解析について報告する。これより、橋梁に作用する断面力を推定したが、曲げモーメントについて現行の設計曲げモーメントに対する比という形で、ある期間内に発生する最大値を主として推定している。これは、構造物の安全性を評価するうえで、構造物に作用する極限の荷重強度を明確にする必要があるためである。

対象構造部材として床版・縦桁および主桁を選び、それぞれについてモデル化により再現した活荷重状態を用いてシミュレーションを行い、作用する断面力を推定した。床版・横桁には輪重による影響、また主桁では荷重列（渋滞時の自動車荷重列）による影響を試算した。この結果、それぞれの構造部材において50年程度の間は、現行の設計断面力に対して、発生する最大断面力が約2倍程度となる可能性の高いことが推定された。

これらの結果は、限界状態設計法の導入に際しての基礎データとなるばかりでなく、既設橋梁の荷重履歴の把握という観点からも有力な情報を提供できると考えられる。

以下に得られた結果について報告する。なお、実態調査の結果については技報第3号「活荷重実態調査報告」を参照されたい。

1. 活荷重の確率モデル化

1-1 概要

作成した確率分布モデルは、大きく分けて①車両に関する諸元（車重、軸重、車長など）、②交通流に関する確率分布（車間距離、渋滞回数など）である。これは、現行の設計活荷重体系におけるT_L荷重をそれぞれ考慮したためである（図-1参照）。

なお、車両に関するモデル化にあたっては同一軸での輪重のアンバランス、大型車の連続到着の傾向の有無について明らかなる有意差がなかったことから、モデル化を行っていない。したがって、輪重は得られた軸重の1/2とし、個々の車両の到着は独立として扱った。

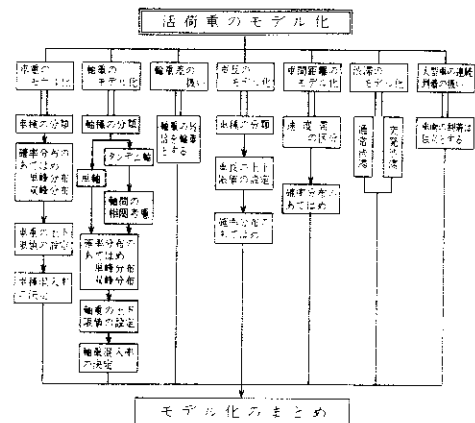


図-1 活荷重のモデル化の作成

1-2 車両に関する諸元のモデル化

車重については10車種(表-1)、軸重については30軸重(表-2)、また車長については表-1のうち①,④,⑦,⑨,⑩についてのモデル化を行った。確率分布関数として車重・軸重では正規分布、対数正規分布、指数分布を用い、車長では β 分布を用いた。実測された頻度分布の1例を図-2,3,4に示す。

図-2,3から明らかなように、貨物車では、空車・積載車・過積載車が混合しているため、図-5に示す概念図のような確率分布モデルの分解を車重・軸重とも行っている。さらに、軸重のうちタンデム軸重については、それぞれの軸重が独立と考えるため、タンデム軸重の和と比のモデル化を行った。散布図(図-6)によりタンデム軸重比 $r = 1.25$ を境界として $r = 1.0$ 、 $r = 1.75$ に収

表-1 車重のモデル化に用いた車種分類表

No.	車種分類		積載の状況
	組合せ車種	軸数	
1	大型車種	2軸	空車
2	"	"	積載車
3	"	"	過積載車
4	"	タンデム軸	空車
5	"	"	積載車
6	"	"	過積載車
7	トレーラー類	"	空車
8	"	"	積載車
9	中型車種	"	"
10	乗用車種	"	"

表-2 軸重のモデル化に用いた軸種分類表

No.	軸種分類			積載の状況
	組合せ車種	軸数	軸位置	
1	大型車種	2軸	前軸	空車
2	"	"	後軸	積載車
3	"	"	"	過積載車
4	"	"	"	過積載車
5	"	3軸①	前軸	空車
6	"	"	後軸	積載車
7	"	"	後軸	過積載車
8	"	"	"	空車
9	"	"	"	積載車
10	"	"	"	過積載車
11	"	3軸②	前軸	タンデム
12	"	"	後軸	空車
13	"	"	"	積載車
14	"	4軸①	タンデム軸	空車
15	"	"	"	積載車
16	トレーラー類	セミトレーラ 軸数3	トラクター前軸	空車
17	"	"	トラクター後軸	積載車
18	"	"	トレーラー前軸	空車
19	"	"	トラクター前軸	積載車
20	"	"	トラクター後軸	空車
21	"	"	"	積載車
22	"	"	トレーラー前軸	空車
23	"	"	"	積載車
24	"	セミトレーラ 軸数5	トラクター前軸	空車
25	"	"	タンデム軸	積載車
26	"	"	"	積載車
27	中型車種	"	前軸	"
28	"	"	後軸	"
29	乗用車種	"	前軸	"
30	"	"	後軸	"

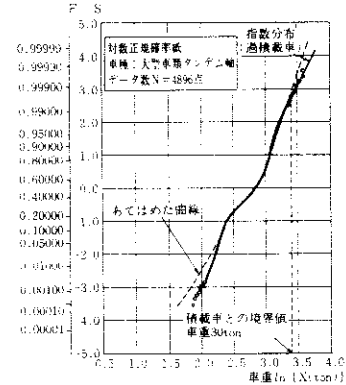
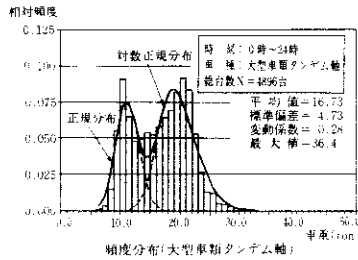


図-2 実測された頻度分布の1例(車重)

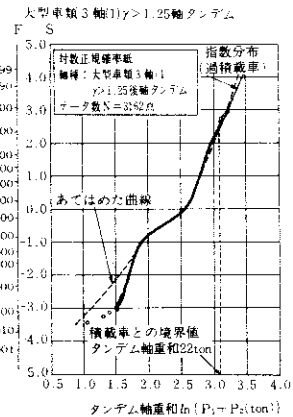
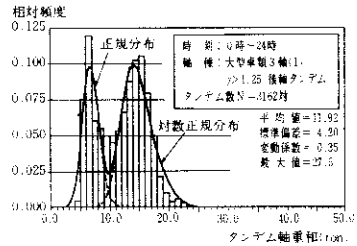


図-3 実測された頻度分布の1例(軸重)

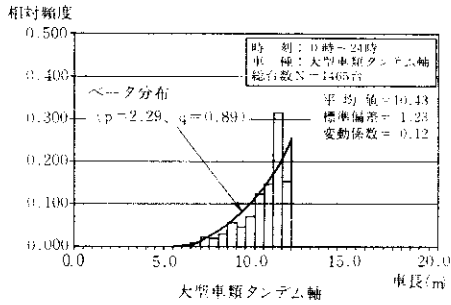


図-4 実測された頻度分布の1例(車長)

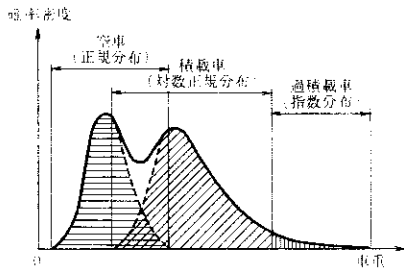


図-5 空車・積載車・過積載車の概念図

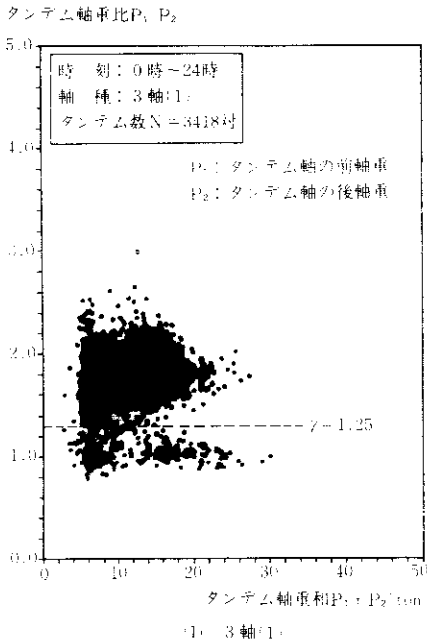


図-6 タンデム軸重和と比の散布図

束する傾向があるため、それぞれのタンデム軸重和のモデルを作成し、そのモデルに対して軸重比の平均値と分散を図-7のように与えた。なお、軸重比モデルは対数正規分布を用いている。上下限値は極値Ⅲ型分布により推定した他、自動車諸元表などにより設定した。

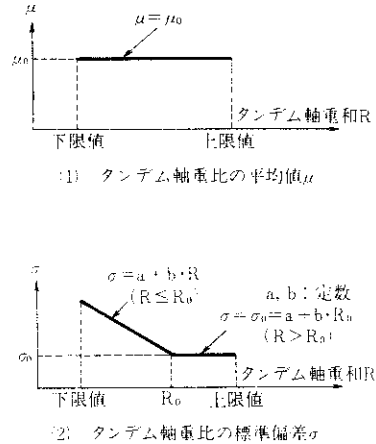


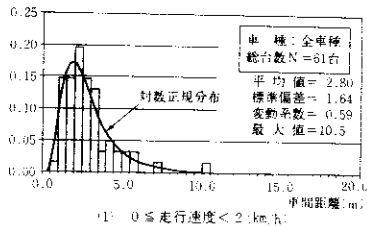
図-7 タンデム軸重和と比の相関のモデル化の概念図

1-3 交通流に関するモデル化

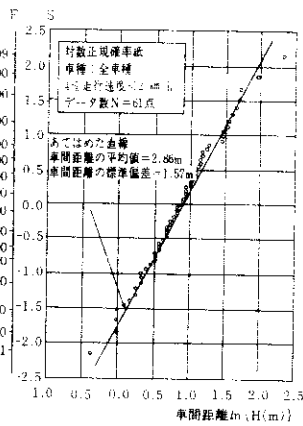
現行のL荷重をシミュレートするためには、前述の車両諸元をモデル化するばかりでなく、橋梁上の車両位置をモデル化する必要がある。ここでは、走行速度帯ごとに車間距離をモデル化することにより、橋梁上の車両位置を確率的に取り扱うことにした。図-8に示すように、確率分布関数として対数正規分布が良く適合している。

さらに、日常の走行速度帯分布をモデル化することにより交通流としてのモデル化は一応完成することとなるが、ここでは、①橋梁に与える影響は渋滞時が大きいと考えられること、②上記日常の走行速度帯分布を考えた場合、L荷重のシミュレーションは莫大な量となることから、渋滞時の走行時間帯のみを想定することとした。なお、渋滞回数・渋滞長さは常時観測データにより、確定量として最大値付近に設定した。これらをまとめて表-3に示す。なお、通常渋滞は朝・夕のラッシュ時に発生する自然渋滞を想定しているため、あ

程度の走行速度は確保されるが、渋滞回数・渋滞長さは大きくなる傾向がある。また突発渋滞は事故などにより突然に発生した渋滞を想定しているため、渋滞回数も少なく、渋滞長さも短かいがほとんど止まったような状態になり、車両間隔も密になる。



(1) 0 ≤ 走行速度 < 2 (km/h)



(2) 0 ≤ 走行速度 < 2 (km/h)

図-8 速度帯別車間距離の頻度分布と確率分布のあてはめの1例(大阪守口線)

表-3 交通流に関するモデル化

車間距離のモデル化		車間距離						
形式	V	形状	大阪線			2線区の統計		
			μ	σ	σ/μ	μ	σ	σ/μ
主桁	2	正規	2.51	1.33	2.56	1.59	2.71	1.49
主桁	4	正規	3.32	1.62	3.92	2.11	3.66	1.92
車体	4	正規	3.27	1.99	4.68	2.36	4.44	2.32
車体	6	正規	2.17	3.42	6.37	3.91	5.80	2.69
(km/h)	10	正規	6.73	2.41	6.88	3.95	8.05	3.93

影響線モデル化		影響線		影響線		影響線		
通過速度	突発渋滞	平均速度 (km/h)	標準偏差 (km/h)	平均車間距離 (m)	最大車間距離 (m)	備考		
30, 50, 70	-	50	10	30	8.25	3.93	20.0	自然渋滞
突発渋滞	-	50	1.0	3	2.71	1.49	10.0	突発渋滞

注: μ: 車間距離の平均値, σ: 車間距離の標準偏差, σ/μ: 変動係数

2. シミュレーションによる活荷重応答解析

2-1 概要

対象構造部材として、床版・縦桁・主桁を選定し、モンテカルロシミュレーションにより、活荷重応答解析を行った。床版・縦桁は輪重モデルをシミュレーションし、T荷重との対比を行った。主桁は荷重列をシミュレーションすることによりL荷重と対比した。対比はそれぞれ設計曲げモーメントに対する最大曲げモーメントの比(最大曲げモーメント比)を用いて行った。

2-2 床版

1で述べたモデルの他、走行位置のモデル(正規分布³⁾および衝撃係数のモデル(正規分布⁴⁾)を用いて行った(図-9,10参照)。シミュレーション回数を減らすため、あらかじめ床版の断面力に特に影響を及ぼす軸種を選定した(30軸種→7軸種)(図-11)。得られた結果を図-12に示す。

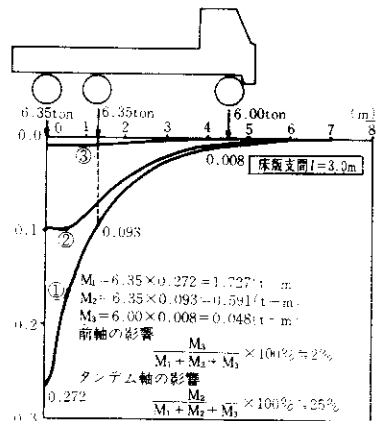
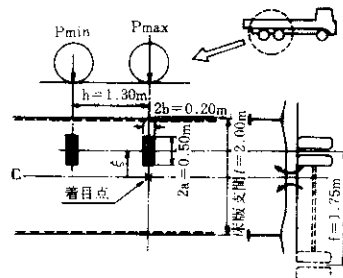


図-9 影響線による床版の応答解析モデル

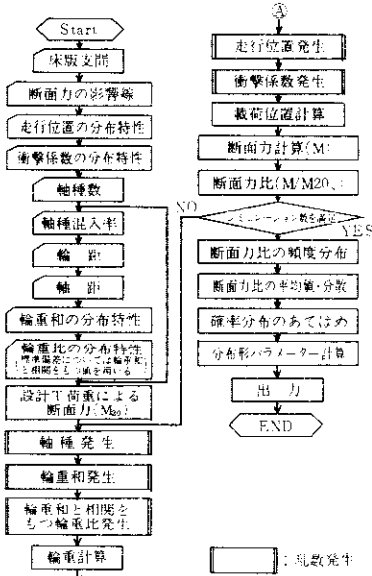


図-10 床版のシミュレーション方法のフロー

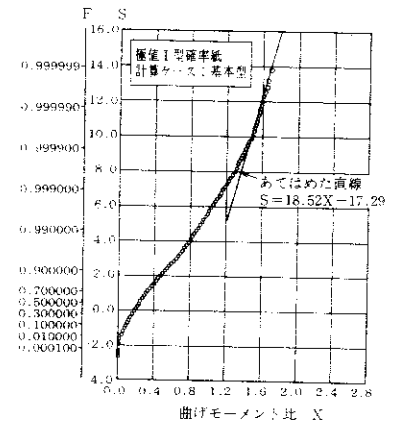
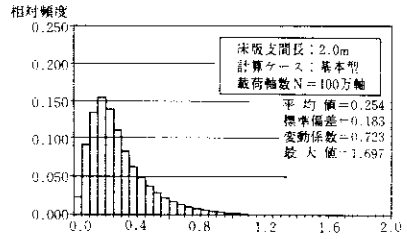


図-12 曲げモーメント比の頻度分布と床版の曲げモーメント比の確率分布のあてはめ

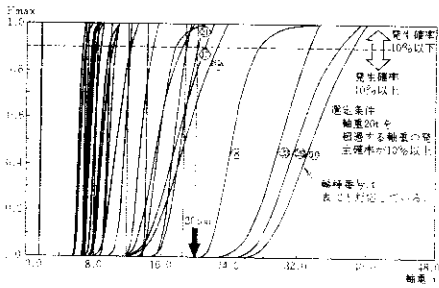


図-11 24時間に発生する最大軸重の確率分布関数(芦屋集約料金所)

表-4 計算ケース(床版)

計算ケース	床版支間	走行位置	軸種出入率	衝撃係数
1 基本型	2 m	正規分布 $\mu=0, \sigma=0.3 m$	芦屋集約	正規分布 $\mu=0.2, \sigma=0.1$
2 支間長の変化	3 m	"	"	"
3 走行位置の変化	2 m	$\mu=0, \sigma=0.1 m$	"	"
4 軸種出入率の変化	"	$\mu=0, \sigma=0.3 m$	尼崎集約	"
5 衝撃係数の変化	"	"	芦屋集約	$\mu=0.4, \sigma=0.1$

図-12を極値I型分布にあてはめることにより、ある期間(T)中に1回発生することが期待される最大断面力比(\bar{X}_{max})を以下の式により求めることができる。

$$F(\bar{X}_{max}) = 1 - \frac{1}{n(T)} \dots\dots\dots(1)$$

ただし、

$$- \ln \ln \frac{1}{F(x)} = S \dots\dots\dots(2)$$

F(x); 非超過確率

n(T); 期間Tの全通行軸数。
S ; 図-12に示す。
したがって、 \bar{X}_{max} は超過確率が1/n(T)となる期待値として求めることができる。
シミュレーションは表-4の5ケースについて行い、それぞれについて各期間ごとの最大断面力比の期待値を算出した(図-13)。最大曲げモーメント比の期待値は、衝撃係数の変化による影響が最も大きく、支間長を大きくした場合小さくなる傾向がある。基本型では、再現期間が5年から50

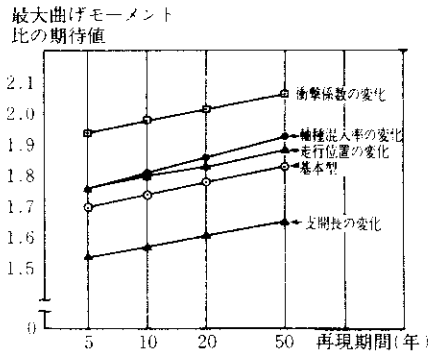


図-13 期間中に発生する床版の最大曲げモーメント比の期待値

年の間で最大断面力比の期待値が約 1.7 から 1.8 程度とあまり変化しない。

2-3 縦桁

縦桁の応答解析モデルを図-14 に示す。シミュレーションには床版同様の輪重モデルを用いた。シミュレーションの流れは床版の場合 (図-10)

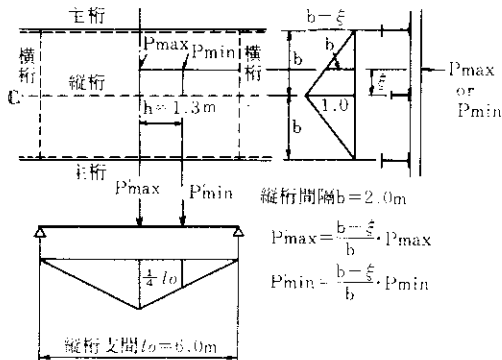


図-14 縦桁の応答解析モデル

と同様である。得られた結果を図-15 に示す。図-15 を極値 I 型分布にあてはめることにより、期間中に 1 回発生する最大断面力比を求めた。計算ケースは、表-4 のうち②支間長の変化を除く 4 ケースとした。結果を図-16 に示す。基本型では、再現期間が 5 年から 50 年の間で最大断面力比の期待値が約 2.5 から 2.7 程度に変化する。また、衝撃係数による影響が最も大きい。

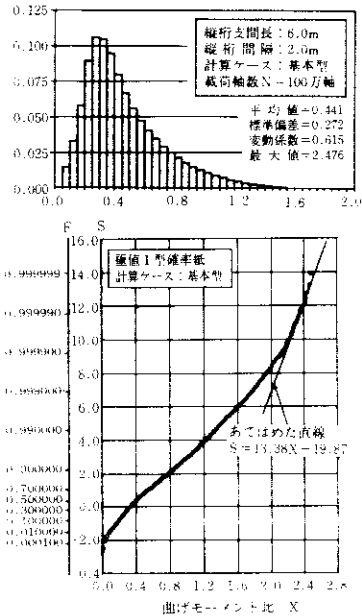


図-15 縦桁の曲げモーメント比の頻度分布と曲げモーメント比の確率分布のあてはめ (基本型)

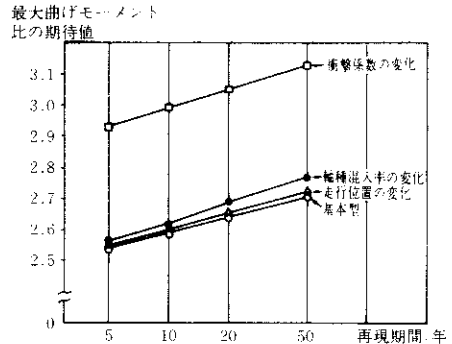


図-16 期間中に発生する縦桁の最大曲げモーメント比の期待値

2-4 主桁

主桁のシミュレーションでは渋滞時の荷重列を作成し、この荷重列による着目点の最大曲げモーメントを算出した。模式図を図-17, 18 に示す。また車重は車両の中央に集中して載荷した場合 (集中荷重) と車長に均等に載荷した場合 (等分布荷重) のそれぞれにモデル化して載荷した。これは車重と軸重の明確な相関が得られなかったことによる。主桁の計算フローを図-19 に示す。なお、

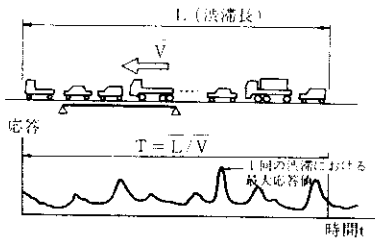


図-17 荷重列の移動と応答の時間変化(模式図)

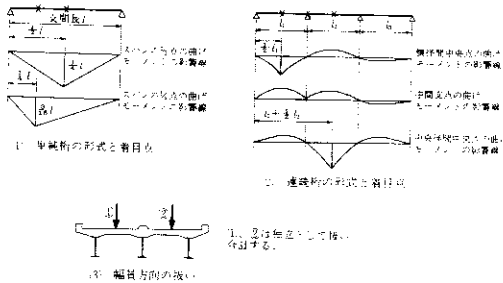


図-18 主桁の応答解析モデル

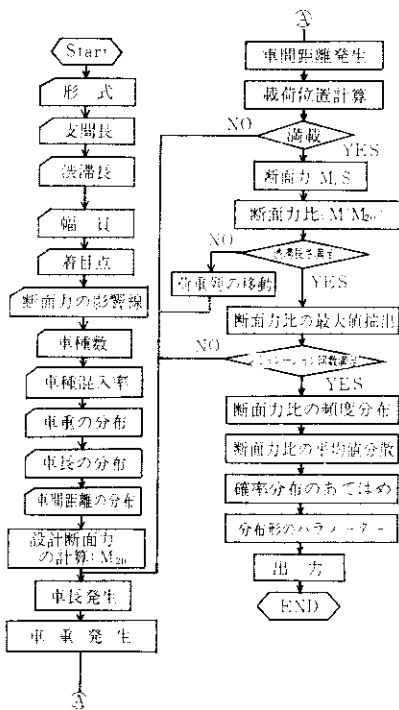


図-19 主桁のシミュレーション方法のフロー

渋滞時を想定しているため衝撃係数は考慮していない。また、連続桁のシミュレーションでは、全橋面上に荷重を載荷した場合(全載荷)と着目点に不利に作用する範囲のみに載荷した場合(部分載荷)のそれぞれについて検討した。桁は、1本の梁と仮定し計算した。

得られた結果の1例を図-20に示す。ここで通常渋滞は常時発生する自然渋滞を想定している。突発渋滞とは事故などで発生する渋滞を想定しており、通常渋滞に比べ安全側に考えて大型車混入率を大きくしてある。1000回のシミュレーションで得られた最大断面力比(最大曲げモーメント比)の最大値の載荷状態は模式的には図-21のようになる。図-21から主桁の最大断面力比は、ほぼ中央の超重量車(トレーラ類)に支配されていることがわかる。

図-22は1000回のシミュレーションを行い1回の渋滞列から得られる最大断面力比を極値I型確率紙に、それぞれプロットしたものである。

極値I型分布を選んだのは、①ある程度適合している。②再現期間の引き延ばしなどの統計処理が容易などの理由による。

確率紙から得られたパラメーターSからN回(T年)の渋滞による最大断面力比の分布 F_{max} はべき乗則に従うとすると式(3)が得られる。

$$F_{max}(x) = \{F(x)\}^N \dots\dots\dots(3)$$

式(3)を式(2)に代入することにより式(4)が得られる。

$$F_{max}(x) = \exp[-\exp(-S + \ln N)] \dots\dots(4)$$

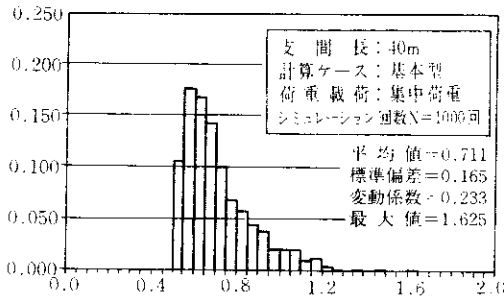
式(4)により渋滞の発生回数N回(T年)の最大断面力比の分布は、1回の渋滞により発生した最大断面力比の分布に比べ $\ln N$ だけ右側にシフトすることがわかる(図-22参照)。

また、式(4)により得られた最大断面力比の分布 F_{max} の平均値 \bar{X}_{max} は式(5)で与えられる。

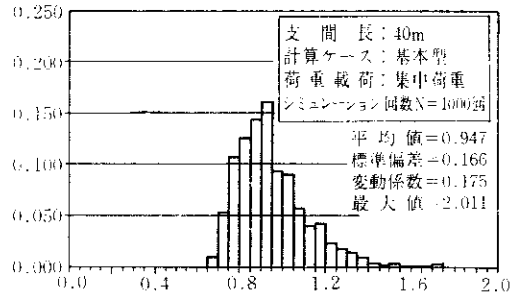
$$\bar{X}_{max} = X_0 + 0.57722/\alpha \dots\dots\dots(5)$$

ここに、
 $S = \alpha (X - X_0)$

得られた \bar{X}_{max} を表-5, 6にまとめた(集中荷重)。これらの結果から以下の点が明らかになった。

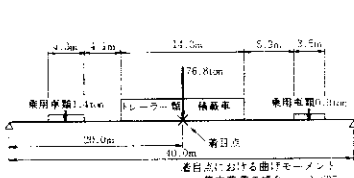


(1) 通常渋滞

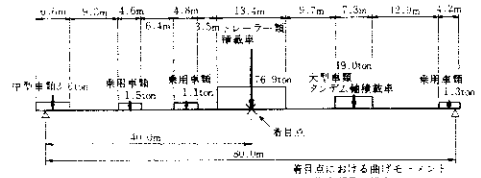


(2) 突発渋滞

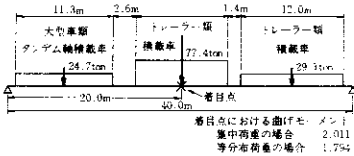
図-20 渋滞における最大曲げモーメント比の頻度分布



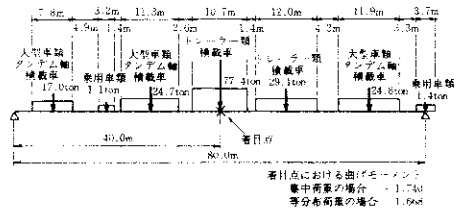
(1) 通常渋滞(支間40m)



(3) 通常渋滞(支間80m)

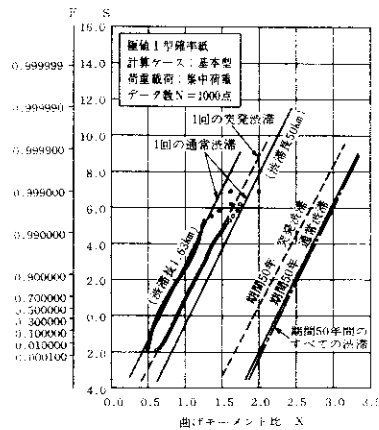


(2) 突発渋滞(支間40m)

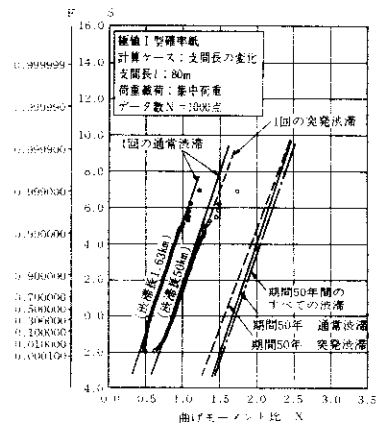


(4) 突発渋滞(支間80m)

図-21 最大断面力時の荷重載荷状態(支間40m、80m)



(1) 基本型(支間長40m)



(2) 支間長の変化(80m)

図-22 単純桁における期間50年間の最大曲げモーメント比の確率分布の推定(集中荷重)

表-5 単純桁の期間50年間における最大曲げモーメント比の期待値(集中荷重)

		通常渋滞			突発渋滞
渋滞回数 N_1		30回/月	50回/月	70回/月	50回/年
期間50年間の渋滞回数		18000	30000	42000	2500
計算ケース	基本型(40m, $\frac{1}{2}$ 点)	2.28	2.34	2.38	2.60
	支間長の変化(60m, $\frac{1}{2}$ 点)	1.93	1.98	2.01	1.74
	支間長の変化(80m, $\frac{1}{2}$ 点)	1.70	1.74	1.77	1.63
	着目点の変化(40m, $\frac{1}{4}$ 点)	2.40	2.47	2.51	2.01
	幅員の変化(40m, 2車線)	1.54	1.57	1.60	1.40

表-6 連続桁の期間50年間における最大曲げモーメント比の期待値(基本型・集中荷重)

		通常渋滞				突発渋滞
渋滞回数 N_1		30回/月	50回/月	70回/月	50回/月	50回/年
期間50年間の渋滞回数		18000	30000	42000	2500	
側径間中央	全載荷	2.27	2.34	2.38	1.87	
	部分載荷	2.30	2.36	2.40	1.97	
中間支点	全載荷	1.55	1.59	1.62	1.41	
	部分載荷	1.56	1.60	1.63	1.51	
中央径間中央	全載荷	2.40	2.46	2.51	1.79	
	部分中央	2.49	2.56	2.60	2.10	

①単純桁の場合、支間40mでは50年間に最大断面力比の期待値が2.3~2.4程度であるが、支間が長くなると低減される傾向がある。これは、1回の渋滞において、最大断面力比は1台の超重量車(トレーラ類)に支配されるためであり、さらに、トレーラ類の発生頻度が少ないため、多少支間が長くなっても、トレーラなどの超重量車が2台・3台と連行する確率が非常に少ないためと思われる。その場合、1台のトレーラは、約77tと、車重モデルの最大値(79t)近くになっている。

②連続桁の場合、全載荷と部分載荷の差は余り顕著にはなっていない。

③いずれの場合においても、通常渋滞が突発渋滞に比べ、期待値は大きくなっている。これは通常渋滞は渋滞回数、渋滞長が突発渋滞より大きくなっており、大型車の発生頻度が大きくな

ったためと思われる。

3. 今後の検討課題

活荷重実態調査から始まり、各確率分布モデルの作成、確率分布モデルによるシミュレーション、および、その結果を用いた最大断面力比の期待値の推定などの成果を得た。

今後さらに、以下の点について検討する必要があると考えられる。

①活/死荷重比が大きい床版においては疲労(荷重繰返し回数など)を考慮した確率分布モデルおよびシミュレーション法を検討する必要がある。

②主桁の最大断面力比は、渋滞により車両間隔が密になったことよりも、トレーラなどの1台の超重量車によって決定されるため、通常走行時において、衝撃を伴った超重量車の場合が最も大きくなる可能性がある。したがって、通常走行時のシミュレーションによる検討とともに、衝撃係数の与え方には十分注意を払う必要がある。

③また、今回のシミュレーションで発生した超重量車(約77t)が現実的かどうかを照査しておく必要がある。(実態調査から実際に観測された最大車重:68t)これは、活荷重(車両・積載物とも)が人為的に作られるため、特に最大値付近のまれにしか発生しない範囲での確率分布モデルの妥当性については検証しておく必要があることによる。

④支間長の違いも最大断面力比の期待値に大きな影響を与えるため、今後はシミュレーション結果に死荷重を考慮した安全性の評価を行う必要がある。

⑤渋滞時の荷重列として、集中荷重・等分布荷重の2ケースを設定したが、さらに正確を期するために軸位置に軸重を配置した荷重モデルを検討する必要がある。

あとがき

本調査研究を遂行するにあたっては、当公団の委託で阪神高速道路管理技術センター内に設けられた「設計荷重委員会（HDL委員会）」（委員長：小西一郎京大名誉教授）および「活荷重分科会」（主査：亀田弘行京大助教授）の各委員の方々に熱心な討議を行っていただいた。ここに深く謝意を表する次第である。本調査研究が橋梁の活荷重に対する信頼性評価を行う上で参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団、設計荷重（HDL）委員会報告書、昭和59年3月
- 2) 江見，中島，石崎；活荷重実態調査報告、阪神高速道路管理技術センター、技報第3号
- 3) 阪神高速道路の通行自動車荷重実態調査報告書、昭和51年8月
- 4) 佐伯，金井，佐藤；橋梁活荷重の実態、土木技術資料、24-10、1982