

活荷重シミュレーション解析による四径間吊橋の設計活荷重に関する検討

A study on Design Live Load of 4-spans Continuous Suspension Bridge based on Live Load Simulation

齊藤 展生*, 村越 潤**, 西川 和廣***

Norio Saitou, Jun Murakoshi, Kazuhiro Nishikawa

* パシフィックコンサルタンツ(株) 総合研究所 研究員 (〒206-8550 東京都多摩市関戸 1-7-5)

(元建設省土木研究所 交流研究員; 1997 年 4 月~9 月)

** 工修 建設省建設経済局 調整課 環境調整室 課長補佐 (〒100-8944 東京都千代田区霞ヶ関 2-1-3)

(元建設省土木研究所 橋梁研究室 主任研究員; ~1998 年 8 月)

*** 工修 建設省土木研究所 橋梁研究室 室長 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭一番地)

In recent years, in Japan, there are several projects of strait crossing roads under consideration and planing. Based on previous studies, the examination is in progress on economic and rational design method for super long-span bridge by various associated organizations. This study focuses on design live load of 4-spans continuous suspension bridge, based on live load simulation. We compared the results with the present design live load of Honsyu-Shikoku Bridge Authority, and then proposed more rational design live load for 4-spans continuous suspension bridge.

Key Words : Live Load, Simulation, 4-spans continuous suspension bridge.

1. はじめに

国土の均衡ある発展を目指し、経済の健全な進展と地域の活性化を図るため、全国各地で海峡部を横断する道路プロジェクトが構想されており、既往の実績を上回る超長大橋の適用可能

性について検討されている。しかしながらこれらのプロジェクトの実現に当たっては、将来の財源確保の問題、あるいは近年のコスト削減の流れから、より経済的かつ合理的な計画が求められている。このような背景のもと、これまで筆者らは工期及び工事費の削減を目指し、メインケーブルの安全率の低減可能性等、超長大橋の設計法に関する各種検討を行ってきた^{1) 2)}。本文は、その検討の一環として四径間吊橋(図-1)を対象として、より合理的な設計活荷重の載荷方法を検討するために、二次元の活荷重載荷シミュレーションを行うことにより断面力等の最大応答値を求め、等価し荷重³⁾との比較を行うことで、設計活荷重の低減可能性について検討したものである。

2. 検討内容

架橋条件にもよるが、一般に四径間吊橋は三径間吊橋を重連するよりも施工性、経済性で有利となることが知られている。特に海上橋梁の場合では、海中基礎の基数を減らすことができ

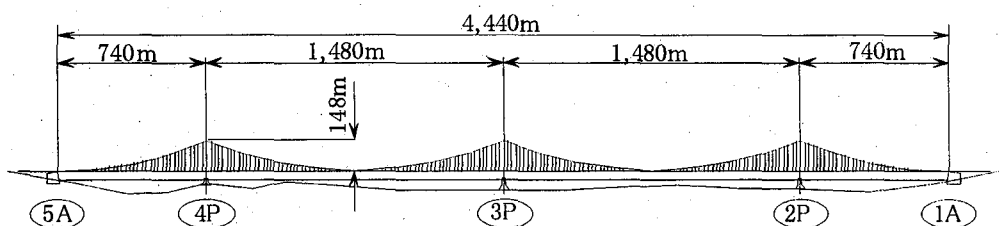


図-1 四径間吊橋の構造モデル

るため四径間吊橋は効果的な構造形式となる。ただし、構造的な観点から言えば、四径間吊橋の中央主塔(図-1 中 3P)は側主塔(図-1 中 2P、4P)や三径間吊橋における主塔とは異なり、橋軸方向の固定度が低い。このため、補剛桁の活荷重たわみに着目した影響線載荷(活荷重偏載)を行うと塔頂が容易に変位し、たわみやすい特性を有している⁴⁾と言える(図-2 参照)。

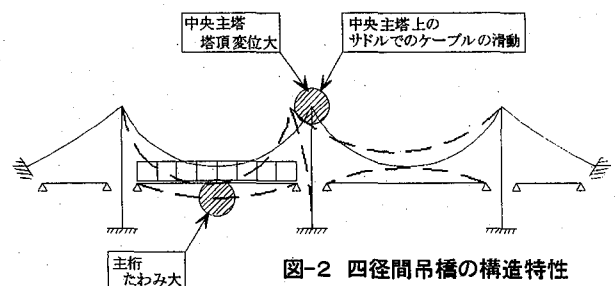


図-2 四径間吊橋の構造特性

一般に四径間吊橋ではこのような活荷重たわみの制限値を満足することが中央主塔の断面設計上のポイントとなり、中央主塔の断面はこれを抑えるための曲げ剛性で決定されるケースも

多い。これに対して、活荷重たわみの制限値を満足するように中央主塔の曲げ剛性を大きくしていくと、今度は塔頂サドル部でのケーブルの滑動に対する安全率の確保が厳しくなる点に留意することが必要となる。

このような技術的課題について文献 5) では、構造的な対処方法として、橋梁の死荷重を意識的に増加させることにより、活荷重偏載の影響を軽減する付加重量型吊橋を提案し、検討がなされている。しかし、設計の基本となるのは外力としての設計活荷重であるにもかかわらず、四径間吊橋の中央主塔に対する設計活荷重の載荷方法についてはほとんど議論がなされていないのが現状である。著者らは四径間吊橋の設計合理性を追求していく上での根本的な課題として、このような設計上のポイントとなる活荷重の載荷方法に着目し、二次元の活荷重載荷シミュレーションを用いての検討を試みた。

活荷重載荷シミュレーションによる設計活荷重の検討としては、これまで関係機関において各種調査研究が行われてきている。文献 6) ～8) では、阪神高速道路など一般高架橋を対象とした比較的短い支間長を有する橋梁を、文献 9) では斜張橋(橋長:1,350m)を含む比較的支間長の長い橋梁を対象として、支間長をパラメータにした実車両荷重列と設計活荷重との関係を明らかにしている。これらの研究成果から現行の設計活荷重強度が必ずしも合理的ではないことが言われている。

一方、四径間吊橋を対象とした検討については、文献 2), 4) 10) があげられる。この内、文献 10) では、最大支間長 1,480 m の四径間吊橋に対して、前述した四径間吊橋の構造的特徴である中央主塔の変位に着目し、影響線形状を参考とした載荷パターンによる活荷重載荷シミュレーションを行い、現行の活荷重の影響線載荷による設計法で想定している載荷状態の見直しを提言している。しかしながら設計活荷重の載荷状態を提案するためには、さらに渋滞ケースや載荷パターンなどに着目した検討を行う必要がある。このような観点から、本文では文献 10) と同様の構造モデルを用いて、影響線形状に近く、かつ現実的に想定しうる載荷パターンを基本とした活荷重載荷シミュレーションによる断面力と、現行設計活荷重による断面力との比較から、現行の設計活荷重の載荷状態に対する妥当性考慮した上で、設計活荷重強度の低減可能性と低減程度について提案するものである。

3. 活荷重載荷シミュレーション

3.1 検討対象モデル、部位及び断面力

本検討では、概略設計を踏まえて図-1 に示す四径間吊橋を解析モデルとして用いた。表-1 にその構造諸元、表-2 に検討対象部位及び断面力を示す。なお、本解析モデル中央主塔の断面設定においては、活荷重たわみの制限値を満足することとケーブル滑動に対する安全率の確保の双方を極力満足するような断面を検討した上で、ケーブルの滑動に関しては摩擦板を有するケーブルサドルを用いることである程度改善できる¹¹⁾ことから最終的に活荷重たわみの制限値を満足する断面に決定した。よって、解析段階での本検討モデルの中央主塔断面はケーブル

表-1 四径間吊橋の構造諸元

対象部位など	設定項目	設定値
幅員構成	車線	3+3車線 (3.5m+3.75m+3.5m) × 2
	有効幅員	13.75m × 2
補剛桁	桁幅	35.5 m
	桁高	6.0 m
ケーブル部	サグ比	1/10
	断面積	0.282 m ² /cable
	ケーブル間隔	33.0 m
	許容応力度	100 kgf/cm ² (Fs=1.8)
中央主塔	塔断面	(8~15) m × 11m
	パネ定数	曲げ; 1,900 tf/Br. 振り; 22,800 tf/m.Br.
側主塔	塔断面	(6~12) m × 6m
死荷重	ケーブル	5.02 tf/m.Br.
	吊り構造部	19.73 tf/m.Br.

表-2 検討対象部位及び断面力

対象部位	対象とする断面力など
主桁 (4P~5A 間、4P から 2/3 点)	曲げモーメント
〃 (3P~4P 間中央部)	たわみ
中央主塔 (塔基部)	曲げモーメント
	せん断力
ケーブル (中央主塔塔頂部)	張力

の滑動に対する安全率 2.0¹²⁾ を満足していない断面となっている。

3.2 活荷重モデル及び車重分布

実交通流を再現するための活荷重モデルとして一般国道 357 号(有明:昭和 59 年調査)での活荷重実態調査結果^{13) 14)}より得られた代表 8 車種の活荷重モデルと車重分布(実測データ)を用いた。図-2, -3 に小型車と大型ダンプについての車重分布を例として示す。なお、シミュレーションでの車重分布は同図に示す実測データをそのままランダム載荷し、表-3 中に示した軸重比を用いて各車両の車両重心位置に一点載荷とすることとした。

3.3 載荷ケース

(1)車両の走行状態

1)渋滞モード

活荷重強度が厳しくなる状態とは、基本的に車間距離が短くなる渋滞時である。したがって本検討における載荷状態は渋滞時を基本としたケースを想定することとした。以下に渋滞の種類と本検討で設定した発生頻度を示す。

- ①観光渋滞: 観光シーズンに発生する乗用車の割合が非常に高いことを特徴とした渋滞 (64 回/年)。
- ②自然渋滞: 朝夕の通勤渋滞やある一定の日時、場所で起こる渋滞 (2 回/日, 10 回/日)。

表-3 シミュレーション載荷活荷重モデル

車両種別	車両重量		車長	活荷重モデル	軸重(比)(tf)			種別	大型車混入率		
	平均値 (最大値)	標準偏差			1軸目	2軸目	3軸目		10%	20%	40%
軽自動車	1.30tf (3.10)	0.36tf	4.4m		0.501W +0.03	0.498W -0.03	—	小型	0.735	0.653	0.490
乗用車	3.60tf (12.60)	1.35tf	4.4m		0.231W +0.76	0.769W -0.76	—	小型	0.165	0.147	0.110
貨客車	6.20tf (18.30)	2.50tf	6.0m		0.182W +1.38	0.818W -1.38	—	大型	0.041	0.081	0.161
小型トラック	17.00tf (45.20)	6.30tf	8.5m		0.109W +3.22	0.891W -3.22	—	大型	0.031	0.063	0.127
トラック(ロング)	20.00tf (61.90)	9.80tf	7.5m		0.081W +3.60	0.919W -3.60	—	大型	0.009	0.018	0.037
中型トラック	16.00tf (33.70)	7.00tf	8.0m		0.107W +3.01	0.893W -3.01	—	大型	0.005	0.011	0.021
大型トラック 1-1	30.00tf (86.70)	12.00tf	14.0m		0.024W +4.19	0.360W -0.70	0.616W -4.89	大型	0.011	0.021	0.042
" 1-2	13.80tf (18.70)	2.40tf	10.5m		0.376W +0.464	0.624W -0.464	—	大型	0.003	0.006	0.012
大型ダンプ								合計	1.000	1.000	1.000

各グループの代表車種を示す。

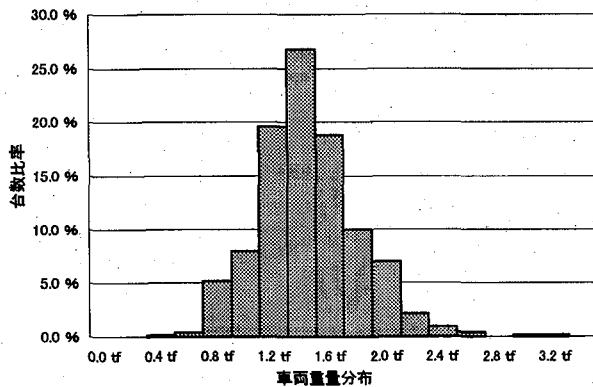


図-2 乗用車 車両重量分布

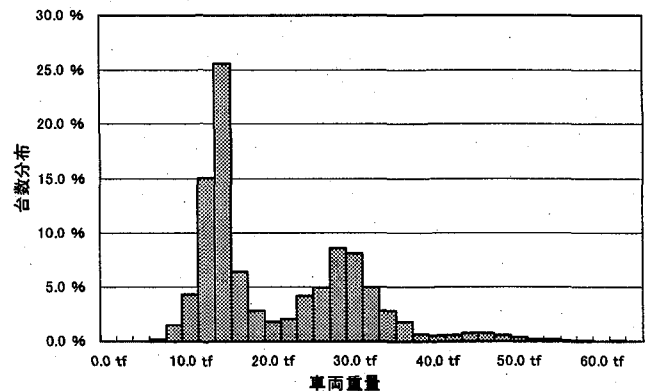


図-3 大型ダンプ 車両重量分布

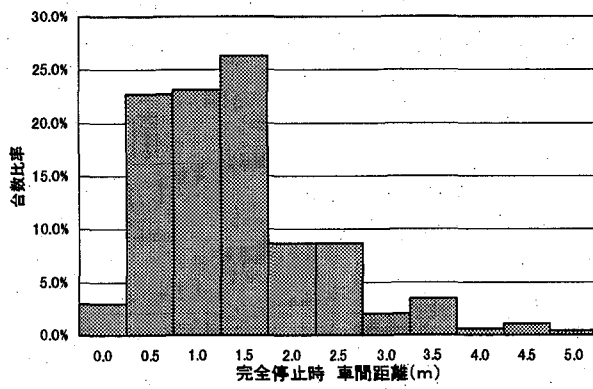


図-4 完全停止時 車間距離分布

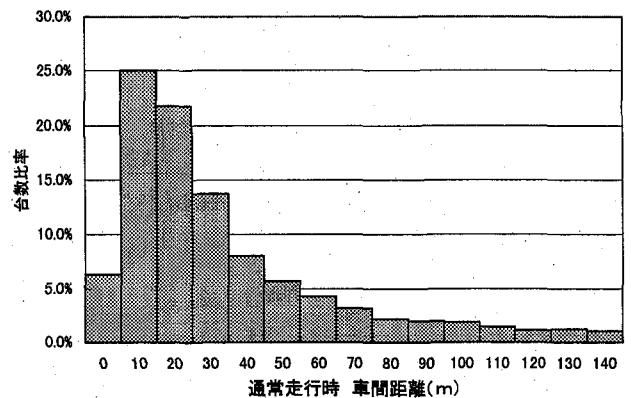


図-5 通常走行時 車間距離分布

③突発渋滞：道路工事、交通事故、故障車などが引き金となって発生する渋滞（2回/月）。

①の観光渋滞とは、年4回の行楽シーズンの、それぞれ4日間、4回/日程度を目安とした渋滞発生頻度、②の自然渋滞は将来対象橋梁が都市内高速道路のような慢性渋滞状態に陥つ

た場合を想定した渋滞発生頻度として、それぞれ設定した。

また、③に示す突発渋滞は発生回数としては少ないが、発生時刻が不定期であることが特徴である。このため仮に突発的な渋滞が夜間に生じた場合には、走行する車両の大型車混入率は比較的高いことが推定される注目すべきケースである。本検

討では、突発渋滞のケースとして事故渋滞を想定した。なお、その発生頻度はおよその目安値であり、極力安全側に設定した。

2) 大型車混入率

大型車混入率は、10%、20%、40%を設定した。各大型車混入率の想定状況は以下の通りである。

10%：観光渋滞など、乗用車の比率が多いとされるケース。

20%：昼間の交通状態における平均的な値¹³⁾で、自然渋滞を想定した大型車混入率。

40%：交通量の多い路線などの最大混入率¹³⁾で夜間の事故渋滞などでの大型車混入率が極めて高いケース。

3) 車間距離

車間距離はそれぞれ以下のデータを用いた。

① 完全停止時（速度：0km/hr）；

一般国道 1 号品川区北馬込 2 丁目交差点（昭和 59 年度調査）での信号停止時の車間距離分布^{13) 14)}

② 通常走行時（速度：45km/hr）；

一般国道 126 号千葉市加曽利、国道 14 号千葉市登戸（昭和 52 年度調査）での車間距離分布^{13) 14)}

図-4、-5 にそれぞれの車間距離分布を示す。

(2) 橋上への荷重方法

車両モデルの橋上（橋軸方向および幅員方向）への荷重方法は無数の荷重ケースが考

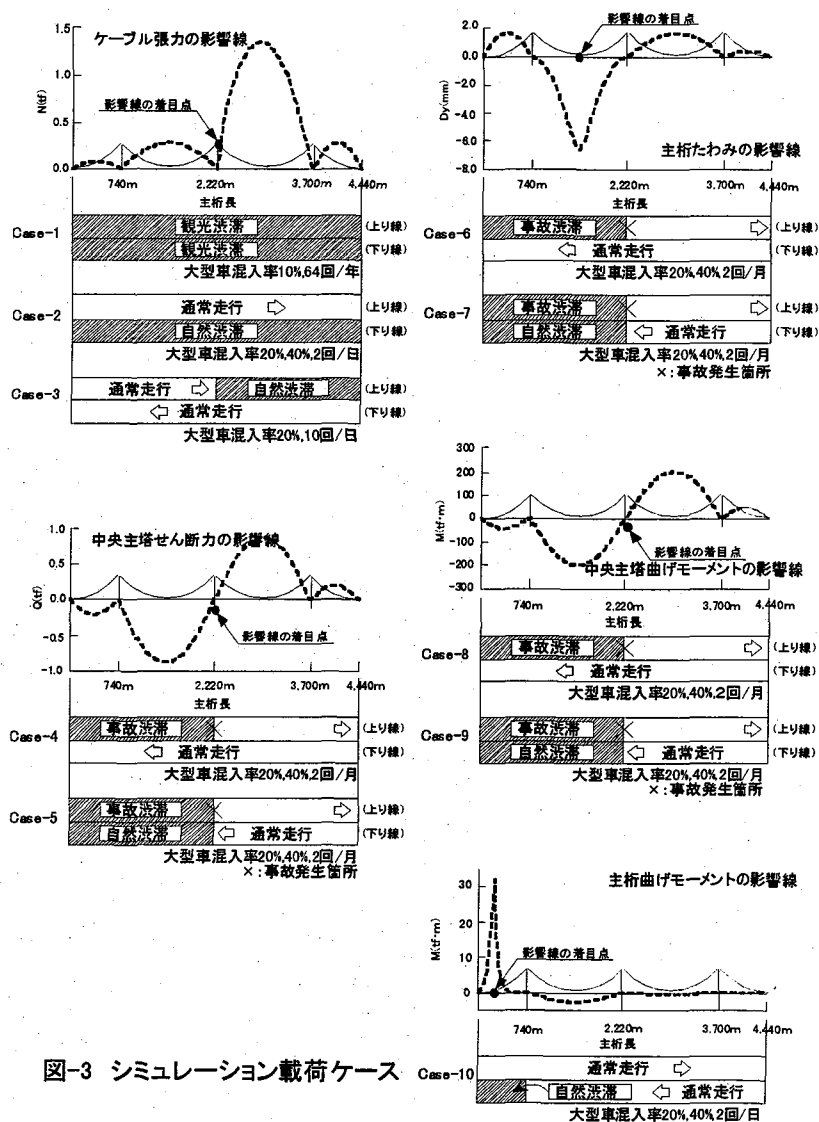


図-3 シミュレーション荷重ケース

表-4 シミュレーションの組合せケース及びその設定条件

	着目する 影響線の種類	荷 重 状 態		渋 滞 モード		渋滞 発生頻度	大型車 混入率	想 定 状 況
		上り線	下り線	上り線	下り線			
Case-1	ケーブル張力	全線 観光渋滞	全線 観光渋滞	完全停止	完全停止	64 回/年	10%	観光シーズンに 発生する渋滞
Case-2		通常走行	全線 自然渋滞	通常走行	完全停止	2 回/日 (朝・夕)	20%・ 40%	通勤渋滞
Case-3		中央まで 自然渋滞	通常走行	完全停止 通常走行	通常走行	10 回/日	20%	慢性的な渋滞
Case-4	中央主塔せん断力	中央から 事故渋滞	通常走行	— 完全停止	通常走行	2 回/月	20%・ 40%	事故渋滞
Case-5		中央から 事故渋滞	中央まで 自然渋滞	完全停止	通常走行	〃	〃	事故渋滞と 自然渋滞の組合せ
Case-6	主桁のたわみ	中央から 事故渋滞	通常走行	完全停止	通常走行	〃	〃	事故渋滞
Case-7		中央から 事故渋滞	中央まで 自然渋滞	完全停止	通常走行	〃	〃	事故渋滞と 自然渋滞の組合せ
Case-8	中央主塔の 曲げモーメント	中央から 事故渋滞	通常走行	完全停止	通常走行	〃	〃	事故渋滞
Case-9		中央から 事故渋滞	中央まで 自然渋滞	完全停止	通常走行	〃	〃	事故渋滞と 自然渋滞の組合せ
Case-10	主桁の 曲げモーメント	通常走行	端径間のみ 自然渋滞	通常走行	完全停止 通常走行	2 回/日 (朝・夕)	〃	自然渋滞

えられる。その中でもより厳しい载荷状態とは、荷重を対象とする断面力の影響線なりに载荷させる状態と考えられる。そこで本検討では、現実には起こりえると考えられ、かつ対象とする断面力の影響線形状に近い载荷状態を想定し、载荷ケースを設定した。図-6 および表-4 に設定した载荷ケースを示す。この中で、通常走行とは日常起こりうる走行時における平均的な载荷状態を想定している。なお、図中の Case-5,-7,-9 の载荷状態は、想定しうる载荷状態ではあるが、意識的に確率的には非常に起こりにくい载荷状態として設定してある。なお、本検討では渋滞長さの最大値を橋長として解析を行った。

3.4 実橋における渋滞の実績

長大橋での交通実態の事例として、表-5 に瀬戸中央自動車道（以下、瀬戸大橋と言う。）および関門自動車道（以下、関門橋と言う。）における自然渋滞、及び事故渋滞の発生実態（平成8年度実績）を示す。

表-5 現在供用中の橋梁での渋滞実績

	年間自然 渋滞回数	年間事故 渋滞回数*1	大型車 混入率
瀬戸大橋	0 回	10 回	20.2%
関門橋*2	3 回*3	1 回*3	35.2%

*1)事故渋滞回数は事故発生回数

*2)下関 IC～門司 IC 区間のデータ

*3)平成8年（1月～12月）実績

表-5 から、実際に長大橋梁の上で発生する渋滞回数は本検討の設定値に比べて少ないことがわかる。また、表-5 に示した各渋滞はいずれも一方向渋滞であり、上下線が同時に渋滞することは無かった。これらの調査結果から今回の Case-1,-5,-7,-9 で想定した6車線渋滞の载荷ケースは現実的には相当過大な载荷状態であると言える。しかしながら、本検討の設定値の一つである大型車混入率40%という数値は表-5 からすれば十分起こりうる状態と考えられ、必ずしも過大でないことがわかる。

3.5 シミュレーションの概要

本検討では文献 15)を参考とした二次元の活荷重シミュレーション解析を実施した。活荷重载荷シミュレーションの流れを図-7 に示す。

多車線シミュレーションは1車線のシミュレーション結果を用いて畳み込み積分を行う方法¹⁾も考えられるが、今回のケースでは载荷長が大きく検討ケースが多岐にわたるため、直接設定した車線分のシミュレーションを行った。シミュレーション回数は、1回の渋滞における断面力と構造物の供用期間における断面力との間にべき乗則が成り立つ（各渋滞が独立して発生する）とすると(1)式で表される。

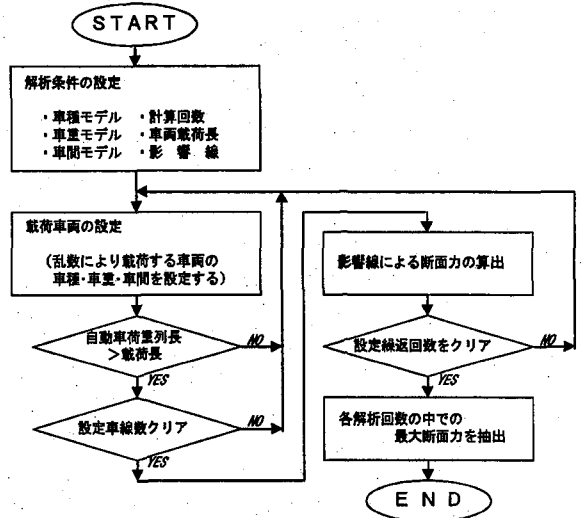


図-7 シミュレーションの流れ

$$F_{\max}(x) = [F(x)]^N \quad (1)$$

ここで、

$F_{\max}(x)$; N 回の渋滞に対して、断面力が x を超えない確率

$F(x)$; 1 回の渋滞に対して、断面力が一定値 x を超えない確率

N ; ある供用期間における渋滞回数

ここで、供用年数を 200 年、ある供用期間の渋滞における断面力分布の非超過確率 $F_{\max}(x)$ を 0.9 とすると、最大値を求めるのに必要最小限のシミュレーション回数 m は、(2)式で表される。

$$m = \frac{1}{1 - 0.9^{(\sqrt[200]{\frac{1}{n}})}} \quad (2)$$

ここで、

n ; 1 年間に起こる渋滞回数

解析精度にもよるが、本来は(2)式で求められた必要最小限の回数以上の解析回数をこなす必要があるが、本検討では(2)式で求められた必要最低限の回数での解析を行い、解析結果を回帰曲線を用いて近似式に置き換え、最大値の解析誤差を極力抑えることとし、シミュレーション回数は基本的に必要最小限の回数で行うものとした。図-8 に解析結果と回帰曲線を極値 I 型確率紙にプロットした例 (Case-8) を示す。本図から回帰曲線により求められる値の信頼性は十分なものと考えられる。

また、通常走行の载荷部分については日常起こりうる载荷状態を想定した。この場合のシミュレーション回数は(2)式によらず平均値の変動が少ない事を確認した上で、10,000 回のシミュレーション結果の平均値を用いて荷重強度を求めた。

表-6 シミュレーションと等価L荷重による断面力計算結果

対象断面力	ケース名	シミュレーション回数	大型車混入率	シミュレーションによる断面力				等価L荷重による断面力
				渋滞部	通常走行部(1)	通常走行部(2)	合計	
ケーブル張力 (tf/Bridge)	Case-1	12 万回	10%	5,530			5,530	6,835
	Case-2	140 万回	20%	3,845	446		4,291	
			40%	5,427	690		6,117	
	Case-3	700 万回	20%	3,327	73	690	4,090	
中央主塔せん断力 (tf/Bridge)	Case-4	4.6 万回	20%	2,205	-1		2,204	3,912
			40%	3,020	0		3,020	
	Case-5	4.6 万回	20%	4,146	-254		3,892	
			40%	5,685	-392		5,293	
主桁たわみ (mm/Bridge)	Case-6	4.6 万回	20%	7,474	31		7,775	15,023
			40%	9,931	466		10,397	
	Case-7	4.6 万回	20%	13,446	-450		12,996	
			40%	18,528	-694		17,834	
中央主塔曲げモーメント (tf・m/Bridge)	Case-8	4.6 万回	20%	473,156	-221		472,935	831,274
			40%	642,137	-107		642,030	
	Case-9	4.6 万回	20%	889,228	-54,575		834,653	17,811
			40%	1,219,539	-84,057		1,135,482	
主桁曲げモーメント (tf・m/Bridge)	Case-10	140 万回	20%	13,091	142	-789	12,444	
			40%	15,115	210	-1,216	14,109	

注) Case-3, -10 通常走行部(1)は上り車線、通常走行部(2)は下り車線を示す。

表-7 シミュレーション解析結果総括表

	渋滞列 載荷長	シミュレ ーション 回数	大型車購入率別活荷重比					大型車混 入率の違いによる 比率	備 考
			10%	20%		40%			
			上下車線 両方載荷	片側車線 のみ載荷	上下車線 両方載荷	片側車線 のみ載荷	上下車線 両方載荷		
Case-1	4,400m×2	12 万回	0.81	—	—	—	—	—	
Case-2	4,440m	140 万回	—	0.63	—	0.89	—	1.41	
Case-3	2,220m	700 万回	—	0.60	—	—	—	—	
Case-4	2,220m	46 千回	—	0.56	—	0.77	—	1.38	
Case-5	2,200m×2	46 千回	—	—	0.99	—	1.35	1.36	
Case-6	2,220m	46 千回	—	0.52	—	0.69	—	1.33	マイナス領域 にも載荷
Case-7	2,200m×2	46 千回	—	—	0.87	—	1.19	1.37	
Case-8	2,220m	46 千回	—	0.57	—	0.77	—	1.35	
Case-9	2,200m×2	46 千回	—	—	1.00	—	1.37	1.37	
Case-10	740m	140 万回	—	0.70	—	0.79	—	1.13	載荷長が短い

4. シミュレーション結果と考察

4.1 シミュレーション結果

(1)断面力および主桁たわみの最大値

表-6 に解析結果と、比較のために一般に長大橋の設計に用いられる等価L荷重³⁾を影響線載荷した場合の断面力（以下、等価L荷重による断面力という。）を示す。また、表-7 にシミュレーションによる断面力、またはたわみの最大値（回帰曲線から算出）を等

価L荷重による断面力、またはたわみで除した値（以下、活荷重比という。）を示す。主な結果を渋滞車線数と大型車混入率に着目して以下にまとめる。

- ・ 3 車線渋滞の場合の活荷重比は、大型車混入率が 20%では 0.52～0.70、また 40%では 0.69～0.89 であった。
- ・ 6 車線渋滞の場合の活荷重比は、大型車混入率が 20%では 0.87～1.0、また 40%では 1.19～1.37、すなわち等価L荷重よりも厳しい載荷状態であった。

- ・ 6 車線渋滞と 3 車線渋滞の場合の活荷重比の比率 (Case-4,5、Case-6,7、Case-8,9)は 1.67～1.78 であった。

- ・ 大型車混入率が 20%から 40%に増加すると、活荷重比は Case-10 を除き、約 1.4 倍となった。

以上結果から、活荷重比に大きな影響を与える要因としては、

- ① 載荷する荷重モデルの大型車混入率
- ② 渋滞を想定する車線数

であることがわかる。ここで、シミュレーションの結果を見ると Case-6、7、及び Case-10 の活荷重比については、他ケースと若干異なる傾向を示している。この内、Case-6、7 の場合は、渋滞の想定上、影響線のマイナス領域も載荷対象としたため、他ケースより若干小さい活荷重比となっていると考えられる。また、Case-10 の場合は、荷重載荷長が短く、かつ影響線の形状が鋭角に変化するため、他ケースより若干大きい値となっていると考えられる。

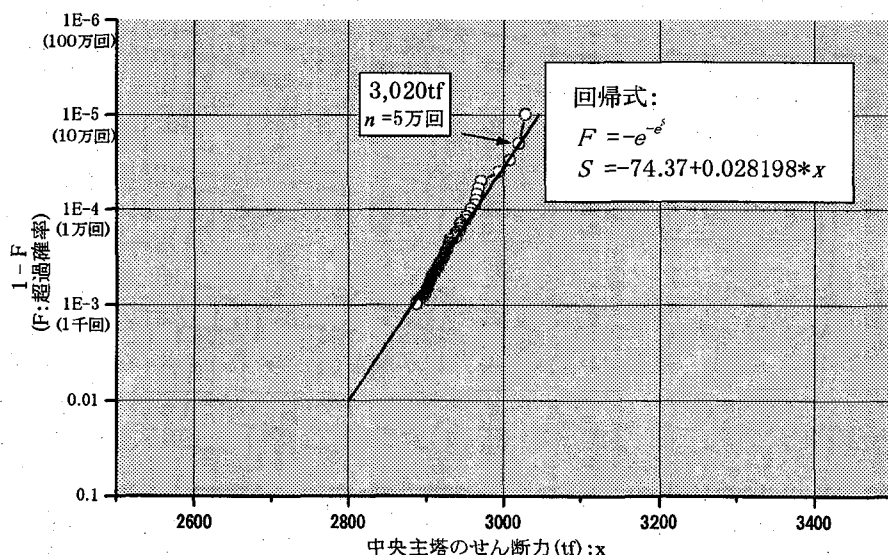


図-8 10万回シミュレーションにおける断面力分布(Case-4)

図-8 に Case-4 について、シミュレーションで得られた上位 100 位による断面力分布を極値 I 型確率紙にプロットしたものを示す。図中の直線はシミュレーション結果に対する回帰曲線である。縦軸値 10^{-5} (シミュレーション回数; 10 万回) は 1 回/週の渋滞発生頻度に、また 10^{-4} (同 1 万回) は 5 回/年、 10^{-3} (同 1 千回) は 1 回/2 年にそれぞれ相当する。3.3 節で延べた各渋滞モードの発生頻度は確定的に設定したものであるが、図-8 よりシミュレーション回数 1 千回、1 万回、10 万回での

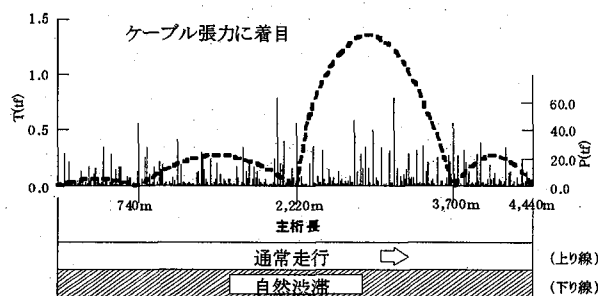


図-9.1 Case-2: 大型車混入率20%,140万回解析

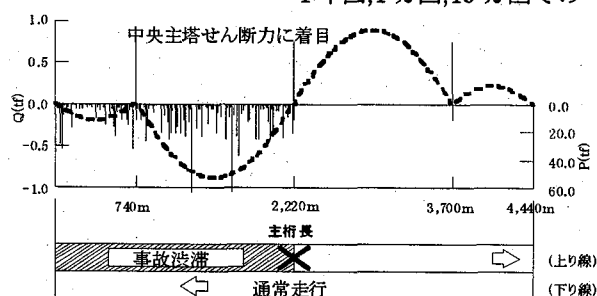


図-9.2 Case-4: 大型車混入率20%,10万回解析

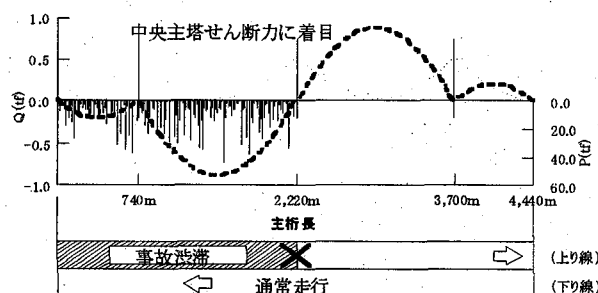


図-9.3 Case-4: 大型車混入率40%,10万回解析

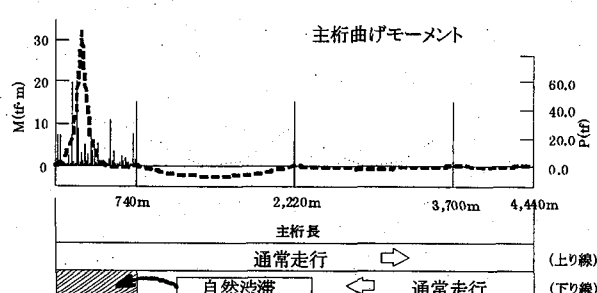


図-9.4 Case-10: 大型車混入率20%,140万回解析

図-9 シミュレーションによる荷重列載荷状況

断面力の差はそれぞれ約 3%程度と小さく、これらの設定回数（シミュレーション回数）を多少増減させても結果に与える影響はほとんどないことがわかる。また、図-9 に Case-2,4,10 について大型車混入率 20%、及び Case-4 の大型車混入率 40%のケースのシミュレーションから得られた 1 車線分の載荷状態を示す。図-9 中の棒線の高さは、車両 1 台の車両重量強度を示す。図-9 より、各ケースともに断面力の最大値発生時の荷重列においても、影響線形状に合わせて車両重量の重い車両が載荷されている傾向はそれほど顕著に見られない。

(2)中央主塔のサドル部におけるケーブルの滑動

2 章で述べた通り四径間吊橋では、中央主塔におけるサドル上のケーブルの滑動が懸念される。ここでは中央主塔上でのケーブルの滑動に対して不利となる、偏載の影響がもっとも大きい影響線載荷ケースとして、Case-8（3 車線渋滞、大型車混入率；40%）を対象に 1 本当たりのケーブルの滑動に対する安全率を計算し、等価 L 荷重を載荷した場合の安全率と比較を行った。なお、本検討は二次元の解析であるため、橋軸直角方向の偏載は考慮されていない。

ケーブルの滑動に対する安全率は(3)式によることとした¹²⁾。

$$v = \frac{\mu \times \alpha}{\ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right)} \tag{3}$$

- ここで、
- v；ケーブルの滑動に対する安全率
- μ；滑りに対して安全な摩擦係数(=0.15)
- α；円周角
- T₁, T₂；塔頂を挟んだケーブル張力

計算結果によれば、Case-8 の載荷時のケーブルの安全率は、設計時の 1.30 から 1.69 まで改善された。両者の改善に対する比率は、0.77 (=1.30/1.69)である。このことからケーブルの滑動に対しても

4.1(1)で示した断面力の低減効果と同程度の比率で、安全率の改善が見られることが示された。

なお、ケーブルの滑りに対する許容安全率としては一般に 2.0 が用いられている¹²⁾が、今回試算に用いた構造モデルでは 3.1 節で示した理由により、これによらず小さめに設定している。

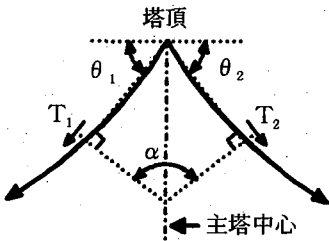


図-7 ケーブルの滑りの算定

表-8 断面力の平均値による活荷重比

載荷ケース	載荷車線数	大型車混入率	活荷重比	
			平均値による	最大値による
Case-5	6 車線	20%	0.84	0.99
		40%	1.19	1.35
Case-7	6 車線	20%	0.67	0.87
		40%	0.95	1.19
Case-9	6 車線	20%	0.85	1.00
		40%	1.20	1.37

(3)断面力の平均値による活荷重比

断面力の最大値から求めた活荷重比が 1.0 を超過したケース（Case-5,7,9）はいずれも設定条件として非常に厳しい載荷条件である 6 車線渋滞の場合である。そこで、これらのケースについては断面力の平均値を計算し、等価 L 荷重による断面力との比較を試みた。なおシミュレーション回数は通常走行の検討と同じく 10,000 回とした。表-8 に計算結果を示す。

断面力の平均値の場合においても、Case-5,9,(6 車線渋滞、大型車混入率；40%) では活荷重比が 1.0 を超過する結果となった。このことから、仮に影響線形状に近い形で 6 車線渋滞した場合には、概ね等価 L 荷重の断面力に近い載荷状態になる可能性が高いと考えられる。

(4)大型車の連行載荷を想定した場合の断面力

上述のシミュレーションでは車両をランダムに橋上に載荷しているが、実交通流では大型車が連行して走行するような場合も日常観察されるところである。ここでは 3 台のダンプトラックが連行した場合の活荷重比について検討を行った。

載荷方法としては、各影響線のピーク部にダンプトラック 3 台/車線を意識的に連行載荷し、残りの載荷部分にはこれまでのシミュレーション解析で得られた車両重量列を載荷させた。ここで、ダンプトラック 1 台当たりの車両重量は過積載を想定した重量、61.9tf^{13) 14)}とした。本検討結果の内、活荷重比が 1.0

表-9 大型車の連行載荷時の活荷重比

載荷ケース	載荷車線数	大型車混入率	活荷重比	
			最大値+大型車連行	最大値
Case-1	6 車線	10%	1.03	0.81
Case-5	6 車線	20%	1.25	0.99
		40%	1.60	1.35
Case-7	6 車線	20%	1.35	0.87
		40%	1.68	1.19
Case-9	6 車線	20%	1.27	1.00
		40%	1.63	1.37
Case-10	3 車線	20%	1.62	0.70
		40%	1.71	0.79

を超過したケースについてのみ表-9に示す。

表-9に示したとおり、大型車の連行載荷を考慮した場合、活荷重比が1.0を超過するケースは6車線載荷時と鋭角に変化する影響線形状を有するCase-10に限られている。また、このように非現実的な想定ケースであっても、鋼材強度に対する安全率1.7に対して、Case-10が同等程度である以外は下回っていることがわかる。

4.2 設計活荷重についての考察

以上のシミュレーション結果を踏まえて活荷重の載荷状態と載荷荷重モデルについて考察し、設計活荷重強度の低減可能性について述べる。

(1) 活荷重の載荷状態について

活荷重比が1.0を超過する、すなわち等価L荷重による断面力より大きな断面力が発生するケースはCase-5,-7,-9の6車線に渋滞が生じる場合（大型車混入率：40%）に見られた。また、同ケースでは断面力の平均値においても等価L荷重による断面力を上回ることが確認されている（表-8参照）。これらのケースは全て現行の影響線載荷に近い状態を想定したものであるが、本検討で対象としたような長大橋において、着目する部材に不利となる範囲のみ6車線全てが渋滞するという事は3.4節で触れた実橋での渋滞実態の実績から言っても極めてまれな状態と考えられる。

(2) 載荷荷重モデルについて

本検討で用いた車両モデルは、一般国道357号で得られた車両重量分布を用いており（表-3参照）、大型車の車両重量分布は比較的過大と判断される車両重量諸元を与えている。今回の検討対象とした長大橋の様な場合では、ある程度通行車両の台数、または車両重量をコントロール出来るとすれば、車両重量分布モデルは本検討で用いた車両モデルよりも厳しくないものを用いた方が現実的な値を与えるものと考えられる。さらに、等価L荷重の主載荷荷重が橋軸直角方向幅5.5mの載荷に限定されるのに対し、シミュレーションでは各車線に荷重列を載荷するため車線数が多くなるほど（5.5m相当幅を超える程）荷重強度としては大きくなる。この点も活荷重比を大きく見積もるひとつの要因となっている。

(3) まとめ

以上のことから、今回のシミュレーション結果は、むしろ現実的にかなり厳しい載荷状態を想定してもこの程度の活荷重比となると評価すべきと考えられる。そして次なるステップとして「現実的な載荷状態」とは何かということが論点となるが、これに対する定量的な評価を行うことは現段階でも困難である。強いて言うとなれば、活荷重の載荷状態に関しては、少なくとも本検討の中で極めてまれな状態とされる6車線渋滞時のケースでは、起こりうるとしても現行の許容

応力度設計法での異常時として扱う（すなわち許容応力度の割増しを考慮できる）くらいが適当ではないかと考えられる。一方、設計活荷重強度に関して言えば、3車線渋滞で大型車混入率40%程度の条件を仮に現実的な載荷状態と評価するならば活荷重比は約0.8～0.9であり、現行の等価L荷重に対し安全側に見ても約10%程度は活荷重強度を低減できる可能性があると言える。今回のシミュレーションの条件設定を踏まえると、この10%の低減可能性も控えめな評価のようにも感じられるが、さらなる低減を図るためにはより現実に見合った載荷条件による検討が必要と考えられる。

5. おわりに

活荷重載荷シミュレーションにより、四径間連続吊橋における設計活荷重について検討を行った。その結果、現行の等価L荷重に影響線載荷する方法が、実交通流の載荷状態と比較して現実的に過大と判断される載荷状態を想定していることを数値的に示すことができた。今回の検討は、四径間吊橋の一例を対象とした試算結果に基づくものであり、長大橋の適切な設計活荷重を提案していくためには、今後、橋梁上への活荷重の載荷方法についてのより詳細な検討や、支間長、走行モードなどに対するパラメトリックスタディ等が必要と考えられる。

謝 辞

本検討におけるシミュレーション解析モデルの設定にあたり、本州四国連絡橋公団企画課の大橋治一課長代理（前設計第二課課長代理）にご助言を頂いた。またシミュレーション解析においては榊建設技術研究所の入江達雄氏にご協力頂いた。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1)建設省土木研究所：海峡横断道路プロジェクト技術調査委員会報告書，土木研究所資料第3479号、平成8年3月。
- 2)岡田 淳，西川和廣，村越 潤：四径間吊橋の活荷重載荷方法の検討，土木学会，第51回年次学術講演会講演概要集，I-A308，pp616-617、平成8年9月。
- 3)本州四国連絡橋公団：上部構造設計基準・同解説，1989年4月。
- 4)岩瀬勝司，駒田敬一，守矢健生，平山 博：4径間吊橋の構造特性に関する一検討，土木学会，第51回年次学術講演会概要集，I-A307，pp614-615、平成8年9月。
- 5)吉田 修：二径間吊橋の構造検討，本四技報

Vol.14No.56、1990 年 10 月.

- 6) 阪神高速道路公団, (財)阪神高速道路管理技術センター: 設計荷重 (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、昭和 61 年 12 月.
- 7) 久保雅邦, 中島裕之, 亀田弘行: 道路橋活荷重の実態調査とその確立モデルによる検討, 橋梁と基礎、1986 年 1 月.
- 8) 北田俊行, 堂垣正博, 岩崎 茂, 池田秀夫, 武田芳久: 鋼箱桁の終局限界状態および使用限界状態に対する実安全率について, 土木学会, 構造工学論文集 Vol.38A、1992 年 3 月.
- 9) 北田俊行, 中井 博, 野口二郎, 岩廣真悟: 実働活荷重にもとづいた連続桁橋、および斜張橋の設計用活荷重モデルについて, 土木学会, 構造工学論文集 Vol.44A, pp71-80、1998 年 3 月.
- 10) 大橋治一, 村瀬佐太美: 4 径間吊橋中央塔の挙動に着目した活荷重の載荷方法について, 土木学会, 第 52 回年次学術講演会講演概要集, I -A278, pp554-555、平成 9 年 9 月.
- 11) 例えば、長谷川和夫, 小島 宏, 佐々木道夫, 竹名興英: 吊橋サドルの摩擦抵抗向上対策としての水平摩擦板の効果, 土木学会論文集, 第 404 号 / I-11、1989 年 4 月.
- 12) 平井 敦他: 鋼橋 (Ⅲ), 土木学会監修, 1967.9.
- 13) 藤原 稔, 岩崎泰彦, 田中良樹: 限界状態設計法における設計活荷重に関する検討, 土木研究所資料第 2539 号, 橋梁研究室、昭和 63 年 1 月.
- 14) 藤原 稔, 岩崎泰彦, 田中良樹: 限界状態設計法における設計活荷重に関する検討Ⅱ, 土木研究所資料第 2700 号, 橋梁研究室、平成元年 1 月.
- 15) 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, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.32A, pp551-559、1986 年 3 月.

(1999 年 1 月 21 日受付)