

論文・報告

暴風時質量付加型吊橋に関する研究

The Effect of Temporary Additional Mass Method Against Violent Storm on the Aerodynamic Stability of the Ultra Long Span Suspension Bridge

川 田 忠 樹*
Tadaki KAWADA

野 村 國 勝**
Kunikatsu NOMURA

中 崎 俊 三***
Shunzo NAKAZAKI

江 崎 正 浩****
Masahiro EZAKI

Taking notice of mass adding type suspension bridge against storm, capable of adding mass temporarily only in case of storm in order to improve the wind damage resistant property of super-long suspension bridge economically, the effect of mass adding in three suspension bridges with center span of 2,000m, 2,500m and 3,000m in length respectively was studied. As a result of study, it was found that the bridge with shorter length of center effective span is more effectual, and, even in the suspension bridge with center effective span of 3,000m in length, total dead load can be reduced by about 20% by adding mass, compared with the case without mass adding, considering extra coefficient of allowable stress of cable, 1.3.

Key words : super-long suspension bridge, mass adding, wind damage resistant property

1. まえがき

近年における吊橋の中央支間長の長大化には目覚ましいものがあり、なかでも現在建設中の明石海峡大橋は、完成すれば中央支間長2 000 m級の吊橋として世界最大規模のものとなる。一方で、この明石海峡大橋を上回る規模の超長大吊橋が、国内外で計画されつつあり、将来3 000 m級の吊橋の建設が実現する可能性もある。しかしながら、2 000 mを超える超長大吊橋においては、支間長が増大するにつれて風の影響が顕著になるため、いかに経済的に吊橋の剛性を高めて耐風性能を向上させるかが、最も重要な検討課題となる。

吊橋の剛性を高めて耐風性能の向上を図るには、トラス桁の横構断面や箱桁の板厚を大きくして、補剛桁の面外剛性やねじり剛性を高める方法があるが、極慣性モーメントも同様に上昇することになるため、結果的に大幅な鋼重増加を招くことになる。

これに対して、吊橋の補剛桁に安価な質量を付加し、その自重を増加させることは、吊橋の安定性を向上させる効果がある¹⁾。しかしながら、完成時にすでに質量を付加した場合、暴風時における補剛桁の経済設計が可能になっても、主ケーブルや主塔に対しては、付加される質量の分だけ負担が大きくなるので、大幅な経済的効果を

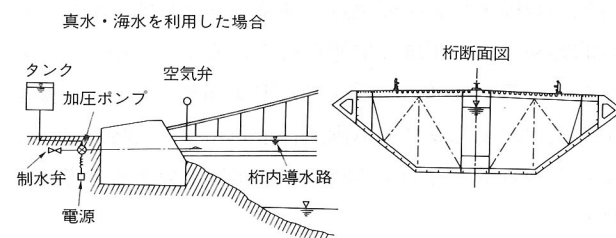


図-1 概念図

得ることは困難である。

本報告は、質量を完成系には残さず、暴風時にのみ一時的に付加する暴風時質量付加型吊橋を考え、付加荷重として少なくとも活荷重分、大きくは暴風時における吊橋の主ケーブルに許容応力度の割り増しを考慮することで、吊橋の耐風性能を経済的に向上させるべく、その効果について検討したものである。

なお、本検討における暴風時にのみ一時的に付加する荷重やその荷重の移送方法については、図-1の概念図に示すとおりであり、

- ① 真水や海水をアンカー付近に設置したタンクに貯留しておき、タンク内の水を桁内へ送り込む
- ② 海から海水を直接ポンプアップして、所定の導水路に送り込む

*川田工業㈱代表取締役社長 **川田工業㈱取締役技術本部長 ***川田工業㈱技術本部長大橋部部長

****川田工業㈱技術本部長大橋部技術開発課

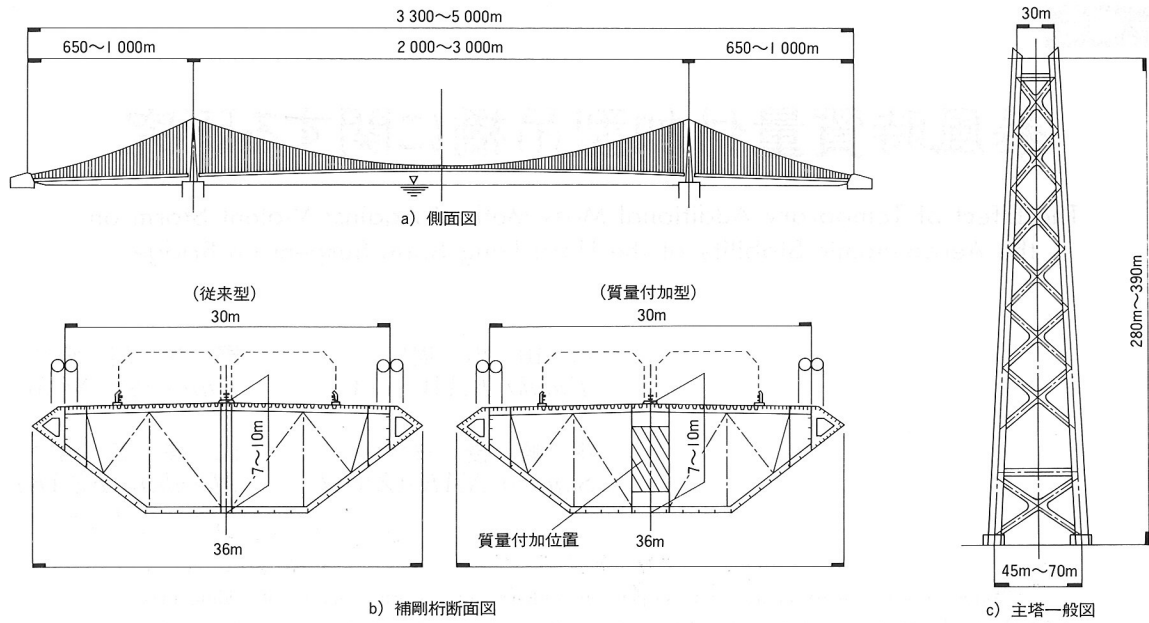


図-2 検討対象モデル一般図

③ 土砂などを積み込んだ車両をアンカー付近に待機させておき、所定の位置まで走行させるなどの方法を想定している。

近年における気象条件の予測に関する技術の進歩には目覚ましいものがあり、特に台風の発生に関する情報、台風の規模・最大瞬間風速・進路・到達時間などは、比較的容易にかつ正確な情報が得られるようになっている。したがって、2000mを超える超長大吊橋において、暴風雨の接近が予想されて車両通行止めとなった時点で、なんらかの質量を付加する時間的余裕は十分あると考えられる。

2. 検討条件

対象とした超長大吊橋は、図-2の一般図に示すように2000m、2500m、3000mの3径間吊橋とし、側径間と中央径間の支間比は、1:3となるように仮定した。

質量を暴風時にのみ一時的に吊橋に付加する方法としては、橋面に土砂などを積み込んだダンプトラックなどの車両を設置することなども考えられるが、極慣性モーメントの増加を抑えるためには、付加する質量をなるべく補剛桁の中央に配置することが望ましい。したがって、補剛桁中央部には管や隔壁を配置する必要があるが、補剛桁をトラス形式とした場合、その構造の煩雑さや静的風荷重に対する受風面積の上昇などが懸念されるため、本検討では箱形式の補剛桁を対象にすることとした。

検討基本条件を表-1に示す。吊橋の耐風性能は、径間比やサグ比などで変化することが知られている²⁾が、本検討ではこれらのパラメータを固定し、質量を付加した場合と、しない場合の特性や鋼重の増減を得ることを目

表-1 検討基本条件 (単位: 全橋当たり)

項 目	2 000m吊橋	2 500m吊橋	3 000m吊橋
基本 条 件	支 間 長	側: 650m 中: 2 000m	側: 850m 中: 2 500m
	サ グ	$f = L_c/10$	同左
	幅 員 構 成	第1種第3級, 4車線	同左
	ケーブル間隔	30m	同左
	桁 高	7.0 m	8.5 m
死 荷 重 強 度	ケ ー ブ ル	10.0 t/m	14.5 t/m
	吊 構 造	20.0 t/m	21.5 t/m
	合 計	30.0 t/m	36.0 t/m
断 面 性 能	ケ ー ブ ル A_c	1.1 m ²	1.6 m ²
	補 剛 桁 I_x	9.5 m ⁴	14.0 m ⁴
	補 剛 桁 I_y	96.0 m ⁴	100.5 m ⁴
	補 剛 桁 J	20.0 m ⁴	28.5 m ⁴

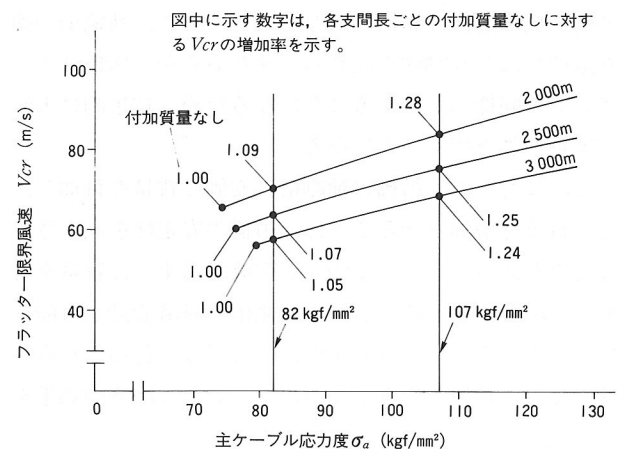


図-3 σ_a - V_{cr} 図

表-2 予備検討計算結果

(単位: 全橋当り)

		2 000 m吊橋			2 500 m吊橋			3 000 m吊橋		
		付加質量無し	付加質量有り		付加質量無し	付加質量有り		付加質量無し	付加質量有り	
			$\sigma_a = 82$	$\sigma_a = 107$		$\sigma_a = 82$	$\sigma_a = 107$		$\sigma_a = 82$	$\sigma_a = 107$
全重量 $M \times 9.8$ (t/m/Br)		30.0	33.5	43.5	36.0	39.0	50.5	43.0	46.5	60.5
極慣性モーメント $I \theta \times 9.8$ (t・m ² /m)		4 200	同左	同左	5 450	同左	同左	7 100	同左	同左
振 動 数	鉛直 $\omega_h/2\pi$ (Hz)	0.088	0.087	0.083	0.075	0.074	0.071	0.069	0.068	0.065
		100%	99%	94%	100%	99%	95%	100%	99%	94%
	ねじり $\omega_\phi/2\pi$ (Hz)	0.214	0.224	0.242	0.178	0.184	0.199	0.153	0.156	0.169
		100%	105%	113%	100%	103%	112%	100%	102%	110%
振動数比 ω_ϕ/ω_h		2.432	2.575	2.916	2.373	2.486	2.803	2.217	2.294	2.600
フラッター限界 風速 V_{cr} (m/s)		66.3 (100%)	72.1 (109%)	84.8 (128%)	61.3 (100%)	65.7 (107%)	76.8 (125%)	57.9 (100%)	60.7 (105%)	72.0 (124%)

的に検討するものとした。

3. 予備検討

付加する質量が吊橋の耐風性能に与える影響を中央支間長ごとに定量的に把握することを目的に、2 000 m, 2 500 m, 3 000 mの3径間吊橋に対して、質量を徐々に増加させた場合のフラッター限界風速を算出した。フラッター限界風速の算出は、撓度理論による吊橋の固有振動解析を行い、Selberg式を用いることで行った。なお、補剛箱桁は各支間ごとの桁高の最小板厚で構成される断面(鋼床版: 12 mm, その他: 10mm)に固定し、主ケーブル断面も各支間ごとに常時荷重(死荷重 D +活荷重 L +温度荷重 T)で決定されたものを固定して用いた。

計算結果を図-3に示す。横軸の主ケーブル応力度は、主ケーブルがその応力に達するまで質量を付加することを示している。質量を徐々に増加して主ケーブルの応力が上昇するにつれフラッター限界風速も上昇し、現在建設中の明石海峡大橋で使用されている主ケーブルの許容応力度 $\sigma_a = 82 \text{ kgf/mm}^2$ を基準に、仮に暴風時の割り増し係数を1.3として主ケーブルの許容応力度が $\sigma_a = 107 \text{ kgf/mm}^2$ となるまで質量を付加した場合、質量を付加しない場合に比べて24~28%の限界風速の上昇がみられる。これは、表-2に示すように質量を付加することでねじり振動数 ω_ϕ が増加していること、および質量効果が限界風速を上昇させる方向に働いていることによるものと思われる。

質量付加に基づく主ケーブル応力の増大は、鉛直・ねじりの振動数を上昇させることを意味するが、一方で、質量の増加は振動数の低下の要因になり、結果的に鉛直

振動数は低下の方向に向かう。ところが、ねじり振動数については、付加する質量を補剛桁の中央部に配置することによって、吊構造部の極慣性モーメントを抑制し、低下させないようにすることができる。表-2に示すように質量を付加した場合、質量を付加しない場合より、ねじり振動数が大幅に上昇しているのに対して、鉛直振動数が若干低下しているものの、その変化率がねじり振動数の変化率と比べて小さいのは、このためである。

また、対象とした支間長によって限界風速の上昇率が異なっており、主ケーブルの許容応力度 $\sigma_a = 107 \text{ kgf/mm}^2$ となるまで質量を付加した場合、3 000 m吊橋より2 000 m吊橋の方が約3%と微少ではあるが、効果が大きいことも認められた。これは、支間長が小さい方が、主ケーブルに発生する死荷重応力の占める割合が小さくなり、所定の主ケーブル応力に対して付加できる質量が増加するためであると思われる。

4. 3 000 m吊橋に適用した場合の経済効果

前項で述べたように予備検討を行った結果、質量を付加することでフラッター限界風速を上昇させることができ、吊橋の耐風性能に大きく関与することがわかった。ここでは、3 000 mの超長大吊橋で補剛桁が箱形式の場合に暴風時にのみ一時的に質量を付加する暴風時質量付加型吊橋を適用した場合の経済効果を具体的に把握することを目的に、質量を付加した場合としない場合について、 $V_{cr} = 85 \text{ m/s}$ のフラッター限界風速を満足し、なおかつ設計基本風速 $V_{10} = 40 \text{ m/s}$ とした場合の暴風時での補剛桁の応力照査を行うことで補剛桁断面を決定した。

フラッター限界風速は前項予備検討と同様に、固有振

表-3 支間長3 000 m吊橋の暴風時質量付加の効果

(単位; 全橋当り)

		従来型 桁高 10 m	質量付加型 桁高 10 m	従来型 桁高 7 m		質量付加型 桁高 7 m	
				中央径間	側径間	中央径間	側径間
死荷重強度	ケーブル (tf/m)	29.0	24.5	35.0		28.0	
	吊構造 (tf/m)	33.5	27.0	41.0	26.5	31.5	23.0
	合計 (tf/m)	62.5	51.5	76.0	61.5	59.5	51.0
全死荷重の比率		1.00	0.82	1.00		0.80	
付加質量 (tf/m)		付加しない	20.5	付加しない		23.1	
断面性能	ケーブル A_c (m ⁴)	3.2	2.7	3.9		3.1	
	補剛桁 I_x (m ⁴)	42	28	32	16	22	13
	補剛桁 I_y (m ⁴)	230	154	331	168	225	129
	補剛桁 J (m ⁴)	103	64	90	42	59	30
	母材板厚 (mm)	29	18	48	22	31	16
限界風速 (m/s)		86.0	86.6	85.8		86.6	
照査風速 (m/s)		85.0	85.0	85.0		85.0	

動解析を行いSelberg式を用いることで行った。静的風荷重に対する面外の断面力および変位は、Moisseiff氏の弾性分配法を用いて算出した。なお、主ケーブルの断面は、暴風時に1.3の許容応力の割り増しを考慮するものと仮定し、許容応力度 $\sigma_a = 107 \text{ kgf/mm}^2$ と考慮し、付加する質量を決定した。

また、検討基本条件は前項で行った予備検討で用いたものと同様としているが、補剛桁の桁高による鋼重の増減および動的・静的特性などを得ることを目的に桁高 $H = 10 \text{ m}$ と $H = 7 \text{ m}$ の2ケースを対象としている。

その結果、表-3に示すように、以下のことがいえる。

- ① 補剛桁の桁高にかかわらず質量を付加した場合、しない場合に比べて母材の板厚が大幅に減少し、主ケーブルと吊構造部の死荷重強度の合計が、約20%減少する。
- ② 質量を付加するかしないにかかわらず $H = 10 \text{ m}$ の場合と 7 m の場合の主ケーブルと吊構造部の死荷重強度の合計を比較すると、 $H = 7 \text{ m}$ の方が約18%大きくなるのがわかる。

なお、主ケーブルの断面が桁高にかかわらず質量を付加しても減少しているのは、暴風時に許容応力度の割り増し1.3を考慮するものと仮定しているため、すべて常時荷重で決定されており、質量を付加することで補剛桁に必要なねじり剛性などが小さくてすみ、常時荷重状態での吊構造部の重量が小さくなるためである。

図-4に静的風荷重に対する面外の変位と断面力を示す。その結果、以下のことがわかった。

- ① 補剛桁の桁高にかかわらず質量を付加することで面外の変位が約15%、面外曲げモーメントが約30%と大幅に減少している。

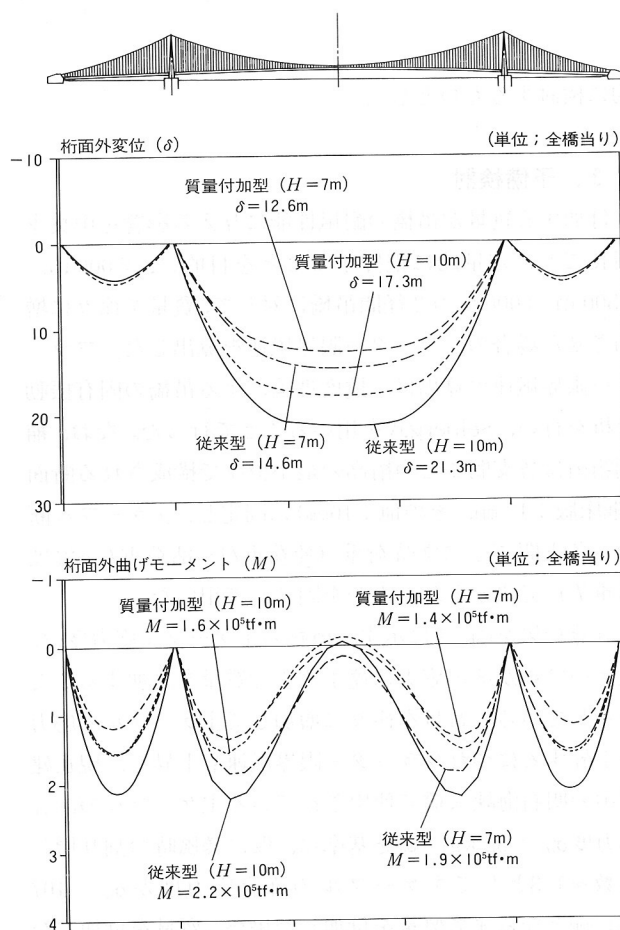


図-4 面外風荷重解析結果

- ② 質量を付加するかしないにかかわらず補剛桁の受風面積が小さくなる桁高 $H = 7 \text{ m}$ の場合の方が面外の変位および面外曲げモーメントとも小さくなっている。

なお、表-3で桁高 $H = 7 \text{ m}$ の場合補剛桁の断面性能が中央径間と側径間で異なっているのは、フラッター限

界風速 $V_{cr} = 85 \text{ m/s}$ を満足する補剛桁断面に対して、静的風荷重による応力が、桁高 $H = 7 \text{ m}$ の場合小さくなり、側径間については板厚を小さくして断面を減少させているためである。一方、桁高 $H = 10 \text{ m}$ の場合、側径間の桁断面は静的風荷重が大きいいため、中央径間と同等の結果となった。

ところで、暴風時質量付加型吊橋においては、補剛桁に必要となるねじり・面外の剛性が小さくてすむため、同時に鉛直剛性も小さくなっており、完成時における主ケーブルの張力も全体死荷重が低減されている分、小さくなっている。したがって、常時荷重での補剛桁の面内断面力に対する応力度を算出し、照査する必要がある。また、暴風時においては、面外風荷重が載荷された状態で表-3に示したように全死荷重の約40%にもなる付加荷重が同時に載荷されることになるため、補剛桁の応力照査は面外風荷重により発生する面外応力度の他に、付加荷重により発生する面内応力度を同時に考慮して行う必要がある。したがって常時荷重による断面力と付加荷重による断面力を算出することを目的に、別途面内解析を行うものとした。ただし、これまでの検討結果から補剛桁の桁高は、 $H = 10 \text{ m}$ の方が $H = 7 \text{ m}$ と比べて有利であることがわかっているため、面内解析は $H = 10 \text{ m}$ でのみ行うものとした。

なお本検討における、暴風時にのみ一時的に付加される荷重の具体的な移送箇所および順序については明確にはしていないため、活荷重と同様に付加荷重も安全側に補剛桁の各部材に最も不利になるように載荷して断面力を算出するものとし、Peeryの影響線解析にて行った。

表-4に補剛桁の面内・面外の最大曲げモーメント（常時荷重、付加荷重、風荷重）と、おのおのの最大応力度を計算した結果を示す。その結果、以下のことがわかった。

表-4 補剛桁の面内・面外最大曲げモーメントと最大応力度

(単位: $\text{tf} \cdot \text{m}$, kgf/cm^2)

			従来型		質量付加型	
			常 時	暴風時	常 時	暴風時
面内	側	$M_{\max}$	16 800	—	13 700	41 300
		σ	240	—	295	890
	中	$M_{\max}$	16 200	—	13 300	39 100
		σ	235	—	285	840
面外	側	$M_{\max}$	—	142 000	—	105 000
		σ	—	925	—	1 025
	中	$M_{\max}$	—	147 000	—	103 000
		σ	—	965	—	1 005

※曲げモーメントはすべて常時換算値を示す。

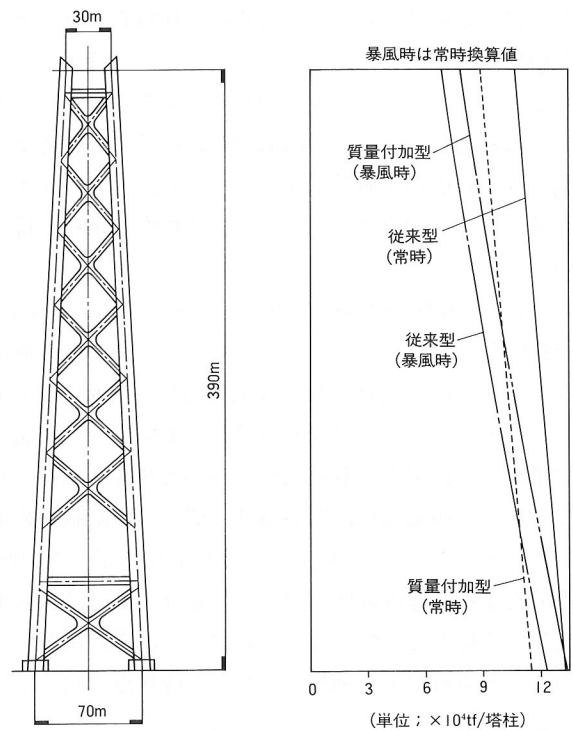


図-5 塔柱軸力図

- ① 補剛桁の常時荷重での面内最大曲げモーメントは、質量付加型の方が側径間・中央径間とも約18%小さくなっている。しかし、応力は従来型の方が桁断面が大きいいため、逆に18%小さい結果となった。
- ② 補剛桁の常時荷重に対して発生する最大応力度は、非常に小さく全く問題とはならない。
- ③ 補剛桁の応力度で、暴風時に一時的に付加する荷重により発生する面内応力度と、風荷重により発生する面外応力度を同時に考慮して照査を行ったところ、50キロ鋼材を使用することで充分対処することができる。

図-5に、上記の面内・面外解析の結果算出された塔頂反力と主塔自重により生じる塔柱の軸力を簡易的に計算し比較したものを示す。質量付加型吊橋の暴風時の塔柱軸力は、許容応力度の割り増しを考慮することで、従来型吊橋の常時荷重の軸力を超えることはない。これは、質量付加型のケーブルと吊構造部の死荷重が従来型に比べて小さいことも影響している。しかしながら、塔面外の曲げモーメント等を見逃したうえでの比較であるため、今後より詳細な検討が必要と思われる。

5. 主ケーブルの安全率について

主ケーブルの許容応力度は、一般的に鋼線の引張強さあるいは、降伏点に対してある安全率で除した値が用いられている。この安全率は、主ケーブルに発生する死荷重応力と活荷重応力の比率や、二次応力の影響などを考

慮して設定されているものであるが、比較的バラツキの少ない死荷重と異なり、場合によっては設計時想定した荷重よりも大きくなる可能性のある活荷重に対して、大型車が満載され、なおかつ路肩などの部分にも普通車が満載された極限荷重載荷状態であっても、主ケーブルは引張強さあるいは降伏点に対してある程度の余裕を持っている。

表-5 に本州四国連絡橋公団の上部構造設計基準・同解説（1989年4月）より、主ケーブルの耐用期間中の荷重変動を考慮した降伏点に対する余裕応力の調査結果を示す。この表は、これまでに建設された吊橋や、現在建設中の吊橋で、極限荷重載荷状態での応力状態を示したものであるが、因島大橋、明石海峡大橋での極限載荷荷重で発生する主ケーブルの応力と、本検討で想定した3000m級吊橋で暴風時質量付加型とした場合の風+付加荷重で発生する応力を比較すると、おおよそ同様の値を示しており、暴風時質量付加型の場合でも降伏点に対して相応な余裕を有していることがわかる。

表-5 耐用期間中の荷重変動を考慮した主ケーブルの応力状態

(単位: kgf/mm²)

橋梁	主ケーブル応力					余裕 応力
	D	T	L	D'+W	合計	
因島大島 (160/2.5)	53	1	10	—	64	
			32	—	86	32
明石海峡大橋 (180/2.2)	75	1	6	—	82	
			27	—	103	37
暴風時質量 付加型 (180/2.2)	77	1	4	—	82	
			—	29	107	33

※余裕応力は、降伏に対するものを示す。

※活荷重応力は、上段に設計荷重時、下段に極限荷重時のものを示す。

※因島大橋、明石海峡大橋の応力は文献²⁾より引用。

※() 内は、引張強さ/安全率を表す。

※D'+Wは、付加荷重+風荷重を示す。

ところで、暴風時に主ケーブルに対して載荷される鉛直荷重は、死荷重+暴風時に一時的に付加する水や荷重を積み込んだ車両であり、後者の付加荷重は、必要とされる分だけの重量を付加するものであるため、荷重としてのバラツキは非常に少なく、暴風時に一時的に質量を付加した状態での主ケーブルの応力が107 kgf/mm²を超える確率は極めて少ないといえる。

これらのことから、本検討で用いた暴風時における主ケーブルの許容応力度は、決して不可能な値ではないと考えられる。

しかしながら、本検討においては、暴風時の主ケーブルの割り増しを仮に1.3として、許容応力度を107 kgf/mm²と設定した場合の検討を行ったにすぎず、当然のことながら今後一層の検討を行い、暴風時における安全率の低

減の可否や、最も妥当な安全率を設定しなければならない。特に、本検討では一次応力のみ算出したうえでの検討しか行っておらず、種々の要因により発生する主ケーブルの二次応力を算出することは、非常に重要な意味を持つため、このことを含めて今後より一層の検討を行っていきたい。

6. まとめ

吊橋に暴風時にのみ一時的に質量を付加した場合の効果についてまとめると、以下のとおりである。

- ① 暴風時にのみ一時的に質量を付加することで、フラッター限界風速を上昇させることができ、その効果は支間長が短い方が大きい。
- ② 暴風時にのみ一時的に質量を付加することで、面外風荷重に対する変位や断面力が低減する。
- ③ 3000m吊橋において主ケーブルの暴風時の許容応力度の割り増しを1.3として質量付加型とした場合、従来型よりも約20%全死荷重を軽減できる。
- ④ 3000m吊橋において補剛箱桁の暴風時の応力照査を行ったところ、50キロ鋼材を用いることで充分対処できる。
- ⑤ 主塔の塔柱軸力は、質量付加型の場合でも暴風時の許容応力度の割り増し（常時換算）を考慮することで、従来型の常時に発生する軸力を超えることはない。

参考文献

- 1) 野村國勝・中崎俊三・前田研一・成田信之：流線形箱桁形式吊橋の補剛特性に及ぼす自重の影響に関する研究、鋼構造年次論文報告集、Vol.1,1993年7月。
- 2) M.Yoneda and M. Ito: Parametric Analyses of Natural Frequencies of Lower Vibration Modes of Suspension Bridges, *Proc. of JSCE*, No.380/I-7, pp. 243~246, April, 1987.
- 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。