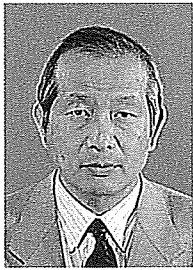


[特別寄稿] タコマ橋の落橋に学び長大橋の耐風安定化を目指して

On the aerodynamics stabilization of future long span bridges based on the fall of Tacoma Narrows Bridge



京都大学教授 松本 勝

Summary

This paper describes some experiments to the unsolved points subject to the Tacoma Narrows Bridge Failure in 1940, such as the torsional flutter critical wind velocity and sudden mode change from 5th symmetrical heaving vibration to the 1st asymmetrical torsional one. On the other hand, the actual wind-induced behavior of Tacoma Narrows Bridge indicates the significant aerodynamic interference between different aerodynamics, which implies the difficulty for the precise prediction of the wind-induced behavior of prototype bridges by use of 2D section model tests. Furthermore, some approaches to aerodynamically stabilize the long span bridges are described from the points of aerodynamic derivatives.

1. はじめに

最近の公共投資や、社会資本整備のあり方が問われ、道路関連の公団の民営化問題が、新聞紙上などのメディアをにぎわしており、そのあり方についても検討されているところである。新しく社会資本を整備することが何か悪のようにとらえられ、いままで多くの人たちの努力と英知により築かれてきた土木技術が、今後次第に失われていくのを危惧せざるを得ない。長大橋設計・建設に関わる技術についてもしかりであろう。米国は、1964年のヴェラザノ・ナロウズ橋完成を最後に、米国では長大橋建設が行われず、(1966年完成のポルトガルのターガス橋は、スタイマン設計事務所やUSスチール会社が設計したもの)、そのためにもそれまでに培われた長大橋の技術が十分に継承されなく、一散した時期がしばらく続いた。しかし、その後、米国のT.Y.Lin Internationalや、Parsons Transportation Group(PTG)等のコンサルタント会社を中心となり、世界の長大橋の計画や検討に積極的に参加し、最近では近く建設が始まると聞く、中央径間長3300mのメッシナ海峡大橋のproject managementとして、PTGが選ばれているようである。我が国は、技術先進国として、国内外において長大橋を設計・建設し、又世界各国へも数多くの国際貢献を果たしてきた。明石海峡大橋建設で結集された高度の技術、経験を継承し、これらの技術を維持、持続しつつ、国内外において、低コストかつ安全性に優れたより合理的な長大橋設計・建設に向けて、さらなる研究、技術の開発と進展は、是非とも必要であろう。イタリア、デンマーク、カナダ、英国、ドイツ、米国等、橋梁設計・建設に高い技術と経験を有している諸外国がこの分野でしのぎを削っており、一方、中国の最近の急速な技術進展を考えたときに、我々に課せられている責任、義務及び役割は大きいといえよう。ここでは、現在の長大吊橋発展の歴史、長大吊橋の耐風性評価のルーツともいえるタコマ橋の落橋について今一度見直し、そこに学ぶべきいくつかの点を指摘し、更に、今後

の国内及び国際的な展開を見定め、耐風性から見た、よりよい長大橋開発のためのいくつかのポイントを述べる。

2. タコマ橋の落橋

タコマ橋の落橋については、ファルカーセン¹⁾や川田²⁾などにより報告されており、今更詳しく説明はいらないと思うが、簡単にその概要を振り返ろう。当時開発された撓度理論によれば、吊橋の桁は軽量でよく、その結果、モイセーフは桁として、プレートガーダー形式を採用し、それまでの吊橋にくらべ、非常にスレンダーな形式の吊橋を完成させた。当時の多くの橋梁設計者は、当時世界で3番目に長い吊橋(中央径間853m)に対し、その大胆な設計と完成した吊橋のスレンダーさに惜しみない拍手を送ったと思われる。このタコマ橋は、テイ橋の風による落橋事故(1879年)も考え、風速約60m/sの風に耐える安全な設計であったはずであった。しかし、1940年7月に完成直後から、タコマ橋は、風により振動を起こすのである。その振動は、逆対称モードの鉛直振動が主であった。完成直後よりワシントン大学の航空工学のファルカーセン教授が、タコマ橋の空力振動の観測、調査を行っており、完成後4ヶ月たった11月7日に、彼の目前で激しいねじれ振動[写真-1]が

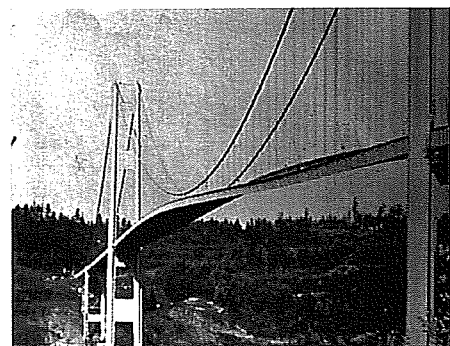


写真-1 タコマ橋のねじれ振動

生じ落橋する。そのときの模様は、ファルカーセンの報告書によれば次のようである。「その日は、風速約18-22m/s (40-50mph) の風が吹いており、いままでに観測されなかった高い振動数 (対称5次と思われる) の鉛直振動が生じ、しばらく続いた後に、風速18.8m/s (42mph) のときに逆対称1次のねじれ振動に突然変わり、激しいねじれ振動の結果、落橋する。」その落橋前後の様子は、18mmフィルムに映像として納められ、広く世界に知られるようになった。

3. タコマ橋落橋の原因と説明

落橋の直接の原因は、激しい空力ねじれ振動であることは間違いなく、その空力振動の原因は、桁断面がプレートガーダーという形式で、極めて空力的に不安定な断面形状であったためといえる。事故後のファルカーセンやカルマン等による一連の風洞実験に基づく落橋調査研究によれば、同桁断面は、鉛直渦励振や、ねじれ渦励振あるいはねじれフラッターの生じやすい断面であることが明らかにされた。なお、鉛直方向の渦励振とねじれフラッターについて、次の記述があり、当時すでに異種空力現象間の干渉問題を指摘していることは注目される。

It was likewise demonstrated that, if a velocity corresponding to one of these higher vertical modes could be developed rapidly with a sufficiently high amplitude, the catastrophic torsional mode might be avoided. What seemed to be a certain overlapping of the various modes had long been observed, and some suspicion had arisen that they may have been present only one torsional mode which was damped at intervals by a vertical mode of superior strength. A series of tests were now run in which an attempt was made to inhibit the vertical motions and determine the true extent of each torsional mode.

一方、ねじれフラッターの発生原因については、カルマンとダンは、上流側の鉛直プレートがないときには、ねじれフラッターに対して安定で、逆に下流側プレートのない状態でも、オリジナルな桁断面とあまり変わりなく空力的に不安定であることから、上流側鉛直プレートからの渦がその原因であるとしている。つまり、断面側面上の渦がねじれフラッターの原因と考えている。しかし、その後、スタイマンの研究⁴⁾によれば、H-断面のねじれフラッターは、ねじれ振動による断面の流れに対するキャンパー効果あるいは流体力発生に対する流れの位相を指摘しており、その後中村⁵⁾は、ねじれ振動に伴う位相差(fluid memory)を伴った断面前縁部からの流れの剥離と再付着により形成される剥離バブルと考えた。又、航空機翼のストールフラッター (ねじれフラッター) に関してMcAlister & Carr⁶⁾もその原因をDynamic Stall Vortexとしている。何れにせよ、タコマ橋の桁断面が、空気力学的に極めて不安定な形状をしていたために、思いもかけず、空力振動という現象により20m/s以下の比較的low風速の風の作用により落橋した。前にも述べたように、落橋直前の様子は、最初鉛直対称5次モードの渦励振で振動しており、突然にねじれ対称1次のねじれフラッター振動に変化し、最後を迎えた。なぜ、突然に振動モードが変化したのであろうか。この点につい

て、ファルカーセンの事故調査報告書にも、落橋直前にセンタータイの伸縮が見て取れることが報告されていることから、川田は、このタイの切断が、振動モードの急変の可能性を指摘している³⁾。つまり、何らかのきっかけで、鉛直撓み渦励振からねじれフラッターへ変化し、最後はこのねじれフラッターにより落橋したといえる。

4. タコマ橋落橋に関わるいくつかのミステリーとその解釈

タコマ橋の落橋に関わるいくつかの疑問点が残されている。それは、1) 風速の不明確さ。2) ねじれフラッターの発生機構。3) 鉛直撓み渦励振とねじれフラッターの空力干渉の詳細。4) 鉛直振動からねじれ振動へのモードの急変。まず、事故当時の風速観測についての曖昧さについて述べよう。これについては、ファルカーセンの調査報告書のPrefaceにも、"For examples, this record reveals no reliable information on the exact velocities and directions of wind at the site."との断りがある。これは、風速計の調子の悪さ (風速11m/s以下では誤差大でそれ以上の風速ではよいとされているが) やキャリブレーションデータの紛失によると説明されている。更に事故調査報告書には、使用された風速計、および風向についての記述は全くなく、事故時の風向は知る由もない。図-1¹⁾に示されるように、本橋梁の橋軸が、NarrowsあるいはChannelに対し、直交せず、約25°弱のずれを持っていることから、果たして風が橋軸直角方向から吹いていたかどうか疑問である。(通常は、Channelに沿った風が吹くことが多い。)

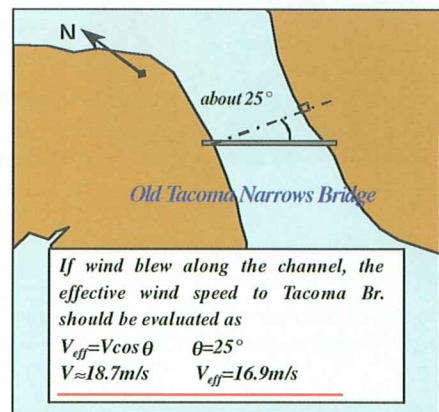


図-1 タコマ橋の橋軸方向

中村等は、剥離バブルの非定常性によるメカニズムを報告しているが、筆者の研究^{8), 9)}によれば、H型断面のねじれフラッターは、低風速域では渦による効果で、又それより高い風速域では、剥離バブルの非定常性による効果で生じ、タコマ橋の落橋下と思われる風速は、ちょうどこの境界の風速域ではなかったかと考えられる。図-2は断面辺長比を変化させたときのある振動条件 (スクルトン数) 下でのH型断面のねじれ振動発生時の風速域を図示したものであり、一方非定常圧力分布特性から考えられる流れのパターンを同時に図示したものの^{8), 9)}で、B/D=5近傍が、タコマ橋断面である。一方、図-3は、タコマ橋の桁断面の、

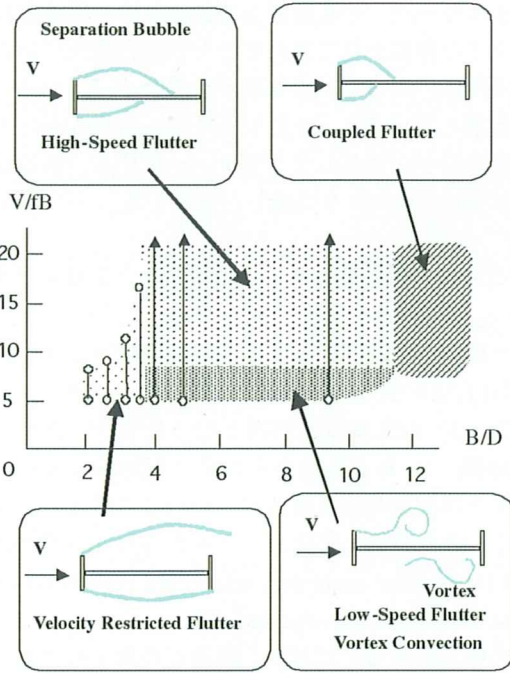


図-2 Flow pattern associated with the torsional flutter mechanism of 2D H-shaped cylinders

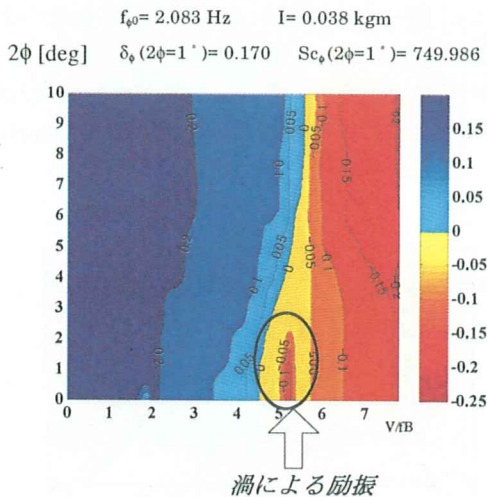


図-3 The V-A- δ diagram of 2D Tacoma Narrows Bridge girder model (torsional 1DOF)

ねじれ応答のV-A- δ 曲線を示すもの²⁾で、明らかに、フラッターの始まった低風速域では、渦励振特有の特性が見て取れる。このように、タコマ橋のねじれフラッターについて、落橋した風速域前後では異なった流れ場となっており、ねじれフラッターのメカニズムとしては、両者の指摘は、どちらかが間違いということでないといえる。ただ、後述するが、鉛直撓み渦励振のあとと生じた、破壊に導いたねじれフラッターは、高風速域でのフラッターであったと考えられ、その意味では、非定常バブル説に軍配があがるといえよう。3) 鉛直撓み渦励振とねじれフラッターとの空力干渉については、結論を先に述べれば、「鉛直振動により生成された側面の渦は、ねじれフラッターの低風速域での渦生成を抑制するが、鉛直渦励振を誘起する渦は、ねじれ振動を誘起する非定常な剥離バブル生成によって抑制さ

れる」となる。タコマ橋桁断面を有する模型について、鉛直振動1自由度系、ねじれ振動1自由度系、そして鉛直振動数をねじれのそれの2.5倍とした2自由度系について（タコマ橋実橋の鉛直撓み対称5次と逆対称1次のねじれの振動数比は2.58）、種々構造減衰や質量を変化（スクルトン数を変化）させたときに、いくつかの空力干渉現象が観察された。その結果は図-4⁷⁾に要約される。なお、同図には、ファルカーセンやカルマン等の実験結果も併せて示されている。空力干渉は、大きく3つに分類される。1つめは鉛直撓み振動が、ねじれフラッター（高風速域の）に抑制される、2つめは、鉛直振動により発生した渦により、ねじれの渦励振（鉛直撓み振動よりゆっくりしたねじれの固有振動数で振動）が励起される。このとき、撓み振動も振幅を非定常にさせながら、同時に振動している。（これは、鉛直たわみとねじれの振動数比がちょうど2.5倍から生じる極めて珍しい干渉現象）3つめは、高風速域のねじれフラッターが鉛直渦励振を抑制（理由は上述）する。これらの空力干渉のうち、タコマ橋落橋に関係するのは3つめの干渉である。この空力干渉は、図-3にも示されるように、ねじれの構造減衰（対数減衰率）で約0.05から0.1の範囲で生じるものと考えられるが、あいにく実橋のそれが求められておらず、推定の域を出ないが、実橋の空力挙動から本橋の減衰はこの範囲にあったものと考えられる。最後の4)の鉛直振動からねじれ振動への急激なモードの変化は、風速の増加により、ねじれの高風速域での振動領域に入り、上述のように鉛直撓み振動が抑制されたために、モードが急変したと推定される。1)で述べたように、そのときの風速域が、報告書の18.8m/s (42mph)であったかどうかについては、実験結果をベースに考えると、16m/s（橋軸直角方向の風速として）程度の風速であった可能性が強い。

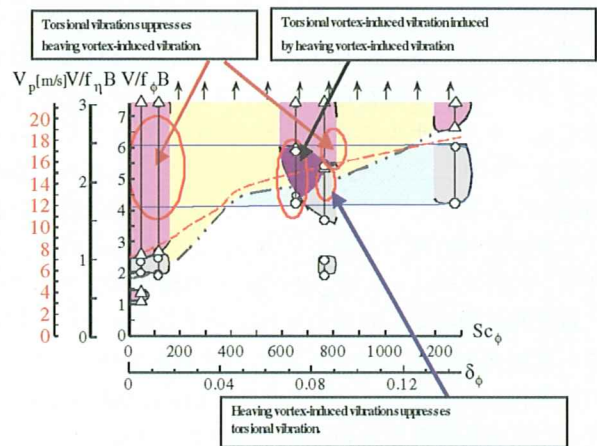


図-4 Aerodynamic interaction between the having vortex-induced vibration and torsional flutter

5. タコマ橋の落橋に学ぶ

タコマ橋の落橋は、長大橋の空力振動に対する十分な安全性の照査の重要性を知らせた以外に、その後のBluff Body Aerodynamicsに関する基本的な研究を促進させたと同時に、それ以降の長大橋の耐風安定性に関する研究の発展に大きく寄与したといえよう。その結果、明石海峡大橋、

メッシナ海峡大橋等の耐風性の優れた桁断面開発を可能とし、さらには、将来に備えての超長大橋の耐風設計への挑戦を動機づけた点で極めて重要な意味を持つ。タコマ橋に見られた空力干渉問題は、実橋の空力挙動評価のための、鉛直・撓み振動の似たモードの組み合わせによる剛体模型2次元実験に対する新しい問題を提起しており、その意味では、タコマ橋の落橋事故は、まさしく「温故知新」であって、現在も学ぶ点が多い。

6. 長大橋の耐風性向上に向けて

最後に、近年研究開発された、明石海峡大橋やメッシナ海峡大橋あるいは、我が国の海洋架橋プロジェクトの一環として研究されてきた、耐風性の比較的優れた桁断面を紹介し、長大橋の耐風性向上のための基礎的なポイントを簡単に紹介しよう。近年の長大吊橋の桁断面に見られるフラッターは、多くは曲げねじれ2自由度であり、その運動方程式は、Scanlanの提案¹⁰⁾によれば、次のように、連成、非連成の自励型空気力によって表現される。

$$\begin{aligned} \ddot{\eta} + 2\zeta_{\eta_0} \dot{\eta} + \omega_{\eta_0}^2 \eta = & \\ (\rho b V^2 / m) \{ k H_1^* \dot{\eta} / V + k H_2^* b \phi / V + k^2 H_3^* \phi + k^2 H_4^* \eta / b \} & \\ \ddot{\phi} + 2\zeta_{\phi_0} \dot{\phi} + \omega_{\phi_0}^2 \phi = & \\ (\rho b^3 V^2 / I) \{ k A_1^* \dot{\eta} / V + k A_2^* b \phi / V + k^2 A_3^* \phi + k^2 A_4^* \eta / b \} & \end{aligned}$$

ただし η , ϕ : 鉛直撓み, ねじれの変位

ζ_{η_0} , ζ_{ϕ_0} : 鉛直撓み, ねじれの無風時の構造減衰比

ω_{η_0} , ω_{ϕ_0} : 鉛直撓み, ねじれの無風時の円振動数

ρ : 空気密度, b : 半弦長, V : 風速,

m , I : 単位長さあたりの質量, 質量慣性モーメント

k : 無次元振動数 (= $b \omega / V$),

ω : 風速 V における円振動数

H_i^* , A_i^* ($i=1-4$): 非定常空気力係数(flutter derivatives)

つまりフラッター特性は、これらのaerodynamic derivativesにより決まる。タコマ橋のようなねじれフラッターは、これらの係数のうち、 A_2^* が正值をとることによる。つまり、ねじれ系の減衰が、ある風速以上で負となることにより、ねじれの発散振動が生じる。一方、平板や扁平な断面では、 A_2^* は負値を示し、ねじれフラッターに対しては安定なもの、主として連成空気力係数である A_1^* と H_3^* の働きにより、ある限界の風速以上で、空力的に不安定となり、曲げねじれ2自由度の連成フラッターが生じる。ここで注意しなければならないのは、これらの非定常空気力をすべて小さくすることが、必ずしもフラッター耐風性をよくすることにならないということである。つまり、これらの空気力係数は、フラッターを押さえる働きをするものと、フラッターを促進させるものがあり、すべてを小さくすることは、両者の働きを小さくすることになるためである。従って、連成フラッター、ねじれフラッターの両者に対して安定にするためには、 A_2^* を負にし、その絶対値を大きくし、また、 A_1^* , H_3^* (もしそれらが負であれば絶対値を) できるだけ小さくすることが、必要となる。すなわちこのような特性を示すような桁断面を見つければよいことになる。しかしここで1つの問題につき当たる。そ










れは、通常の構造断面 (大きく桁を分離した断面とか、桁断面中央部に、かなり背の高い鉛直板をもうけ、その部分から強い剥離した流れを作るような断面等は含まれない) では、上式で示される8個の非定常空気力係数が互いに独立しているわけではなく、係数間にある関係を有する。つまり、これらの係数は、断面が鉛直撓み振動あるいはねじれ振動したときに断面周りに生じる流れ場により決定されるところの断面周りの非定常圧力分布により決定される。ところで、ある風速のもとで、構造断面が鉛直振動あるいはねじれ振動を行う場合、それらの流れ場は、ほぼ振動に伴って生じる相対迎角の大きさにより決まる。このとき、たわみの相対迎角は、 $\dot{\eta} / V$ で、ねじれ振動の場合は、ほぼ ϕ によって決まる。(ϕ による相対迎角の寄与は、スタイマン¹¹⁾のいうキャンバー効果に相当するが、中村¹²⁾や筆者ら¹³⁾の実験によっても、 ϕ によりの効果に比べほぼ無視できることが示されている。) 従って、これらの特性から、非定常空気力係数の間には次の関係が成立する。

$$H_1^* = k H_3^*, H_4^* = -k H_2^*$$

$$A_1^* = k A_3^*, A_4^* = -k A_2^*$$

更に、 A_2^* と A_3^* 、あるいは H_1^* と H_4^* の間には、それらにより表現される非定常モーメント、揚力 (無次元振動数に関して複素関数) の逆ラプラス変換された時間関数が、時間に関して実関数となるために、ある関係が成立しなければならない。¹⁴⁾ つまり、結局、2つの空気力係数のみが独立で、他は、互いに従属した関係にあることから、上述のように、フラッターを安定化するための桁断面開発は、そう簡単には行かない。したがって、フラッター安定化のためには、このような非定常空気力係数間の従属関係を成立しないような断面の工夫と、主として連成フラッターを生じさせる A_1^* あるいは H_3^* を集中的に制御するのが効果的といえる。表-1に、比較的耐風性の優れた桁断面 (基本断面も含めて) の、フラッター限界風速特性 (同じ同特性

表-1 Flutter safety indices, A_2^*/A_2^* plate, A_1^*/A_1^* plate and H_3^*/H_3^* plate of the proposed bridge girders with comparatively high performance against flutter instability

Bridge Girders	$V_{cr}/V_{cr,plate}$	A_2^*/A_2^* plate	A_1^*/A_1^* plate	H_3^*/H_3^* plate	remarks
Modified Rhombus Girder 	1.16	1.88	1.28	0.79	(H_3^* control)
Ellipse Girder 	1.01	0.75	0.52	1.59	A_1^* control
B/D=2 Rectangular 2-box Girder 	>>1	0.92	0.53	1.02	A_1^* control
Straight Crossing Road Projects in Japan 	3.8	0.36	(0.1) at $V_r=10$	0.40	A_1^* , (H_3^*)control
B/D=5 Rectangular 2-box Girder with Fairing 	1.4~1.5	0.79	0.58	0.88	A_1^* control
Messina Strait Bridge 	>>3	0.37	0.19	0.65	A_1^* , (H_3^*)control
All Grating Girder (opening ratio=60%) 	>2.8	0.04	0.002	0.12	A_1^* , H_3^* control
Rectangular B/D=20 with a Vertical Plate 	1.11	3.75 H_3^*/H_3^* plate (1.03)	2.05	0.79	(H_3^* control)
Hexagonal Box Girder with a Vertical Plate 	(>2.5)	0.5 H_3^*/H_3^* plate (0.83)	1.08	-0.33	H_3^* control

を持つ平板のそれとの比でしめされる)と A_1^* および H_3^* 特性(無次元風速20の場合の,同様に平板のそれとの比で示される)を示す.明らかなように,フラッター安定化には, A_1^* 制御, H_3^* 制御あるいはその両方が有効であることが示されている.オールグレーティング桁,メッシナ海峡大橋,分離箱桁は,あきらかに, A_1^* 制御及び, H_3^* 制御による安定化であり,楕円形状や,ダイヤモンド型桁断面は, A_1^* 制御,また鉛直板付き箱桁は, H_3^* 制御によるものであることがわかる.このような桁形状を工夫することによる耐風安定性確保のほかに,構造形式を工夫することで^{たとえば13), 14), 15)},あるいは,アクティブダンパー,パッシブダンパーなどを用いて,耐風性を確保しようとする研究^{たとえば16), 17), 18), 19)}もいくつか行われており,この方面での研究の進展も望まれる.更に,長大橋は,耐風性の面のみならず,車両の走行性の面や,その施工性,経済性からも十分にそのヒューズビリティが検討されなければならないのは当然であり,今後より性能の高い長大橋の開発が待たれる.

7. 終わりに

本稿は,タコマ橋の落橋当時の空力挙動を,2次元剛体風洞実験で再現し,それらをファルカーセンやカルマン等による実験結果と比較検討を加えることにより改めて考察を加えた.風速,風向,構造減衰などいくつかの明確でない点はあるものの,風速16m/s程度で,鉛直撓み渦励振とねじれフラッターの間の強い空力干渉が生じ,最終的にねじれフラッターで落橋したとの推論を得た.このような異種現象間の空力干渉問題は,今後の2次元剛体試験を実施する際の,対象とするモードの組み合わせに注意を喚起するものであろう.又,今後の長大橋の耐風安定性確保については,従来より提案,検討されてきたいくつかの長大橋桁断面の空気力係数特性を参考に, A_1^* 制御並びに H_3^* 制御の重要性を指摘した.内容が,専門的になり過ぎ,また言葉足らずの所も多いのではと危惧するが,今後の国内外における長大橋設計,建設に対して,新たな挑戦意欲と情熱を持っておられる技術者に少しでも参考になれば幸いである.

参考文献

- 1) F.B.Faugharson (1949) : Aerodynamic Stability of Suspension Bridges, Part-IV
- 2) 川田忠樹 (1975) : 誰がタコマを落としたか, 建設図書
- 3) 川田忠樹 (2000) : タコマ落橋-耐風工学の揺籃, 日本風工学会誌83号
- 4) D.B.Steinman (1950) : Aerodynamic theory of bridge oscillations, Trans. ASCE, Vol.115
- 5) Y.Nakamura & T.Mizota (1975) : Torsional flutter of rectangular prisms, Journal of the Engineering Mechanics

Division, ASCE, Vol.101

- 6) K.W.McAlister & L.W.Carr (1978) : Water tunnel visualization of dynamic stall, ASCE Publication Symposium on Nonsteady Fluid Dynamics
- 7) M.Matsumoto & R.Shijo (2002) : The flutter instability and its stabilization of long span bridges, Proc. of In-Vento2002
- 8) M.Matsumoto (1999) : On flutter stabilization, "Long-Span Bridges and Aerodynamics", Springer, Edt. by Miyata, Fujisawa and Yamada
- 9) M.Matsumoto, Y.Daito, F.Yosizumi, Y.Ichikawa and T.Yabutani (1997) : Torsional flutter of bluff bodies, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71
- 10) R.H.Scanlan & J.J.Tomko (1971) : Airfoil and bridge deck flutter derivatives, Journal of Eng. Mech. Div., EM6, ASCE
- 11) Y.Nakamura (1979) : On the aerodynamic mechanism of torsional flutter of bluff structures, Journal of Sound and Vibration, 67
- 12) M.Matsumoto (1996) : Aerodynamic damping of prisms, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 59
- 13) K.Yokoyama (1999) : New challenges for long span bridges crossing Japan's straits in 21st century, "Long-Span Bridges and Aerodynamics", Springer, ed. by Miyata, Fujisawa and Yamada
- 14) 風間浩二, 久保田浩 他 (1996) : ケーブルステイ方式による超長大吊橋の耐風安定化に関する研究, 第14回風工学シンポジウム論文集
- 15) 米田昌弘, 木村公雄 他 (1996) : 2500m級超長大橋吊橋の連成フラッター特性に及ぼす鉛直クロスステイの効果, 第14回風工学シンポジウム論文集
- 16) Y.Fujino (1999) : New control method for flutter suppression of long span bridge, "Long-Span Bridges and Aerodynamics", Springer, ed. by Miyata, Fujisawa and Yamada
- 17) H.Kobayasi & H.Nagaoka (1992) : Active control of flutter of a suspension bridges, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44
- 18) 松本勝, 吉住文太, 藪谷忠大 (1996) : 前縁部に設けた鉛直可動プレートを用いた流れ制御によるフラッターのアクティブコントロール, 第14回風工学シンポジウム論文集
- 19) 岡田徹, 本家浩一 他 (2000) : ジャイロ制振装置による橋桁の連成フラッターの制御, 構造工学論文集, Vol.46A