

タコマ橋落橋の謎を解く！

Yoshida-Gumi Co.Ltd

2019/7/1

田中 洋

JC

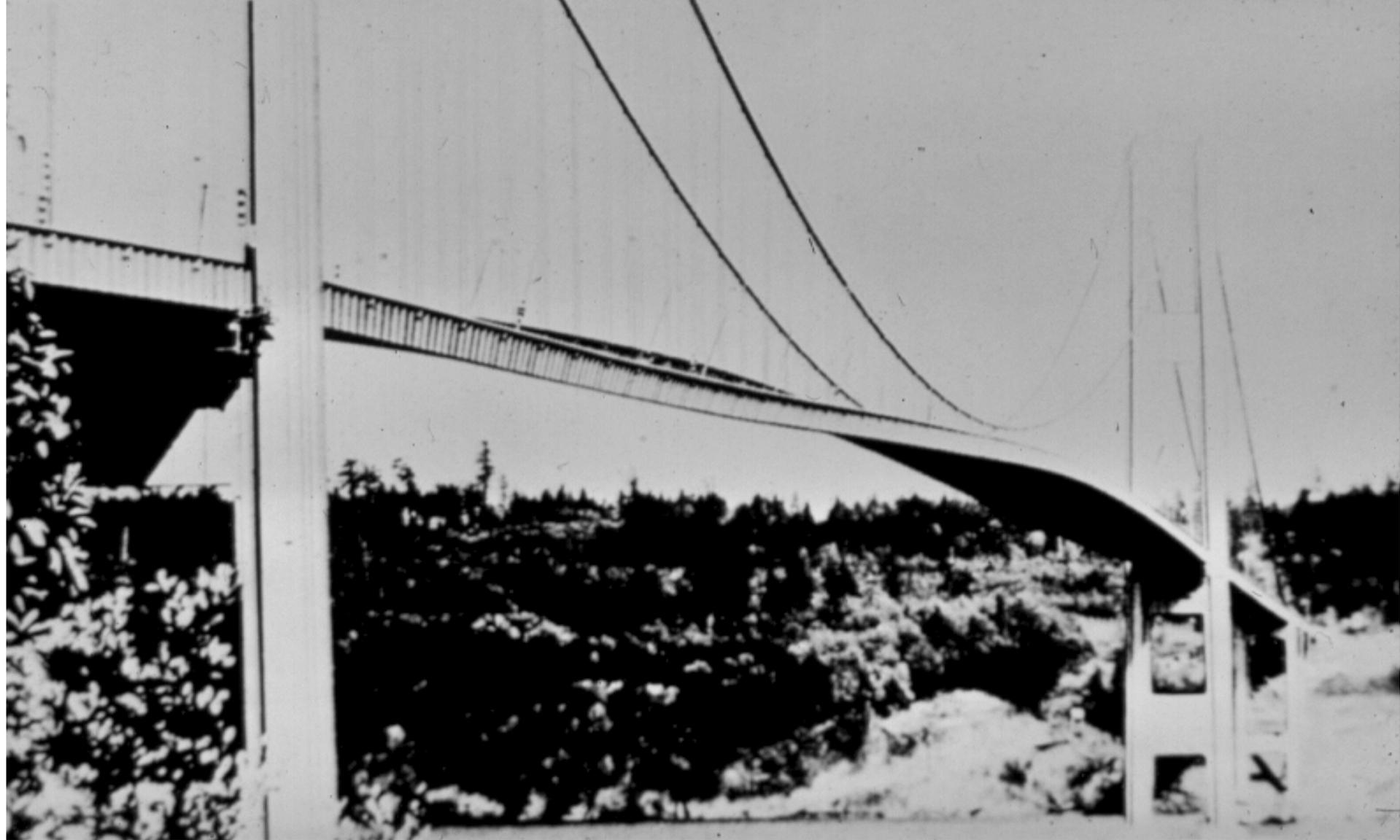
All (C) rights are reserved to Dr. Hiroshi
TANAKA

内容

◎ タコマ橋は、二時間半ほどの撓み振動を経て、突然、ねじり振動に変化して、半時間で落橋した。

1. どうして突然、逆対称ねじり振動モードに変化したのか？
2. 構造変化のためか？
3. 風速変化が起こったのか？
4. それとも?????





Tacoma Narrows Bridge (1940) 855m

【無断複製・転載止】 (C) All Rights are Reserved to Hiroshi TANAKA

JC

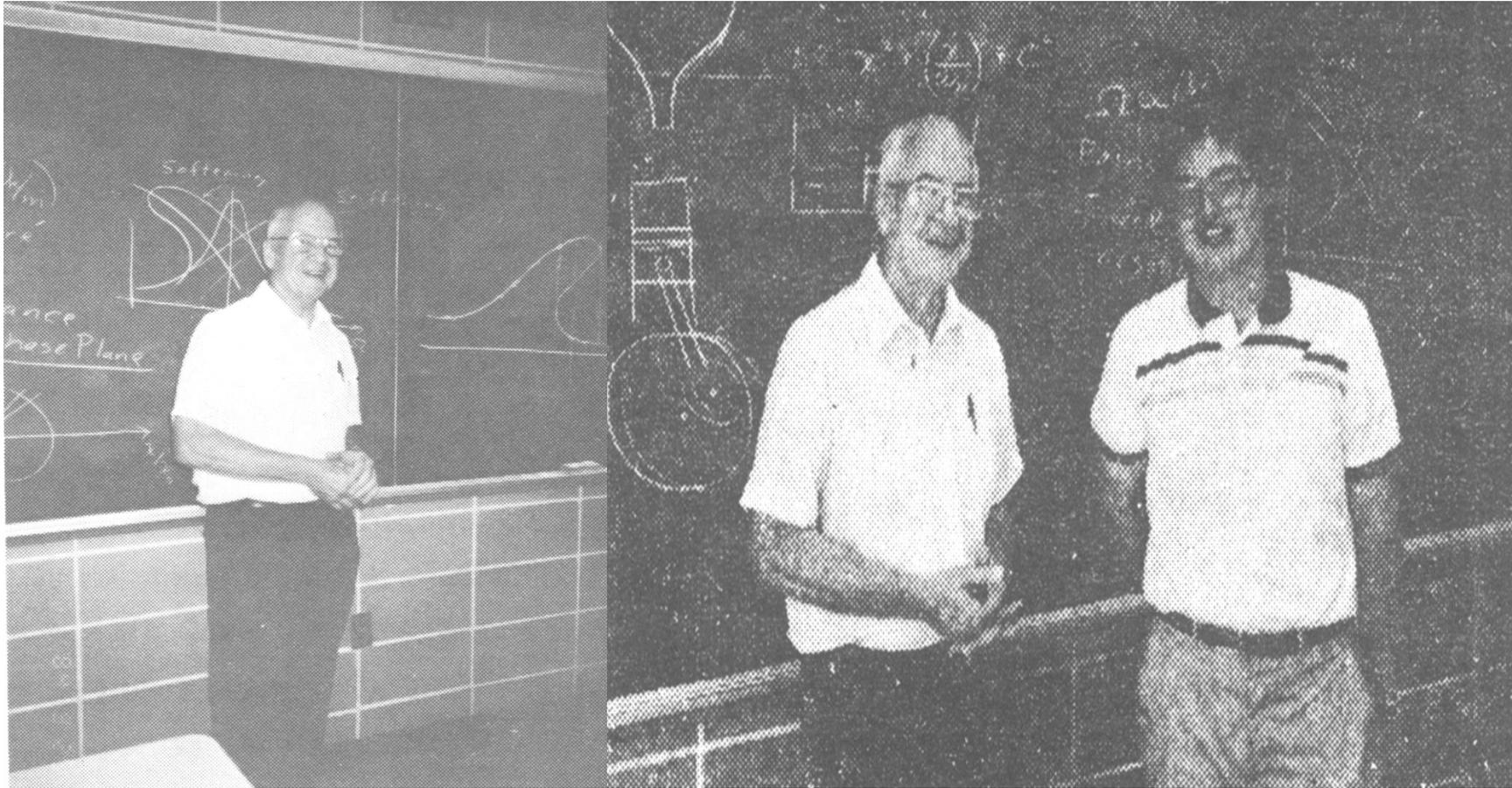
1. Movie Records of Collapse

https://www.youtube.com/watch?v=68NxH9tk_4g

このビデオ(添付)の説明は不正確である

2. Tacoma Bridge Dimensions

Prof.R.H. Scanlan の説明



JC

Lecture of Structural Dynamics at Princeton University
(USA)

Wing Theory を援用



FIG Static Pressure Field on a
NACA Airfoil
(Trailing edge **fulfills Kutta condition**)

Bluff Body (e.g., Bridges)

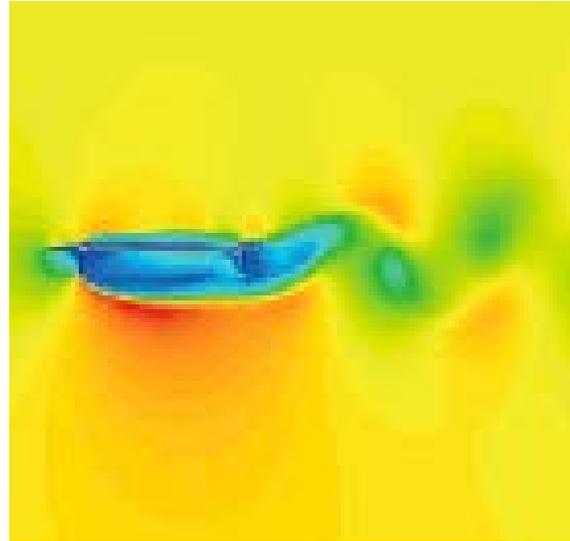
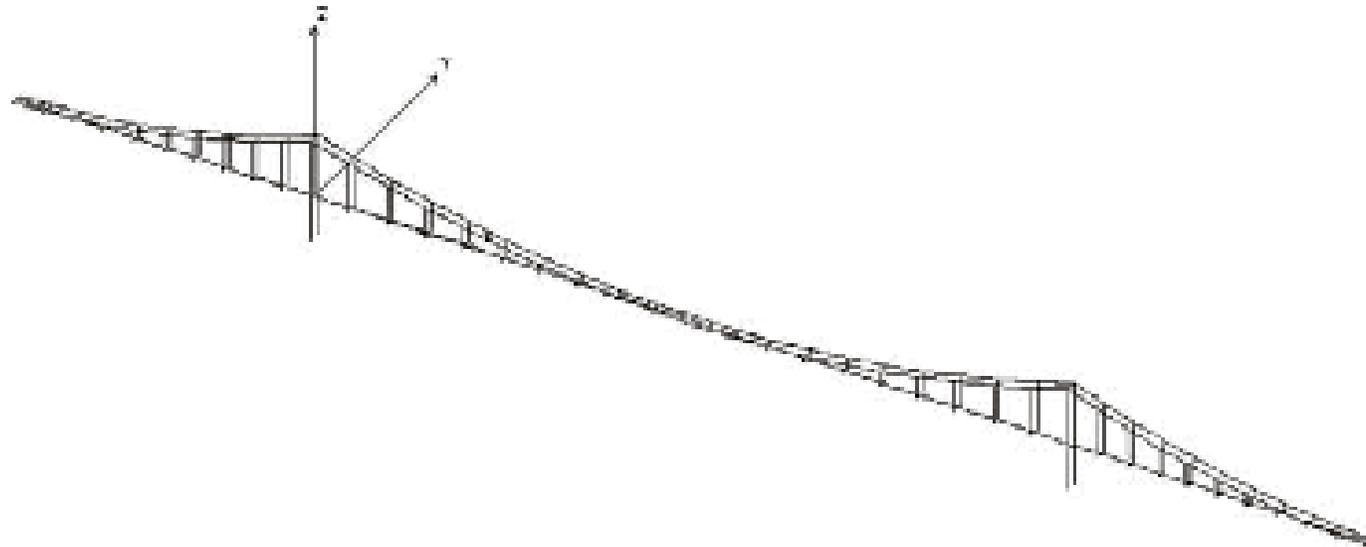


FIG Flow around Bluff Bodies
(trailing edge does **not fulfill Kutta condition**)

Dimension of Original Tacoma Bridge

Main span length (m)	853.4
Side span length (m)	335.3
Tower height (m)	71
Width between cables (m)	11.9
Total deck width (m)	11.9
Deck edge (m)	2.3
Cross section of each main cable (m ²)	0.124
Mass of each main cable (t/m)	1.05
Inertia moment for vertical bending I_y (m ⁴)	0.154
Inertia moment for lateral bending I_z (m ⁴)	5.69
Inertia moment for torsion J (m ⁴)	6.07×10^{-6}
Deck mass (t/m)	6.22
Polar inertia moment for deck (tm ² /m)	106.5

Finite Model of Original Tacoma Bridge



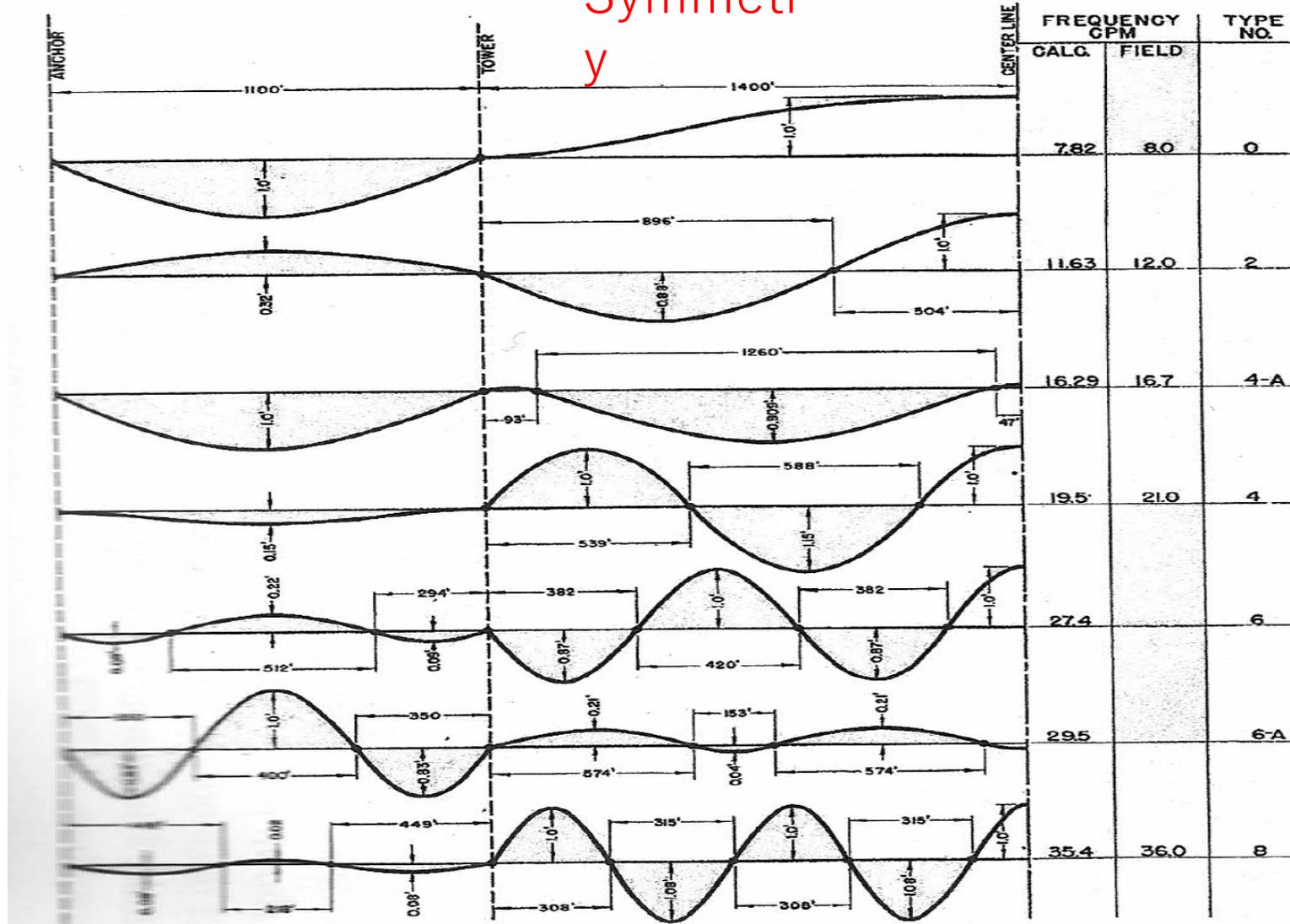
Comparison of national frequencies (Unit: $2\pi f$)

Mode type	ADISNOL3D	COBO	COLAPSE
(1) LS	0.568	0.435	–
(2) VA	0.817	0.795	–
(3) VS	1.189	0.809	–
(4) LA	1.296	0.949	–
(5) TA	1.505	1.147	1.256
(6) TS	1.608	1.165	–
(7) VA	1.705	1.055	–
(8) VS	1.792	–	–
(12) VS	2.179	–	–
(16) TA	2.321	–	–

By
Farquharson
0.824 rad/s

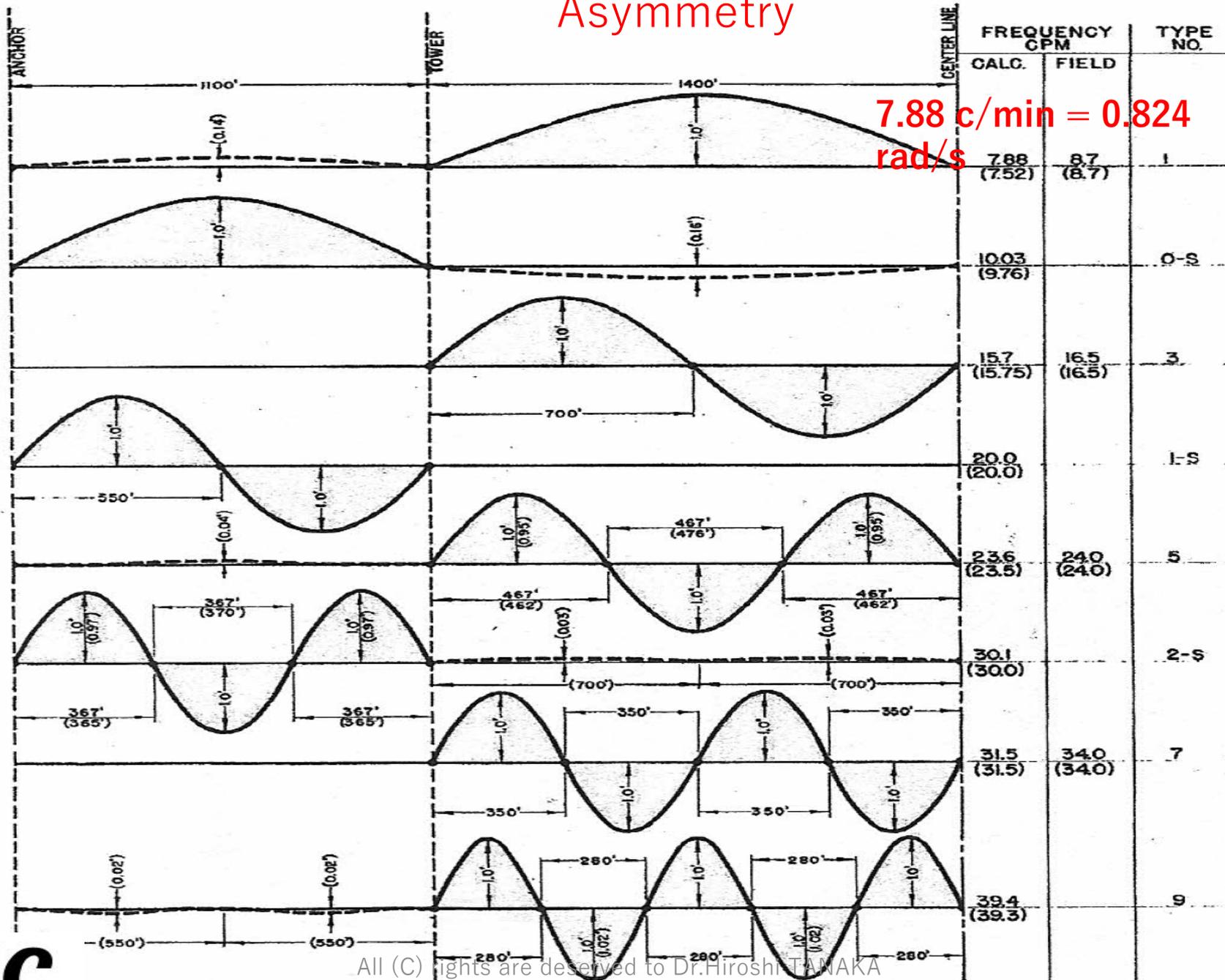
Vibration Modes

Symmetry
y



All (C) rights are deserved to Dr.Hiroshi TANAKA

Asymmetry



7.88 c/min = 0.824 rad/s

JC

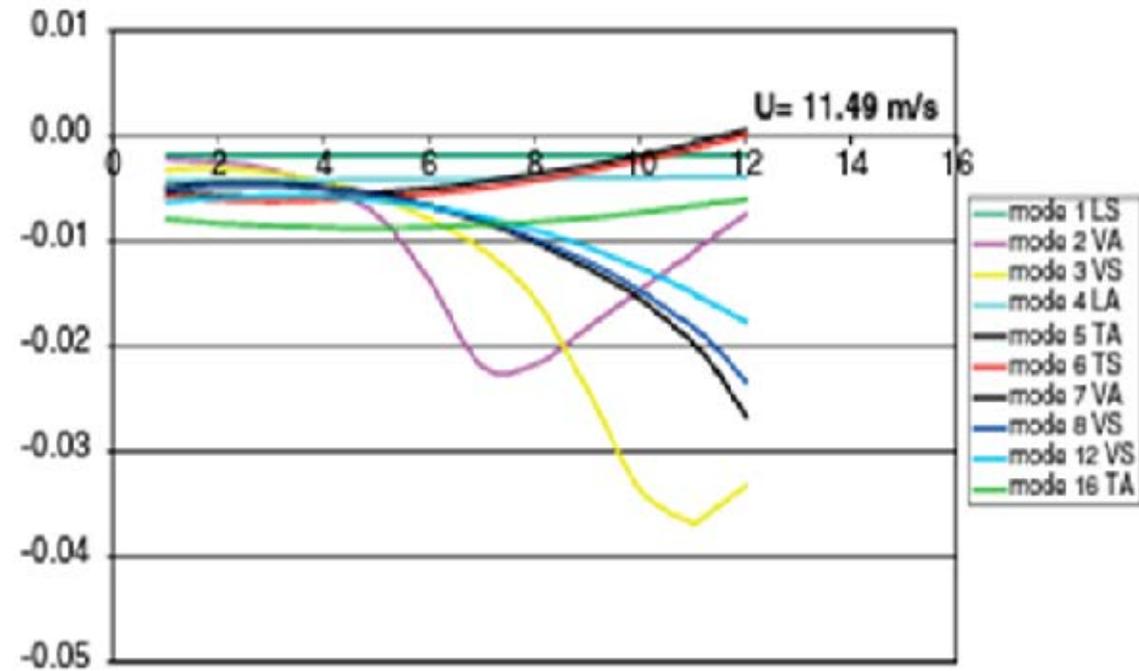


Figure Evolution of α in comparison with U using 10 modes.

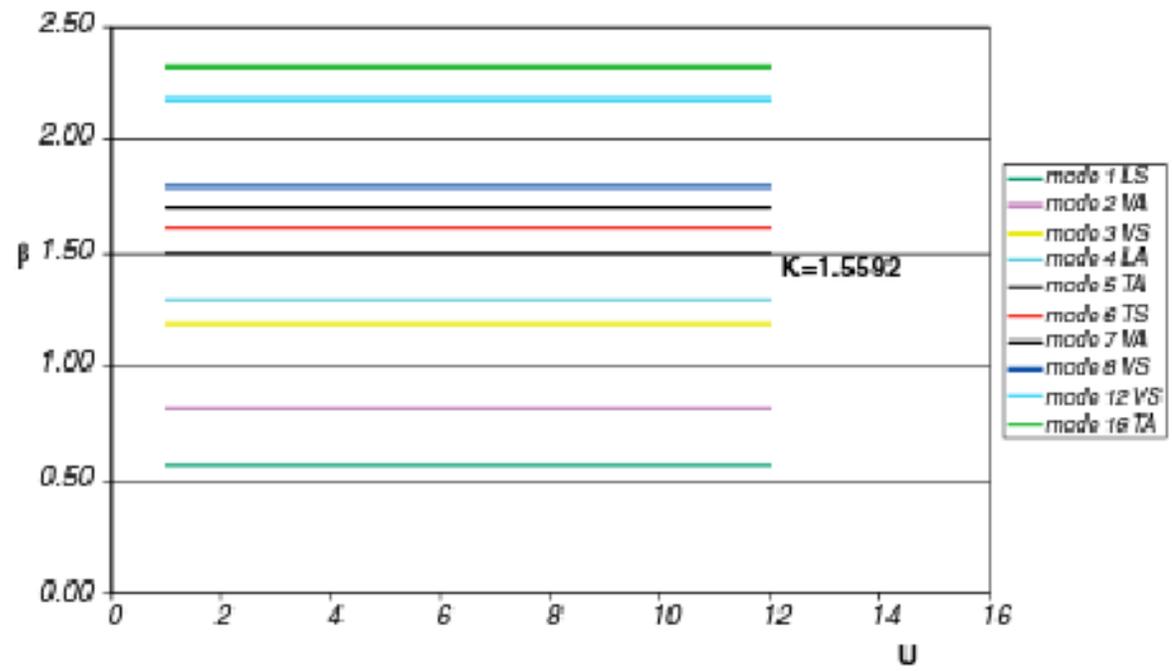


Figure Evolution of β in comparison with U using 10 modes.

Comparison between analysis and measurement on Original Tacoma Bridge

Analyses	U(m/s)
Jurado, 2modes $\xi = 0.00318$	11.49
Jurado, 10modes $\xi = 0.00318$	11.49
Scanlan torsional flutter $\xi = 0.003$	7.60
Scanlan torsional flutter $\xi = 0.010$	10.23
Farquharson real collapse	18.77

Flutter Solution by Prof. Scanlan

- *Single-degree-of-freedom torsional flutter*

$$I [\ddot{\alpha} + 2\zeta_n \omega_n \dot{\alpha} + \omega_n^2 \alpha] = F(\alpha, \dot{\alpha}),$$

$$F(\alpha, \dot{\alpha}) = A_2 \dot{\alpha} + A_1 \alpha,$$

Non-dimensional Form:

$$F(\alpha, \dot{\alpha}) = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B^2) [KA \zeta (B\dot{\alpha}/U) + K^2 A \zeta \alpha],$$

Flutter Derivatives by Scanlan

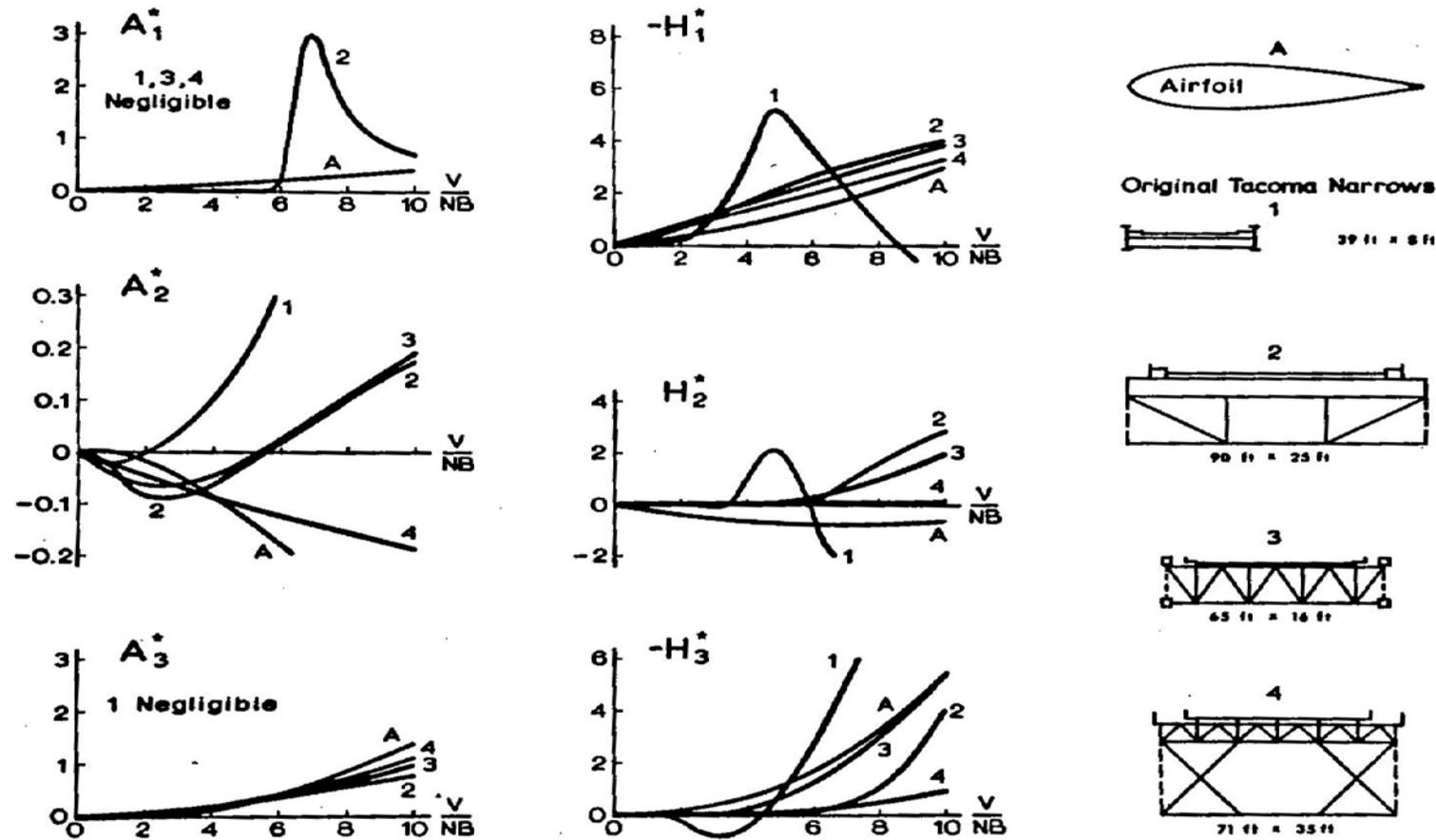
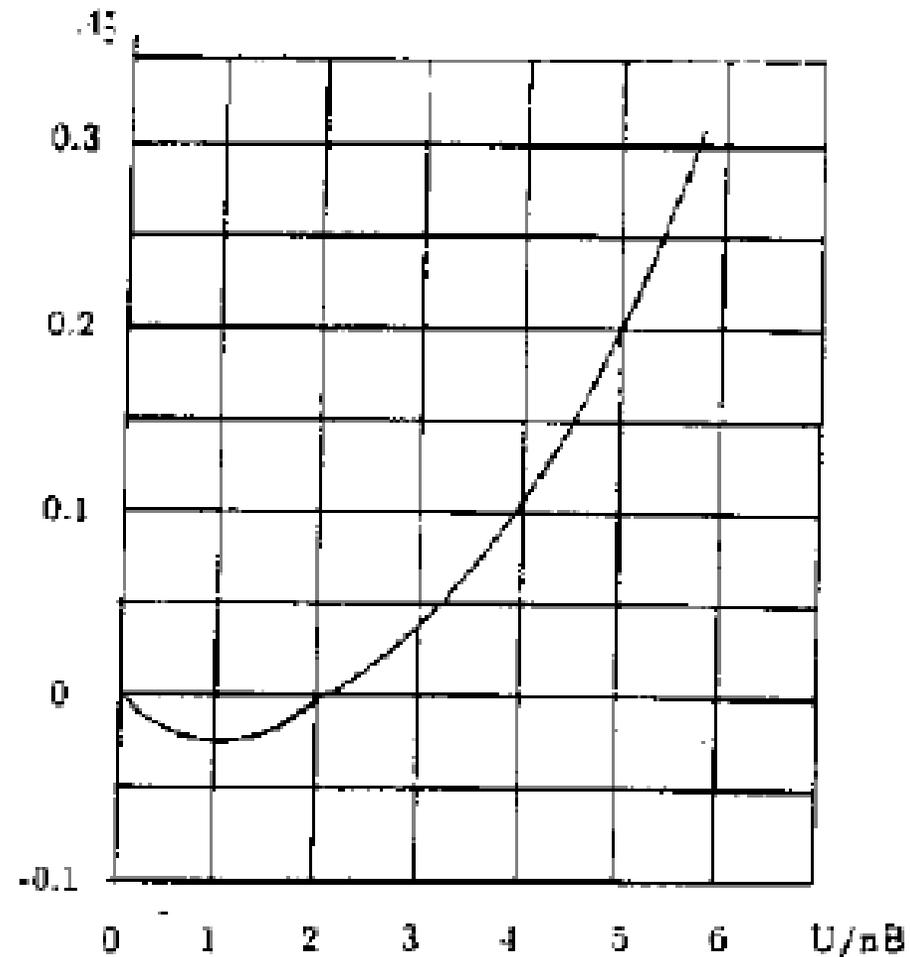
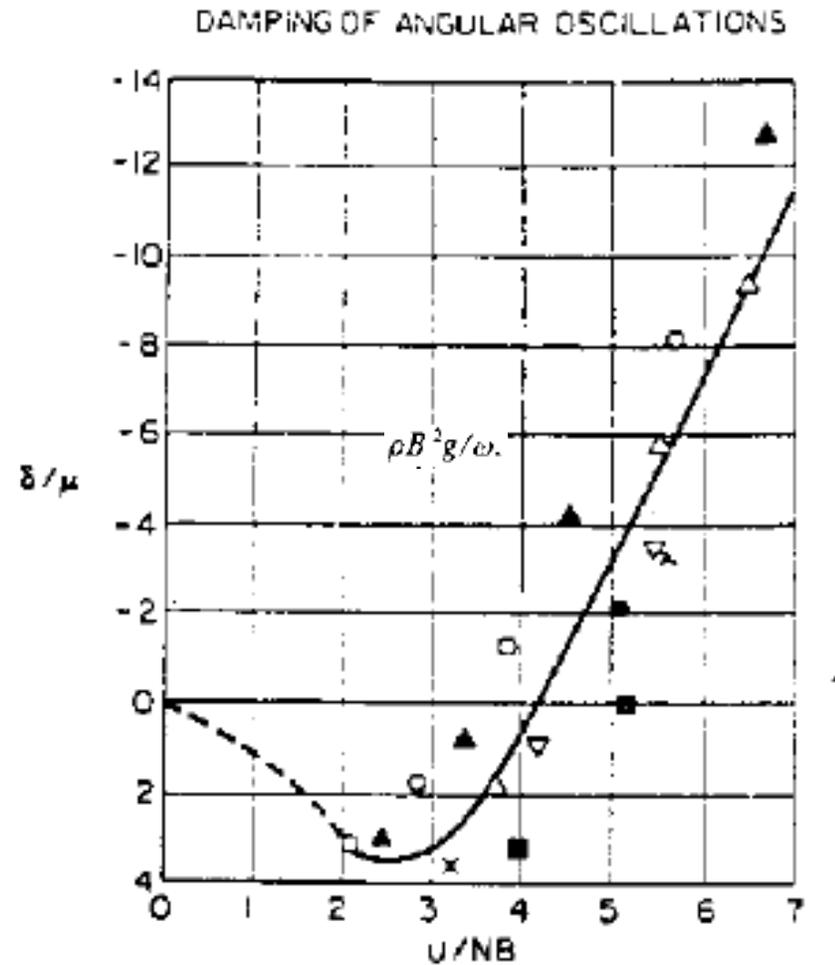


FIGURE 3.2

Flutter derivatives A_2^*



Karman & Dunn

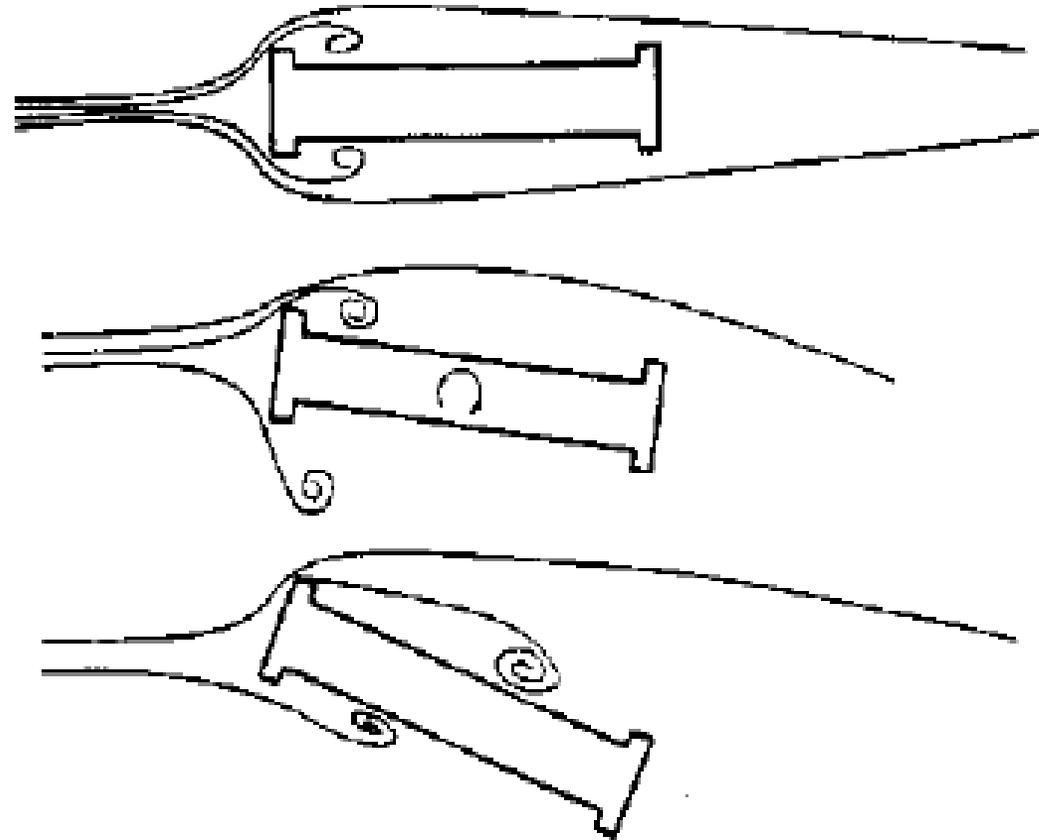


μ : Mass Ratio $\rho B^2 g / \omega$ Ω : weight/foot

All (C) rights are reserved to Dr.Hiroshi TANAKA

JC

Vortex Pattern over Rotating Deck Section drawn by Scanlan



JC

All (C) rights are deserved to Dr.Hiroshi TANAKA

Dimension of Tacoma Narrows Bridge

$$m = 4.249 \text{ t/m}$$

$$r \text{ (Rotation Radius): } 4.573 \text{ m}$$

$$g \text{ (Gravity) } 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$I \text{ (Polar moment) } 178 \text{ tm}^2/\text{m}$$

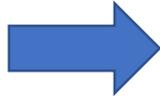
$$\rho \text{ (Air density) } 0.00123 \text{ t/m}^3$$

$$B = 11.89 \text{ m}$$

$$(A^*)_{\text{crit}} = 2I \zeta_a / \rho B^4.$$

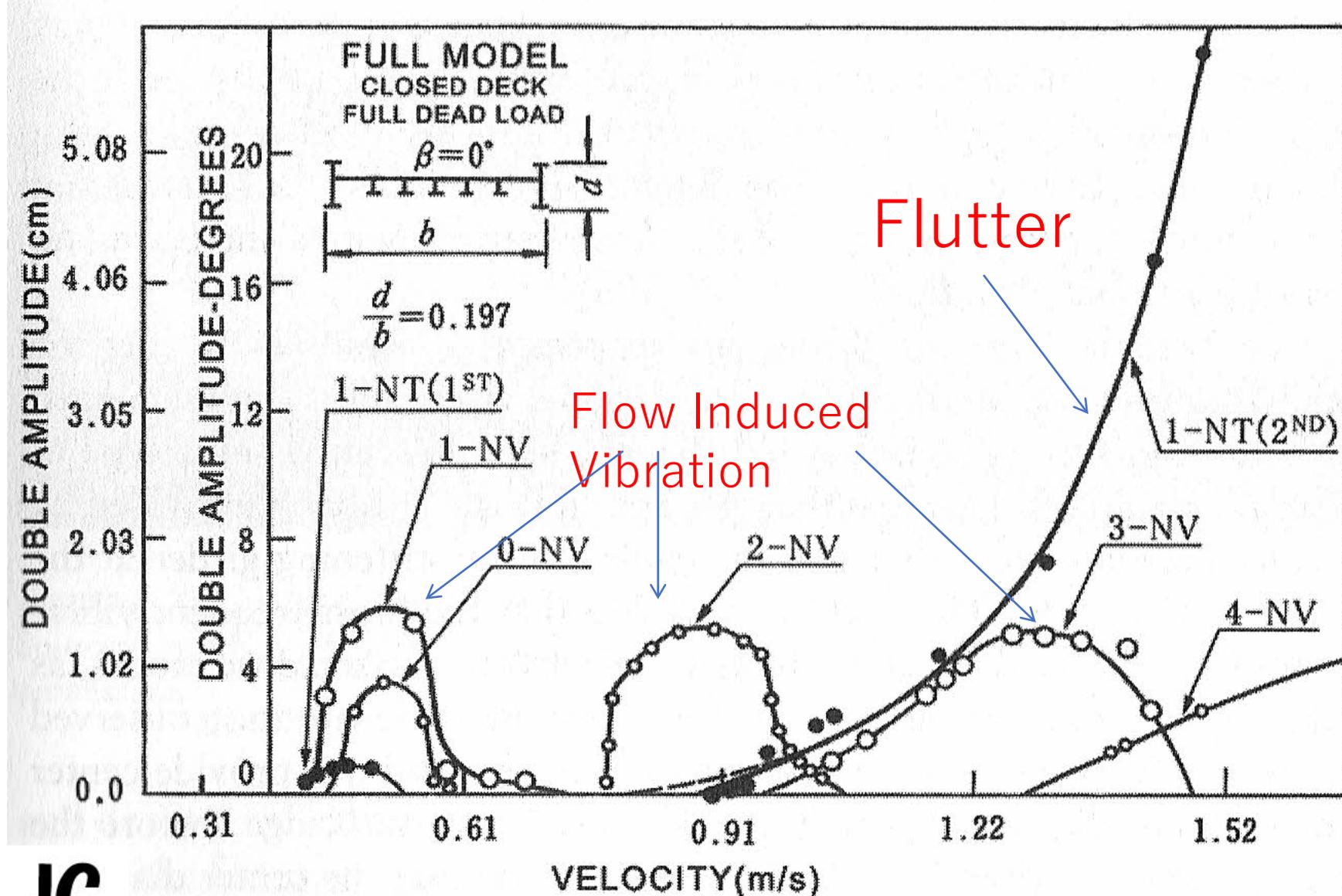
$$14.48 \zeta_a.$$

OTN flutter conditions as a function of Mechanical damping

	ζ_n	A_2^*	U/nB	Proto Type Velocity U_{cr} (m/s)
	0.003	0.043	3.20	7.6
	0.005	0.072	3.50	8.3
	0.010	0.145	4.30	10.2
	0.015	0.217	5.15	12.2
	0.020	0.290	5.75	30.6

JC

Results of Wind Tunnel Tests of Original Tacoma Bridge



JC

The results of wind tunnel tests

- !-NT(2nd) $U_{cr} = 0.99 \text{ m/s} \times \sqrt{50}$
 $= 7.0 \text{ m/s} \dots\dots$

Proto - Type

- $f_{\text{model}} = 1.44 \text{ Hz}$
 $f_{\text{proto-type}} = 1.44 / \sqrt{50}$
 $= 0.20 \text{ Hz} \dots\dots$ **The same value**
of observation

- $2.20 \text{ m/s} \times \sqrt{50} = 15.6 \text{ m/s}$

Original Tacoma Bridge was collapsed at ■.

Prof. Scanlan's Conclusion

- The cause of the collapse of original Tacoma Narrow Bridge was flutter.
- Prof.R.H.Scalan made clear it by using aerodynamic theory.
- Flutter is destructive phenomena, therefore we must check that it will not occur below wind design speed.

1940年11月7日 0.60 周期/S(撓み振動) 風速: 18.7m/s
→ 0.23周期/s (ねじれ振動) 落橋に至る

"On the morning of
November 7th the frequency
was 36 cycles per minute
with the wind blowing
at 42 miles per hour."

川田忠樹氏など多数：センターステイ破壊説



Figure 5-6. Role of the center diagonal stays.
Source: Courtesy of Tadaki Kawada.

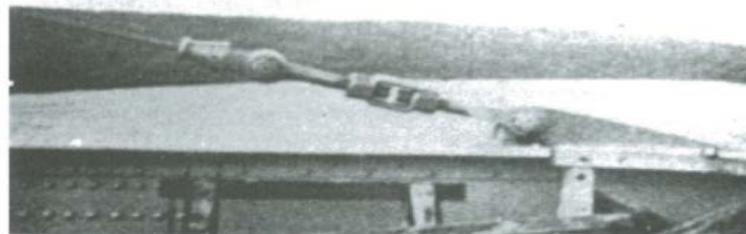
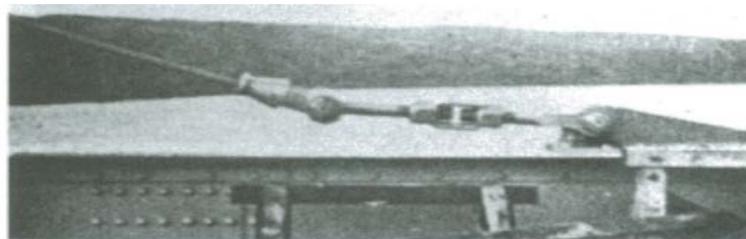


Figure 5-7. Center diagonal stays just before the collapse.
Source: University of Washington Libraries, Special Collections, negative UW26371, with permission.

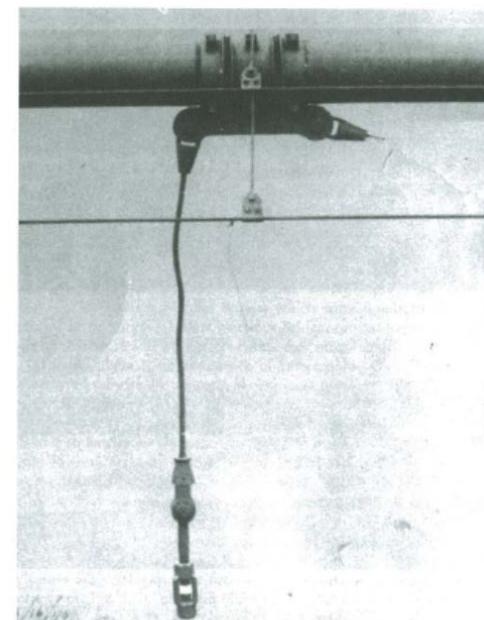


Figure 5-8. Center diagonal stays after the collapse.
Source: University of Washington Libraries, Special Collections, with permission.

【無断複製・転載止】 (C) All Rights are Reserved to Hiroshi TANAKA

JC

構造系変化派

川田忠樹氏以下多数の見解

- センターダイヤゴナルステイが破断したため、撓みモードから、ねじれモードに変化した。
- 著名な橋梁設計家のスタインマン氏が初めて提唱した意見である。彼の非難の矛先は、彼のライバルのモイセイエフ氏であった。モイセイエフ氏は、タコマ橋の設計者で時めいていた。
- モイセイエフ氏は、この事件後三年で失意でか？早死にした。

松本勝先生：風速変動と異種空力現象干渉論



流体力変化派

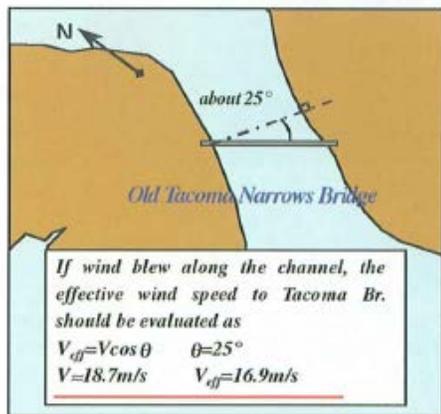


図-1 タコマ橋の橋軸方向

Ref) 片山技報_22

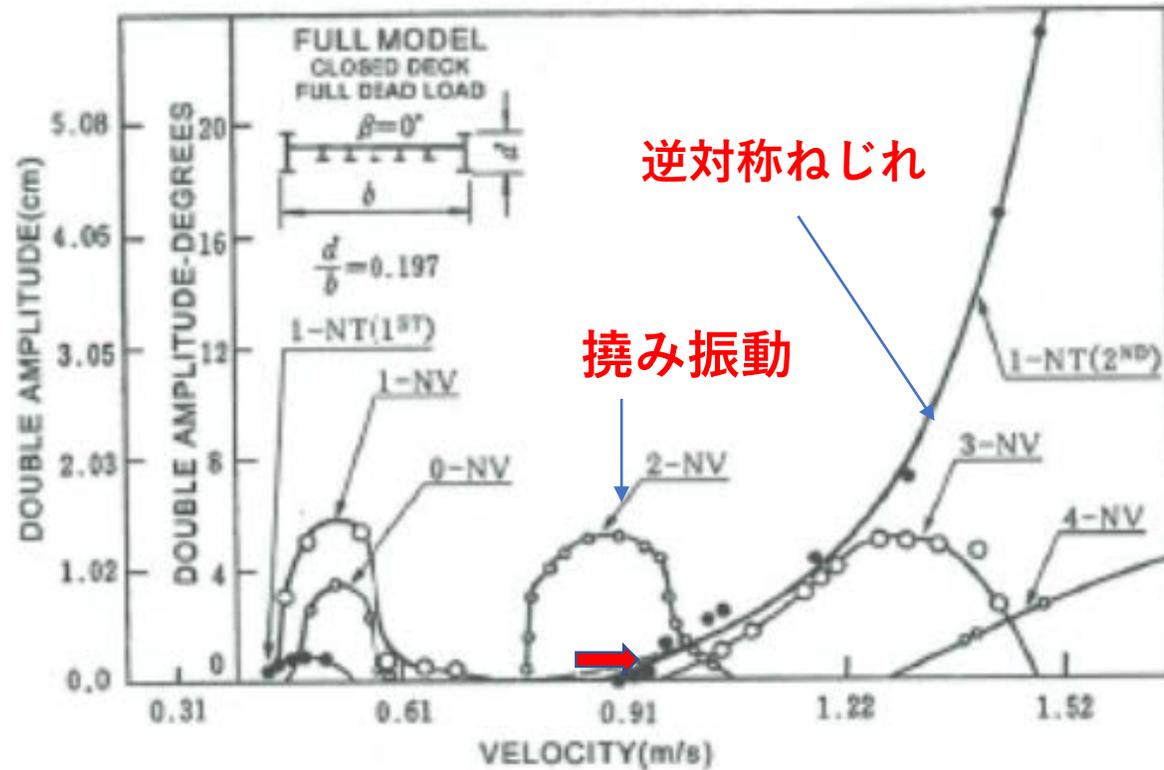


Figure 5-5. Wind speeds vs. vibration in wind tunnel testing of the full-span model. 0-NV, vertical bending vibration with no node; 1-NT, 1-node torsional vibration; 1-NV, 1-node vertical bending vibration; 2-NV, 2-node vertical bending vibration; 3-NV, 3-node vertical bending vibration; 4-NV, 4-node vertical bending vibration.

Source: University of Washington Libraries, Special Collections, with permission.

【無断複製・転載止】 (C) All Rights are Reserved to Hiroshi TANAKA

JC

京大名誉教授松本勝氏は風速変化と推察

- 片山技報に詳しいが、風洞試験と整合させると、風速が急に高くなったと推察した。このため、フラッターと渦励振の異なる空力現象が干渉するという複雑な空力現象が生じたかもしれない（片山技報参照）と興味ある空力振動論を展開している。
- ただし、現場の風速計については、不調であったため正確な風速記録に確信が持てないことが原因追及を困難にしているとしている。
- 残念ながら、正しい風速計は、現場からかなり離れていたため論拠とできなくなったことから、本橋落橋の謎追及を困難にしているようだ。

田中 洋：側径間機能不全説(非連動)



構造系変化派

PHOTO :
Y.C.FUNG/AEROELASTICITY



伸縮装置が壊れている! →

$C \cdot L$ ($C = Hw/EI$)が、
5以上なら、最低モードは、ね
じれ1次 (伊藤学：鋼橋Ⅲ) タコ
マ橋は、13.4である。

【無断複製・転載止】
(C) All Rights are
Reserved to Hiroshi
TANAKA

JC

田中洋は側径間の機能不全が原因と推察

- 約2時間半の撓み振動において、中央径間と側径間が調和振動していたが、次第に構造疲労（例えば、伸縮装置がかみ合わなくなったり、側径間のケーブルバンドに滑りが生じたり）して、**映画に見られるように、中央径間と側径間がバラバラなモードに変化し、機能的には単径間吊り橋に変化してしまった。**
- 東大名誉教授の伊藤学氏の著書である鋼橋III（P.428）によれば、**スパンの長い単径間吊橋では、映画に見られるスパン中央に節点を有する逆対称型固有振動が最低の振動数を与える**と主張している。 Messina 海峡大橋も同様に逆対称固有振動が最低振動数である。

Conclusion

- タコマ橋の完全な落橋原因は、いまだ完全ではありません。
- 田中の説明は、このHPで初めて公に公開するものです。
まだまだ諸説が考えられそうです。
- 正確な風速が現場で観測されていなかったので、永遠の謎になりそうです。

ありがとうございました!

Thank You Very Much !!