ながれ **21**（2002） 269 − 273.

〔総合講座ながれより〕

長大橋の風による振動とその制振対策

Aerodynamic Response of Large-Span Bridges and Its Stabilizations

*石川島播磨重工業(株)技術開発本部・総合開発センター　松　田　一　俊†
Kazutoshi MATSUDA

1　はじめに

現在，長大橋と呼ばれる中央支間が比較的長い橋梁は，風による振動などの問題点がないかどうか，風洞試験によってその耐風安定性を確認することが一般的に行われている．しかし，風洞試験による耐風安定性の確認が実際に行われるようになるまでには，風による多くの橋梁被害を経験しなければならなかった．これらのうち，橋梁の耐風設計に大きな影響を与えた代表的な被害は，次に挙げる2つである．

まず，静的な風圧である風荷重の重要性が広く認識されるようになった代表的な被害は，1879年スコットランドにおける全長3 km，85径間の錬鉄製ラティストラス鉄道橋であるテイ橋の落橋である．落橋したのは，85径間のうち13径間連続トラス部であり，この落橋の原因には諸説があるが，設計段階で風荷重の見積もりが不十分であったことは間違いないと言われている．

残念ながら，風の静的作用である風荷重のみを設計に考慮すれば橋梁の風に対する検討は十分であるという考え方は，**図1**に示す1940年米国シアトル近郊で起こったタコマ・ナロウズ吊橋の落橋事故によって覆された．当時853 mの世界第3位の中央径間長を有する本橋は，風速約60 m/sに相当する風荷重に耐えられるように設計されていたが，完成後4ヶ月後，わずか19 m/sといわれる風速に達したとき，激しいねじれ振動によって落橋した．この事故を契機に，風の静的作用である風荷重だけでなく，風の動的作用の重要性も認識されることになった．

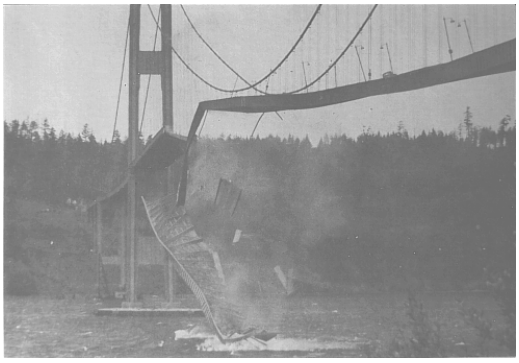


図1　タコマ橋の落橋 [1)]

このような橋梁被害を経て，橋梁の耐風設計技術が向上，確立されてきた．ここでは，長大橋を対象に，風によって発生する振動現象，耐風設計の概要，振動現象に対する制振対策について簡単に述べる．また，具体的な制振対策の事例として，明石海峡大橋と白鳥大橋の2橋に対して施された制振対策を取り上げ，その概要についても述べる．

2　風によって生じる振動現象 [2)]

タコマ・ナロウズ吊橋は，風の動的作用に起因したねじれ振動で落橋したが，風による振動現象の種類はこればかりではない．ここでは文献2)の定義に基づいて，風によって主として橋桁に生じる振動現象について述べる．

・渦励振

比較的低風速の限られた風速領域で発現する

* 〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1番地
† E-mail: kazutoshi_matsuda@ihi.co.jp

規則性の強い振動．風琴振動ともいう．

・ガスト応答

特定の発現領域をもたない，自然風の風速変動に起因する不規則性の強い振動をいう．バフェッティングとも呼ばれる．

・発散振動

ある風速に達すると振幅が急激に大きくなる振動をいう．

・ギャロッピング

気流に直角なたわみ 1 自由度の発散振動をいう．橋桁では鉛直たわみの振動となる．

・フラッター

ねじれ 1 自由度あるいは鉛直たわみとねじれ 2 自由度連成の発散振動をいう．

3 橋梁の耐風設計

基本的に風によって長大橋には，前章に示したような振動現象が発生する可能性がある．これらの振動現象に対する安全性を確保し，橋梁の構造諸元や橋桁・主塔の断面形状を決定することが（動的）耐風設計である．一方，（静的）耐風設計は，道路橋示方書で規定されている風荷重を考慮した静的設計である．これは橋軸直角水平方向に吹く風による抗力を基本として，これに風速変動の効果を考慮した風荷重を用いた設計である．橋梁架設周辺の風環境や橋梁の構造特性によっては，抗力だけでなく，揚力や空力モーメントも静的耐風設計に適切に配慮することが必要である．

支間長が 200 m までの道路橋については，道路橋耐風設計便覧[2] に従って耐風設計を実施することになっている．また，支間長が 300 m 程度までの道路橋についても，内容を吟味した上でこの便覧を準用してもよいと便覧に規定されている．支間長がさらに長い長大橋の耐風設計は，主として風洞試験によって実施されることが多い．実橋の縮尺模型を風洞内に設置して風による応答や作用空気力を計測することによって，実橋の応答を推測する．推測する方法には大別して 2 種類ある．一つは，**図 2** に示すように実橋の形状，構造特性および振動特性を相似則に基づいて縮尺した

図 2 3 次元弾性模型による風洞試験の例（広島県道路公社ご提供）

3 次元弾性模型に風を作用させることによって，直接的に模型の振動応答を計測する方法である．他方は，2 次元剛体模型を用いて橋桁に作用する静的空気力（三分力）および動的空気力（非定常空気力）を風洞試験[3] によって計測し，それらを実橋 3 次元解析モデルによるフラッター解析，ガスト応答解析プログラム等に外力として入力することよって，間接的に実橋の振動応答を推測する方法である．最近では，CFD（Computational Fluid Dynamics）によって静的および動的空気力を予測する試み[4] も活発に行われるようになってきた．

4 制振対策の方法

構造物の制振対策については，これまで多くの論文[例えば5–13] において，詳細な記述がなされている．ここでは，紙面の都合上制振対策方法の大まかな分類のみ述べることにし，詳細についてはそれらの論文を参照されたい．

空気力による加振力および制振装置による振動抑制力が作用する構造物の運動方程式は一般的に次式で表現される．

$$M\ddot{\boldsymbol{x}} + C\dot{\boldsymbol{x}} + K\boldsymbol{x} = \boldsymbol{F}_{\mathrm{w}} - \boldsymbol{F}_{\mathrm{c}}$$

ここで，$\boldsymbol{x}$ は振動変位，M，C，K はそれぞれ質量，減衰，剛性に関する項，$\boldsymbol{F}_{\mathrm{w}}$ は空気力による加振力，$\boldsymbol{F}_{\mathrm{c}}$ は制振装置による振動抑制力である．

したがって，この式から構造物の制振対策方法は，次の 5 つに分類できる．すなわち，

①質量を付加する方法
②構造減衰を付加する方法
③剛性を付加する方法
④空気力による加振力を低減させる方法
⑤制振装置による抑制力を付加する方法

である．これらのうち，④のみが空気力学的制振対策と言われる方法であり，耐風部材を構造物に添加することにより，断面まわりの風の流れをコントロールして，空気力による加振力を低減させるものである．箱桁断面の両端部のフェアリングや断面中央部に設置される鉛直スタビライザー等がこれに該当する．耐風部材は，橋桁の断面形状や制振対象となる振動の種類によって選択され，風洞試験によってその有効性を確認する．一方，①～③および⑤は構造力学的制振対策に分類され，同調系質量ダンパ TMD（Tuned Mass Damper）やアクティブ質量ダンパ AMD（Active Mass Damper）が代表的方法である．

5　制振対策の事例

ここでは，橋桁および主塔に対してそれぞれ制振対策が施された例として，明石海峡大橋補剛トラスの空気力学的制振対策，白鳥大橋独立時主塔（3P）の構造力学的制振対策の 2 つについて述べることにする．

5.1　明石海峡大橋補剛トラスの空気力学的制振対策

明石海峡大橋は，本州四国連絡橋神戸・鳴門ルートの本州と淡路島を結ぶ中央支間長 1991 m を有する世界最長の吊橋である．長年に渡って数多くの風洞試験等による技術的検討がなされた．その過程でいくつかの制振対策が必要であることが判明した．最終的には，本州四国連絡橋公団が行った模型全長が約 40 m となる縮尺 1/100 の 3 次元弾性模型による風洞試験[14] によって本橋の耐風安定性の確認がなされた．補剛桁に対して施された空気力学的制振対策は次のようなものである．

まず，道路面の中央分離帯および路肩については，耐風安定性を向上させるため，オープングレーチング構造（**図 3**）としている．さらに，耐風安定化対策として高さ 215 cm の鉛直スタビライザー（**図 4**）と呼ばれる板を中央分離帯直下に設置することによりフラッター照査風速 78 m/s を満足させた．なお，この鉛直スタビライザーの設置範囲は，上述の縮尺 1/100 の 3 次元弾性模型風洞試験結果から，側径間については鉛直スタビライザーがなくても耐風安定性が確保できることが確認できたので，中央径間のみの設置となった．

図 3　路肩のオープングレーチング
（本州四国連絡橋公団ご提供）

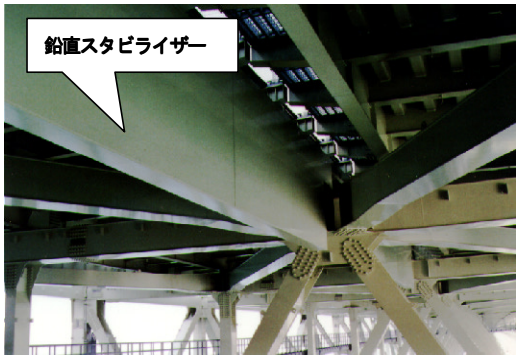


図 4　鉛直スタビライザー
（本州四国連絡橋公団ご提供）

5.2　白鳥大橋主塔（3P）独立時の構造力学的制振対策

白鳥大橋は，室蘭港の湾口部に位置する中央支間 720 m の吊橋である．事前の風洞試験の結果，主塔独立状態の架設段階において，渦励振が発現することが予測された．そのため，塔頂加速

度を 10 gal 程度に低減して建設作業員の作業環境を確保することが必要となり，アクティブ制振装置[15] が主塔上に設置された．**図 5** に本主塔および制振装置の設置状況を示す．また，制振装置の写真および機構をそれぞれ**図 6** および**図 7** に示す．別途，実施された本主塔の風に対する動態観測[16] の結果，渦励振によって生じた最大約 15 gal の塔頂加速度が，制振装置を作動させることにより，約 1/2～1/3 に低減させることができることがわかった．

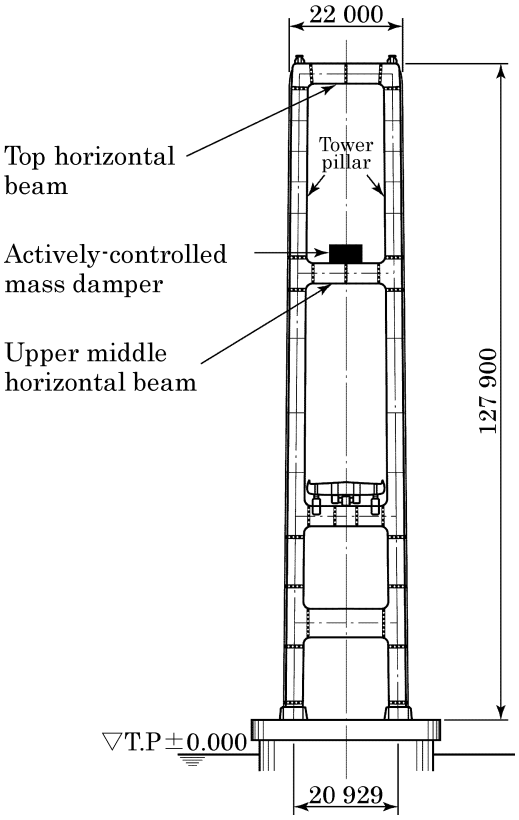


図 5　白鳥大橋主塔(3P)独立状態および制振装置設置状況

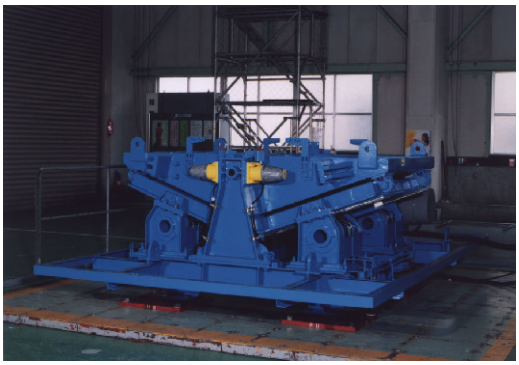
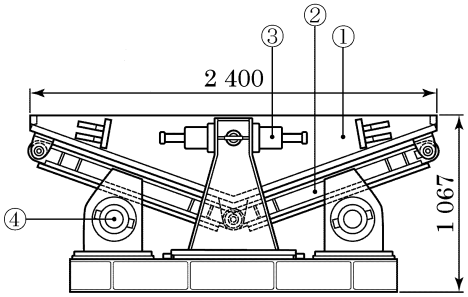
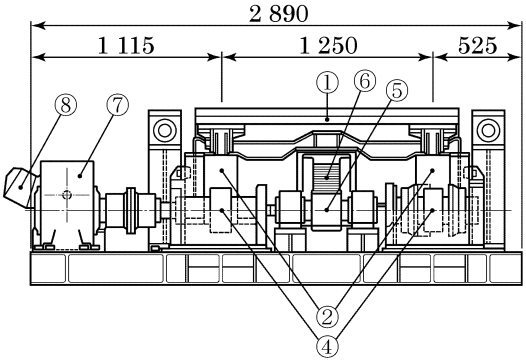


図 6　白鳥大橋主塔(3P)制振装置





Weight of moving mass	9.0 t
Maximum stroke	±0.3 m
Motor output	AC 45 kW
Overall weight	15 t

① Weight
② Rail
} Moving mass
③ Buffer
④ Roller
⑤ Pinion
⑥ Rack
⑦ Reduction gear
⑧ Motor

図 7　白鳥大橋主塔(3P)制振装置の機構

6 まとめ

長大橋を対象に，風による振動現象，耐風設計・制振対策の概要，制振対策の事例について簡単に述べた．風の影響を受ける構造物は，橋梁だけでなく高層ビルや高層マンション，さらには，スキー場のゴンドラやリフト，ロープウェイなど数多く存在するが，これらに対する制振対策も実施例が多い．

今後，構造物の設計は性能照査型設計に移行する傾向にあることから，制振対策のメンテナンスコストも勘案したライフサイクルコストに基づく設計の中で，如何に適切な制振対策を対象構造物に反映させていくかという設計技術力がますます重要視されるであろう．

引 用 文 献

1）http://maclab.alfred.edu/students/harttm/default.html

2）社団法人日本道路協会：道路橋耐風設計便覧,（1991）.

3）例えば K. Matsuda, K. R. Cooper, H. Tanaka, M. Tokushige & T. Iwasaki : An investigation of Reynolds number effects on the steady and unsteady aerodynamic forces on a 1:10 scale bridge deck section model, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **89**, Issues 7-8,（2001）619–632.

4）例えば 黒田眞一：2 方程式乱流モデルを用いた長大橋非定常空気力の数値計算, 土木学会論文集 **654**（2000）377–387.

5）岡内 功, 伊藤 学, 宮田利雄：耐風構造, 丸善（1977）323–335.

6）社団法人日本鋼構造協会：構造物の耐風工学,（東京電機大学出版局, 1997）.

7）土木学会：土木技術者のための振動便覧,（1985）347–404.

8）久保喜延：長大橋梁の桁および塔の風による振動とその制御, 第 2 回振動制御コロキウム Part A（1993）1–20.

9）藤野陽三：構造物の制振対策（土木分野）, 日本風工学会誌 **44**（1990）53–69.

10）山口宏樹：構造振動・制御,（共立出版, 1996）109–190.

11）山口宏樹：土木構造物の制御, 日本機械学会誌 **103**（2000）34–38.

12）辻 松雄：構造力学的耐風制振対策, 日本風工学会誌 **20**（1984）81–101.

13）谷田宏次：吊形式主塔の架設時制振対策―アクティブ制振装置の設計ガイドライン―, 第 3 回振動制御コロキウム Part A（1995）173–184.

14）勝地 弘, 宮田利雄, 北川 信, 佐藤弘史, 樋上琇一：明石海峡大橋大型風洞試験での連成フラッター特性に関する考察, 第 13 回風工学シンポジウム論文集（1994）383–388.

15）小池裕二, 谷田宏次, 牟田口勝生, 今関正典, 上島秀作：ハイブリッド式制振装置による白鳥大橋主塔の制振対策, 第 38 回自動制御連合講演会 特別セッション「土木建築分野の制御技術」（1995）481–484.

16）高橋守人, 西本 聡, 橋本 幸, 上島秀作：白鳥大橋主塔の動態観測, 第 13 回風工学シンポジウム論文集（1994）293–298.