Ⅰ－14　白鳥大橋補剛桁架設時の耐風安定性について

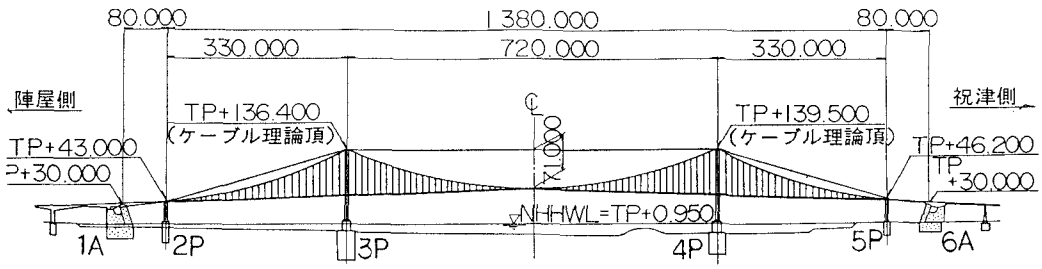
北海道開発局　正会員　斎藤　嘉之
〃　　高橋　守人
〃　　米田　義弘

１．はじめに

白鳥大橋は室蘭港湾口部を連結する全長１，３８０ｍ、中央径間７２０ｍの３径間２ヒンジ補剛吊橋である（図－１）。

本橋の補剛桁（箱桁）の架設工法は、工期・経済性・施工条件等を考慮して中央径間及び側径間共、桁ブロックを直下から引上げ、逐次架設していく工法（直下吊り工法）を選定している。直下吊り工法には、①逐次ブロック間を剛結していく工法（逐次剛結工法）と、②ブロック間を鉛直面の曲げモーメントを伝達しないピン連結にし、あるブロック数まで架設すると、後追いで剛結していく工法（オールヒンジ架設工法）がある。本橋は、国内で初めて後者のヒンジ工法を採用する計画であり、補剛桁架設時の耐風安定性を確認するため、架設系全橋模型の風洞試験を行ったのでその概要を報告する。

架設系耐風安定性検討フローを図－２に示した。



図－１　白鳥大橋側面図

２．検討架設形状の選定

現在、桁の架設は次に示すような順序で行うことが計画されている。（図－３　参照）

１）中央径間

①中央の約５５％の区間については、吊橋センターから塔に向けて架設を行う。

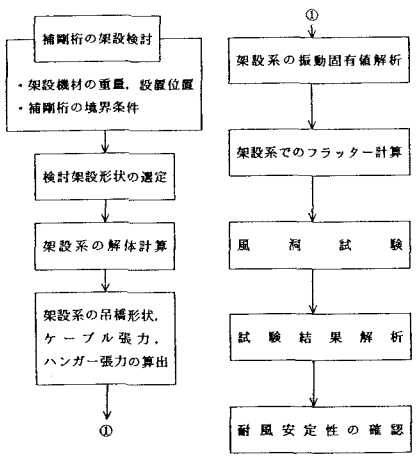
②残りの部分は、主塔から吊橋センターに向けて架設を行う。

２）側径間

①側塔側から約６５％の区間について、側塔から主塔に向けて架設を行う。

②残りの約３５％の部分は、主塔から側塔に向けて架設を行う。

固有値解析及び風洞試験を行う際、一番クリティカ



図－２　架設系耐風安定性検討フロー

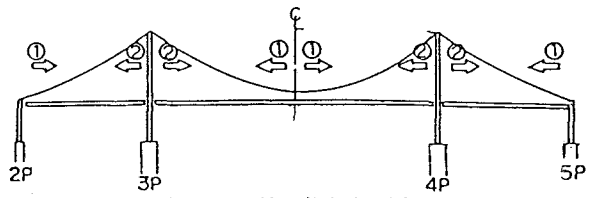
Aerodynamic Stability in Installing The Stiffening Girder of Hakucho Ohashi
by Yoshiyuki SAITO, Morito TAKAHASHI ,Yoshihiro YONETA

ルな架設段階の解析モデルや模型を選定・製作する必要がある。本橋では、風洞試験の都合上架設段階を３段階に分け、以下の理由により、中央径間の桁架設段階が２９％、５５％、９４％の３ステップについて解析及び試験を行った（図－４）。

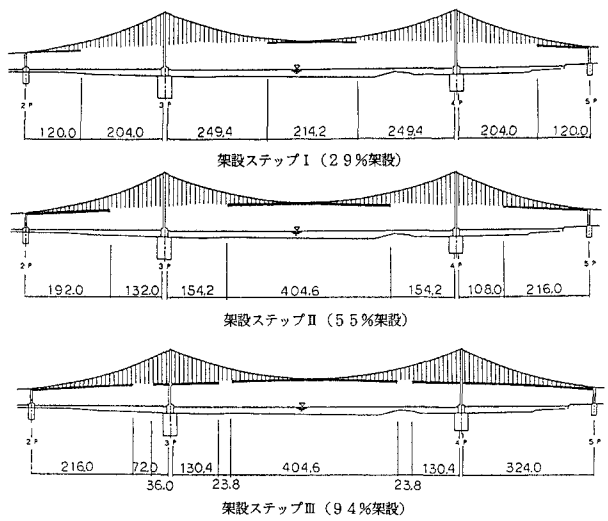
1）一般に、中央径間中央から桁を架設する方法を取るとき、最も耐風安定性が悪い状態が中央径間の桁架設段階６７％（中央径間の２／３）の時にあると言われている。

2）架設状況を考えた時、中央径間において中央から主塔方向への架設が終了し、その後主塔側から中央方向へ架設が始まる転換期にあたるのは５５％段階であり、架設上クリティカルな形状である。

3）３ステップ選定することを考えると、５５％の前後にあたる、中央径間の１／３桁架設段階と、中央径間閉合直前を行った方が全体を網羅できる。



図－３　補剛桁架設順序



図－４　架設ステップ

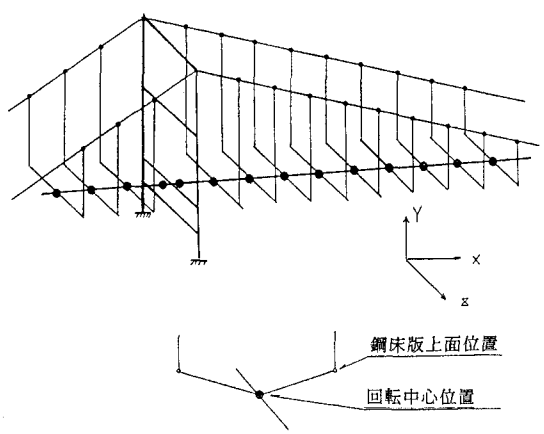
３．振動特性の検討

吊橋の振動性状について水平振動と鉛直振動を問題とする場合は平面解析で十分であるが、特に補剛桁の耐風安定性を検討する場合には、鉛直方向とねじれの振動性状が必要となる。したがって、解析モデルとして図－５に示すようなフィッシュ・ボーンタイプの骨組構造とし、実橋と模型について立体固有値解析を行った。各部のモデル化については以下の通りである。

・主塔及び側塔：塔柱と水平材からなるラーメン主塔としてモデル化する。

・主ケーブル：両ケーブルをモデル化する。

・ハンガー：２格点分のハンガーを１本にまとめてモデル化する。ハンガー定着位置は鋼床版上面位置



図－５　立体固有値解析モデル

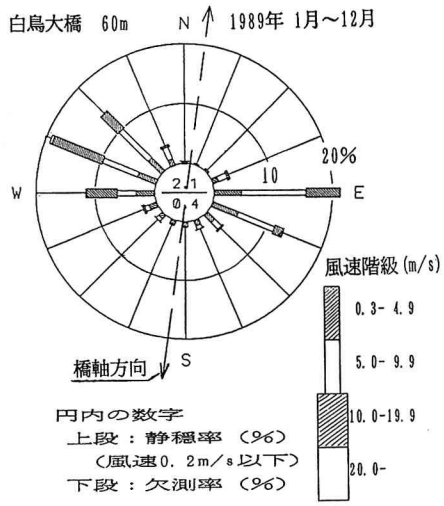
表－１　乱流特性現地観測結果

	乱れ強さ Iu (%)	乱れスケール Lu (m)	備考
西風	6 ～ 9	200 ～ 700	海風
東風	8 ～ 12	100 ～ 300	陸風

とする。

・補　剛　桁：フィッシュ・ボーンタイプとし、補剛桁及び横桁（ダイヤフラム）をモデル化する。補剛桁は、重心とせん断中心の距離が小さいことを考慮し、回転中心（重心とせん断中心の中間）に配置する。（図－５　参照）

・アンカレイジ及び基礎：固定支点とし、モデル化しない。

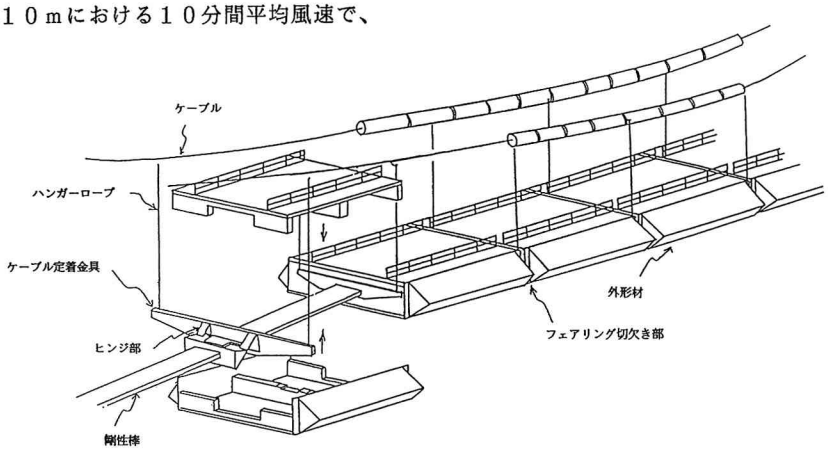


図－６　年間風配図

４．架橋地点の風の特性[1]

本橋の架橋地点において気象観測用鉄塔（高度６０ｍ）を設置し、昭和５６年より風観測を行っている。図－６に示すように、橋軸直角方向の風が卓越しており、ＷＮＷの風速１０．０～１９．９ｍ／ｓの出現率は全体の約１０％を占めている。

基本風速V_{10}は地上１０ｍにおける１０分間平均風速で、耐風設計の基本となる値である。室蘭地方気象台のデータと架橋地点データとの相関を求め、再現期間を１００年として、風速の鉛直分布の関係式より、V_{10}＝４１ｍ／ｓとした。なお、風速の鉛直分布のべき指数はα＝０．０９である。



図－７　架設系全橋模型概念図

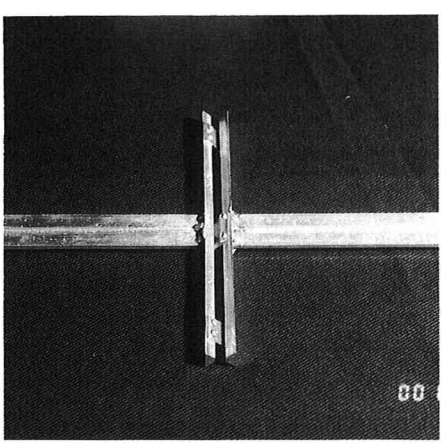
また、乱流特性についての現地観測結果を表－１に示す。

５．架設系全橋風洞試験

５．１　模　型

模型はブロック形式とし、実橋に相似な剛性を有する剛性棒と、実橋に相似な外形形状を有する外形材とから製作した。また、重量分布は、鉛製の付加調整ウェイトを取り付け実橋に相似になるようにし、縮尺１／１４５で１体制作した。模型概念図を図－７に示す。

ブロック間を結合するヒンジの模型化の際に、ピン連結を採用すると構造減衰がかなり増大することが予想されるため、写真－１に示すような、Ｘ型に板バネを組んだヒンジ模型を製作、使用した。



写真－１　ヒンジ部の模型化

5．2　試験条件

・試験要領：本州四国連絡橋公団風洞試験要領・同解説[2]による。

・迎　　角：吹き上げを正とする。

・照査風速：

1）基本風速

$V_{10} = V_{10}/\sqrt{2}$

$= 41/\sqrt{2}$

$= 29\,m/sec$

2）発散振動に対する照査風速

$V_{cr} = 29 \times 1.2 \times \nu_1 \times \nu_2$

$= 47\,m/sec$

$\nu_1 = 1.17$…構造物の高度（58m）による補正

$\nu_2 = 1.16$…構造物の水平長さによる補正

3）限定振動に対する照査風速

$V_D = 29 \times \nu_1 = 34\,m/sec$

写真－2　風洞試験状況

表－2　架設系全橋風洞試験ケース

架設ステップ	風向	気流	迎角	構造減衰
29%	橋軸直角方向	一様流	0°，±3°，±5°	δ=0.02
		乱流	0°	
55%	橋軸直角方向	一様流	0°，±3°，±5°	δ=0.02
		乱流	0°	
94%	橋軸直角方向	一様流	0°，±3°，+5°	δ=0.02
		乱流	0°	

5．3　試験方法

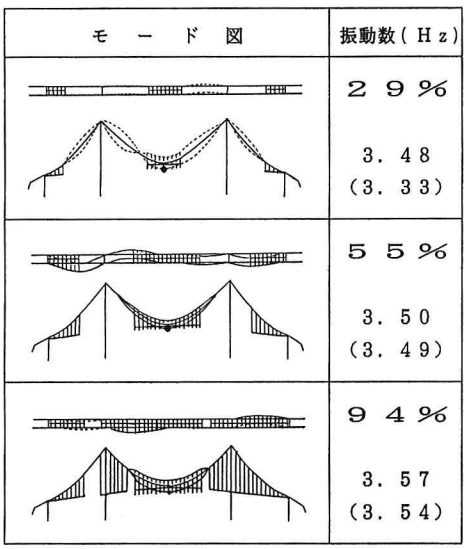
写真－2に示すように、大型汎用風洞の風路内に模型をセットして所定の風を吹かせ、模型に発生する振動幅と風速の関係を求めた（V－Aテスト）。試験において、傾斜角を有する一様流は、風洞吹出口に取り付けられた翼列板を一定角度に傾けることにより、また乱流は、翼列板をコンピュータ制御により不規則に動かすことによって（翼列ダンパー方式）再現した。

試験ケースを表－2に示す。また、表－1に乱流特性についての現地観測結果を示したが、西風と東風で特徴が異なっている。したがって、再現する乱流は強風時の風向で発現頻度の高い西風を基本とし、乱れ強度（Iu）9%、乱れスケール（Lu）700mとした。

5．4　試験結果

振動数・振動モード測定結果の一例として、各ステップにおけるねじれ対称1次の振動モード図および振動数の解析値との比較を図－8に示す。

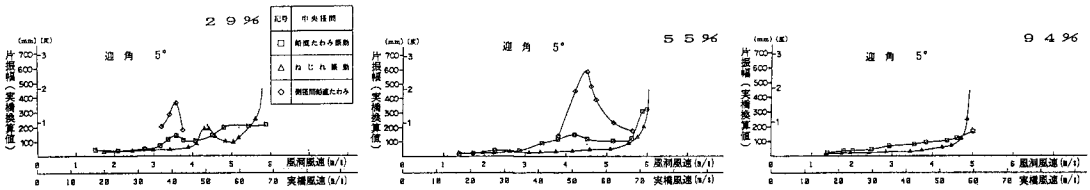
風洞試験結果の一例として、各ステップにおける一



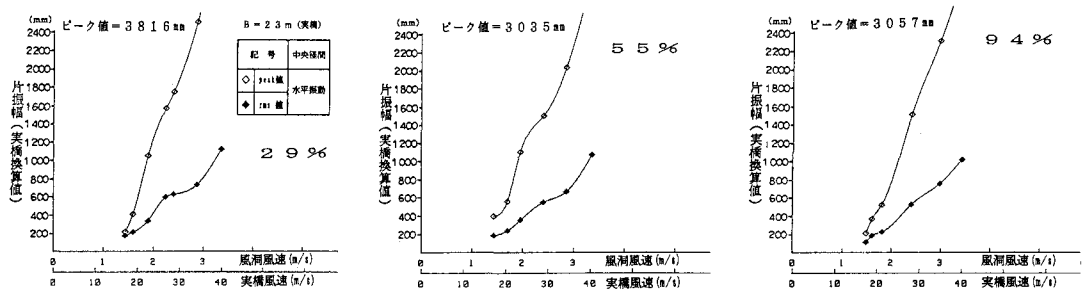
（　）：固有値解析値

図－8　ねじれ対称1次の振動モード図及び振動数の試験値と解析値との比較

様流試験での、迎角＋５°の時の補剛桁の風速と振幅の関係（Ｖ－Ａ曲線）を図－９に、乱流試験でのＶ－Ａ曲線を図－１０に示す。また、翼列ダンパー方式により再現した乱流の特性値を表－３に示した。



図－９　一様流試験での迎角＋５°の時の補剛桁風速－振幅曲線



図－１０　乱流試験での補剛桁風速－振幅曲線（水平振動）

６．耐風安定性の検討

風による振動は次の３つに大別される。

１）構造物が振動することによって励起される発散的な振動〔フラッター〕

風の中にある物体が運動すると、もともと運動系が持っていた減衰に加え、風速に比例した空気力による減衰も加わる。この付加された減衰が負（運動方向）の場合、風速が大きくなるにつれて運動系全体の減衰も負に変化していく。このような状況で、系に微小な運動が生じると、その振幅は時間と共に増大、発散し、構造物の破壊につながる。

２）渦による限定的な振動〔渦励振〕

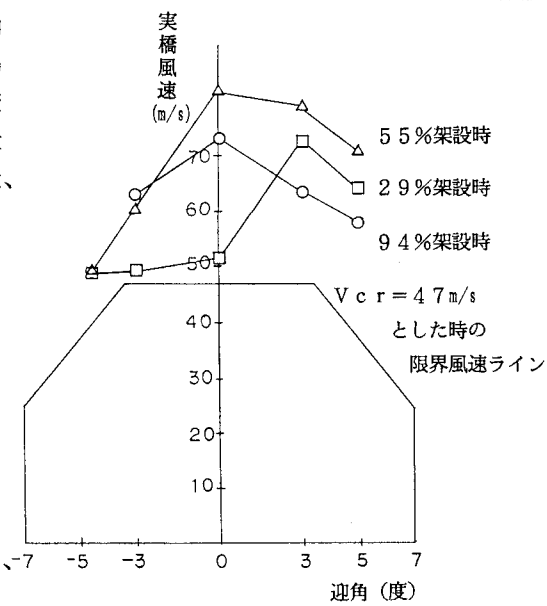
風の中に物体があると、その背後に発生する渦により、物体には周期的な力が交互に作用する。この渦の発生周期は、風速に比例し、ある風速において渦の発生周期と物体の固有周期が一致すると共振し、振幅の限られた振動が発生する。

３）風の乱れによる強制振動〔バフェティング〕

風の時間的、空間的乱れの中に物体がある場合、物体に強制力が働き振動する場合がある。一般に、この振動は入力が不規則であるため、応答も不規則である。

表－３　乱流試験による乱れ特性

	乱れ強さ	乱れスケール
再現値	８．３％	５７８ m
目標値	９．０％	７００ m

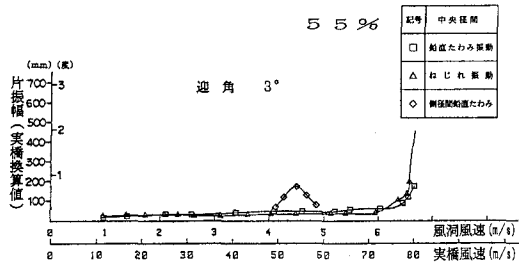


図－１１　迎角－フラッター発振風速曲線

以上３つの振動について安定性を検討した。

１）フラッター

本試験で観測されたフラッターは、補剛桁の鉛直曲げとねじれ振動が同時に発生する曲げねじれフラッター（連成フラッター）であった。図－１１にこのフラッターが発振する風速と気流の迎角との関係を示す。本試験で得られたフラッター発振風速は高風速であり限界風速ラインを満足しているため、フラッターに対して安定性が確保されている。



図－１２　５５％架設時における一様流試験での迎角＋３°の時のＶ－Ａ曲線

２）渦励振

９４％架設時において補剛桁の渦励振は発生せず、５５％架設時においては迎角＋３°、＋５°の風速５０～６０ｍ／ｓ付近（図－９，１２　参照）、２９％架設時においては迎角＋５°の風速３５～４０ｍ／ｓ付近（図－９　参照）で側径間から張り出した補剛桁に渦励振が見られたが、それは定常な振動ではなく、不規則な振動であった。側径間の補剛桁ブロックは吹き上げの風が作用するとねじれ変形及び鉛直上向きの変形が大きく、それによるハンガー張力の減少、空力特性の変化等がその発生要因として考えられる。以上、本試験では、補剛桁の渦励振について、定常振動は観測されず、不規則な振動が発生したのみで疲労破壊の可能性は少ない。また、その発生風速は、照査風速（V_D ＝３４ｍ／ｓ）以上であるため、架設時の渦励振に対して問題ないと考える。

３）バフェティング

乱流試験の結果、一様流では見られなかった不規則振動が発生した。この不規則振動は鉛直方向のほか水平方向にも発生し、比較的大きな振幅が生じている。このような現象は一般的な現象であるが、本試験のような架設時を対象とした場合、補剛桁ブロックがケーブルによって吊られただけの不安定な状態にあるため、特に水平方向の乱流応答値が大きい傾向にある。また、これらの応答の波形はいずれも不規則なものであり、ＰＥＡＫ値とＲ．Ｍ．Ｓ．値との比は３倍を越えている。（図－１０　参照）

しかし、発散的な振動はみられず、また、乱流による応答は実橋風速で約２０ｍ／ｓ付近からである。よって、架設作業に対するバフェティングの影響は少ないと考える。

７．まとめ

一般に、吊橋の設計においては、静的照査に加え動的照査も行っており、その複雑で未解明な性状を風洞試験で確認する必要がある。また、本橋は、補剛桁の架設工法に国内初めてのヒンジ架設を採用する計画である。したがって、補剛桁架設時の耐風安定性について確認する必要があり、架設系全橋風洞試験を行った。その結果、

１）フラッター発振風速は、発散振動に対する照査風速（V_{cr}＝４７ｍ／ｓ）を上回った。

２）定常な渦励振は観測されず不規則な振動のみ発生し、その発生風速も限定振動に対する照査風速（V_D ＝３４ｍ／ｓ）を上回った。

３）乱流による発散振動はみられず、また、乱流による応答は実橋風速で約２０ｍ／ｓ付近からと高風速であった。

以上、いずれも限界風速ラインを満足しており、架設時の耐風安定性が確認できた。

なお、今年度内に吊橋完成後の全橋風洞試験を行う予定である。

参考文献　(1).白鳥大橋架橋地点における風の特性について　広瀬哲司ほか　第29回北海道開発局技術研究発表会論文集　昭和60年度,　(2).風洞試験要領・同解説　本州四国連絡橋公団　1980