

吊橋に対する風洞実験について

平井 敦*
岡内 功**
宮田 利雄***
小樋 一郎****

1. まえがき

長大スパン吊橋の耐風安定性に関する問題は1942年のTacoma Narrows 橋の落橋以来特に注目を浴びて、数々の研究がこの問題に対して重ねられてきている。しかしながら、吊橋補剛桁のように複雑な形状をもつ断面に作用する風力自体の解析が未だ明らかでないため、この問題を理論的に取扱った諸研究は、筆者の過去の研究¹⁾も含めて、なお幾多の問題点を内包していると評するのが正しいようである。従って吊橋の耐風安定性を最終的に確認するためには現在のところ風洞実験によるのが最良とされて、既に諸外国でも多くの風洞実験が行われている。

筆者らもさきに若戸橋の耐風安定性に関して部分模型による風洞実験²⁾を実施し、基礎資料を提供したが、部分模型による実験では三次元的現象の把握が不可能であるため、引続き全経間模型による実験を開始し、長大スパン吊橋の風力作用下の挙動についてさらに実験的検討を進めている。今のところ実験継続中で最終的結論を示す段階には到っていないが、この機会に現在までに得られた実験結果を綜括的に報告し、併せて現在の実験の問題点などにも多少触れて御参考提供することとする。

2. 実験内容

現在までに実施した実験は、基礎段階として、補剛桁断面形状あるいは吊橋構造としての剛度

* 東京大学工学部

** 中央大学理工学部

*** 東京大学工学部

**** 石川島播磨重工業技研

1) A. HIRAI, Aerodynamic Stability of Suspension Bridges Under Wind Action, Preliminary Publications for 5th Congress of the International Association of Bridges and Structural Engineering, 1958.

2) 平井、岡内ほか 若戸橋の耐風安定性に関する実験的研究、日本道路公団報告、1960.

などが耐風性に及ぼす一般の影響を検討する目的によって行われている。先づ模型、実験設備、実験方法などについて簡単に説明を加える。

2.1. 実験模型

実験が基礎段階であるため、実験に用いた模型も実橋を極めて単純化したものである。風洞吹出口の寸法に合わせて、模型は図-1に示すようにスパン8.2m、サグ比1/10の単経間吊橋としている。なお両端とも可動支承で支持している。

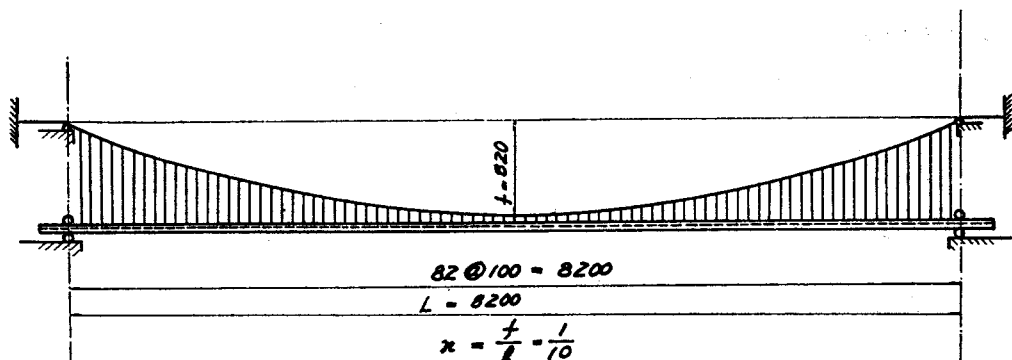


図 - 1 模型一般図

主として補剛桁の断面形状の影響を知るため、模型の断面を図-2のように変えて実験を繰り返した。これら各種模型を大別してH型モデル及びトラス型モデルと呼ぶが、前者はプレートガーダー補剛桁、後者はトラス補剛桁を代表する模型と考えている。H型モデルでは図示の如く桁高と巾員の比 h/b を0.05から0.25にわたって5段階に変化させ、またトラス型モデルではトラス面の充実率を30%及び50%の2種類に変化させている。橋床には閉床と開床の2種の形式をとらせ、主桁の変化と組合わせている。写真-1、2、3は各種模型の写真である。

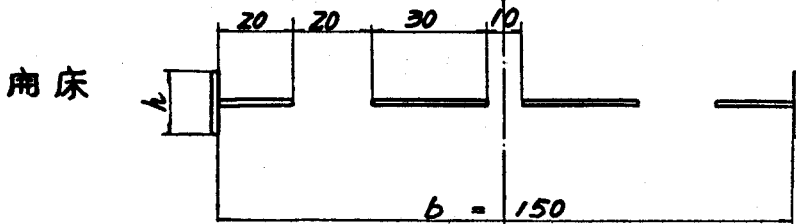
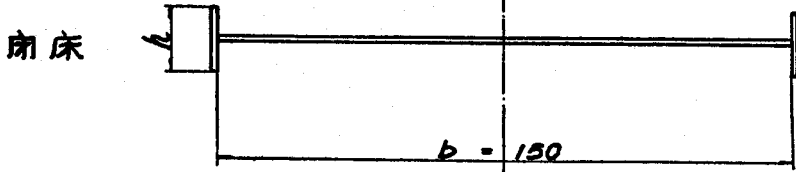
2.2. 実験設備及び方法

実験に使用した風洞は石川島播磨重工業技研に設けられている長大構造物試験用低速風洞であつて、その吹出口寸法は8m×1.2mの扁平長方形であり、送風可能最大風速は約13m/secである。この風洞の一つの特徴は、吹出口を回転させて鉛直面内風向を水平から±10°の範囲に変更することが可能であることである。

風洞実験では、風速の増加につれて模型の動的挙動が如何に変化するかを主として観測した。すなわち、風速を0.5～1.0m/secの間隔で順次増速し、その各風速において模型の振動を記録したのである。模型の振動測定にはスパン1/4点及び1/2点に取りつけた小型加速度計が用いら

H 型 モデル

$\frac{h}{b} = 0.05 \quad 0.10 \quad 0.15$
 $0.20 \quad 0.25$



トラス 型 モデル

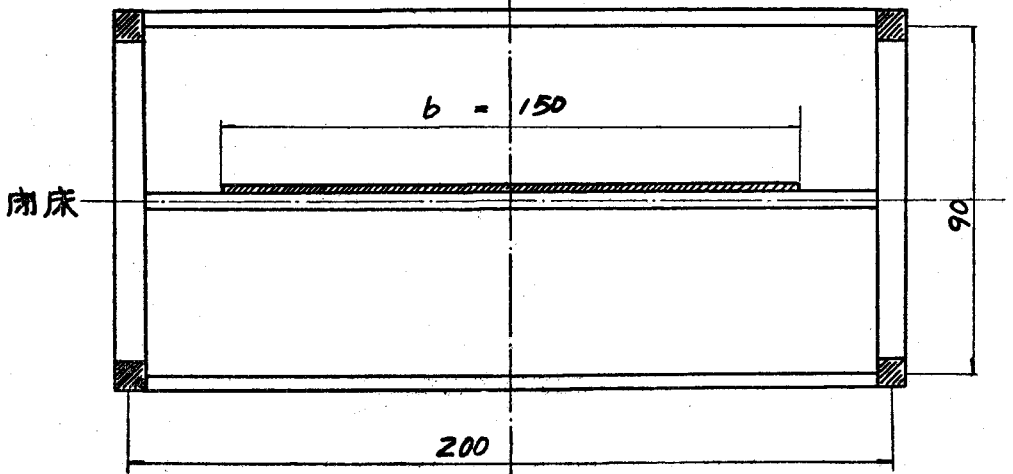


図 - 2 模型断面

れた。この加速度計の出力を二重積分して変位をオシログラフに記録させている。なお、模型
 には風力により曲げ振動と捩れ振動が発生するが、この両者を同時測定した。写真 - 4 は加速度

計の写真である。

風の傾斜（鉛直面内の風向）も風力作用下の挙動に大きな影響を与えるので、各モデルに対して傾斜角度を $+6^{\circ}$ から -6° の範囲に変化し実験を繰返した。その他、吊橋構造としての剛性に変化を与えた場合の影響を調べる意味で、鉛板を模型に添加し死荷重を変えた場合の実験も行った。さらに写真-5のようにワーレントラス形式に吊材を組んだ場合に対しても実験を行って、鉛直吊材の場合と比較している。

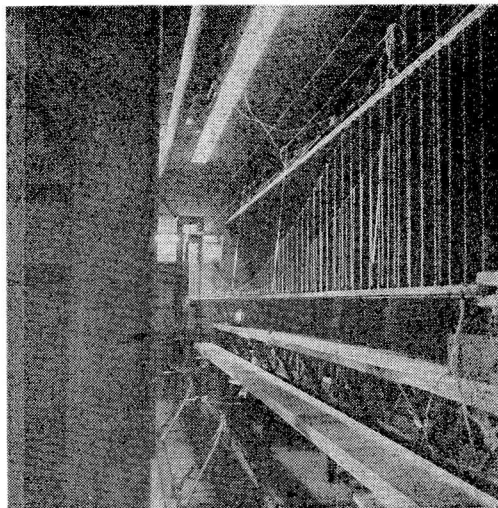


写真-1 H型モデル

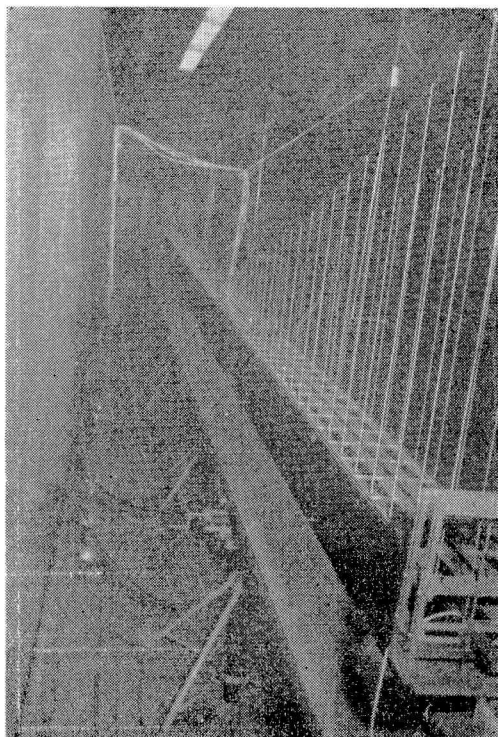


写真-2 H型モデル（開床）

3. 実験結果

3.1. H型モデルの実験結果

H型モデルにおいては桁高を5段階に変えて実験を繰返したが、各モデルとも風力作用により曲げ振動及び捩れ振動が誘起される現象が見られた。しかし、これら諸振動のうち、最も低風速で発生し始め、しかも風速増加とともに大振幅に発達するのは、もっぱら一節点逆対称捩れ振動（INT振動として表わす）であった。そこで各モデルに発生したINT振動の最大振幅と風速の関係を示すグラフを比較して示せば図-3～8のようである。ここで、風速を表わすパラメーターとして無次元の V/Nb の値をとっているのは、各模型の剛性の間に差異がありその影響を除くためである。なお N は振動数

（ cyc/sec ）、 b は巾員（ m ）、 V は風速（ m/sec ）である。

図-3は閉床をもちかつ水平風を受けた各モデルの実験結果を比較したものであるが、これか

ら $\eta/b \geq 0.10$ の諸断面では、桁高の大きさによらずいづれもかなり低い風速で振動が発生し、しかもその振動は風速の増加につれて急速に大振巾の振動に発達することが知られる。一方、桁高の最も低い $\eta/b = 0.05$ の断面では、発振風速が高くまた増速に伴う振動の発達度も比較的小さい。

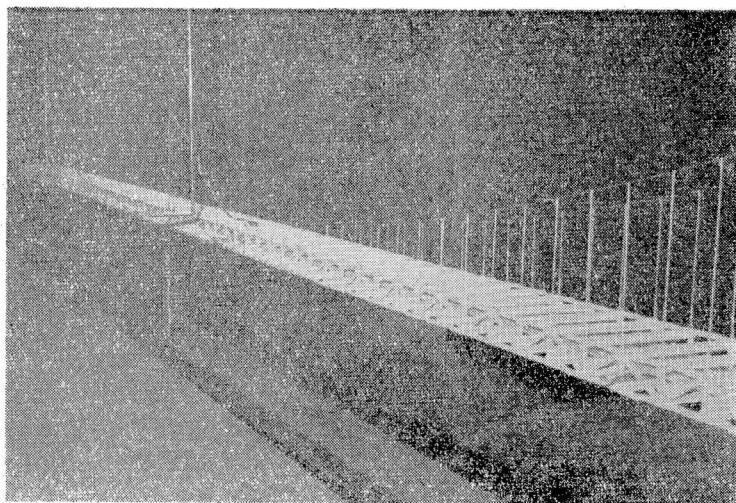


写真-3 トラス型モデル

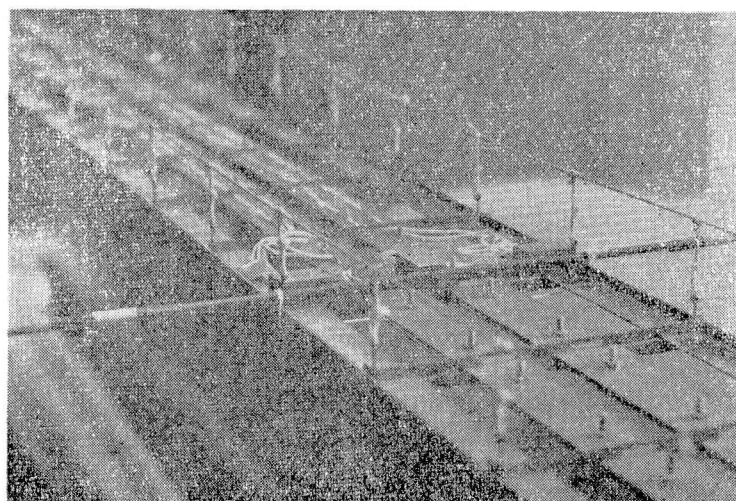


写真-4 小型加速度計

次に図-4に開床の場合の比較を示すが、この結果からは閉床の場合に見られたほどはつきりとした桁高の影響を知ることは出来ない。たゞ $\eta/b = 0.05$ の場合には振動の発達度が他の断面の場合よりやや小さいように見受けられる。

以上は水平風の場合

における実験結果であるが、傾斜風の場合の実験結果(図-5、6に一例を示す)を見ると、ここにおいても $\eta/b \geq 0.10$ の諸断面と $\eta/b = 0.05$ の断面では異った特徴が見られる。すなわち、図-5、6によれば、桁高の大きい $\eta/b = 0.15$ の断面では、傾斜風の場合においても水平風の場合とほぼ同じような性状を示すのに対して、 $\eta/b = 0.05$ の断面では傾斜風の場合著しく相違した性状を示す。さらにその相違が閉床の場合と開床の場合で異った傾向をもち、閉床の場合は傾斜風を受ける時安定度が落ちるのに対して、開床の場合反対に安定度が増加するという結果が

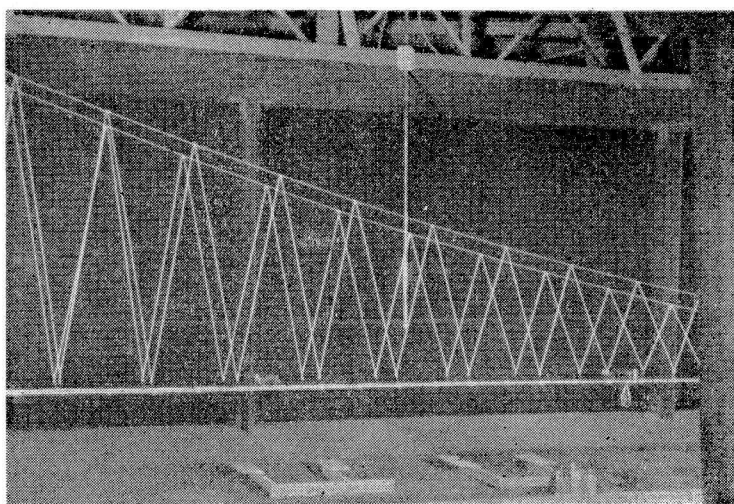


写真-5 トラス状吊材をもつ模型

認められている。

吊橋構造としての剛性を増加せしめる方法の一つとして死荷重を増やすことが考えられるが、死荷重を増加した場合の実験結果を図-7、8に示す。これらによれば、死荷重増加による影響は特に顕著には認められない。ただし、後述の限界状態に達する風速は死荷重

を増すほどすなわち吊橋構造としての剛性を増加するほど高くなることが確かめられた。

上に述べたように鉛直吊材をもつ吊橋の場合には常にINT振動が最も低い風速で発生し、しかも風速増加とともに大振巾の振動に成長している。この振動を抑制する方法としては吊材をワーレントラス形式に組みケーブルと補剛桁間の相対移動を妨げることも有効と考

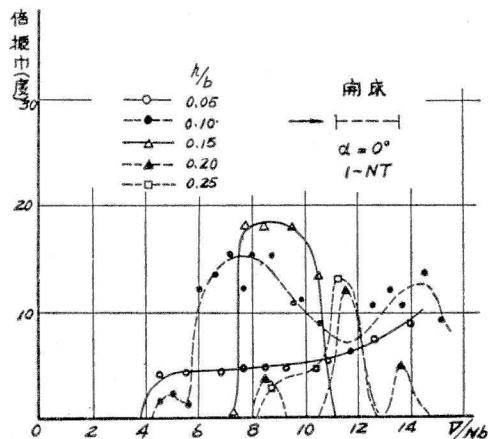


図-4 桁高の影響比較
(H型モデル閉床)

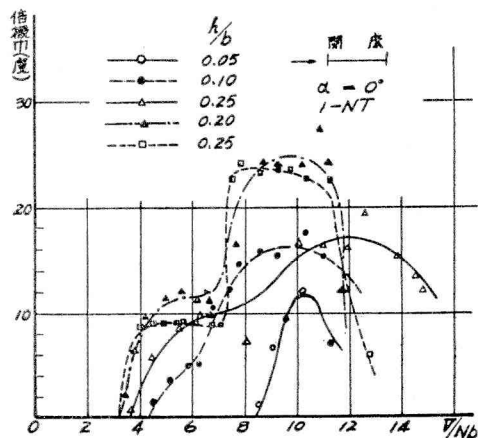


図-3 桁高の影響比較
(H型モデル開床)

えられるが、この場合の実験を $h/b = 0.05$ 及び 0.15 のH型モデルに対して行なった。その結果、INT振動の発生は抑制されるが、それに代って、

図-9のように二節対称振れ振動(2NT振動)が発現することが認められた。

以上風力によりH型モデルに誘起された振動の性状について示したが、これらの振動発生後もなお風速増加を続けると、非定常振動状態を経て突然限界状態に達し、その際写真-6に見られるような大きな一節点逆対線振れ変形を生ずることが確められた。この限界状態に達する

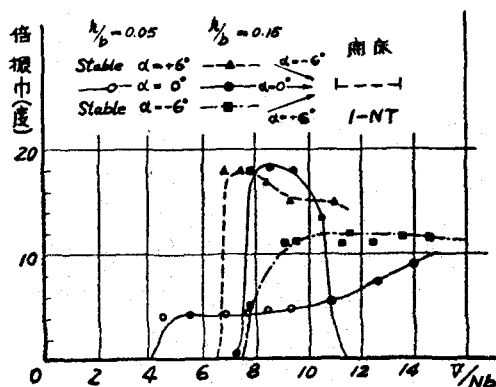


図-6 風の傾斜角の影響 (開床)

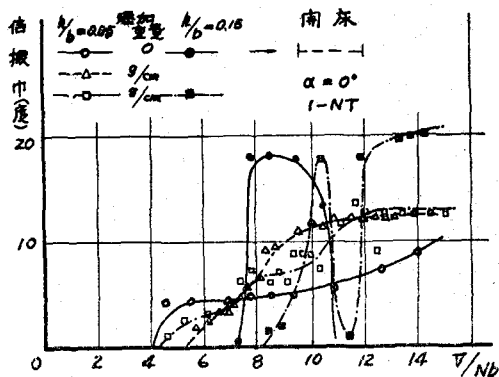


図-8 死荷重増加の影響 (開床)

H型モデルにおいて観測されたような振れ振動の発現がほとんど見られなかった。しかし、かなり低い風速時から曲げ振動が発生しており、この振動の振巾は図-10、11に一例を示すように、

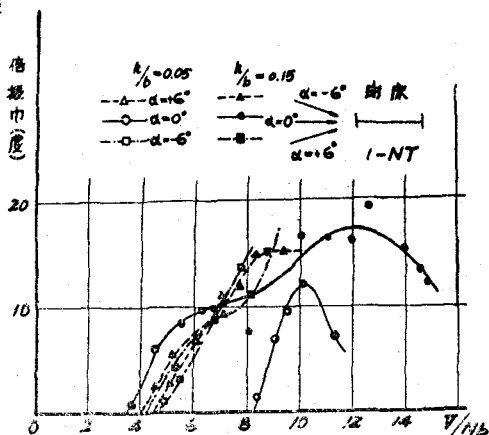


図-5 風の傾斜角の影響(閉床)

時の風速は一般に吊橋構造としての剛性の大きさに関係しており、剛性が大きいほど限界風速も高くなることが認められている。

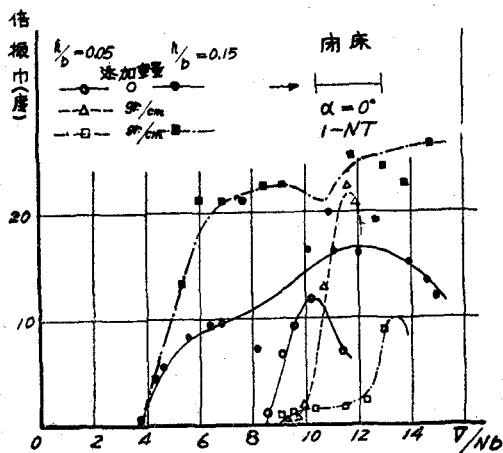
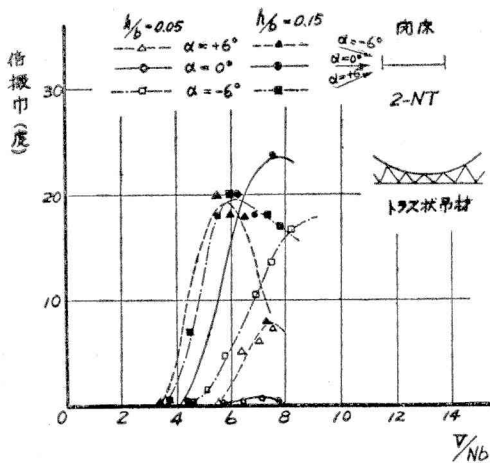


図-7 死荷重増加の影響 (閉床)

3.2 トラス型モデルの実験結果

トラス型モデルにおいてはトラス面の充実率を変えて実験を行ったが、いずれの場合にもH



図一〇 トラス状吊材をもつ場合の実験結果

4. 実験結果の総括と今後の研究課題

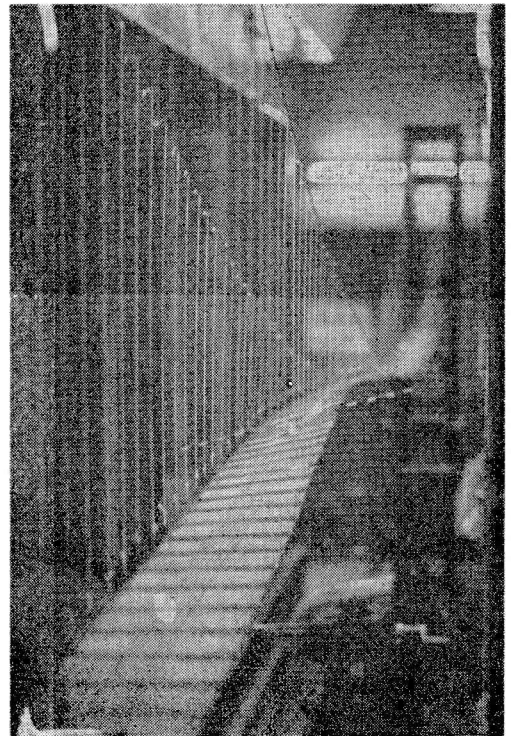
さきにも述べたように、現在実験及び実験資料の検討を継続している途中であって、以上述べたところは現在までに得られた実験結果の中間報告に過ぎないが、次にこれらを総括するとともに、関連する今後の研究課題について若干説明をつけ加えたいと考える。

① H型モデルに対する実験では、風力作用により捩れ振動が誘起されしかも風速上昇とともに大振幅振動に発達する現象が観測された。この現象は補剛桁の断面形状によって大きい影響を受けるが、各種断面における実験結果を比較すると、一般的にいって桁高の小さい開床型断面の耐風安定性が最も大きいと認められる。

ところでH型モデルでは共通して著しい捩れ振動を発生するという上述の現象には補剛桁前縁で剝離した渦が大きな関係を持つと考えられる。筆者らは若戸橋に対する部分模型による風洞実

一般に風速上昇とともに増大する傾向を示している。現在までのところ、この傾向に関してトラス面の充実率あるいは橋床構造などの影響を把握するには到っていない。

これに対して、限界状態においてはトラス型モデルにおいても写真一七に示すような大きい捩れ変形を突然生ずることが観測され、H型モデルにおけると同様な現象を呈することが認められている。

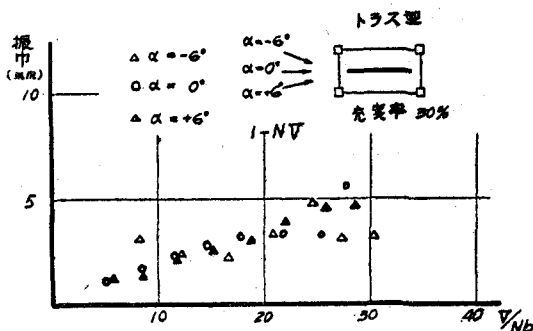


写真一六 H型モデルにおける限界状態

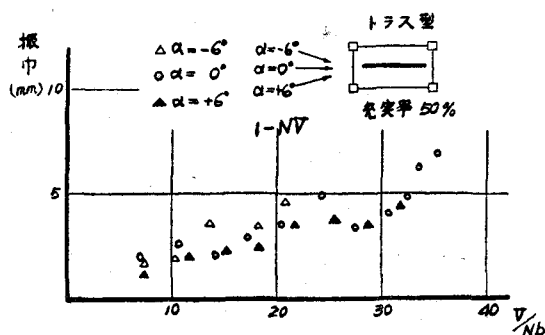
験の報告において、補剛桁に作用する風力を近似的ながら求めた結果を示し、前縁における剝離流の影響を説明したが、この考え方を進めて上の振れ振動の発振風速あるいは最大振巾などを予測する方法を見出すべく、目下全経間模型による実験と並行して部分模型による実験も実施中である。

②トラス型モデルに対する実験では、H型モデルで見られた振れ振動の発生がほとんど見られなかった。その原因として剛性あるいは減衰量などの影響も考えられるが、

最も大きい原因としては、トラス部材から剝離する渦の効果自体が小さい上に相互干渉によってさらにその効果が減殺されるという点が挙げられるであろう。



図一 10 曲げ振動の振巾と風速の関係(トラスモデル充実率 30%)



図一 11 曲げ振動の振巾と風速の関係(トラスモデル充実率 50%)

一方、トラス型モデルにおける実験では、小振巾ながら風速上昇とともに振巾を漸次増加する曲げ振動の発生が観測されている。この振動も、変形制限の厳しい鉄道用吊橋を計画する時など特に問題とされる現象と考えられる。今のところその原因は必ずしも明らかではないが、風洞気流の変動性が一つの素因をなしていると予想されている。自然風には風洞風よりさらに大きい変動性が存在するこ

とを考えるならば、このような変動風に対する吊橋の挙動についても充分調査されなければならないと考えられる。

③H型、トラス型両モデルに共通して、限界風速に達すると大きな一節点逆対称振れ変形を生ずる現象が認められた。その限界風速の大きさは吊橋構造としての剛性に関係すると確められているが、この現象は風圧による振れ挫屈現象と密接な関連をもつものと考えられる。現在この線において、数値的な検討を進めている段階である。

④現在までの実験に供された各模型は基礎実験に使用するという意味合いもあって、一応実橋

とは無関係に製作されている。しかしながら、模型によって風洞実験を行い、その結果より実橋の挙動を推定するためには、第一に相似性に関して考慮が払われねばならないことは言うまでもない。今の場合には、吊橋に風力により振動が誘起される現象は空力弾性的な現象であるのでこれに基いて相似則を求め、模型の諸元を決定しなければならない。ところがこの相似則において必要とする諸条件を同時に満足するように模型を製作することは一般にかなり困難なことであつて、過去において実施された諸外国の実験でもこの点に関し多くの苦心が払われたようである。筆者らも今後特定の实橋を対象とした実験を進める計画であるが、模型製作法に関して一段と工夫する必要があると考えている。

その他数多くの問題点が残されているが、今後さらに種々の実験、検討を重ねて、長大スパン吊橋の耐風安定性問題の解明に多少なりとも資するところありたいと考えるものである。

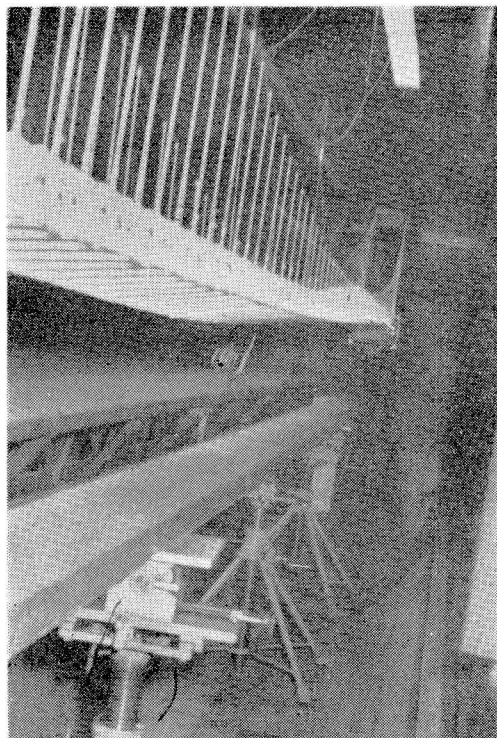


写真-7 トラス型モデルに
おける限界状態