

## 横川砂防公園吊橋（仮称）の風洞実験

幽谷 栄二郎<sup>1)</sup> 細見 雅生<sup>2)</sup>

横川砂防公園吊橋（仮称）は、横川砂防公園内（宮城県刈田郡七ヶ宿町大字横川地内）に架かる人道吊橋である。本橋のスパンは120mであり、無補剛吊橋としては比較的規模の大きなものである。桁部分については、全幅員が2.220m、桁高が0.260mと偏平な断面となっている。計画段階で、床版部分は木床版とされていた。このような吊橋の規模、形状と現地の風環境などの条件から、本橋が空気力学的に不安定なものであると考え、耐風性の検討を行った。本文では、本橋に関して風環境および風洞実験を中心とした検討結果について報告を行う。

キーワード：無補剛吊橋，風環境，風洞実験，曲げねじれフラッター，空気力学的制振対策

### まえがき

横川砂防公園吊橋（仮称）は、横川砂防公園内（宮城県刈田郡七ヶ宿町大字横川地内）に現在施工中のスパン120mの人道吊橋である。無補剛の吊橋としては規模が大きなことと、桁断面の辺長比（流下方向断面長さ／断面高）が10程度と偏平率の大きな断面となっていることから、低風速で発散振動が発生する可能性が高いことが容易に予測できる。道路橋耐風設計便覧<sup>1)</sup>（以下、「便覧」という）による照査でも、ねじれ発散振動に対して“より詳細な検討を要する”という結果となる。そこで、桁断面に対して何らかの空気力学的制振対策を施す必要があると判断し、駒井鉄工(株)所有の風洞実験施設を用いて検討を行った。本文では、現地の風環境と風洞実験結果の概要について報告を行う。

### 1. 現地の風環境

構造物の動的耐風安定性を照査する場合に、その構造物自体の空力特性と振動特性を把握するのは勿論のことであるが、現地の風環境を知ること

も同様に重要な条件となる。また、本橋の架設位置は「蔵王おろし」と呼ばれる蔵王連峰からの吹き下ろしの風が強い場所に計画されていることから、動的耐風安定性を総合的に検討する上で風の条件の重要性は高いと考える。風環境を把握するためには、架橋位置において強風データの蓄積が

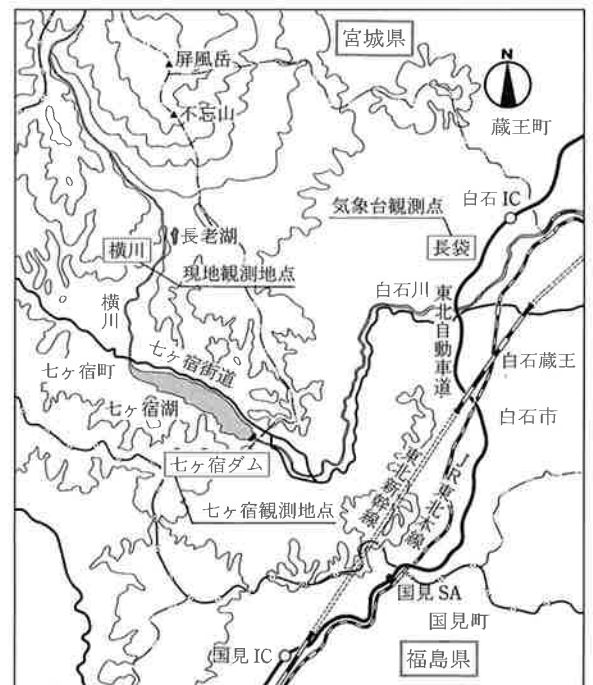


図-1 架設位置周辺の地図

1) 橋梁設計部東京設計一課 2) 開発室次長

なされていることが望ましい。本橋の場合には、そのようなデータがないため、近傍にある気象観測点（気象官署）に蓄積されたデータを調べ、架橋位置の風環境把握に利用することにした。データとしては、架設位置に近い場所での気象データ（気象台（白石市））のデータと横川下流に位置する七ヶ宿ダムのデータ（1989年10月～1998年12月の間のデータ）および現地での簡易な風観測から得られたデータの比較を行い、架設位置の風特性を推定した。

## 2. 現地風環境の推定

図-1に現地周辺の地図を示す。現地観測は、架設位置近傍の七ヶ宿町に流れる横川に建設中の砂防ダムで風洞実験に先立って実施した。七ヶ宿ダム観測位置、気象台の観測位置についても図中に示す。

### (1) 気象台と七ヶ宿ダムの相関関係

図-2に七ヶ宿ダムと気象台の最大平均風速および風向を比較したグラフを示す。風向について、七ヶ宿ダムでは年間を通して西北西からの風、気象台では西もしくは西南西からの風が強い傾向にある。風速についてみると、山岳部に近い七ヶ宿ダムの最大平均風速の平均値が、気象台に比べて4m/s程度大きくなっている。

### (2) 現地と気象台の相関関係

現地の風観測は、任意の日を選び3日分の毎正時の10分間平均風速と風向を簡易な風向風速計で測定した。

図-3に現地と気象台の風速および風向（毎正時観測データ）を比較した図を示す。現地での風向きは南からの風に限定されている。これは、架橋位置の東側と西側に山があり、この地形的な影響で北もしくは南からの風（橋軸直角方向からの風）に限定されるものと考えられる。風速については、現地の風速よりも気象台の風速の方が速い確率が高い傾向にある。

### (3) 設計基準風速

設計基準風速は便覧では23.7m/sである。一方、気象台および七ヶ宿ダムの最大平均風速データを基に二重指数確率紙を用いて推定すると、設計基準風速はそれぞれ23.5m/sと25.5m/sであった。この中の最大値25.5m/sすなわち七ヶ宿ダムのデータで設計基準風速を決めると、より安全側の基準値が設定できることになる。したがって、風洞実験での照査風速を計算するのに用いる設計基準風速は25.5m/sとした。そして、照査風速は46m/sとした。

### (4) 現地風環境

現地での風観測中に橋梁に対して吹き上げの風

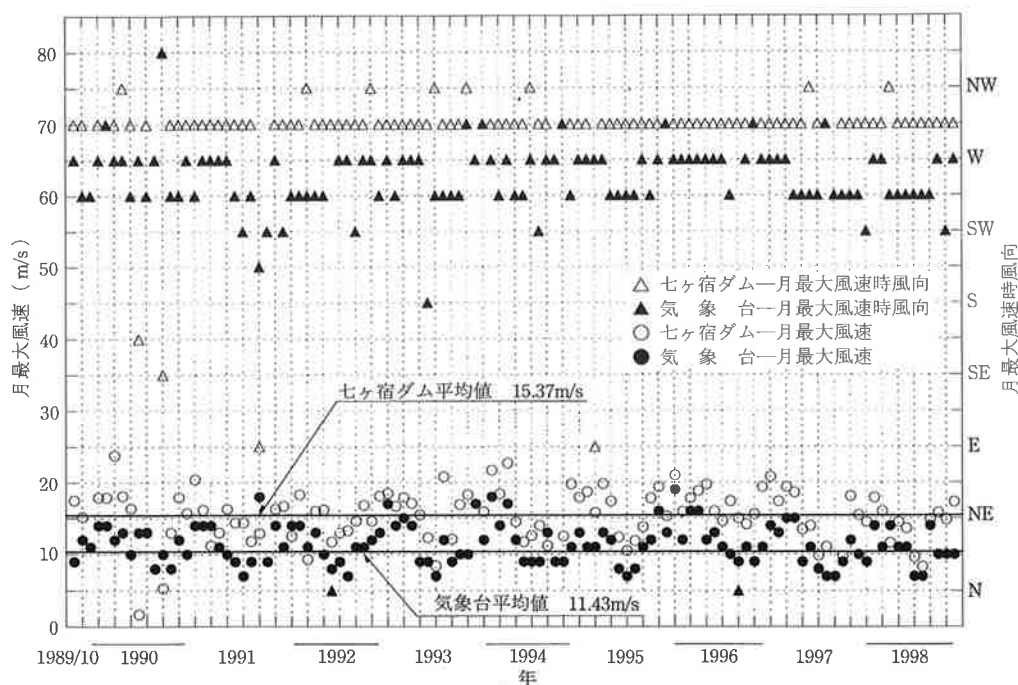


図-2 最大平均風速および風向の比較（七ヶ宿ダム-気象台）

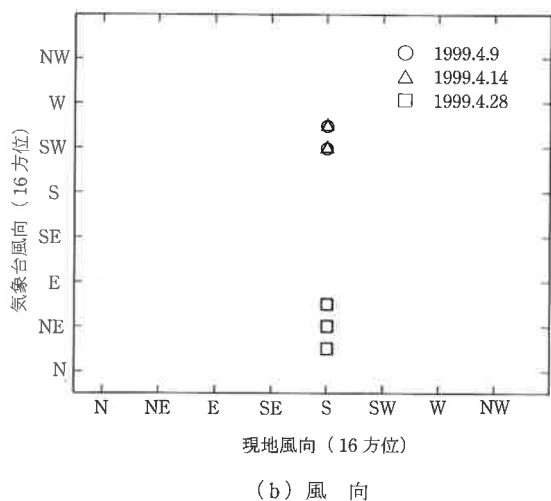
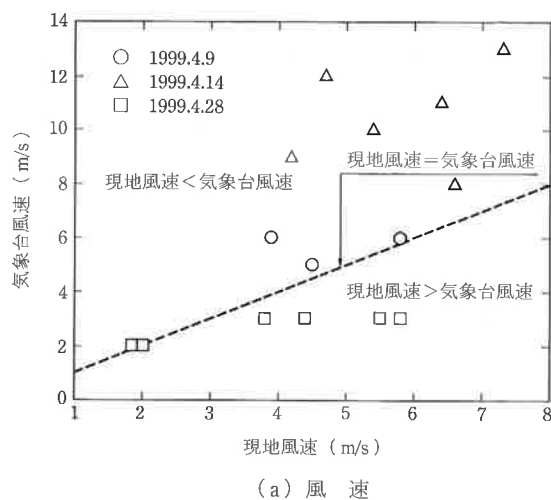


図-3 風速および風向の同時刻における比較（現地－気象台）

が吹くようなことはなく、また、周辺にも風を著しく乱すような地物は存在しなかった。風向については現地の地形の影響で南からの風が支配的である。ただし、今回の風観測はデータが少ないため南からの風に限定されていたが、実験後の現地調査により、冬期には蔵王連峰からの吹き下ろしである北からの強風も吹くことを確認した。

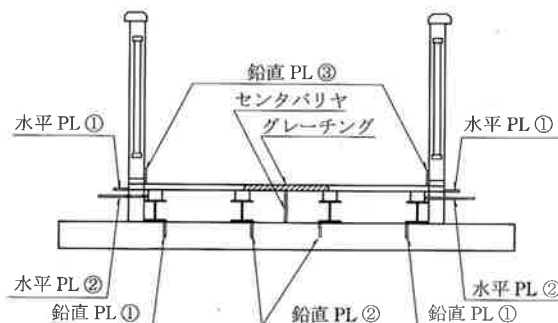
### 3. 風洞実験結果

#### (1) 風洞実験の諸元

図-4に本橋の一般図を、図-5に耐風性検討を行った実験模型の断面形状を示す。また、表-1に実橋（解析値）および模型の諸元を示す。

#### (2) 2次元弾性支持風洞実験結果

2次元弾性支持風洞実験結果のうち代表的な応答図を図-6～9に示す。



単位：mm（実橋値）

TYPE No.	グレーチング幅	センターバリア高さ	水平PL ①	水平PL ②	鉛直PL ①	鉛直PL ②	鉛直PL ③
0	—	—	—	—	—	—	—
1	600	—	—	—	—	—	—
2	600	220	—	—	—	—	—
3	600	—	—	300	—	—	—
4	600	—	—	—	100	—	—
5	600	—	—	—	—	100	—
6	600	—	—	300	100	—	—
7	600	—	100	—	100	—	—
8	600	—	—	—	—	—	100

図-5 実験模型断面概略図

表-1 実橋（解析値）および模型の諸元

諸元	単位	縮尺比	実橋	模型
長さ	m	1/n = 1/10	—	1.19
重量	kgf/m	1/n <sup>2</sup> = 1/100	469.829	4.698
極慣性モーメント	kgf・m <sup>2</sup> /m	1/n <sup>4</sup> = 1/10000	408.033	0.041
たわみ振動数	1/s	s = 3.6	0.497	1.790
ねじれ振動数	1/s	s = 3.6	0.549	1.977
照査風速	m/s	s/n = 1/2.778	46.4	16.7
対数減衰率	—	1	0.020	0.020

図-6は当初に計画されていた全面木床版断面TYPE-0の結果であり、低風速で曲げねじれフラッターが発生している。図-7は床版中央部分にグレーチングを配置したTYPE-1の結果であり、限定振動の発生と高風速側でフラッターの発生がみ

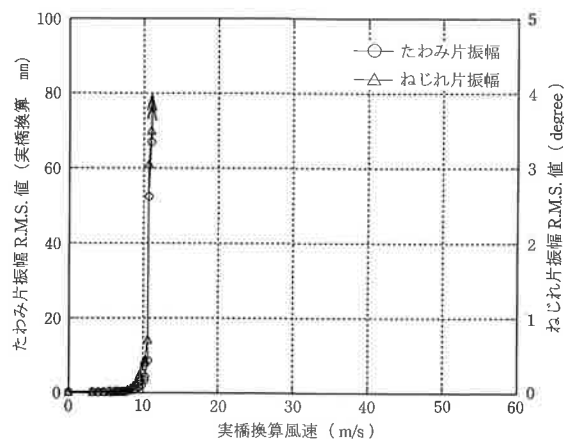


図-6 応答図（TYPE-0，迎角  $\alpha = 0^\circ$ ，一様流中）

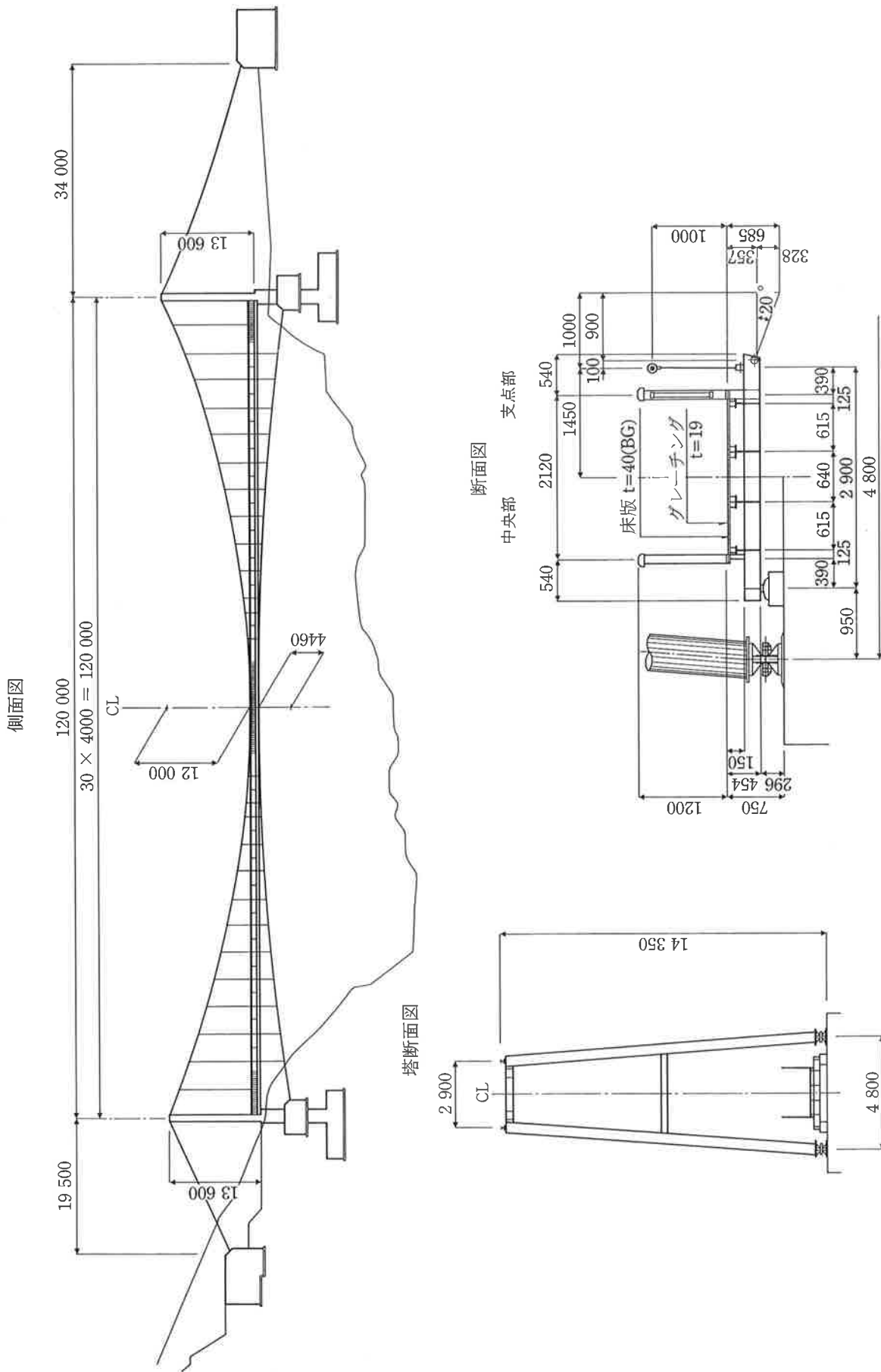


図-4 一般図

られる。図-8はグレーチングと外縦桁に鉛直プレートを設置したTYPE-4の結果である。限定振動の発生はみられるが、フラッターは発生しなかった。図-9はグレーチングと外桁側に鉛直プレートおよび水平プレートを設置したTYPE-7の結果である。限定振動の発生は抑えられたが、実風速40 m/s付近でフラッターが発生している。

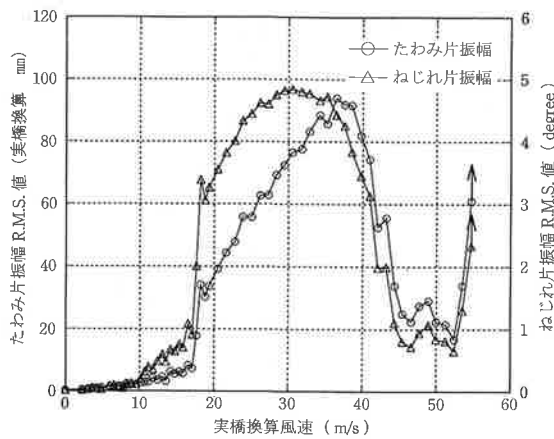


図-7 応答図 (TYPE-1, 迎角  $\alpha = -3^\circ$ , 乱流中)

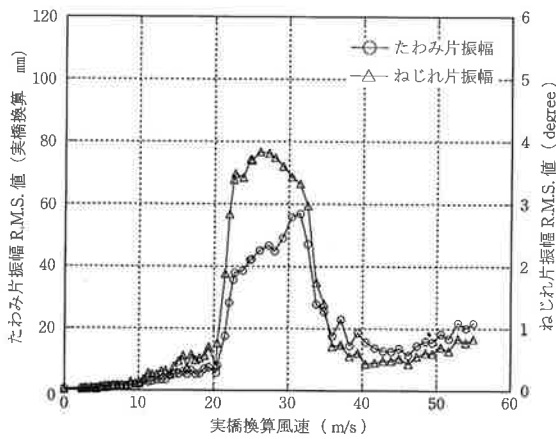


図-8 応答図 (TYPE-4, 迎角  $\alpha = -3^\circ$ , 乱流中)

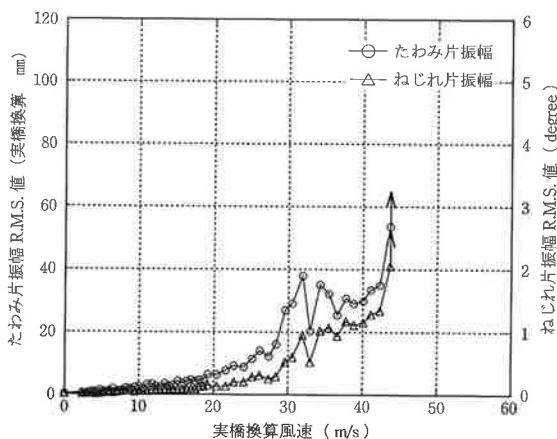


図-9 応答図 (TYPE-7, 迎角  $\alpha = -3^\circ$ , 乱流中)

#### 4. 空気力学的な制振対策の効果

本実験で検討を行った空気力学的な制振対策の効果について、簡単にまとめると以下ようになる。また、各対策を講じたときのフローパターンの予想図を図-10に示す。

##### (1) グレーチング

床版中央部にグレーチングを設置することで、低風速でのフラッターの発生はみられなくなったが、限定振動および照査風速内でフラッターが発生した。全面木床版断面の時に大きく剥離していた剥離せん断層がグレーチングにより床版上下面の圧力差を減少させ、これに伴い剥離せん断層も小さくなり、桁の空力特性が改善されていると考えられる (図-10(b))。

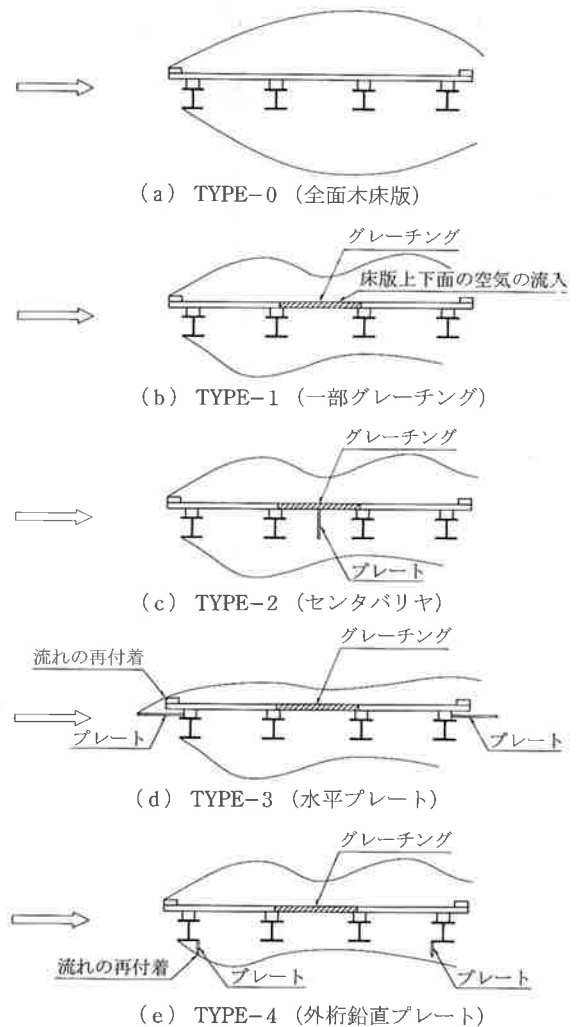


図-10 フローパターンの予想図

(2) センタバリヤ

本実験では、機能上および構造上の制約から、床面上から縦桁下面までの高さのセンタバリヤのみを設置した場合の実験を行った。実験では、その効果は良好なものではなく、空力特性はグレーチングのみの時よりも悪化した(図-10(c))。

(3) 水平プレート

水平プレートは、限定振動を抑える効果が最も高かったが、フラッター発振風速が低風速側へ移行する傾向がみられた。水平プレートにより、断面上流側に剥離点が追加され、床版上面の剥離せん断層がグレーチング設置時よりもさらに小さくなり、限定振動に対する空力特性が改善されているものと考えられる(図-10(d))。

(4) 鉛直プレート

鉛直プレートを外桁に設置すると、限定振動の振幅を抑え、フラッター発振風速を高風速側へ移行させる効果があった。内桁に設置してもその効果はあまり認められなかった。

5. 静的変形量

今回の風洞実験で空力安定性が最も良かった断面は、床版中央部に幅600mm(実橋値)のグレーチングを設置し、外縦桁下面に鉛直プレート100mm(実橋値)を取り付けたTYPE-4であった。しかし、風洞実験において、模型の迎角が静的な風圧により変化する現象が現れた。この現象について、TYPE-4の2次元弾性支持応答試験(乱流中)における模型の静的変形量と応答値との比較により検討を行った。

TYPE-4の応答試験における模型の静的変形量と図-8の応答図とを重ね合わせたものを図-11に示す。なお、図-11中のねじれ静的変位(計算値)は、静的3分力試験より得られた空力モーメント(迎角正側の平均値 $C_M=0.151$ )を用いて算出した2次元模型のねじれ変形量である。また、ねじれ静的変位(解析値)は、風圧力を静的に载荷し振動解析に用いた3次元モデルで解析を行った結果得られた値である。図-11を基に比較検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

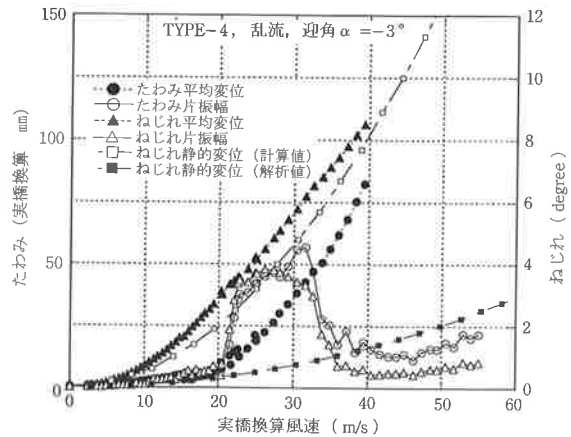


図-11 静的変形量と応答図の重ね合わせ (TYPE-4, 迎角  $\alpha = -3^\circ$ , 乱流中)

1) 実験時静的変位

2次元弾性支持応答試験では、模型のねじれ中心を高さ方向は吊り索と横桁接合位置に、幅方向は桁の中心に固定している。そのため、ここを支点として大きなねじれの変形が生じており、その迎角は測定可能範囲で $+8^\circ$ 程度となっている。

2) ねじれ静的変位(計算値)

実験で生じた静的変位は、静的な荷重により支持バネが変形して生じたものである。したがって、静的3分力試験より得られる空力モーメント(迎角正側の平均値 $C_M=0.151$ )を用いて、ねじれ変形量を算出できる。図-11に示すように計算値は実験値とほぼ同じ値となっている。

3) 実験値と解析値の相違

実験値の変位は、静的風荷重による3次元モデルの解析値(対称モード)の4倍程度の値となっている。これは、実験時に全体系3次モード(ねじれ1次モード:非対称モード)の剛性を用いているので、実橋に静的な風荷重が働くときの剛性より低く評価しているためである。

6. まとめ

実橋に適用する断面は、乱流中における風洞実験結果より測定風速範囲内でフラッターが発生しなかったTYPE-4、すなわち床版中央部に幅600mmのグレーチングおよび外縦桁に鉛直プレートを設置するタイプとした。また、比較的大きな振幅(実橋での最大片振幅はたわみが56.9mm、ねじれが $3.83^\circ$ である)の限定振幅の発生がみられたため、本実験で用いた全体2次モードと3次モード

の発生応力度を計算し、疲労の照査を行った。照査の結果、縦桁、横桁およびケーブルに発生する応力振幅は小さなものであり、疲労上問題のないことを確認した（最大応力振幅は主ケーブル断面で $\Delta\sigma = 119\text{kgf/cm}^2$ 、縦桁断面で $\Delta\sigma = 49\text{kgf/cm}^2$ 、横桁断面で $\Delta\sigma = 45\text{kgf/cm}^2$ である）。しかし、前項の検討より、静的変形が実橋と実験とでは異なっていることが予測される。このことを考えると、今回の実験ではより厳しい条件である大きな迎角

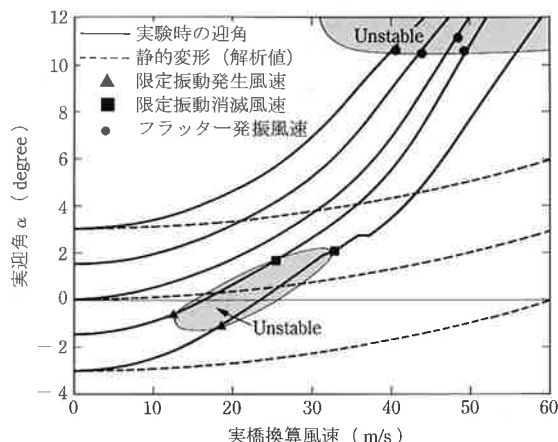


図-12 TYPE-4実験時の実迎角と振動（一様流）

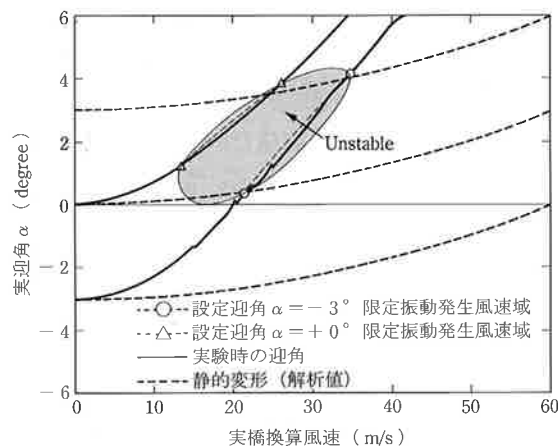


図-13 TYPE-4実験時の実迎角と振動（乱流）

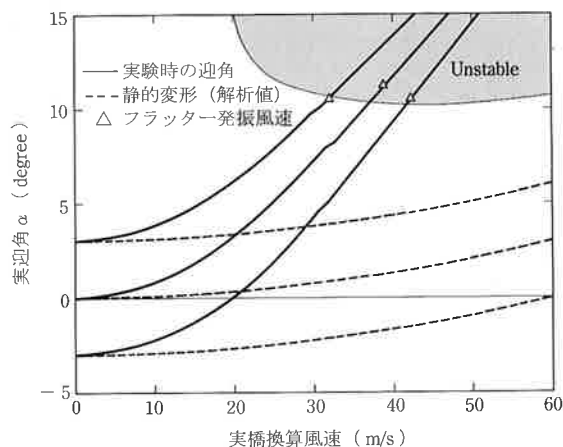


図-14 TYPE-7実験時の実迎角と振動（乱流）

（安全側の条件）で耐風安定性の検討を実施したことになる。

TYPE-4実験時の実迎角と振動の発生状況を表したものを図-12および図-13に示す。実橋でのねじれの静的変位が小さいことを考えると、実橋で生じる限定振動と実験で生じていた限定振動は、発生風速域、振幅ともに異なることになる。また、発散振動については、さらに安定であると考えられる。

同様に、限定振動の発生しなかったTYPE-7について整理すると図-14のようになる。この場合、限定振動、発散振動ともに生じない可能性が高い。ただし、TYPE-7の採用にあたっては、迎角の条件を考慮した詳細な風洞実験を実施することが望ましいと考える。

本橋では、耐風対策として外桁下面に鉛直の整流板を設置したTYPE-4を採用している。しかし、架設後に問題となるような限定振動の発生が観測された場合を考慮して、TYPE-4から水平の整流板を設置したTYPE-7への変更が容易にできるように加工を施しておくこととした。

あとがき

本報告では横川砂防公園吊橋（仮称）の風洞実験について、主に現地風環境の予測と風洞実験結果に対する考察を中心に説明した。風洞実験の内容については、参考文献5で報告している。今回の実験にあたり計画当初から、ご指導およびご協力を頂いた宮城県大河原土木工事事務所ならびに東北鉄骨橋梁株式会社の関係者の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，1991.7.
- 2) 本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋風洞試験要領(1980)・同解説，1980.6.
- 3) 日本道路協会：小規模吊橋指針・同解説，1984.4.
- 4) 岡内 功・伊藤 学・宮田利雄：耐風構造，1977.5.
- 5) 露野公則・工藤憲二・細見雅生・幽谷栄二郎：横川砂防公園吊橋の風洞実験，東北鉄骨橋梁技報，Vol.1，pp.1-7，1999.11.