

## 少数主桁橋の耐風性に関する実験的研究

Experimental investigation on aerodynamics of plate girder bridge with PC slab

松本 勝\*, 宮内秀敏\*\*, 白土博通\*\*\*, 八木知己\*\*\*\*, 阿南景子\*\*\*\*\*  
 Masaru Matsumoto, Hidetoshi Miyauchi, Hiromichi Shirato, Tomomi Yagi, Keiko Anami

\*工博, 京都大学大学院教授, 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町) \*\* 日本道路公団関西支社 構造技術課 (〒530-0003 大阪市北区堂島 1-6-20) \*\*\*工博, 京都大学大学院助教授, 工学研究科(〒606-8501 京都市左京区吉田本町) \*\*\*\*Ph.D, 京都大学大学院助手, 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町) \*\*\*\*\*工博, 京都大学大学院助手, 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

Recently, a new style of plate girder bridge has been proposed to build bridges more economically. The number of girder has been reduced with fewer connecting members with the introduction of PC slab. In the design of aerodynamic stability, this type of bridge tends to have lower natural frequency in torsional vibration mode and more 'bluff' sectional shape, which may change the aerodynamic characteristics compared to conventional bridges.

In this study, aerodynamic stability of this new plate girder bridge has been investigated through a series of wind tunnel test. Basic characteristics have become clear as well as effects of turbulence. It has been shown that the aerodynamics of this new bridge has combined with that of 1-box girder section and H-shaped section.

*Key Words: Plate girder bridge with PC slab, Aerodynamics, Wind tunnel test*

キーワード: 少数主桁橋, 耐風性, 風洞試験

### 1. まえがき

少数主桁橋は、合理化を図った鋼橋の新しい形態として近年注目されている橋梁形式である。その主たる特徴としては、従来のプレートガーダー橋に比べて、PC床版の採用と同時に主桁間隔を広げることで鋼主桁の数を減らし、構造の簡素化による製作工数や現場作業の効率化を総合的に図ったことにある。適用支間長は、当初 50m 程度の橋梁を中心に適用されていたが、一部ではさらに長い支間長の橋梁にも適用されている例がある。

この少数主桁橋においては、その耐風性に大きく関わる特徴として、以下の二点が指摘されている。

第一点は、構造的な特徴として、主桁間を結ぶ横構・対傾構が省略される傾向にあるため、相対的にねじれ剛性が低下する点である。このとき、ねじれ固有振動数の低下とあわせて、ねじれ空力振動の発生風速が低下し、従来よりも振動が問題とされるケースが増える可能性がある。

もう一点は、形状的な特徴であり、主桁の小數化とともに、そのウェブ高さが増加する傾向にある。これは、橋桁断面の縦横比  $B/D$  ( $B$ : 総幅,  $D$ : 有効高さ) を減少させることとなるため、従来よりもブラフな断面形状となり、より多様な空力振動を生じさせる可能性がある。

このような少数主桁橋の耐風性に関しては、その普及とあわせて研究<sup>1)</sup>が報告されつつあるものの、その知見の蓄積はまだ十分なものとはいえない状況にある。本論文では、

少数主桁橋の耐風性に関し、今後の普及に備えることを想定して、二主桁橋における基本的な耐風性の把握を中心に風洞実験を行ない、実験的に検討を加え、現象の発生メカニズムについて考察するものである。

### 2. 検討対象断面

本研究では、少数主桁橋の典型的な断面形状として、主桁数が2である二主桁橋を代表断面として取り上げた。その形状を図-1に示す。

この断面は、総幅  $B$  が 11.2m, 主桁高さ 2.9m, 高欄を除く有効高さ 4.0m を有する。高欄については、ポスト高欄を基本として想定したが、遮音壁が設置された場合など後述のように形状を変化させている。仮に、有効高さ  $D$  として高欄を除いた値 4.0m をとった場合、縦横比  $B/D$  は 2.8 となる。

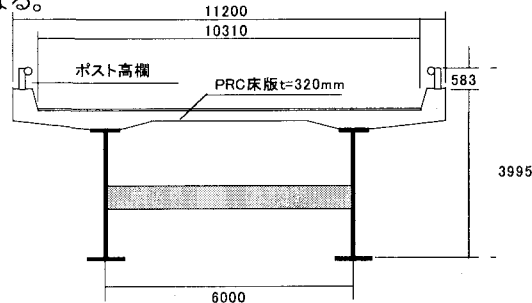


図-1 検討対象断面 (ポスト高欄のみの状態)

振動特性としては、前述の断面を有する二主桁橋として、径間長約50mを有する8径間連続橋を想定したものを用了。表-1に構造解析で求められた各モードの特性値を示す。この結果をもとに、等価質量、等価極慣性モーメントが最小で、振動数が低いモード、すなわち鉛直たわみ振動が卓越するモードとして1次を、ねじれ振動が卓越するモードとして3次を、それぞれ代表として抽出した(図-2)。

なお、少数主桁橋の構造減衰特性としては、まだデータ数も少なく、一般的に参照できる十分なデータとは言えない(JHで実施した6例の実橋振動試験結果では、たわみの構造減衰率が $\delta=0.03\sim 0.07$ に分布している)ため、安全側かつ現象の把握の観点から、対数減衰率 $\delta$ として0.02という値を仮定して研究を進めた。ただし、対数減衰率 $\delta$ の値が振動応答に及ぼす影響を把握するため、一部ポスト高欄を有する基本断面について、 $\delta$ を変化させた実験も行った。

表-1 振動モード一覧

次数	固有振動数 (Hz)	等価質量 (t/m)	等価極慣性モーメント (t・m)
1	1.85	16.4	9244
2	2.01	19.8	790
3	2.12	92.8	176
4	2.24	45.7	224
5	2.31	24.8	416
6	2.50	213.8	157
7	2.65	17.4	2001
8	2.84	411.9	151
9	3.05	16.9	3387
10	3.23	443.8	151

a) 1次 (鉛直たわみ卓越)



b) 3次 (ねじれ卓越)



c) 2次



図-2 振動モード形状

### 3. 風洞実験方法

前項に示した検討対象断面について、部分模型を用いた二次元風洞実験を実施した。

模型は、後述の風洞測定部寸法を考慮し、縮尺60分の

1にて模型化したものを用いた。模型はヒノキ製であり、スパン長は690mm、その両端には気流の二次元性を確保するための端板を設置している。

風洞は、京都大学社会基盤工学専攻に設置された、室内回流式エッフェル型風洞を用いた。測定部は、高さ1.8m×幅員1.0m×長さ6.55mの大きさを有し、上記の模型を測定部壁面に設けた導流壁の内側に設置した。気流は、一様流のほか、2種類の格子乱流(主流方向乱れ強さ6.5%及び12.7%)を用いた。

空力振動の発生状況は、バネ支持自由振動実験を主体に調査したが、バネ支持実験自由振動実験の実験条件の例を表-2に示す。

また、静的空気力係数の計測においては、ロードセルを用いて三成分の空気力(抗力、揚力、ピッチングモーメント)を計測し、桁高Dを用いた無次元化を施すことにより、静的空気力係数を整理した。(今回の研究では、道路規格1-3-Bを対象としており、橋梁幅が一定となることから、桁高Dによる無次元化とした。)静的空気力は、各断面の代表高さに基づく無次元化を行い、抗力係数 $C_D$ 、揚力係数 $C_L$ 、モーメント係数 $C_M$ をそれぞれ求めた。

表-2 実験の条件の例

諸元	記号	実橋値	模型値(縮尺1/60)	
壁高欄	桁高	D	4.32 m	0.072 m
	桁幅	B	11.22 m	0.187 m
ポスト高欄	桁高	$D_p$	4.58 m	0.076 m
	桁幅	B	11.4 m	0.19 m
低速音壁	桁高	$D_l$	6.12 m	0.102 m
	桁幅	B	11.4 m	0.19 m
高速音壁	桁高	$D_h$	7.14 m	0.119 m
	桁幅	B	11.4 m	0.19 m
等価質量	m	16.39 t/m	4.553 kg/m	
等価質量慣性モーメント	I	175.6 t <sup>2</sup> /m	0.01355 kg <sup>2</sup> /m	
鉛直たわみ固有振動数	$f_n$	1.854 Hz	約5.2 Hz	
ねじれ固有振動数	$f_\theta$	2.116 Hz	約6.0 Hz	
鉛直たわみ対数減衰率	$\delta_n$	0.02	0.02	
ねじれ対数減衰率	$\delta_\theta$	0.02	0.02	

### 4. 基本応答特性

実験結果で求められたうち、最初に一様流中における基本特性について記す。なお、振動応答は、少数主桁橋の基本特性把握のため、鉛直たわみあるいはねじれの1自由度での条件を最初に調査し、両者の連成の影響が考えられる高風速の応答は、非定常空気力とフラッター解析を主体として後から調査するスタイルで検討を進めた。

#### (1) 鉛直たわみ振動応答(1自由度時)

ポスト高欄のみを有する基本断面の鉛直たわみ応答特性を図-3に示す。迎角 $0^\circ$ では、実風速30~43m/s付近と、60~70m/s付近の2箇所に渦励振の発生が見られる。迎角を $\pm 3^\circ$ に変化させた場合、吹上げ風時に振幅が大きくなる傾向がみられる。

この渦励振の振動発生風速は、無次元風速 $U/\beta D$ にして4付近である。この風速は、主桁の総幅Bで無次元化した

無次元風速  $U/B$  でみれば、1.4 程度に相当し、自己励起型渦励振の典型的な発振風速とされる 1.67 に近い。従って、この渦励振は自己励起型の性格を有している可能性があると考えられる。

また、高風速では、ギャロッピングと思われる発散型振動の発生が確認された。この発散型振動も、渦励振と同様に、吹上げ風で顕著に発達するようになる。これは、一箱桁断面を有する桁橋でしばしばギャロッピングが問題とされるのと共通の現象であると考えられる。

### (2) ねじれ振動応答 (1 自由度時)

次に、同じポスト高欄のみを有する基本断面のねじれ応答を図-4 に示す。迎角  $0^\circ$  では、実風速 50~75m/s 付近と、85m/s 以上の 2 箇所限定型の振動の発生が見られる。また、振動発現風速付近ではリミットサイクルを有し、初期変位があった場合に振幅が発達する傾向を有している。迎角を  $\pm 3^\circ$  に変化させた場合、振動の発生状況に大きな変化は見られず、迎角の変化には敏感ではない。

この限定型振動のうち高風速側の振動は、著者らの過去

の研究<sup>3)</sup>においてH型断面を有する基本断面においてみられた特性と類似している。振動発生風速は、無次元風速  $U/B$  にして9付近であるが、 $U/B$  では3.2 となり、同一の縦横比  $B/D$  を有するH型断面の振動発生風速に近い。

一方、低風速側の振動は、一般的に知られる自己励起型の渦励振の典型的な発振風速よりはやや高い領域で発生し、やや異なる特性を有していると考えられる。この違いは、断面周囲の流れの特性と関連づけ、振動発生に有効な断面辺長の取り方など、今後詳細について検討を重ねる必要があるものと考えられる。

また、これらの限定型の振動は、発生風速域で見れば、実風速 50m/s 以上の幅広い領域で発生し、かつ振幅もすぐに大きくなる可能性を有していることから、少数主桁橋の耐風設計上は重要な検討課題であると考えられる。

以上のように、今回の検討断面における1自由度の応答では、従来の一箱桁断面でみられた特性に加えて、H型断面に近い特性もみられており、両者の応答性状をあわせ持つことが大きな特徴である。

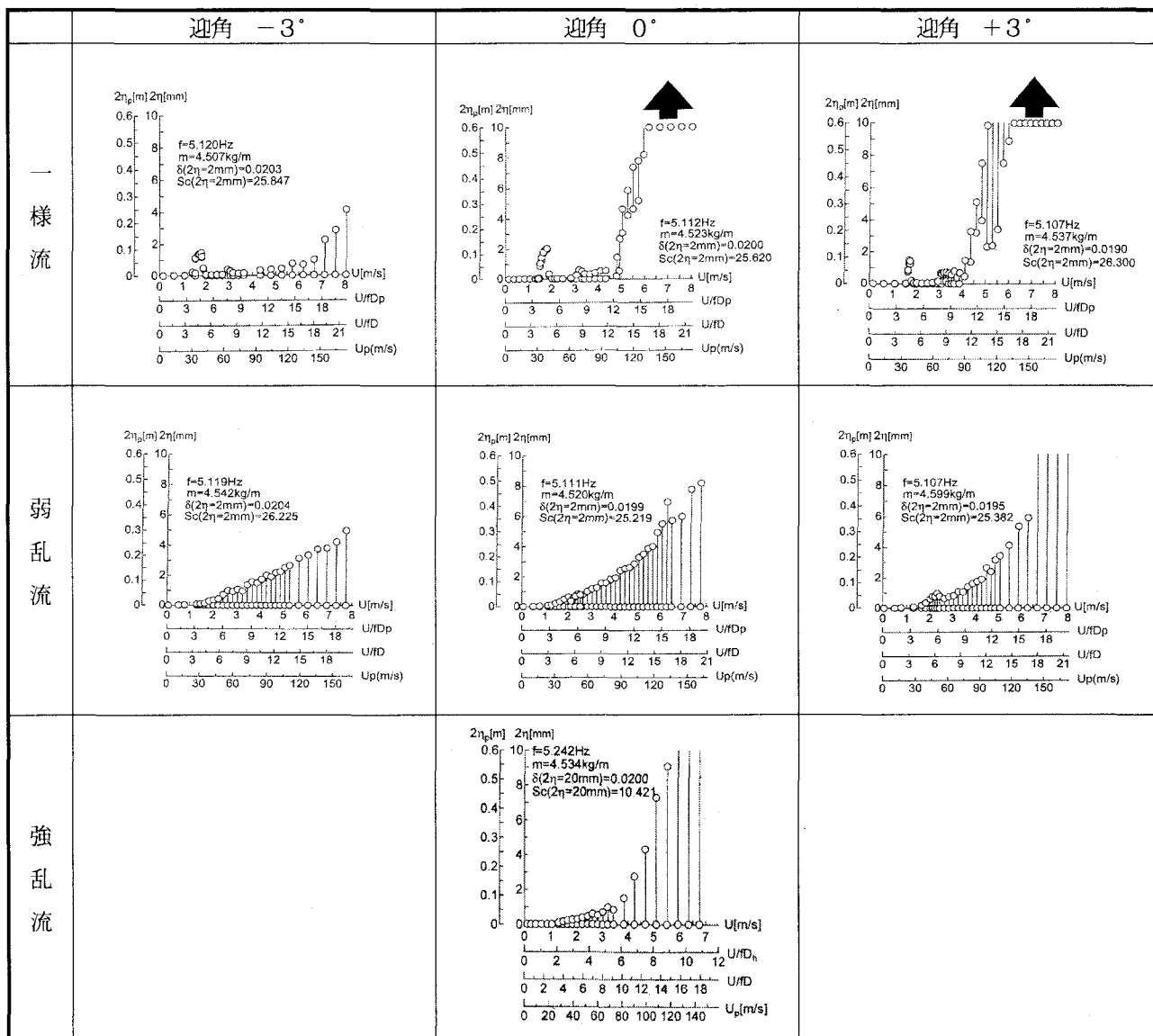


図-3 基本応答特性(ポスト高欄, たわみ 1 自由度)

## 5. 風の乱れの効果

今回は、一様流に加えて、主流方向乱れ強さ(6.5%〔「弱乱流」〕と表記する)及び12.7%〔「強乱流」〕を有する2種類の格子乱流を用いて、風の乱れの効果を検討した。

### (1) 鉛直たわみ振動応答(1自由度時)

ポスト高欄のみを有する基本断面に対する弱乱流中の応答は、図-3の下半分に併記している。乱流中では、渦励振の振幅が減少し、発散振動は振幅の不規則性を増してガスト応答の性質を兼ね備えるように変化する。全般的には、乱れ強さの増加とともに、特に発散振動は安定化する傾向にある。

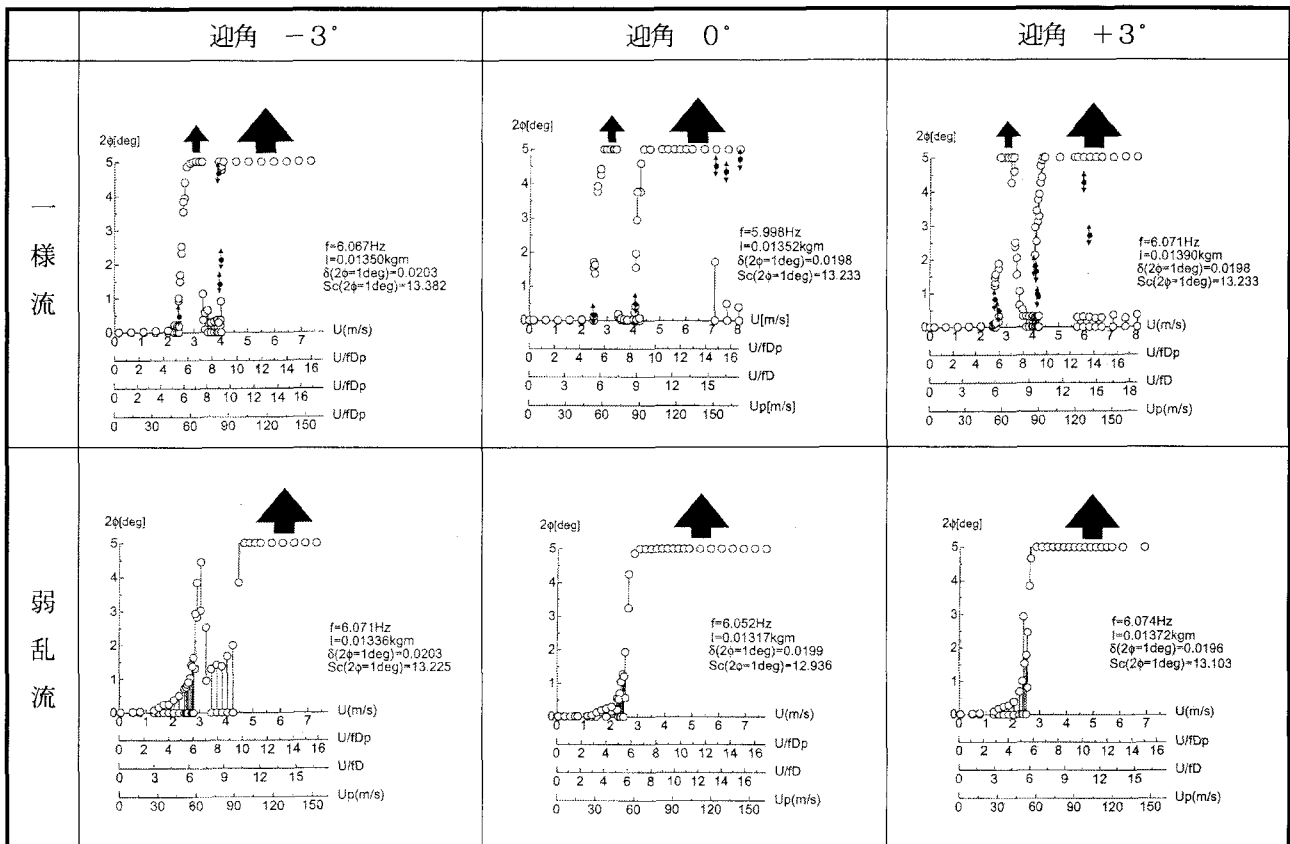


図-4 基本応答特性(ポスト高欄, ねじれ1自由度)

### (2) ねじれ振動応答(1自由度時)

同じく弱乱流中の応答は、図-4の下半分に併記している。

乱流中では、不安定なリミットサイクルが消え、高速風域での振動が風速限定型から発散型となる大きな応答の変化が現れている。これは、乱れの存在により見かけ上のアフターボディが長くなり、断面辺長比 $B/D$ が増加するためと考えられる。H型断面においても、断面辺長比の増加により風速限定型から発散型の応答性状へ変化する特性が見い出されており<sup>3)</sup>、本研究で対象とする断面とH型断面との空力的な類似性が見られる。なお、発散型ねじれフラッターの限界風速は、一様流中の応答特性と比較すれば、渦の影響を強く受けている可能性が考えられるが、詳細については今後の課題としたい。全般的には乱れの安定化効果はさほど期待できないと考えられる。また、細かく見れば、振動発生風速が乱流中で多少低下するケースもみられている。

以上のように、鉛直たわみとねじれ振動では、乱れの効果が異なることが少数主桁橋の大きな特徴である。なお、H型断面においては、乱れが小さな場合にねじれ振動の不安定性を表す非定常空気力係数 $A_2^*$ が同じように不安定側に変化することが明らかとなっている。この点に関しても、少数主桁橋の特性はH型断面の特性に類似していると考えられる。

## 6. 構造減衰の効果

対数減衰率を細かく変化させ、スクルートン数( $Sc$ )の違いによる渦励振最大振幅の変化を調べた。ここでは、一様流、傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ での実験結果を図-5に示す。図に示すように、たわみの渦励振は $Sc=48$ 以上で安定化しておりこれは、およそ $\delta = 0.04$ 以上に相当する。また、ねじれ渦励振では $Sc=45$ で最大倍振幅が $1^\circ$ 以下まで安定しており、このときの対数構造減衰率は、 $\delta = 0.07$ である。

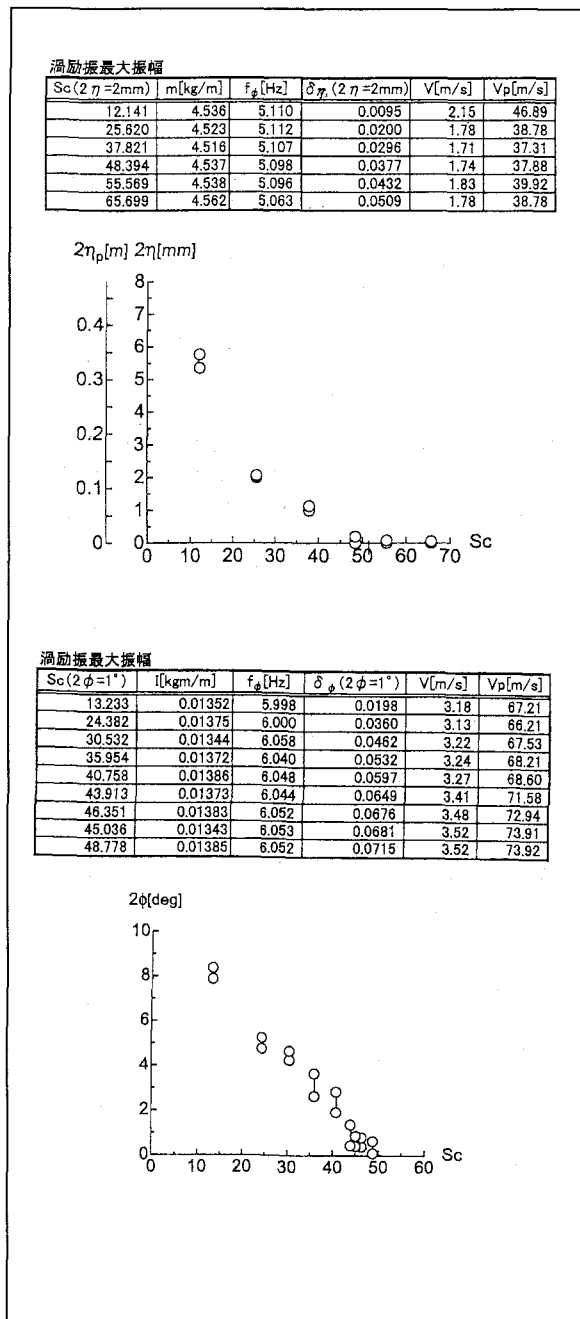


図-5 スクルートン数と渦励振最大振幅

## 7. 遮音壁設置時の耐風性

少数主桁橋は都市地域内などの住宅地近辺に建設される状況も多いと考えられるが、その際にはしばしば遮音壁の設置が必要とされる。このとき、遮音壁の設置により、見かけ上の有効高さが大幅に増加、縦横比 B/D も変わるため、耐風性の変化には十分な注意が必要である<sup>5)</sup>。

ここでは、2種類高さの遮音壁が設置された場合を想定して、耐風性の変化を調査した。遮音壁設置高さは、ポスト高欄に代えて、設置頻度の高い、高さ 2085mm (「低遮音壁」と称する) あるいは高さ 3085mm (「高遮音壁」と称する) を想定した。図-5 には、低遮音壁が設置された場合の断面形状を示す。

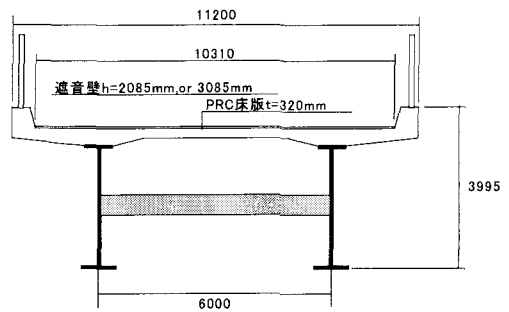


図-6 遮音壁設置時の検討対象断面

### (1) 鉛直たわみ振動応答 (1自由度時)

遮音壁設置時のたわみ振動応答を図-7 に示す。

一様流中では、ポスト高欄のみの断面と比較すると、渦励振の振幅は小さくなり、発散振動も安定化する傾向にある。ただし、遮音壁の高さの違いによる渦励振振幅への影響は明確には現れていない。発散振動については、遮音壁高さがより高いほど発現風速が上昇する傾向にあると考えられ、縦横比 B/D が増加するに伴い安定化していく関係となっている。

さらに乱れの効果については、遮音壁設置断面では、弱乱流であっても、渦励振の発生がみられなくなる。発散振動に対しては、振動の不規則性が高まり、ガスト応答に類する振動性状を示すようになる。ただし、その最大振幅は発散振動発生時から比べて大きく減少するには至っておらず、構造的な影響には注意が必要であると考えられる。

### (2) ねじれ振動応答 (1自由度時)

同じく遮音壁設置時のねじれ応答を、図-8 に示す。

一様流中では、ポスト高欄付き断面に比べて、振動発生風速はかなり狭くなる傾向にあり、限定振動のみを生じるようになる。

しかしながら、乱流中では一様流に対する不安定化傾向が著しい。一様流中では限定振動であったものが、乱流中ではポスト高欄付断面に類似した発散振動を発生するようになる。

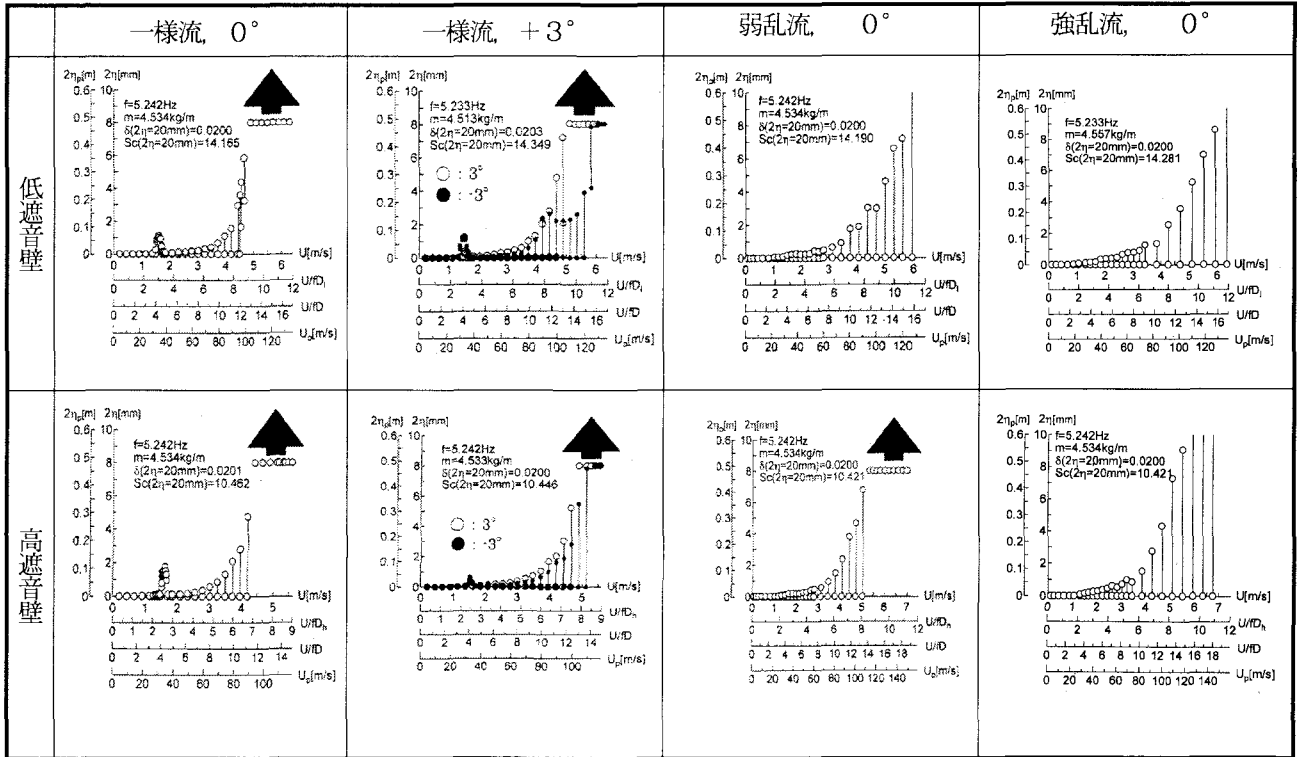
以上のように、遮音壁設置時に伴い、振動発生状況は大きく変わる特性があり、少数主桁橋では遮音壁あるいはこれに類する壁構造の有無を十分に反映して耐風検討を実施する必要がある。さらに、遮音壁設置時には、乱流中でのねじれ振動の不安定化が著しい場合があるのが特徴であり、検討のための気流条件には注意する必要がある。

### (3) 振動発現風速域

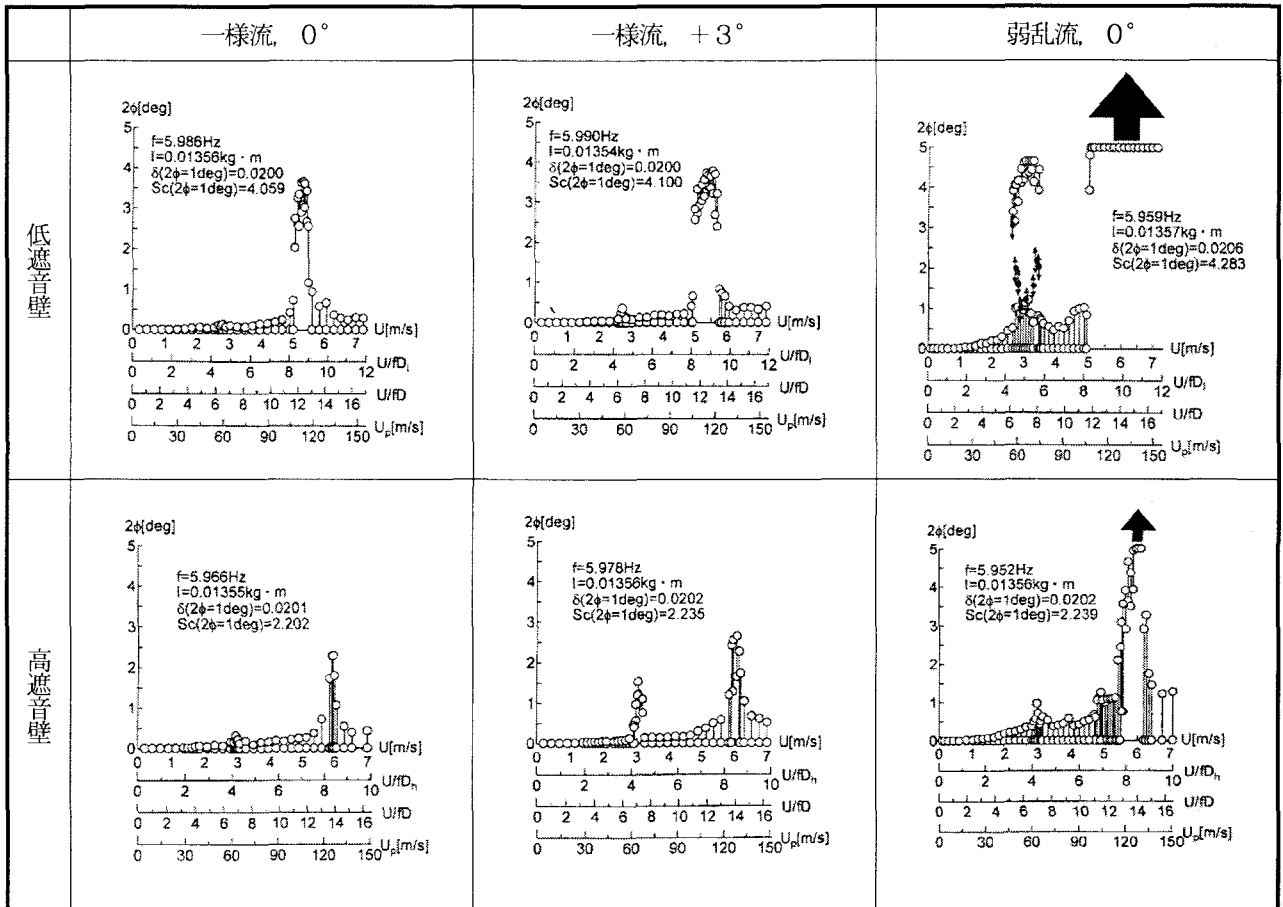
表-3 および表-4 に一連の応答性について、振動の発現風速域をまとめて示す。ここでは、基本的空力性状を把握するため、たわみとねじれで共通の代表長を用い無次元風速を算出した。遮音壁付き断面の場合も、たわみ渦励振の発現開始無次元風速は、それぞれ遮音壁上端から主桁下フランジ下面までの鉛直距離を D とすれば、1.67 (B/D) におおよそ対応する値となる。

なお、厳密には若干の差異が見られるが、前述のねじれ渦励振の場合と同様に、有効な断面辺長の取り方や、励振

を支配する渦の流下パターンなどを詳細に調査する必要がある。



図一七 基本応答特性(低遮音壁, 高遮音壁, 鉛直たわみ 1 自由度)



図一八 基本応答特性(低遮音壁, 高遮音壁, ねじれ 1 自由度)

傾斜角	気流	高欄/遮音壁	渦励振	ギャロッピング	備考
-3°	一樣流	ポスト高欄	U/fDp= 4.0~4.8 (Up = 33~40[m/s])	(U/fDp)cr= 16.2 ((Up)cr = 142[m/s])	
0°			3.8~5.0 (32~42)	12.0 (100)	
+3°			4.0~4.5 (32~38)	10.2 (85)	
-3°	弱乱流		6.3~* (53~*)		"バフエッティング
0°			6.3~* (53~*)		"バフエッティング
+3°			5.5~* (45~*)		"バフエッティング (振幅大)
0°	一樣流	低遮音壁	2.5~3.2 (28~36)	7.1 (81)	
		高遮音壁	2.3~2.6 (30~34)	6.2 (82)	
		低遮音壁	2.8~3.3 (32~37)	7.1 (81)	
		高遮音壁	2.4~2.7 (32~36)	5.2 (69)	
		低遮音壁	2.8~3.1 (32~35)	6.8 (77)	
		高遮音壁	-	5.8 (73)	
0°	弱乱流	低遮音壁	5.9~* (67~*)		*バフエッティング
		高遮音壁	5.2~* (69~*)		*バフエッティングからギャロッピングへ移行

注) 断面辺長比 (B/D) : ポスト高欄 B/Dp=2.49, 低遮音壁 B/Df=1.86, 高遮音壁 B/Dh=1.60 (実橋倍振幅 50mm 以上の振動発現風速域)

表-3 発現風速 (たわみ振動)

傾斜角	気流	高欄/遮音壁	渦励振	ねじれフラッター	備考
-3°	一樣流	ポスト高欄	U/fDp= 5.2~7.7 (Up = 52 ~ 75[m/s])	(U/fDp)cr= 8.6 ((Up)cr = 80[m/s])	
0°			5.0~7.0 (53~72)	8.3 (85)	U/fDp>14 で不安定リミットサイクルあり
+3°			5.5~8.0 (53~77)	8.9 (85)	U/fDp>12 で不安定リミットサイクルあり
-3°	弱乱流		4.8~* (46~*)		U/fDp=7.5~9.2 で振幅低下 高風速では発散型
0°			5.0~* (47~*)		発散型
+3°			4.7~* (45~*)		発散型
0°	一樣流	低遮音壁	4.4~4.6 (56~60)	8~10.2* (105~133)	*風速限定型
		高遮音壁	3.9~4.7 (60~72)	7.7~9.0* (118~135)	*風速限定型
+3°	一樣流	低遮音壁	4.2~4.8 (55~63)	8.0~9.8* (105~128)	*風速限定型
		高遮音壁	4.1~4.5 (62~69)	7.5~10.0* (115~150)	*風速限定型
0°	弱乱流	低遮音壁	4.1~6.2 (53 ~ 111)	7.0* (91)	*発散型
		高遮音壁	3.9~4.8 (60~74)	6.25~* (95~)	*風速限定型

注) 断面辺長比 (B/D) : ポスト高欄 B/Dp=2.49, 低遮音壁 B/Df=1.86, 高遮音壁 B/Dh=1.60 (実橋倍振幅 0.5° 以上の振動発現風速域)

表-4 発現風速 (ねじれ振動)

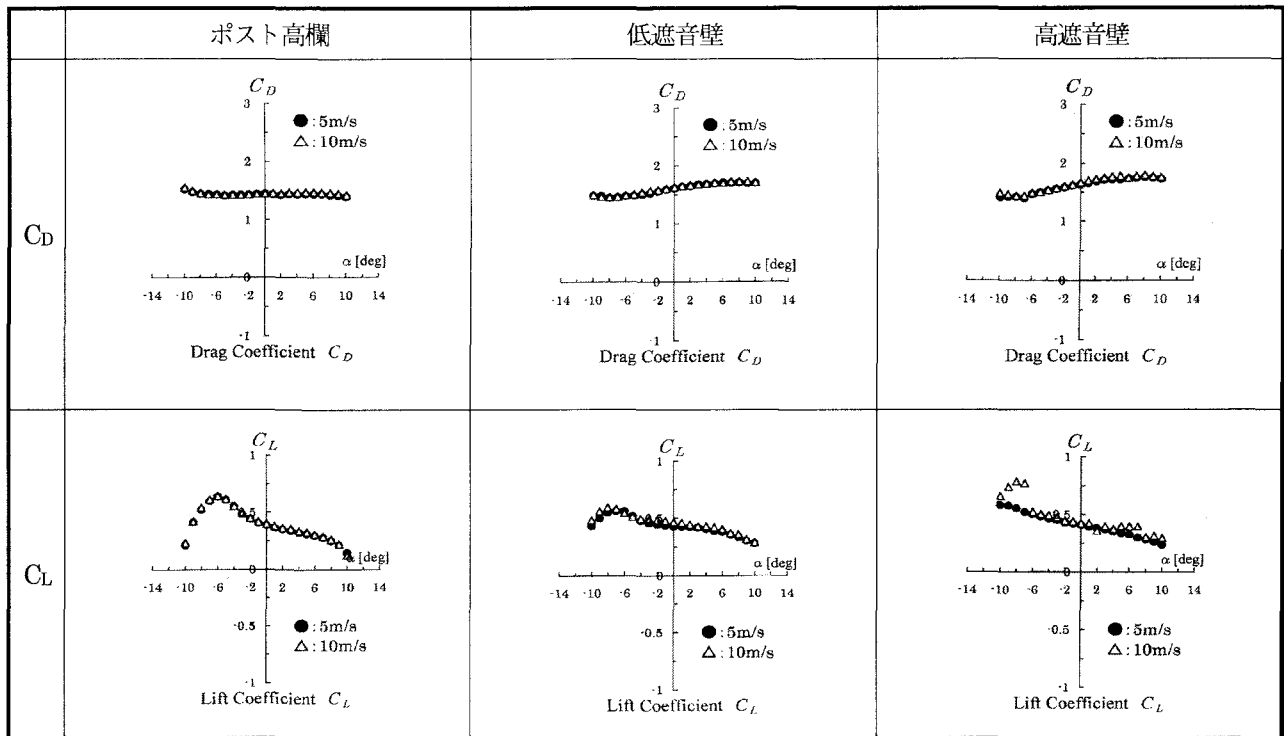


図-9 静的空気力係数(一様流)

(4) 静的空気力特性

実橋梁で遮音壁が設置される場合、動的耐風性とは別に、受風面積の増加により、風荷重が増加する点が構造的にも影響を及ぼすことがある。ここでは、遮音壁設置時の静的空気力係数について計測した。

図-9に構造軸周りの静的空気力係数を、ポスト高欄付断面と比較して示す。なお、無次元化にあたっての受風面積は各断面形状毎の代表高さをとっているため、これらの係数は荷重の大小を直接反映するものではない。

抗力係数  $C_D$  は、ポスト高欄付き断面では、1.4程度 の値をとる。遮音壁設置断面では、これが1.6~1.7程度まで増加している。従って、遮音壁設置時の風荷重は、抗力係数と受風面積の両方の増加が影響することに注意が必要である。また、道路橋示方書では、縦横比  $B/D$  をもとに抗力係数を想定しているが、上記の値はこれをやや下回る値である。

また、揚力係数  $C_L$  はいずれの断面でも負勾配を有しており、潜在的な発散振動発生可能性を有していることが分かる。なお、遮音壁設置に伴い、その勾配は緩やかに変化している。表-5には、揚力係数勾配を示す。0°、±3°の各傾斜角でそれぞれ負勾配を示す点は、自由振動応答と対応するものの、その絶対値は負の傾斜角のほうが大きく、準定常理論からは負迎角の時ほどギャロッピングに対して空力的に不安定となる傾向を示し、実際の応答性状とは逆の結果となっている。

	迎角 $\alpha$ [deg]	ポスト高欄	低遮音壁	高遮音壁
$dC_D/d\alpha$ ( $V=5.0\text{m/s}$ )	-3	-0.04906	-0.01630	-0.01467
	0	-0.02829	-0.00584	-0.01174
	3	-0.00594	-0.01058	-0.01458
$dC_L/d\alpha$ ( $V=10.0\text{m/s}$ )	-3	-0.04768	-0.01220	-0.02642
	0	-0.02681	-0.00440	-0.00070
	3	-0.00542	-0.01253	-0.01105

表-5 揚力係数勾配

8. まとめ

本研究では、少数主桁橋の耐風性を検討するため、典型的な形状として二主桁橋の断面について実験的に検討した。その主要な結果を以下に記す。

- ・少数主桁橋においては、鉛直たわみ・ねじれの各モードで空力不安定振動を発生する可能性がある。特に、ねじれモードでは、幅広い風速域で大振幅の振動を発生する可能性がある。また、鉛直たわみモードでも、発散振動を発生する可能性があるため、耐風性の検討が重要である。
- ・上記の特性は、従来の一箱桁断面で見られた特性に加え、H型断面で見られる特性の両方を兼ね備えたものと考えられる。
- ・風の乱れに関しては、特にねじれ振動への安定化効果が小さいと考えられ、場合によっては不安定化傾向も認められる。



- ・遮音壁が設置された場合、断面の縦横比が大きく変化し、耐風性が大きく変わりうる。特に、遮音壁設置時には風の乱れにより振動が大きく不安定化する場合があるため、耐風性検討には注意を要する。

なお、上記以外にも、二自由度の振動自由度を考慮した場合の影響、あるいは、鉛直たわみとねじれの干渉など引き続き検討を要する現象があり、これらは少数主桁橋の耐風特性を把握する上で重要であると考え研究を進めている。

また、今回取り上げた断面形状以外にも、合理化を図ることにより橋梁の形態のバリエーションは、さらに増加していくことが想定され、これらについても形態の変化にあわせて検討を行う必要があると思われる。

## 参考文献

- 1) 木村吉郎 永島寛之 久保喜延 加藤九州男：2主桁断面と溝型  $\pi$  型断面の空力応答特性, 第17回風工学シンポジウム論文集, pp.415-420, 2002.
- 2) Scanlan, R.H., Belveay, J.G., Budlong, K.S. : Indicial Aerodynamic Functions for Bridge Decks, Journal of Eng. Mech. Division, Proc. of ASCE, Vol.100, EM4, 1974.
- 3) 松本勝, 白石成人, 白土博通, 平井滋登, 伊藤裕一, 重高浩一：H型断面柱のねじれフラッター特性に関する研究, 第11回風工学シンポジウム論文集, pp.251-256, 1990.
- 4) 松本勝, 白石成人, 白土博通, 南荘淳：都市域内における高速道路高架橋の風荷重特性, 日本風工学会誌第55号, pp.129-130, 1993.
- 5) 上田, 山口, 猪原：合理化構造形式2主桁橋梁の空力振動特性, 第55回土木学会年次学術講演会論文集, I-B61, 2000, 9
- 6) 山田, 台原, 上島, 澤田, 枝元, 篠原：少数主桁橋梁の耐風性, 橋梁と基礎 Vol.36, No. 2, 2002, 2
- 7) 村越 麓, 芦塚, 清田, 宮崎：鋼少数主桁橋の耐風安定性と振動特性に関する実験的検討, 橋梁振動コロキウム, 2003, 9
- 8) 京都大学大学院工学研究科, (社)スィム総合研究所：第二名神高速道路少数桁の耐風安定性に関する検討, 平成12年3月
- 9) 京都大学大学院工学研究科, (社)スィム総合研究所：第二名神高速道路少数桁の耐風安定性に関する検討(その2), 平成13年3月
- 10) 京都大学大学院工学研究科, (社)スィム総合研究所：第二京阪道路 鋼1桁橋の空力特性に関する検討, 平成14年3月

(2003年9月12日受付)