

扁平箱桁断面の渦励振動特性に関する実験的研究

白石成人・松本 勝・武内隆文・佐伯英和

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON VORTEX SHEDDING EXCITATIONS OF FLAT BOX BRIDGE SECTIONS

By *Naruhito SHIRAISHI, Masaru MATSUMOTO,*
Takafumi TAKEUCHI, Hidekazu SAEKI

Synopsis

In connection with flexible long spanned bridge structures it is called for to disclose the vortex shedding excitations of flat box type cross sections which commonly are induced in rather low wind velocity.

In this paper an attention is particularly placed on three themes, namely (i) the effect of pitching angle, (ii) the effect of turbulence incident to natural strong winds and (iii) consequent treatment for improvement of aerodynamic stability. In addition to these the effect of solidity ratio of truss girders on vortex induced excitations is also discussed based on the wind tunnel tests.

1. ま え が き

橋梁を含めた土木構造物は、近年、産業、経済の発達、土木技術の進歩などに伴ない次第に長大化、巨大化の傾向にあり、それに伴って構造物の耐風安定性の問題が重要となってきた。本論文では構造物に生ずるさまざまな空力不安定現象のうち、主として比較的低風速において発生する渦励振動現象に着目する。渦励振動現象は直ちに構造物の破壊に結びつくことは少ないが、車両の走行障害、部材の疲労等、構造物に重大な機能障害を生じせしめることがあり、この振動発現の予想される構造物については十分検討が必要とされる。

非流線型物体が流体中に置かれたとき、物体の背後には、物体表面の境界層のはく離によって周期的な交番渦が発生する。この周期的後流渦による交番力に起因して発現する不安定現象が、渦励振動と呼ばれる空力振動現象である。渦励振動現象に関しては現在まで数多くの研究がなされてきたにもかかわらず、その発生機構は渦による強制振動と、自励振動的要素を合わせもつとされているものの本質的な解明はなされていない。

発生機構に関する最近の実験的研究には、矩型断面について、強制振動法により非定常空気力測定を行ない、考察を加えた伊藤他¹⁾、鷺津他²⁾、中村他³⁾、などの研究があり、また同じく強制振動法により断面まわりの非定常圧力分布測定を行ない、非定常空気力と比較した岡島他⁴⁾の研究や、同様な方法により渦の流れと物体の応答発現とを関連づけた小林他⁵⁾の研究、さらに特殊流速計により物体まわりの非定常流線を測定した溝田⁶⁾の研究などがある。

防振対策に関する最近の実験的研究には、吊橋、斜張橋の断面形状に関して検討を行なった伊藤・成田⁷⁾の研究、斜張橋の断面形状、迎え角変化に対して強制振動法により検討を加えた成田他⁸⁾の研究、迎え角変化の影響ならびにフラップ、スポイラーの制振効果について検討を加えた小西他⁹⁾の研究などがある。

本研究は、扁平箱型橋梁断面および1:2矩型断面について、主として耐風安定性の評価という立場から、風洞実験を行ない、考察を加えたものである。

第2章および第3章において、それぞれ、迎え角の変化に対する渦励振動特性、乱れの中での渦励振動特性について検討を行ない、それらの特性が対象断面形状にも依存することを示す。第4章において、偏平箱型断面について、対象断面形状に有効な防振対策の検討を行ない、また防振対策のひとつとして、斜張橋にトラス断面が採用される場合もあることより、第5章において、トラス側面の充実率の変化に対する渦励振動特性について検討を加える。

2. 迎え角の変化に対する渦励振動特性

渦励振動特性は物体の断面形状に大きく支配されるが、迎え角の変化は流体からみれば物体の断面形状変化と考えられ、また自然風は必ずしも水平からのみ作用するとは限らないことを考慮すれば、迎え角の変化に対する渦励振動特性の検討は不可欠と考えられる。また渦励振動に対する迎え角の影響は、対象断面形状にも支配されると考えられ、本章の研究は、偏平逆梯形橋梁断面と1:2矩型断面の2種の基本断面について、迎え角の変化に対する渦励振動特性を、風洞実験によって検討を行なうものである。

2.1 実験模型および実験装置

(1) 実験模型

本章で使用する模型は、偏平逆梯形橋梁断面および1:2矩型断面であり、Fig. 1にその形状を示す。模型はいずれも流れの二次元性を保つため、両端に端板が設けられた、スパン長93cmの二次元剛体部分模型である。

(2) 風 洞

京都大学工学部土木工学教室に設置されたエッフェル型吸い込み式風洞であり、測定断面は高さ1.5m幅2.5m、長さ8.5mに渡り測定可能となっている。風速は0~18m/secの範囲で連続的に制御することができる。

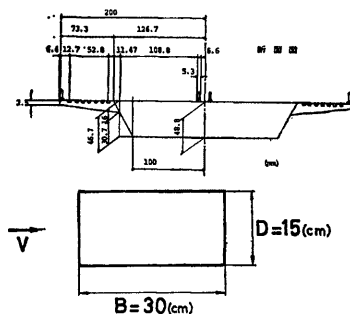


Fig. 1. Cross section (Box-Girder and Rectangular 1:2).

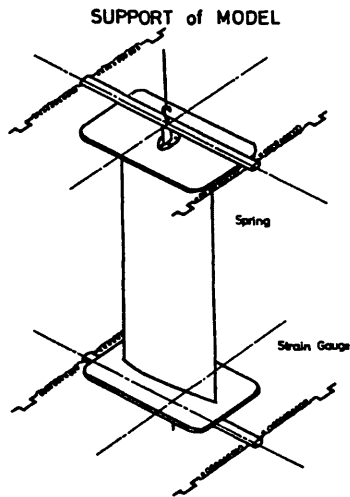


Fig. 2. Sketch of supported model.

(3) 風速測定器具

NPL型ビトー管および、ベッツ型マノメータ（理化精機工業社製）によって平均流速を測定した。

(4) 応答検出装置

模型はFig. 2のようにコイルスプリングに支持されており、模型の応答はコイルスプリング端のコの字エレメント（試作品）に貼り付けられた歪ゲージの抵抗値の変化として動歪計（新興通信工業社製、DS61MTY型）により検出し、DCアンプ（三栄測器社製、6L5型）を用いて電氣的に増幅し、ローパスフィ

ルター（新興通信工業社製，LIT 00450型）を通した後にペン書きレコーダー（渡辺測器製作所社製，WTR 21型）に記録した。

(5) 変動風速検出装置

熱線風速計（日本科学工業社製，21-1311型）および加算機（日本科学工業社製，28-6411型）を使用し2方向変動風速成分を測定した。記録は応答検出に使用したと同一のDCアンプ，ローパスフィルター，ペン書きレコーダーおよびデータレコーダ（TEAC製，R351-FH型）によった。

(6) データ解析器

データ解析に使用した計器は以下の通りである。

- (i) 相関確率分析器（SAICOR社製，SAI-42型）
- (ii) フーリエ変換器（SAICOR社製，SAI-470型）
- (iii) X-Yレコーダ（渡辺測器製作所社製）

2.2 実験結果および考察

(1) 偏平逆梯形橋梁断面

偏平逆梯形橋梁断面は，その形状が流線形に近いことから，耐風性の面からは，比較的安定であると考えられている。ところがこの断面も，迎え角変化に対して非常に敏感であり，特に吹き上げの場合には，渦励振動などの不安定現象が発生するという報告が，今までにもいくつかなされている¹⁰⁾。本節では偏平逆梯形橋梁断面の迎え角変化による応答特性変化を，ストローハル数特性も考慮しつつ検討する。

(i) ストローハル数

一様流中で，設定迎え角 $\alpha = \pm 7^\circ, \pm 5^\circ, \pm 3^\circ, 0^\circ$ において，風洞内におかれた静止模型の後流中における流速の時間的変化を熱線風速計によって測定し，相関確率分析器，フーリエ変換器を用い後流速度変動のパワースペクトルを求め，卓越するパワーをもつ振動数 f_s を読みとることによって求めた。Fig. 3の縦軸はストローハル数 $St = f_s d / V$ であり，横軸は迎え角 α である。この場合 $\alpha = -7^\circ, -5^\circ, -3^\circ, +7^\circ$ に関しては，ストローハル数を求めることができたが，他の迎角 $\alpha = 0^\circ, +3^\circ, +5^\circ$ に関しては後流速度変動の卓越振動数 f_s が見つからず，ストローハル数は決定されなかった。

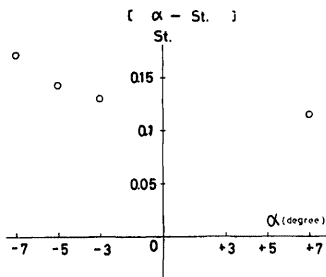


Fig. 3. Strouhal number in wake (Box-Girder Section).

Table 1. (Box-Girder Section)

No.	8	1	6	7	11
迎角 damper 流れ	0° 小 一様流	+7° 大 一様流	+7° 小 一様流	+3° 小 一様流	+3° なし 一様流
f_v (cps)	3.040	3.040	3.035	3.035	3.026
f_θ (cps)	6.718	6.671	6.689	6.702	6.757
f_θ / f_v	2.210	2.194	2.204	2.208	2.233
m (kg s ² /m ²)	0.5588	0.470	0.5588	0.5588	0.5518
I (kg sec ²)	0.00982	0.00978	0.0982	0.00982	0.00956
$\bar{\sigma}_v$ (at 10 mm)	0.01007	0.01081	0.01000	0.00989	0.00820
$\bar{\sigma}_\theta$ (0.050rad.)	0.01451	0.02781	0.01496	0.01400	0.00448

(ii) 一様流中での二次元自由振動実験結果

迎え角 $\alpha = \pm 7^\circ, \pm 5^\circ, \pm 3^\circ, 0^\circ$ と変化させて，一様流中において自由振動実験が行われた。なお damper として模型の支持アームに取り付けられた小さな板をシリコンオイル中に浸し，板 (damper) の大小により構造減衰を変化させた。実験諸量を Table 1 に示す。前述のように，この断面は比較的安定な断面であるが，迎え角の変化に対しかなり敏感であり，次のいくつかの条件のもとで渦励振動の発現が認められた。すなわち $\alpha = 7^\circ$ (damper 大小共) において曲げおよびねじれ振動が， $\alpha = 3^\circ$ (damper 小) において曲げ振

動が、 $\alpha=3^\circ$ (damper なし) においてねじれ振動が発現し、その他の場合には渦励振動の発現はみられなかった。

Fig. 4 に $\alpha=0^\circ$ の場合の応答図 (風速 V —振動振幅 A 図) を、Fig. 5 の (A), (B) に $\alpha=7^\circ$ の場合の、それぞれ damper 大の場合と damper 小の場合の応答図を示し、同じく Fig. 5 の (C), (D) に $\alpha=3^\circ$ の場合の、それぞれ damper 小の場合と damper なしの場合の応答図を示す。

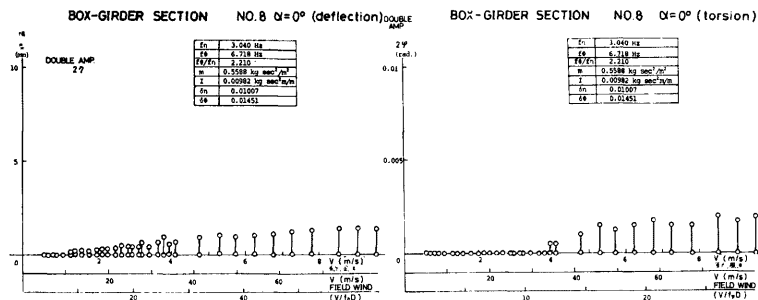


Fig. 4. Measured amplitude. (Box-Girder Section)

① $\alpha=+3^\circ$ の場合……damper 小の場合 (Fig. 5 (C)), 風洞風速 0.7m/sec 付近において曲げの渦励振動の発現が認められるのに対し、damper なし、すなわち構造減衰が極めて小さい場合 (Fig. 5 (D)), 風洞風速 1.9m/sec 付近でねじれの渦励振動の発現が認められ、曲げの渦励振動は発生していない。これは、damper がその性質上ねじれ振動についてより有効に作用したため、damper なしの場合、ねじれ振動が発現しやすくなり、このねじれ振動の存在が曲げの渦励振動を抑制したものと考えられる。

② $\alpha=+7^\circ$ の場合……damper 小の場合 (Fig. 5 (B)) 曲げ、ねじれとも第一および第二の不安定域、およびねじれフラッターの存在が認められるが、ねじれの不安定域が、曲げ応答の存在により、その応答出現風速域が狭げられている様子が見うけられる。damper 大の場合 (Fig. 5 (A)), damper 小の場合と比較して、ねじれの第一の不安定域が消滅している。これは、渦励振動は構造減衰に敏感であり、damper 効果はねじれ振動に対して特に有効であったことに起因したものと考えられる。ただし、ねじれの第2の不安定域の応答値を比較すると、damper 小の場合の方が damper 大の場合より応答値が小さくなっているが、これは実験装置に起因した誤差の混入によるものと思われる。

また、 $\alpha=-7^\circ, -5^\circ, -3^\circ$ では、後流渦測定において明らかに卓越周波数成分が観測されたにもかかわらず、振動が発現しなかった。このことは、静止断面後流速度変動結果と振動発現とはそのまま直接関連づけられず、従来の研究にも指摘されているように、流れのパターンと励振力との間の位相差が大きな影響を及ぼしていることに起因しているものと判断される。

(2) 1:2 矩型断面

設定迎え角を $\alpha=0^\circ, +4^\circ, +8^\circ, +10^\circ, +12^\circ, +16^\circ$ と変化させて、一様流中において実験を行なった。1:2 矩型断面については、今までにもいくつかの研究がなされており、その応答特性は、共振風速 V_{cr} のおよそ $1/2$ の風速で渦励振動が生ずるなど、非線形性の強いものとされている。実験の物理的諸量を Table 2 に示し、実験結果を Fig. 6 に示す。

迎え角 $\alpha=0^\circ$ の場合、 $1/2\bar{V}_{cr}=6.25$ 付近に渦励振動と考えられる限定振動風速域が存在し、 $\bar{V}_{cr}=12.5$ 付近より第二の不安定域が存在するが、これは次章の結果によると高風速においてギャロッピングに通ずるものと思われる。また $1/2\bar{V}_{cr}$ における渦励振動には不安定なリミットサイクルが存在することなど、従来の

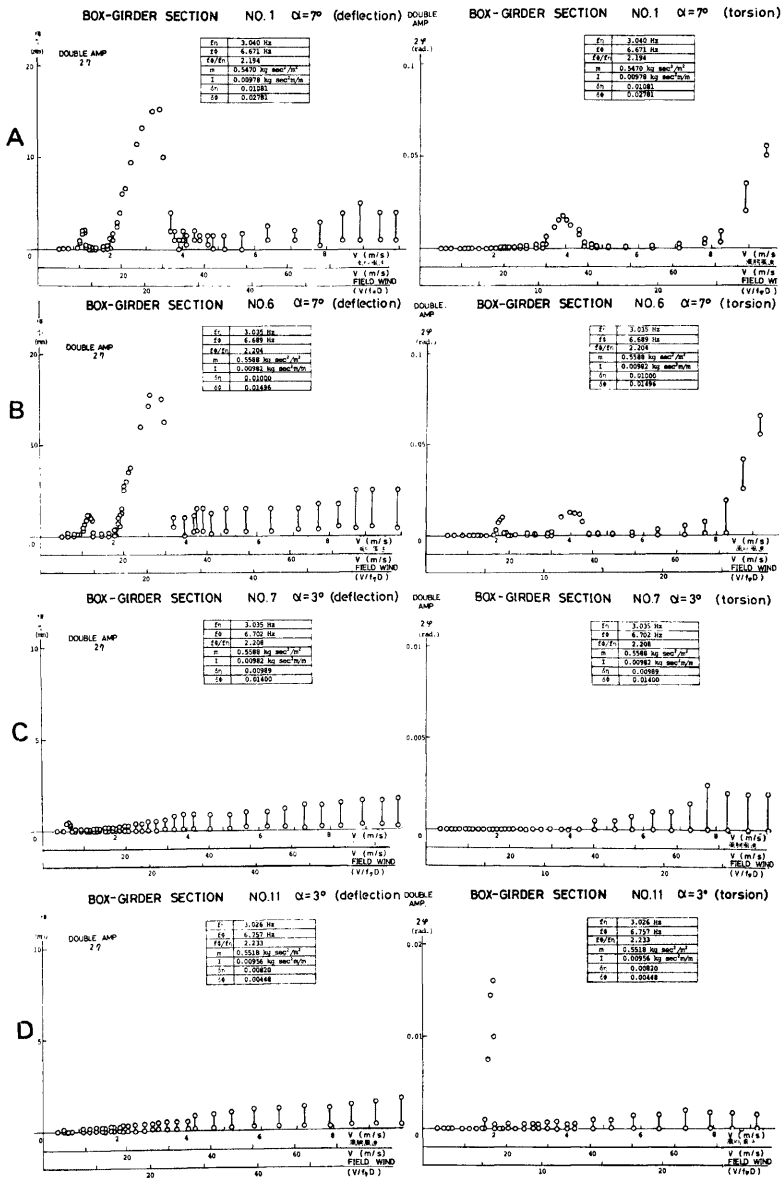


Fig. 5. Measured Amplitude. (Box-Girder Section)

Table 2. Characteristics of oscillations.
(Rectangular 1:2 Model)

α	f_s	δ_s	$2m\delta_s/\rho D^3$
0, 4	3.98	0.00540	2.338
8, 10, 12, 16	3.98	0.00580	2.504

下している一方、第二の不安定域における振動は限定振動となり、その最大応答振幅は第一の不安定域における応答振幅より大きくなる。 $\alpha=12^\circ$ になるといままで第一の不安定域としていた風速域において振動が

研究, 中村¹¹⁾, Novak¹²⁾ の結果とほぼ一致している。

迎え角の変化に対する応答特性の変化に着目すると、迎え角 $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ$ ではその応答特性にはほとんど差異はみられず、ただ迎え角 $\alpha=8^\circ$ で振幅がやや小さくなっている。ところが迎え角が 10° になると応答の様子は一変し、第一の不安定域の応答振幅が極端に低

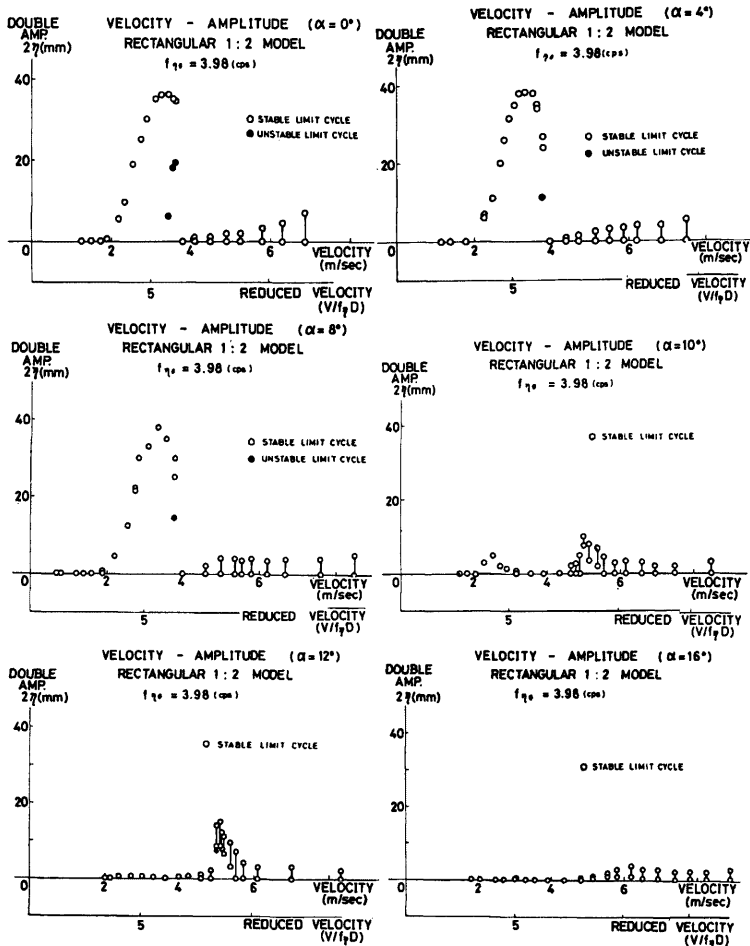


Fig. 6. Measured amplitude. (Rectangular 1:2 Section)

見られず、第二の不安定域でのみ振動がみられる。さらに迎え角 $\alpha=16^\circ$ になるとほとんど顕著な振動現象は認められず、 $\bar{P}=10.0$ 付近でわずかに確認される程度である。中村¹¹⁾は $\alpha=7.5^\circ$ 付近を境にして、模型の前縁からはく離れた流れが再付着し、流れの特性が大きく変化することを示している。

以上(1)、(2)のことから偏平逆梯形断面では、迎え角 $\alpha=7^\circ$ のとき渦励振動が最も生じ易いのに対し、1:2短型断面では $\alpha=0^\circ\sim8^\circ$ で最も生じ易くなるというように、対象とする基本断面形状が変化することによって、それらの渦励振動に対する迎え角の影響が全く違ったものになっている。従って今後これら“迎え角の変化”といった条件変化が物理的には何を变化させているのか(例えば、流れのパターン——流れの再付着点、後流幅、周期渦誘起速度等——や、断面の圧力分布等の変化)を定量的に調べるが必要と考えられる。

3. 変動気流中での渦励振動特性

自然風中における構造物の耐風安定性を評価する上で、乱れが各種の空力現象にどのような影響をもたらすかを調べることは極めて重要な課題といえる。そのため、これらの研究の第一段階として、本章では、前章と同様偏平逆梯形断面および1:2短型断面を対象として、二次元変動気流中での渦励振動特性の変化を調べる。

3.1 実験模型および実験装置

(1) 実験模型、風洞、および応答検出装置は前章と同様である。

(2) 変動風発生装置

加振翼(試作品、6枚のNACA-0012薄翼より成る)を風洞上流に設置し、それらを油圧によって回転加振させることにより、周期的および不規則気流を発生させた。

3.2 実験結果および考察

(1) 偏平逆梯形橋梁断面

実験条件をTable 3に示す。模型設定迎角は $\alpha=+7^\circ$ と $\alpha=0^\circ$ であり、変動気流は次の3種を対象とした。

Table 3. Characteristics of oscillations. (Box-Girder Section)

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
迎 角	$+7^\circ$	$+7^\circ$	$+7^\circ$	$+7^\circ$	0°	0°	0°	0°	$+7^\circ$	$+3^\circ$
フラップ	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	付設	付設
加振振動数	一様流	2.0Hz	0.2Hz	$0.65+1.5+2.0\text{Hz}$	一様流	2.0Hz	0.2Hz	$0.65+1.5+2.0\text{Hz}$	一様流	一様流
f_s (cps)	3.027	3.028	3.028	3.040	3.033	3.022	3.030	3.021	3.024	3.016
f_ϕ (cps)	6.748	6.720	6.718	6.689	6.680	6.702	6.676	6.680	6.700	6.711
f_ϕ/f_s	2.230	2.219	2.219	2.201	2.203	2.218	2.203	2.211	2.216	2.225
m (kg·sec ² /m ²)	0.5466	0.5466	0.5466	0.5466	0.5610	0.5610	0.5610	0.5610	0.5545	0.5520
I (kg·sec ²)	0.00963	0.00963	0.00963	0.00963	0.00984	0.00984	0.00984	0.00984	0.00982	0.00973
δ_s (at 10 mm)	0.01042	0.01044	0.01024	0.01003	0.00996	0.00974	0.01006	0.00903	0.00922	0.01096
δ_ϕ (0.050 rad.)	0.02132	0.02147	0.02221	0.02244	0.01862	0.01785	0.01825	0.01755	0.01881	0.00844

(i) 比較的高周波数である2.0Hz周期変動気流。

(ii) 曲げ、ねじれ固有振動数 $f_\eta=3.03\text{Hz}$, $f_\phi=6.72\text{Hz}$ に対し、ゆっくりした風の迎え角変動を想定した0.2Hz周期変動気流

(iii) ランダム波を想定した0.65Hz, 1.5Hz, 20Hzの合成変動気流

各変動気流の乱れの強さ $(\sqrt{\bar{w}^2}/V)$ は、2.0Hz変動気流の場合2~5%, 0.2Hz変動気流の場合3~5.5%合成波の場合2.5~5.5%程度である。

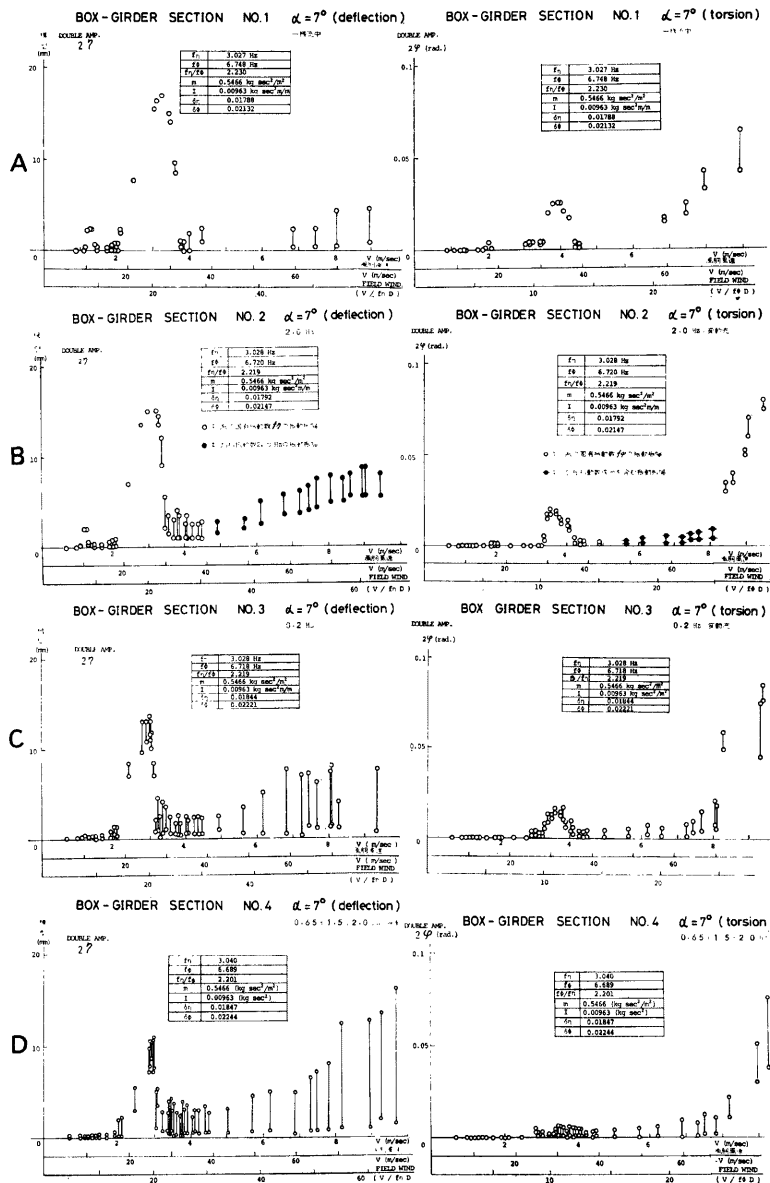
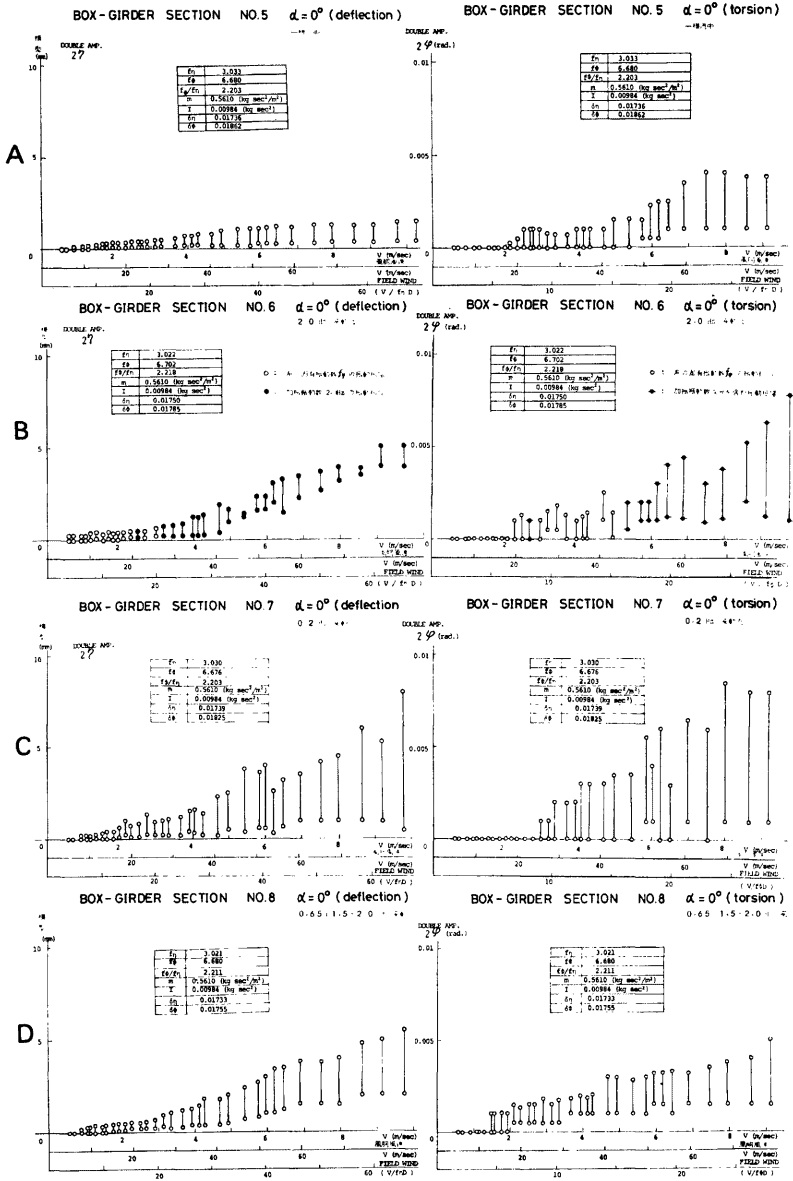


Fig. 7. Measured amplitude. (Box-Girder Section)



設定迎え角 $\alpha = 7^\circ$ の場合の結果を Fig. 7 に、 $\alpha = 3^\circ$ の場合の結果を Fig. 8 に示す。

① 設定迎え角 $\alpha = 7^\circ$ (Fig. 7)

以下に、各変動気流中における結果を一樣流中における結果 (Fig. 7 (A)) と比較しながら検討を加える。

(i) 2.0Hz 周期的変動気流中 (Fig. 7 (B))

曲げ振動においては、最大応答振幅が $2\eta = 16\text{mm}$ (一樣流中) より $2\eta = 15.3\text{mm}$ に減少しており、また第一、第二の曲げ渦励振動とも、その発振開始風速、終止風速がわずかに低風速側に移行している。ねじれ振動においては、一樣気流中で認められた第一の不安定域の振動が発現せず、また第 2 の不安定域が、かなり低風速側へ移行しており、その発振風速 $\bar{V} = 10.5$ 付近において、応答の急な立ち上がりが見られる。これはこの風速域近傍直前までは曲げ応答の存在によって、ねじれ応答が抑制されたものと考えられる。

(ii) 0.2Hz 周期的変動気流中 (Fig. 7 (C))

曲げ、ねじれ振動とも一樣流中における結果と比較して、最大応答振幅値の低減、発振風域の低風速側への移行が認められ、2.0Hz 変動気流の場合よりさらに低減している。特に曲げ振動においては、第一の不安定域が消滅し、また応答に beat 状の波形が認められる。なお、ねじれフラッターにおいては、その発振風速にほとんど変化は認められない。

(iii) 合成波変動気流中 (Fig. 7 (D))

曲げ、ねじれ振動とも一樣気流中における結果に比べて、0.2Hz の場合よりさらに、最大応答振幅値の低減、発振域の低風速側への移行が認められると共に、応答波形の beat 状が顕著となっている。一方、2.0Hz、0.2Hz の場合に気流の変動の影響が小さかったねじれ振動においても、最大振幅が 0.01 rad に至らない微小振幅振動に低減している。ただし、この場合においても、ねじれフラッターについては、あまり影響を受けていないのが注目される。

② 設定迎え角 $\alpha = 3^\circ$ (Fig. 8)

3 種のいずれの変動気流中においても、渦励振動は発現せず、変動気流に起因した不規則振動が、風速増加と共に現われるのみであり、3 種の変動気流での結果とも、その最大振幅値は、曲げ、ねじれ振動いずれの場合も変動気流の差によらずほぼ似た値をとっている。

以上の結果によると、渦励振動の応答が発現した $\alpha = 7^\circ$ の場合、変動気流周波数 2.0Hz、0.2Hz、合成波の順に渦励振動の最大応答振幅の低減がみられると共に、渦励振動の発現する風速域がより低風速側へと移行している。このように渦励振動特性は、変動気流の周波数特性に大きく依存することが明らかになった。しかしその応答振幅の低減のメカニズム、曲げ応答の方がねじれ応答に比べて乱れの影響を受け易い原因等については、今後の研究に待たねばならないといえよう。

(2) 1 : 2 矩型断面

本章においては、第 2 章で行なった 1 : 2 矩型断面に関する実験と異なり、曲げおよびねじれの 2 自由度振動系に関して実験を行なう。実験条件を Table 4 に示す。模型設定迎え角は $\alpha = 0^\circ$ であり、変動気流の周波

Table 4. Characteristics of oscillations. (Rectangular 1:2 Section)

加振振動数 (cps)	f_v (cps)	f_θ (cps)	$\bar{\delta}_v$	$\bar{\delta}_\theta$	$\frac{2m\bar{\delta}_v}{\rho D^2}$	$\frac{2I\bar{\delta}_\theta}{\rho D^4}$
0	1.05	2.27	0.01101	0.00730	5.017	6.302
0.5	1.05	2.27	0.01096	0.00730	4.996	6.304
1.0	1.05	2.27	0.01103	0.00730	5.099	6.392
1.5	1.05	2.27	0.01109	0.00722	5.045	6.222

数は 0.5Hz、1.0Hz、1.5Hz の 3 種である。変動気流の乱れの強さ ($\sqrt{\bar{w}^2}/V$) は、0.5Hz の場合 0.5~2%，1.0Hz の場合 2~3.7%，1.5Hz の場合 0.8~1.6% 程度である。

実験結果を Fig. 9 に示す。そのうち、一樣気流中における結果を (A) に、変動気流中における結果をそ

れぞれ(B)~(C)に示す。設定曲げ、ねじれ振動数比 $f\varphi_0/f\eta_0$ は2.16であり、この2自由度振動系においては、曲げ1自由度系における V_{cr} 付近より発生する渦励振動発生風速域と、ねじれ1自由度振動系における $1/2V_{cr}$ 付近に発生するねじれの渦励振動発生風速域が重複し、その結果、(A)に示すように、曲げ1自由

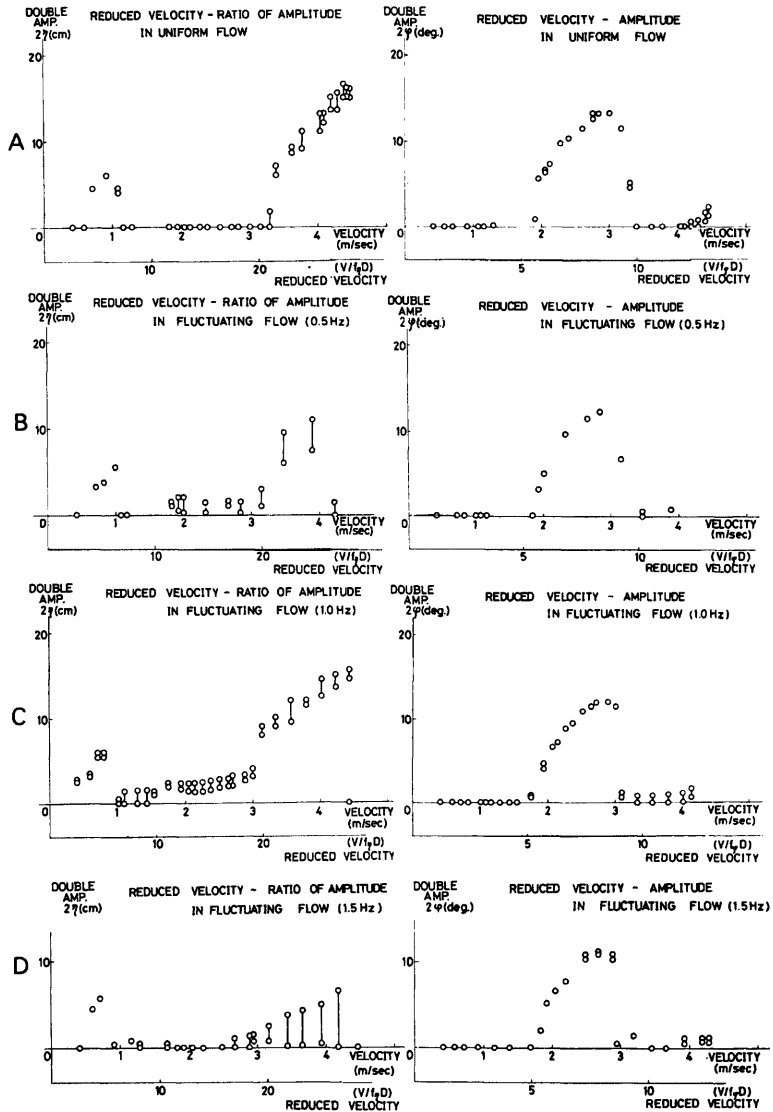


Fig. 9. Measured amplitude. (Rectangular 1:2 Section)

度系において発現する V_{cr} 付近からの応答が、 $\bar{V}=21$ 付近までねじれの渦励振動の存在によって抑制されている。得られた結果の概要は次のようである。

① 曲げ振動

$1/2V_{cr}$ 付近の渦励振動において、最大応答振幅についてはこれら 3 種類の変動気流中では一様流中に比べてあまり変化しないものの、応答終止風速については変動気流周波数を 0.5Hz, 1.0Hz, 1.5Hz と増すに従って順次低下しており、応答発現域が次第に狭くなっている。以上の他に一様気流中における応答特性と比較して、系の固有振動数 ($f_{\eta_0}=1.05\text{Hz}$) に近い振動数 1.0Hz の周期変動気流中における応答特性として、ねじれの渦励振動が発現している風速域においても曲げの応答発現が認められること、および全風速域に渡って振動波形が beat 状になることなどであり、一方系の固有振動数と異なる 0.5Hz あるいは 1.5Hz の周期変動気流中における応答特性としては、1Hz の場合と異なり、第二の不安定域における曲げ応答振幅が大きく抑制されること等を指摘することができる。

② ねじれ振動

一様気流中におけるねじれ振動と比較して、曲げ振動の場合と同じく第一の不安定域における渦励振動終止風速が、変動気流周波数を 0.5Hz, 1.0Hz, 1.5Hz と増すに従って $\bar{V}=10.5, 9.3, 8.7$ と低くなり、一方零発振風速に変化がみられないことより、不安定域が次第に狭くなっていると共に、最大応答振幅についても順次減少しているのが認められる。

以上 1 : 2 矩型断面においても、渦励振動特性が変動気流の周波数特性に大きく影響を受けることが明らかになった。傾向的には曲げ振動における影響の方がねじれ振動における影響より大きく、多くの場合それらは安全側、すなわち、渦励振動最大応答振幅を抑制するように働き、変動気流の影響は特に曲げの第 2 の不安定域において著しいといえよう。

以上の議論は、ある特定の卓越周波数を有する二次元変動気流中でのものであるのに対して、自然風の変動特性はより広帯域な不規則気流であり、また、その変動気流は橋軸方向にも相関性を有すると共に三次元的な乱れを構成していること等を考えたとき、これらの結果の実橋への適用については、更に多くの課題は残されているものの、一応、変動気流は、一様気流中での渦励振動を抑制する効果を有するものと考えられる。

4. 渦励振動現象に対する防振対策

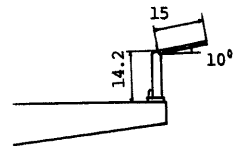
風洞実験の結果、実橋において渦励振動発現の予想される場合については、その断面形状に対して十分な防振対策が必要とされる。本章においては、第 2 章、第 3 章において対象とした偏平逆梯形断面についてその渦励振動に対する防振対策を検討すると共に、その防振効果のメカニズムを flow visualization によって考察する。また、防振対策が対象とする基本断面形状によって変化する一例として、さらに偏平六角断面に対する防振対策をもあわせて検討する。なお風洞実験に関して、使用した風洞および実験装置は第 1 章と同様である。

4.1 偏平逆梯形橋梁断面

(1) 風洞実験

第 2 章、第 3 章で対象とした模型に、Fig. 10 に示す末広大橋で用いられた、床板に対し 10° の角度を持つフラップ（制流板）を付設し、一様流中で実験を行なった。設定迎え角は、第 1 章において渦励振動発現の認められた $\alpha=+7^\circ$ および $+3^\circ$ である。実験の物理量を Table 3 に示し、実験結果を Fig. 11 に示す。

$\alpha=+7^\circ$ においては、風洞風速 $2\sim 3\text{m/sec}$ においてわずかに曲げ渦励振動の発現が認められるが、フラップの取り付けられていない基本断面と比較して振動は十分抑制されたといえる。またねじれ振動についても渦励振動はほぼ完全に抑制され、ねじれフラッターの発現も実験風速域においても認められない。 $\alpha=+3^\circ$



フラップ

Fig. 10. Flap plate

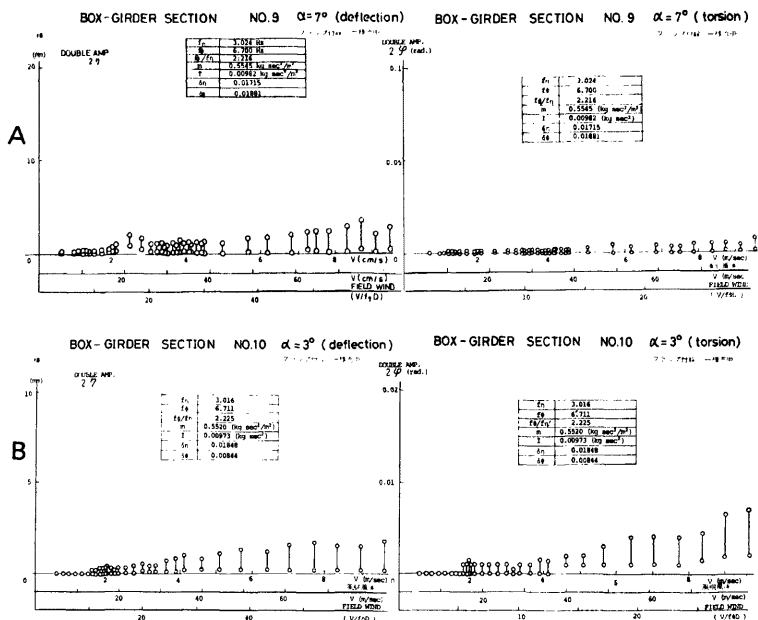


Fig. 11. Measured amplitude. (Box-Girder Section)

においては、曲げ、ねじれ両渦励振動とも、ほぼ完全に抑えられていると共に、ねじれフラッタの発現も認められない。

以上より、Fig. 10 に示される床板に対して 10° の角度をもって偏平逆梯形断面に全スパンに渡って付設されたフラップは、空力不安定振動を抑制する制振効果を有するものと考えられる。

(2) flow visualization

第2章においては、偏平逆梯形基本断面に関して、迎え角 $\alpha=7^\circ$ および 3° において渦励振動の発現が認められたのに対し、本章においては、フラップを付設した修正偏平逆梯形断面に関して、渦励振動の発現は認められなかった。これらの空力挙動の変化は、物体まわりの流れのパターンの変化によるものと考えられ、後流渦の特性を流れの可視化実験によって直接把握することは、渦励振動現象を議論する上で不可欠である。

(i) 実験の方法および実験装置

風洞実験の結果にもつき、水槽において風洞実験における換算風速($\bar{V}=V/fD$)および換算無次元振幅(本実験では $2\eta/D=0.18$)を一致させて、曲げ方向強制加振を行ない、断面まわり、ならびに後流の流れの特性を観察する。

使用水槽は、幅95cm、深さ60cm、長さ500cmであり、水中にはトレーサーとしてアルミニウムの微粉末が混入されており、直流モーターにより、任意の等速度で動かすことのできる台車に、強制加振装置および模型が取り付けられている。試験模型は、風洞実験で使用した模型断面と幾何学形状を相似させた縮尺率 $3/8$ の模型を使用した。なお実験時のReynolds数はおよそ 10^3 程度である。実験は次の2種の項目について行なう。

④ 基本断面 (フラップなし)、設定迎え角は $\alpha=3^\circ, 7^\circ$ 、流速は風洞実験において $\alpha=7^\circ$ の場合のみ応

答が発現した流速域にあたる $\bar{V}=21.8$ 。

⑤ 修正断面 (フラップ付設), 設定迎え角は $\alpha=7^\circ$, 流速は ④と同程度の $\bar{V}=20.8$

(ii) 実験結果および考察

④ 基本断面 (フラップなし) の場合

$\alpha=3^\circ$ の場合 (Photo. 1 (A), Fig. 12 (A)) ; 上床板側では 1 の位置ではなく離れた前縁はく離渦は, 床板に

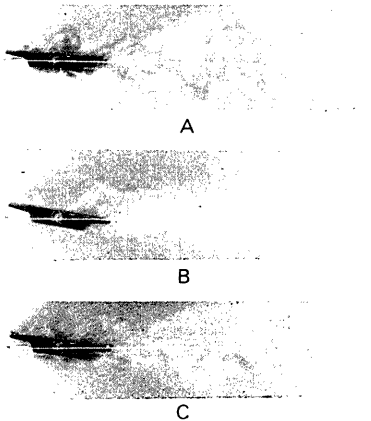


Photo. 1. Flow pattern around Box-Girder Section.

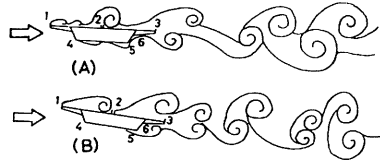


Fig. 12. Flow pattern around Box-Girder Section.

再付着し床板にそって流下するが, 2 の位置で大きく立ち上がりをみせ, そのまま 3 を経て後流へ放出される。下床板側では, 4 の位置ではなく離れた渦は下床板にそって流下し, 5 の位置を経て, 6 の位置に大きく取り込まれることなくそのまま後流へ放出される。すなわちこの場合, 上床板側と, 下床板側とから別々に干渉しあうことなく渦は放出されているが, 上床板側からの渦の放出と, 下床板側からの渦の放出との間の位相の関係により, 振動を発生させる

周期的交番力が生じなかったと考えられる。また後流の渦と渦とをつなぐ流跡線には, 流れの鉛直方向への立ち上がりが見られない。

$\alpha=7^\circ$ の場合 (Photo. 1 (B), Fig. 12 (B)) ; この場合は風洞実験において渦励振動の発現が認められる風速域に対応する。上床板側では, 1 の位置ではなく離れた前縁はく離渦は, $\alpha=3^\circ$ の場合と同様, 2 の位置にまで大きく立ち上がり, そのまま 3 の位置まで来る。下床板側では 4 の位置ではなく離れた渦は, 5 の位置を経て, $\alpha=3^\circ$ の場合と異って 6 の位置へと取り込まれて, 上床板側後縁 3 の位置で放出された渦と干渉しあい, あるいは一方の渦が他方の渦を取り込むという形で, 後流の大きな後流渦へと成長してゆく。そこにもまた上床板側からの渦の放出と, 下床板側からの渦の放出との間の位相が重要な要因として存在していると考えられる。またここでは後流において流跡線が流れの鉛直方向へ立ち上がった渦が観察される。

⑤ 修正断面 (フラップ付設) の場合 (Photo. 1 (C))

④の $\alpha=7^\circ$ の場合と比較して特徴的なことを以下に述べる。まず前縁に付設したフラップより発生する小さな, きこぎみな渦が, 3 の位置で成長している渦の影響を与えている。また後縁に付設したフラップにより, 上床板, 下床板から放出される渦の干渉する位置が後方にずれ, 位相のずれなどに起因して, 渦間の干渉が弱まる。さらに後縁のフラップの整流効果により, 流れがスムーズになることなどが, フラップの効果として考えられる。

4.2 偏平六角断面

前節において, 偏平逆梯形基本断面を有する橋梁においては, 床板に対し 10° の角度をもつフラップが防振対策として有効であることを示した。しかし, 断面形状の異なる橋梁においては, そのまわりの流体パターンが異なり, 個々の場合に応じて適当な防振対策を検討する必要がある。本節において, Fig. 13 の上図に示す偏平六角基本断面模型に, Fig. 13 の下図に示すスポイラーおよびフラップを付設し, それらの防

振効果について検討する。模型に施す防振対策の種類および設定迎角を次に示す。

基本断面模型 + A (spoiler A, flap なし), $\alpha = 7^\circ, 0^\circ$

基本断面模型 + AF (spoiler A, flap), $\alpha = 7^\circ$

基本断面模型 + B (spoiler B, flap なし), $\alpha = 7^\circ, 0^\circ$

基本断面模型 + BF (spoiler B, flap), $\alpha = 7^\circ, 0^\circ$

実験の物理量を Table 5 に示し、実験結果を Fig. 14 に示す。

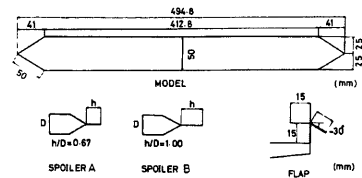


Fig. 13. Hexagonal Box-Girder, Spoiler and Flap plate

Table 5. Characteristics of oscillations. (Hexagonal Box-Girder)

防振対策の種類	α degree	m $\text{kg}\cdot\text{sec}^2/\text{m}^2$	I $\text{kg}\cdot\text{sec}^2/\text{m}$	f_n cps	f_θ cps	δ_y	δ_θ	$\frac{2m\delta_y}{\rho D^2}$	$\frac{2I\delta_\theta}{\rho D^4}$
A	7	0.602	0.0328	4.116	9.072	0.0073	0.0064	28.31	540.86
	0	0.581	0.0350	4.110	9.058	0.0074	0.0044	26.75	383.20
AF	7	0.626	0.0363	4.008	8.856	0.0072	0.0048	31.61	457.02
B	7	0.622	0.0328	4.079	9.299	0.0093	0.0076	36.84	635.11
	0	0.600	0.0348	4.078	8.973	0.0076	0.0047	28.43	407.94
BF	7	0.655	0.0380	3.979	8.785	0.0088	0.0102	36.83	990.67
	0	0.648	0.0364	3.994	8.780	0.0081	0.0092	33.54	911.74

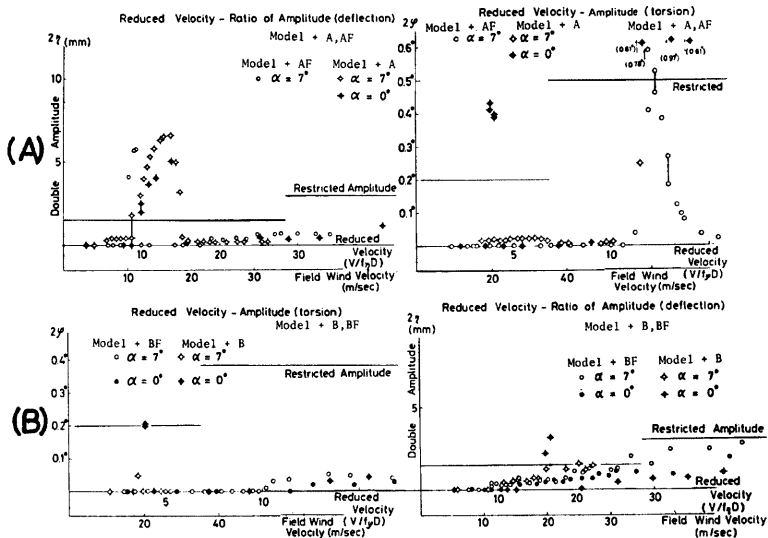


Fig. 14. Measured amplitude. (Hexagonal Box-Girder)

(1) 防振対策 A および AF の場合 (Fig. 14 (A))

曲げ応答について、防振対策 A (スポイラー A) を基本断面に施した場合、 $\alpha = 0^\circ$ の場合とも $\bar{V} = 14.0$ において最大応答振幅値をとる渦励振動の発現が認められ、最大応答振幅値は $\alpha = 7^\circ$ の場合の方が大きい。

これにさらにフラップを施した防振対策 AF の場合 ($\alpha=7^\circ$)、防振対策 A の場合 ($\alpha=7^\circ$) と比較して、応答発現開始風速は変化しないものの、応答発現域が大幅に狭くなり、それに伴って最大応答発現風速が低下すると共に、最大応答振幅値にいくぶん低下が認められる。しかしこの場合のフラップの防振効果は小さいといえる。

ねじれ応答について、防振対策 A (スポイラー A) の場合は、 $\alpha=0^\circ$ の場合に $\bar{V}=4$ 付近において渦励振動の発現が認められ、 $\alpha=0^\circ, 7^\circ$ の場合とも激しいねじれ振動が発現する。これにさらにフラップを付設した防振対策 AF の場合、防振対策 A の場合 ($\alpha=7^\circ$) と比較して、 $\bar{V}=12$ より発生するねじれ振動の応答値が、 $\bar{V}=13$ より高風速においては次第に小さくなり、この振動現象はフラッタではなく渦励振動現象であったことが理解される。

(2) 防振対策 B および BF の場合 (Fig. 14 (B))

模型基本断面に防振対策 B (スポイラー B) を施した場合、迎え角 $\alpha=0^\circ$ においてのみ、曲げおよびねじれの渦励振動の発現が認められ、これにフラップを付設した防振対策 BF の場合、上記の渦励振動はほぼ抑えられるようである。

以上本章において得られた結果を総合すると次の諸点が指摘できる。

- (i) 偏平逆梯形断面に対しては床板に対し 10° の角度をもつフラップが防振対策として有効である。またフラップが流体パターンに及ぼす影響もある程度明らかになった。
- (ii) 偏平六角基本断面に対しては、桁高と同じ長さをもつスポイラーが防振対策上有効であり、フラップは場合によってはある程度有効である。

5. トラスの充実率に対する渦励振動特性

斜張橋の場合、吊橋とは異なり桁そのものが種々の荷重に対して抵抗する主体であり、その桁断面は箱型形状が有利であるものの、渦励振動の発現をみることが多い。その対策として、たとえば六甲アイランド連絡橋のようにトラス断面を有する桁も採用されている。しかし斜張橋においては径間長の増大化に伴って桁の剛性として大きなものが要求される結果、トラス部材は大きくなりトラス面の充実率 (トラス面の投影面積/トラス外形面積) の増大化につながり、桁としてトラス断面を採用した主な理由 “空気流の通り抜け易さ” が次第に失われることになる。以上の背景をもとにして、本章ではトラスの充実率の変化による渦励振動現象の変化特性に検討を加える。

5.1 実験模型および実験装置

使用風洞および測定装置は、以前の章と同様である。

模型の断面は縦横比 $1:1.54$ の矩形断面であり、上下面は平板で構成され (ダブルデッキトラス断面を想定)、側面形状は充実率を変化させるために、Fig. 15 に示すように切り抜き、充実率を 100%, 80%, 60%, 50%, 40% と 5 種類に変化させる。実験の物理量を Table 6 に示す。なお応答測定実験に先だって充実率 100% の静止模型における後流渦の発生周波数測定を熱線風速計を用いて行なった結果、ストローハル数は 0.100 であり、従って限界換算風速 $V_{cr}(=1/s_r)$ は 10 である。実験は一樣流中、迎え角 $\alpha=0^\circ$ のもとで行なわれた。

5.2 実験結果および考察

実験結果を Fig. 16~Fig. 17 に示す。

(1) 充実率 100% の場合 (Fig. 16)

この場合、 $1:1.54$ の矩型断面になるが、曲げおよびねじれの渦励振動の発現が、それぞれ $1/2 V_{cr}$ および $1/2 V_{cr}$ 付近において認められ、 V_{cr} 付近より曲げの不安定振動が現われている。曲げおよびねじれそれぞれの応答特性は $1:2$ 矩型断面における応答特性と同一形態をとるようであるが、2 章の結果や白石他¹⁸⁾の研究によると、 $1:2$ 矩型断面において曲げの V_{cr} 付近より発生する曲げ振動は、ねじれの $1/2 V_{cr}$ にお

るねじれの渦励振動の存在によって抑制されると考えられるのに対し、本実験においては、ねじれの $1/2V_{cr}$ 付近のねじれの渦励振動の発生域と、曲げの V_{cr} 付近より発生する曲げ振動域とが重なる風速域においても、曲げおよびねじれの2自由度応答特性を示す。これはねじれの応答振幅が比較的小さく、ねじれ振動の曲げ振動におよぼす減衰力が曲げの自励力に比較して小さかったことによると思われる、実際、この風速域に

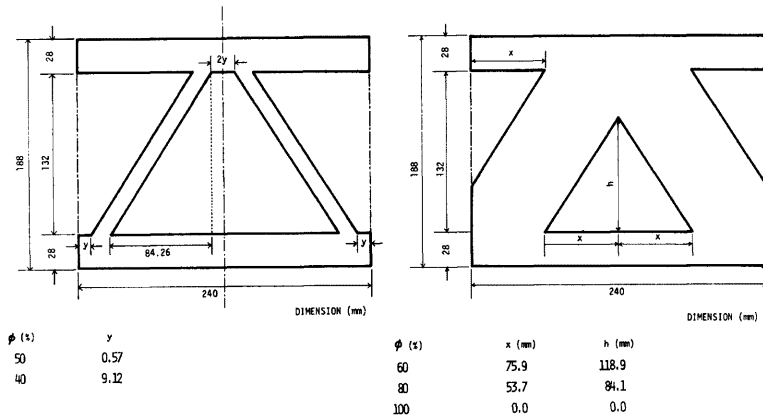


Fig. 15. Shape of truss.

Table 6. Characteristics of oscillations. (truss)

充実率 %	m (kg·sec ² /m ²)	I (kg·sec ²)	f_y (1/sec)	f_ϕ (1/sec)	ζ_y (10mm)	ζ_y (5mm)	ζ_ϕ (0.02 rad)	ζ_ϕ (0.012 rad)
100	1.0991	0.0407	2.71	7.15	0.00127	0.000863	0.000550	0.000456
80	0.9738	0.0375	2.18	7.22	0.000982	0.000927	0.00102	0.000801
60	0.7420	0.0357	2.79	7.30	0.000911	0.000786	0.000754	0.000684
50	0.8108	0.0421	2.82	7.33	0.000894	0.000815	0.000864	0.000660
40	0.7018	0.0360	2.87	7.36	0.00101	0.000894	0.00102	0.000801

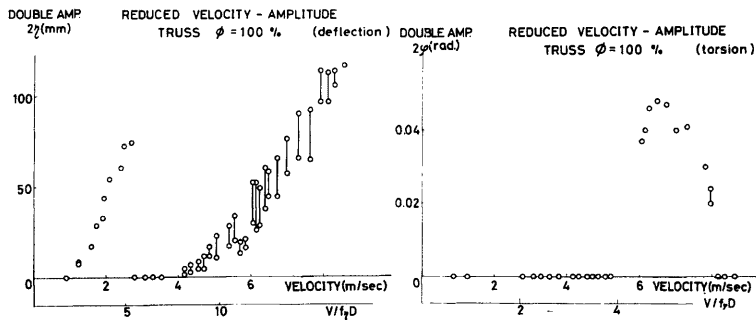


Fig. 16. Measured amplitude. (Truss Section)

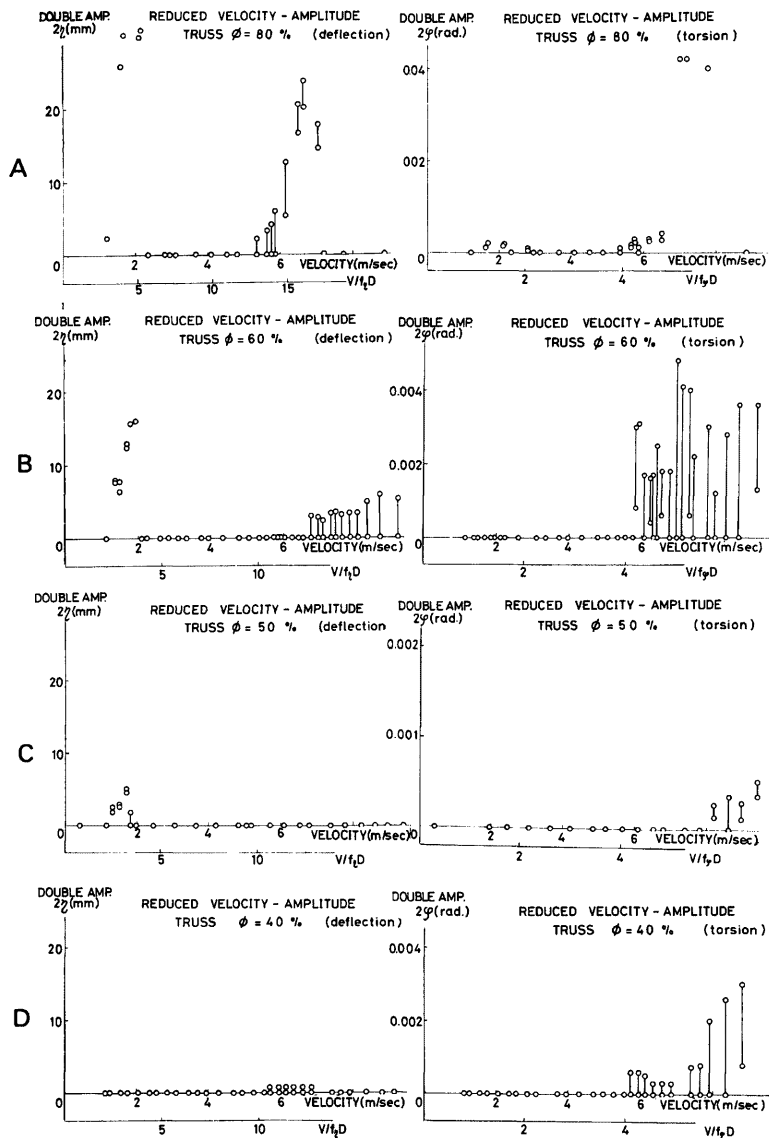


Fig. 17. Measured amplitude. (Truss Section)

において曲げ応答振幅が多少低減している。

(2) 充実率80%の場合 (Fig. 17 (A))

曲げ応答に関して、充実率100%の場合と比較して、第一の不安定域における渦励振動の応答値が半分以下に低減し、また第二の不安定域の開始風速が高風速側に移動すると共に $V=17$ 付近において振動が消滅している。これは流体パターンに変化が生じ、充実率100%の場合のようなギャロッピングが生じなくなったものと考えられる。ねじれ振動については、応答発現域は狭くなるものの、応答振幅にはあまり変化は認められない。

(3) 充実率60%の場合 (Fig. 17 (B))

曲げ応答において、第一の不安定域がさらに狭くなると共に、その応答振幅も、充実率100%の場合の1/4以下に低下しているものの、その応答形態は明確な渦励振動現象の様相を呈している。すなわち断面を通過して風が後流へ吹き抜けるという効果は、第一の不安定域における渦励振動の発生機構そのものには決定的な影響を与えないものと考えられ、これは、この第一の不安定域における渦励振動の発生機構（例えば渦のはく離点の位置等）が第二の不安定域における振動発生機構と異なることに起因すると思われる。ねじれ応答においては、充実率100%の場合の1/10以下の不規則な振幅の振動が発現するのみである。

(4) 充実率50%の場合 (Fig. 17 (C))

曲げ応答においては、第一の不安定域に微小な振幅の渦励振動が認められるのみであり、他の風速域において不安定域は認められない。ねじれ応答においても、測定風速域内での最大応答振幅が0.001 ラジアンにも満たない微小な振動が $V=8$ m/sec 付近より発現しているのみである。

(5) 充実率40%の場合 (Fig. 17 (D))

曲げ応答においては、渦励振動も発現しなくなり、ほぼ安定となる。ねじれ応答においても、比較的高風速域で不規則な振幅の微小振動が発現するのみである。

以上のことより、充実率が100%より40%まで小さくなると、曲げ振動についてはほぼ完全に改善され、ねじれ振動についてもかなり改善されることが明らかになった。今回の実験では迎え角 $\alpha=0^\circ$ について検討を加えたものであり、また上下面を平板によって構成したため、実際の橋梁断面の場合と多少異なるため、これらの結果からそのままトラス桁の耐風安定性を評価することができないまでも、トラス面の充実率が空気力学安定性に及ぼす影響の判断基準の一つとなるものと判断される。

6. あ と が き

以下に、本研究で明らかにされた諸点を列記する。

(1) 偏平逆梯形断面においては迎え角 $\alpha=7^\circ$ のとき渦励振動が最も生じ易いのに対し、1:2 矩型断面においては $\alpha=0^\circ\sim 8^\circ$ で最も生じ易くなり、対象とする基本断面形状が変化することによって、それらの渦励振動に対する迎え角の影響は全く違ったものになる。従って、今後、迎え角の変化といった条件変化が物理的には何を変化させているのかを定量的に調べるが必要と考えられる。

(2) 渦励振動は変動気流に影響を受け、またその周波数特性に大きく影響を受けることが明らかになった。傾向的には、曲げ振動における影響の方が、ねじれ振動における影響より大きく、多くの場合それは安全側、すなわち渦励振動最大応答振幅を抑制するように働く。ただし以上の結果は、ある特定の卓越周波数を有する二次元変動気流中のものであるから、これらの結果を、より広帯域な不規則気流でありまた、橋軸方向にも相関性を有すると共に三次元的な乱れを構成している、自然風中の実橋へ適用するには、更に多くの課題が残されている。

(3) 風に対する有効な防振対策は対象基本断面形状によって異なる。たとえば偏平逆梯形断面については、床板に対し 10° の角度をもつフラップを設置した場合に、また偏平六角断面については、模型の桁高等しい長さのスポイラーを設置した場合、渦励振動のほとんど生じない耐風性状の優れた断面が得られることが実験により明らかになった。

(4) トラス断面は斜張橋において、優れた耐風性状が期待される断面のひとつであり、トラスの充実率を変化させて、耐風安定性の検討を行なった結果、充実率約40%でほぼ実験模型の耐風安定性は保たれることが明らかになった。実験が迎え角 $\alpha=0^\circ$ のみについて行なわれたことや、模型上下面を平板によって構成したことにより、この実験の結果をそのまま実際のトラス桁に適用することはできないまでも、トラス面の充実率が空気力学安定性に及ぼす影響の判断基準の一つとなるものと判断される。

参 考 文 献

- 1) 伊藤 学・宮田利雄・森光康夫：正方形柱に作用する変動抗揚力，構造物の耐風性に関する第2回シンポジウム論文集，1972. pp. 159-165
- 2) 鷺津久一郎・大築志夫・藤井邦雄・大屋昭男・富沢治利：箱型模型の空力特性に関する風洞実験，構造物の耐風性に関する第4回シンポジウム論文集，1976. pp. 191-198
- 3) 中村泰治・溝田武人：矩型断面柱の非定常揚力と後流の速度変動について，構造物の耐風性に関する第3回シンポジウム論文集，1974. pp. 201-208
- 4) 岡島 厚・溝田武人・原田健一：並進振動する矩形柱まわりの圧力分布，第32回年次学術講演会講演概要集，1977. pp. 193-194
- 5) 小林紘士・小松定夫：限定振動の発生機構に関する実験的考察，第32回年次学術講演会講演概要集，1977. pp. 225-226
- 6) 溝田武人：角柱まわりの流れ(II)，第32回年次学術講演会講演概要集，1977. pp. 189-190
- 7) 伊藤 学・成田信之：耐風性からみたすり形式橋りょうの断面形状，構造物の耐風性に関する第4回シンポジウム論文集，1976. pp. 23-30
- 8) 成田信之・横山功一・伊藤壮一：斜張橋桁断面の空力特性(その1)，構造物の耐風性に関する第3回シンポジウム論文集，1974. pp. 223-230
- 9) 小西一郎・白石成人・松本 勝：斜張橋の耐風性に関する実験的研究，防災研究協会，昭和49年度報告書，1975
- 10) 小西一郎：鋼橋／基礎編 II，第2章，pp. 692-752
- 11) 中村泰治・溝田武人：ある箱型構造物の空力弾性的特性について，九州大学応用力学研究所所報，1973. pp. 37-46
- 12) Milos Novak: Galloping and Vortex Induced Oscillations of Structures, Wind Effects on Buildings and Structures, 1971.
- 13) 白石成人・松本 勝・武内隆文：矩形断面の渦励振動現象に対する曲げ・振れ間の干渉に関する実験的研究，第32回年次学術講演会講演概要集，1977. pp. 227-228