

インディシャル運動時の橋梁断面模型まわりの
流れ観察と表面圧力の測定*FLOW VISUALIZATION AND SURFACE PRESSURE MEASUREMENT
FOR BRIDGE DECK SECTION MODELS FOLLOWING AN INDICIAL
CHANGE IN INCIDENCE

吉村 健**・中村 泰治***

By Takeshi YOSHIMURA and Yasuharu NAKAMURA

1. はしがき

流体力は履歴現象によって特徴づけられる。この現象は流れの遅れ (fluid memory) とよばれる。ねじりフラッタの発生には、この流れの遅れが支配的であることは前論文^{1),2)}に述べたとおりである。すなわち、ねじりフラッタの発生には準定常効果は重要でなく、負減衰モーメントは、主として、空力モーメントの履歴現象によってもたらされるわけである。

前論文²⁾では、数種の充腹断面橋桁模型に対してインディシャルモーメント応答が測定され、空力モーメントの履歴特性が調べられた。その結果、ねじりフラッタを生じる不安定な断面とそれを生じない安定な断面の応答では、その履歴特性にきわめて特徴的な差異が認められることがわかった。また、この履歴特性の差異とねじりフラッタ発生の有無とが理論的にも実験的にも対応することが明らかにされた。

本研究の目的は、上記インディシャルモーメント応答の履歴特性にみられる特徴的な差異について、その流体力学的原因を明らかにすることである。そのために、インディシャルなねじり運動時の充腹断面橋桁模型まわりの流れ観察と、模型表面の圧力測定が行われた。以下では、まず、インディシャルモーメント応答の測定結果が記述され、ついで、流れ観察結果と圧力測定結果が記述される。

2. 模型と実験装置

本実験では、図-1と図-2の図中に示される二種の単純な充腹断面橋桁が取り上げられた。図-1の断面

は、断面比1対10の矩形断面 (図-2)を原形とし、その前縁と後縁に、それぞれ、弦長の約20%高のプレートを付加したものである。この断面と原断面を、それぞれ、プレート付矩形断面および矩形断面と以下によぶことにする。

縦×横×長さ=40×40×600cmの曳航式水路を用い、これら断面に対して、インディシャルモーメント応答測定、圧力測定ならびに流れ観察が行われた。インディシャルモーメント応答測定用と流れ観察用模型、および圧力測定用模型は、それぞれ、木製と真鍮製であり、弦長×スパン長=12×37cmである。圧力測定用模型では、上下面のスパン中央部に、それぞれ、9個の静圧孔 (1mmφ)が12mm間隔で配列されている。これら静圧測定点を、前縁側より順に、測点1～測点9とよぶことにする。各測点の圧力は、内径3mmφのステンレス製導圧管と内径6mmφの切換えコックを経て、小型圧力変換器に伝えられる。圧力変換器を含む系の固有振動数は十分に高い。

曳航台車に鉛直片持ち支持された模型は、文献2)に述べた装置によって、断面中心まわりのステップ的ねじり変位を与えられた。インディシャルモーメント応答の測定装置については文献2)を参照されたい。流れ観察にはアルミ粉法と水素気泡法が併用された。インディシャルモーメント応答測定と圧力測定の場合、および流れ観察におけるレイノルズ数 $R=Vc/\nu$ は、それぞれ、 $R \approx (1\sim 2) \times 10^4$ および $R \approx 3 \times 10^3$ であった。ここに、 V, c および ν は、それぞれ、流速、弦長および水の動粘性係数を表わす。この程度のレイノルズ数の差異による流れの違いは、比較的小さいものと思われる。

3. 実験結果と考察

(1) インディシャルモーメント応答の測定

流れ観察と圧力測定にききだち、プレート付矩形断面

* 土木学会第32回年次学術講演会において一部発表

** 学生会員 工修 九州大学大学院博士課程
(現在 九州産業大学講師 工学部土木工学科)

*** 正会員 工博 九州大学教授 応用力学研究所

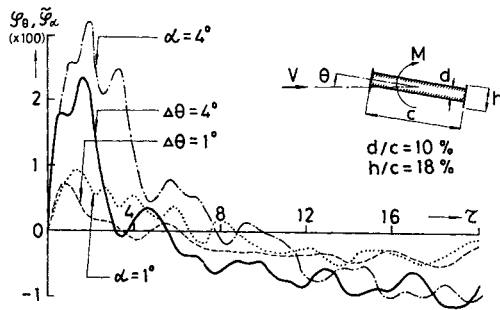


図-1 プレート付矩形断面模型の過渡モーメント応答

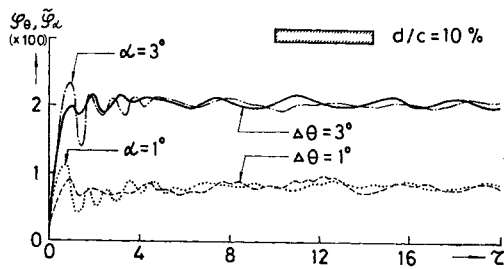


図-2 矩形断面模型の過渡モーメント応答

模型と矩形断面模型に対してインディシャルモーメント応答が測定された。図-1 と 図-2 に $\Delta\theta = 1^\circ$ と記される曲線がそれぞれの模型に対する応答測定結果である。模型に与えられたねじり変位は、初期迎角 0° 、ステップ

変位 $\Delta\theta = 1^\circ$ であった。図中、応答モーメント $M(\tau)$ は次式で無次元化されている（頭上げ方向が正）。

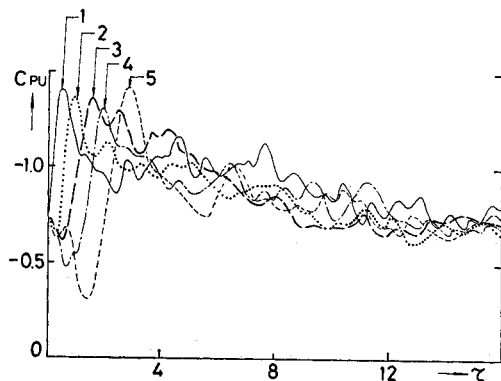
$$\varphi_\theta(\tau) = M(\tau) / (2\pi\rho b^2 V^2 l) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\tau = Vt/b$ 、 t 、 b 、 l および ρ は、それぞれ、無次元時間、実時間、半弦長、スパン長および水の密度を表わす。図-1 と 図-2 の応答では、その履歴特性に著しい差異が認められる。すなわち、姿勢変化直後に生じる頭上げモーメントが緩和される過程で、前者は減少を示すのに対し、後者は減少を示さない。前論文²⁾によれば、この履歴特性の差異とねじりフラッタ発生の有無とが理論的にも実験的にも対応する。したがって、プレート付矩形断面はねじりフラッタを生じる不安定な断面であり、一方、矩形断面はそれを生じない安定な断面である。

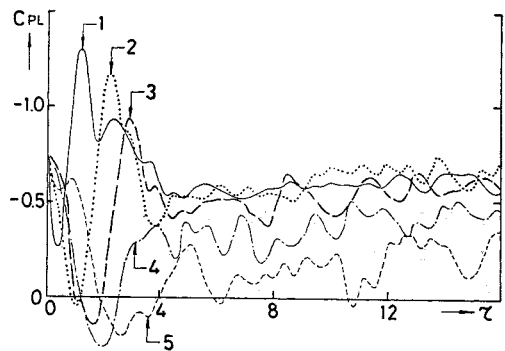
(2) 流れ観察と圧力測定

上記インディシャルモーメント応答の履歴特性にみられる特徴的な差異について、その流体力学的原因を明らかにするために、流れ観察と圧力測定が実施された。

本研究の目的からすると、模型に与えられるステップ変位 $\Delta\theta$ は、線形応答を示す微小変位でなければならない。しかしながら、微小変位に対する流れの変化はきわめてわずかであり、流れ観察と圧力測定が困難となる。そこで、本実験では、インディシャルモーメント応答の



(a) 上面の静圧



(b) 下面の静圧

図-3 プレート付矩形断面模型の静圧

特性が線形応答と定性的に変わらない範囲で、比較的大きなステップ変位が模型に与えられた。プレート付矩形断面模型と矩形断面模型に与えられたステップ変位は、それぞれ、 4° と 3° であった。この場合の応答は、それぞれ、図-1 と 図-2 に、 $\Delta\theta=4^\circ$ と $\Delta\theta=3^\circ$ の曲線として示されている。

a) プレート付矩形断面模型

まず、プレート付矩形断面模型の結果を記述する。図-3 は、インディシャルなねじり運動時の模型上下面の圧力測定結果である。図中、各曲線に記される 1~9 の数字は測点番号を表わす。また、圧力は次式で無次元化されている。

$$C_{PJ} = (P_J - P_0) / \left(\frac{1}{2} \rho V^2 \right), \quad J=U \text{ あるいは } L$$

.....(2)

ここに、 P_U と P_L および P_0 は、それぞれ、上面と下面の静圧および測点の静水圧を表わす。

図-4 は、これら過渡圧力の測定結果から得られた圧力分布である。図中、 $\tau=0$ の太い破線と $\tau=\infty$ の太い実線の曲線は、それぞれ、姿勢変化の前後における定常値を表わす。また、LE と TE は、それぞれ、前縁と後縁を表わす。図にみる上下面の圧力分布の特徴は、非対称な負圧の山と谷の発生と移動にある。すなわち、姿勢変化直後、前縁付近とそのいくらか後方に、それぞれ、負圧の山と谷が発生する ($\tau=0.6$)。その後、この負圧の山と谷が後方へ移動する ($\tau=1.2\sim 3.0$)。約 $\tau=$

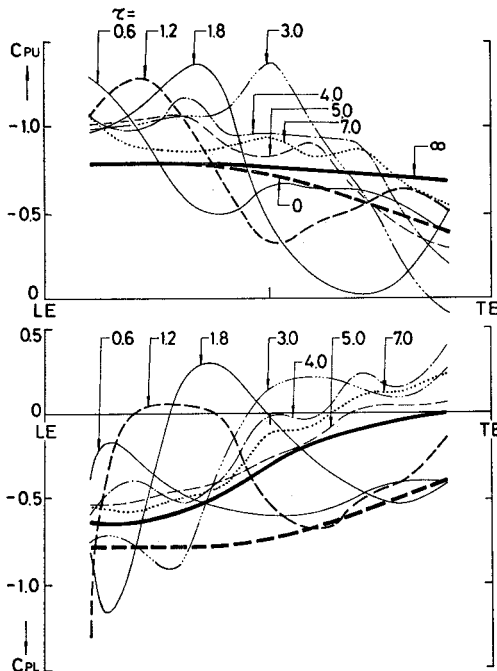


図-4 プレート付矩形断面模型の圧力分布

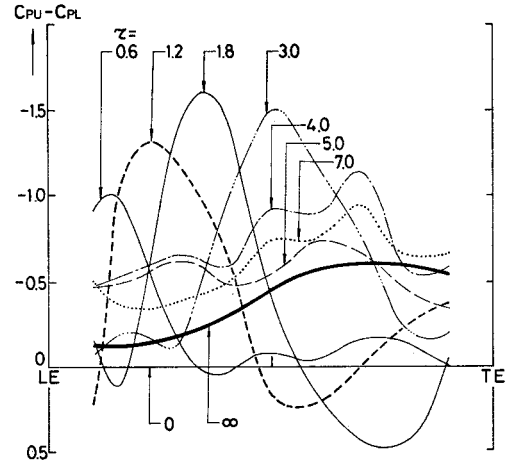


図-5 プレート付矩形断面模型の差圧分布

4 で負圧の山と谷が消滅した後、緩慢な変化を経て、約 $\tau=12$ で圧力分布はほぼ定常値に近い分布となる。

図-4 の圧力分布と 図-1 のインディシャルモーメント応答の対応を調べるために、図-4 より差圧分布を得た。これを 図-5 に示す。姿勢変化直後の差圧分布では、前縁付近にきわめて大きな上向き負圧の山が発生する ($\tau=0.6$)。その後、この負圧の山が後方へ移動する ($\tau=1.2\sim 3.0$)。約 $\tau=4$ で負圧の山が消滅した後、緩慢な変化を経て、約 $\tau=12$ で差圧分布はほぼ定常値に近い分布となる。この差圧分布よりインディシャルモーメント応答を推定すると、次のとおりである。すなわち、姿勢変化直後に頭上げモーメントが生じた後、モーメントが急激に減少する。その後、小さな変動を伴いながら、モーメントが緩慢に減少する。このような推定は、図-1 の実測結果と定性的に一致する。すなわち、模型上下面の非対称な負圧の山と谷の発生と移動、およびその後の緩慢な圧力変化により特徴づけられる圧力分布と、不安定な断面に特有のインディシャルモーメント応答とが、定性的に対応することがわかった。

写真-1 は、インディシャルなねじり運動時の模型まわりの流れ観察写真である。本実験では、模型前縁付近に張られたタングステン線から、姿勢変化と同時に、水素気泡のシートを発生させた。このようにして、姿勢変化以後に形成されるはく離せん断層が白色に可視化され、姿勢変化以前のはく離せん断層と区別される。写真-1 にみるように、姿勢変化直後の流れでは、白色のはく離せん断層が巻き込み (写真-1 (b))、その後、この巻き込み渦が成長する (写真-1 (c)~(g))。すなわち、流れの特徴は、姿勢変化に基づくはく離バブルの発生と成長にある。このような流れの変化を経て、約 $\tau=7$ になると、ほぼ定常流 (写真-1 (h)) に近い流れが模型まわりに形成される。

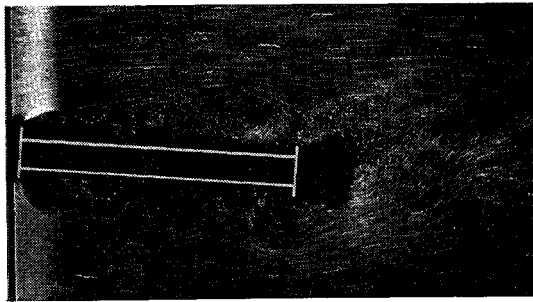
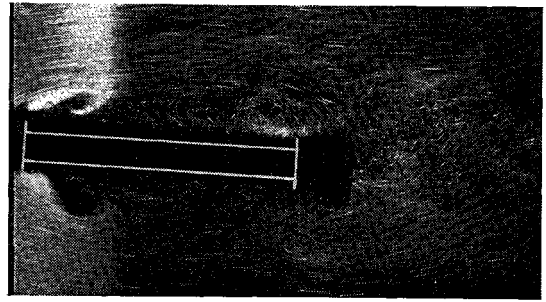
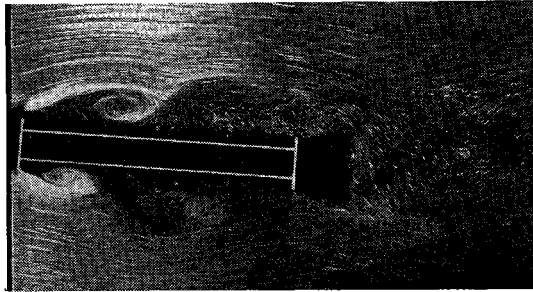
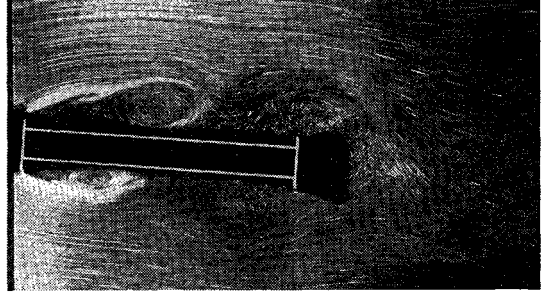
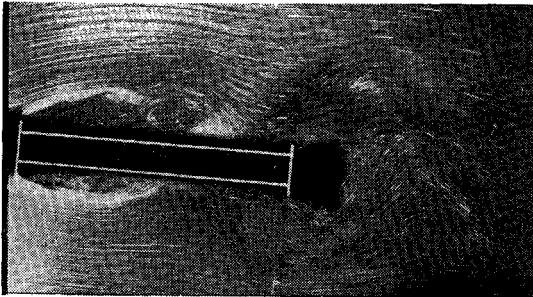
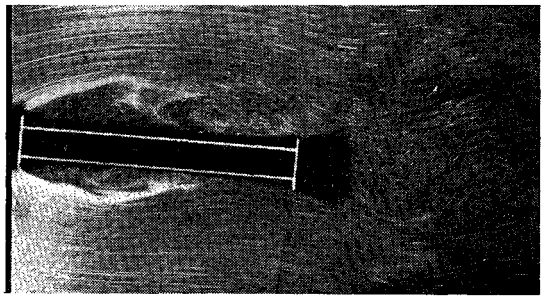
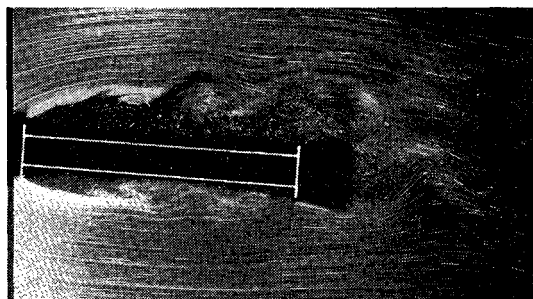
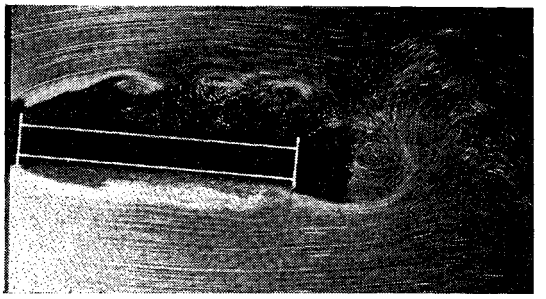
(a) $\tau=0.21$ (b) $\tau=0.68$ (c) $\tau=1.57$ (d) $\tau=2.46$ (e) $\tau=3.32$ (f) $\tau=4.18$ (g) $\tau=6.28$ (h) $\tau=\infty$

写真-1 プレート付矩形断面模型まわりの流れ

以上述べたように、インディシャルなねじり運動時の流れでは、はく離バブルの発生と成長がみられ、一方、圧力分布では、負圧の山と谷の発生と移動が生じる。図-6 は、これらの現象が互いに密接な関係にあることを示す資料である。図中、I は、流れ観察写真より推定された模型上下面の再付着点の位置を表わす。また、 \square と \bullet は、それぞれ、各測点における負圧の山と谷の発生時

刻(図-3 参照)を表わす。図-6 より、再付着点付近に負圧の谷が生じること、ならびに再付着点よりいくらか前方に負圧の山が生じることが知られる。このことから、負圧の谷、すなわち圧力回復現象は、はく離せん断層の再付着によって生じたものと考えられる。また、負圧の山は、はく離せん断層の強い巻き込み渦の寄与によって生じたものと思われる。このような流れの変化と圧

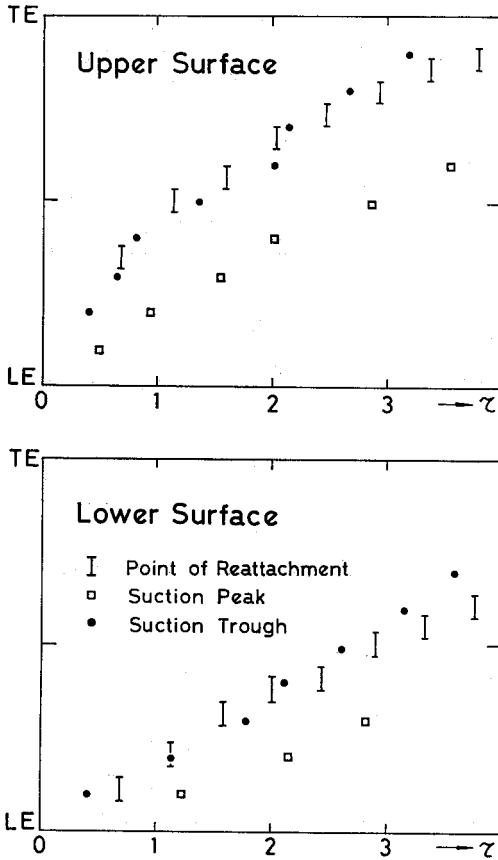


図-6 はく離バブルの成長に伴う負圧の山と谷の移動 (プレート付矩形断面模型)

力変化に類似した現象が、翼のダイナミックストール時に認められている³⁾。

なお、図-4 にみたように、 $\tau > 4$ では、負圧の山と谷が消滅し、圧力分布は緩慢に変化する。この圧力変化は、上面はく離バブルの破裂と下面の巻き込み渦の減衰、およびその後の緩慢な流れの変化(写真-1(f)~(h))と対応するようである。

ねじりフラッタを生じる不安定な充腹断面橋桁模型に対する以上の実験結果を要約すると、次のとおりである。すなわち、この模型の上下面では、インディシャルなねじり運動時、非対称なはく離バブルの発生と成長がみられる。これははく離バブルによって、非対称な負圧の山と谷の発生と後方への移動、およびその後の緩慢な圧力変化が、模型上下面にもたらされる。この圧力分布によって、不安定な断面に特有のインディシャルモーメント応答、すなわち、姿勢変化直後の頭上げモーメントの発生とこれに続くモーメントの減少がもたらされる。このモーメント応答の履歴現象が負減衰モーメントをもたらすのであるから、ねじりフラッタの発生原因は、姿勢

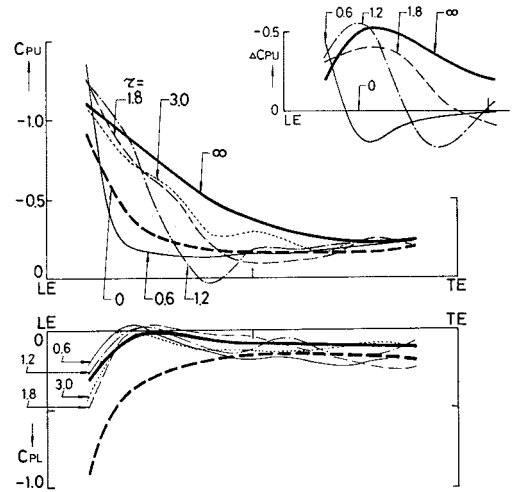


図-7 矩形断面模型の圧力分布

変化に基づくはく離バブルの発生と成長にあると結論される。

b) 矩形断面模型

次に、矩形断面模型の結果を記述する。図-7 は、インディシャルなねじり運動時の模型上下面の圧力分布である。本断面に対する姿勢変化以前の定常圧力分布(図中、 $\tau=0$ の太い破線の曲線)は、既述のプレート付矩形断面のそれと異なり、前縁付近で大きな圧力勾配を示す。この場合、姿勢変化に基づく圧力変化の特性を調べるには、図の結果を変動圧力として図示の方が都合がよい。図中、 ΔC_{PU} の図は、上面圧力の変動成分を示したものであって、上面圧力 C_{PU} から姿勢変化以前の定常圧力を差し引いたものである。 ΔC_{PU} の図にみるように、本模型の上面でも、負圧の山と谷の発生と後方への移動が生じるが、プレート付矩形断面模型の上面でみたような著しい移動はない。一方、下面では、負圧の山と谷は発生せず、姿勢変化後、まもなく、圧力分布はほぼ定常値に近い分布となる。

図-8 に示される差圧分布では、姿勢変化直後、前縁付近に上向き負圧の山が生じ、その後、この負圧の山がわずかに後方へ移動する。この差圧分布よりインディシャルモーメント応答を推定すると、次のとおりである。

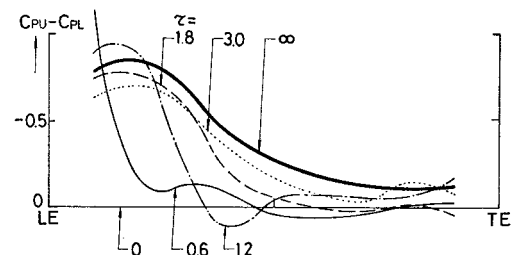


図-8 矩形断面模型の差圧分布

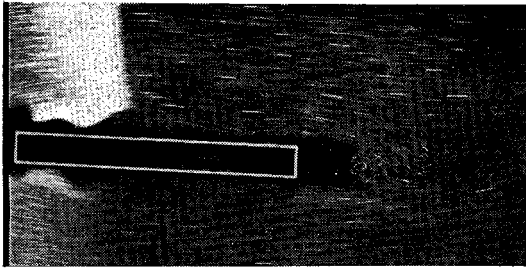
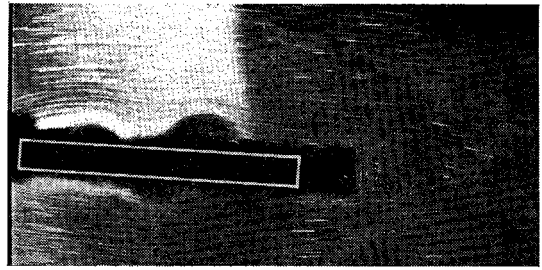
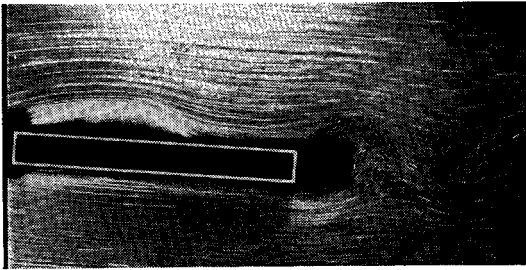
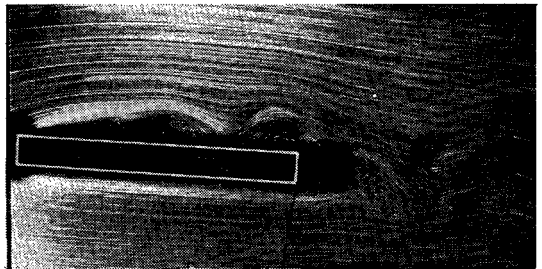
(a) $\tau=0.64$ (b) $\tau=1.50$ (c) $\tau=3.21$ (d) $\tau=\infty$

写真-2 矩形断面模型まわりの流れ

すなわち、姿勢変化直後に頭上げモーメントが生じた後、プレート付矩形断面模型のようにモーメントは減少しない。モーメントは $\tau=1.2\sim 3.0$ で小さな変動を示した後、そのままほぼ定常値に近い値となる。この推定は、図-2の実測結果と定性的に対応する。

写真-2は、インディシャルなねじり運動時の模型まわりの流れ観察写真である。本模型上面のはく離バブルはプレート付矩形断面模型上面のはく離バブルに比べて小さい。また、下面のはく離バブルは著しく小さい。既述のように、はく離バブルの発生と成長は負圧の山と谷の発生と移動をもたらす。このことから、はく離バブルが大きく成長する断面では、負圧の山と谷が大きく後方へ移動し、一方、はく離バブルが小さい断面では、負圧の山と谷の移動が少ないといえる。プレート付矩形断面は前者に相当し、本模型は後者に相当する。

結局、上記二種の模型のインディシャルモーメント応答にみられる履歴特性の差異が、はく離バブルの大きさの違いにより生じることがわかった。

(3) 出発流れ

ねじりフラッタの発生には流れの遅れが支配的である。この流れの遅れは、実は、有効迎角運動の寄与を表わす^{1),2)}。ねじり運動と有効迎角運動に対するインディシャルモーメント応答がほぼ一致すること、ならびにこれらインディシャル運動時の模型まわりの流れの間にほとんど差異がないことは、前論文^{2),9)}に述べたとおりである。

一方、インディシャルな有効迎角運動時の流れの本質

を保存し、かつ、より単純な流れは出発流れと考えられる。ここに、出発流れとは、静止流体中において、一定迎角で物体を急出発させたときの流れである。前論文⁹⁾によれば、出発流れに対するモーメント応答は、有効迎角運動のインディシャルモーメント応答を近似し、したがって、ねじり運動のインディシャルモーメント応答も近似する。このことから、出発流れの観察は、ねじりフラッタの発生機構の考察に有効と思われる。以上の考察に基づき、上記二種の模型の出発流れが観察された。

流れ観察にさきだち、これら模型について、出発流れに対するモーメント応答 $\hat{\varphi}_\alpha(\tau)$ が測定された。図-1と図-2に、それぞれ、迎角 $\alpha=1^\circ$, $\alpha=4^\circ$ および $\alpha=1^\circ$, $\alpha=3^\circ$ と記される曲線が得られた結果である。本実験結果も、また、 $\hat{\varphi}_\alpha(\tau)$ とねじり運動のインディシャルモーメント応答 $\varphi_\theta(\tau)$ とが定性的に一致することを示している。また、図示されていないが、プレート付矩形断面模型に対して測定された出発流れ時の圧力分布でも、図-4に示されたインディシャル運動時の圧力分布とほぼ同様に、負圧の山と谷の発生と移動ならびにその後の緩慢な圧力変化が認められた。

写真-3は、 $\alpha=4^\circ$ に対するプレート付矩形断面模型の出発流れ観察写真である。既述のインディシャルなねじり運動時の流れとの間に basic flow の違いがあるにもかかわらず、出発流れでも、上記流れとほぼ同様に、急出発後、非対称なはく離バブルが模型の上下面に生じていることに注目すべきである。同様のことが矩形断面模型の場合にも認められた。したがって、出発流れに対するモーメント応答とインディシャルモーメント応答の

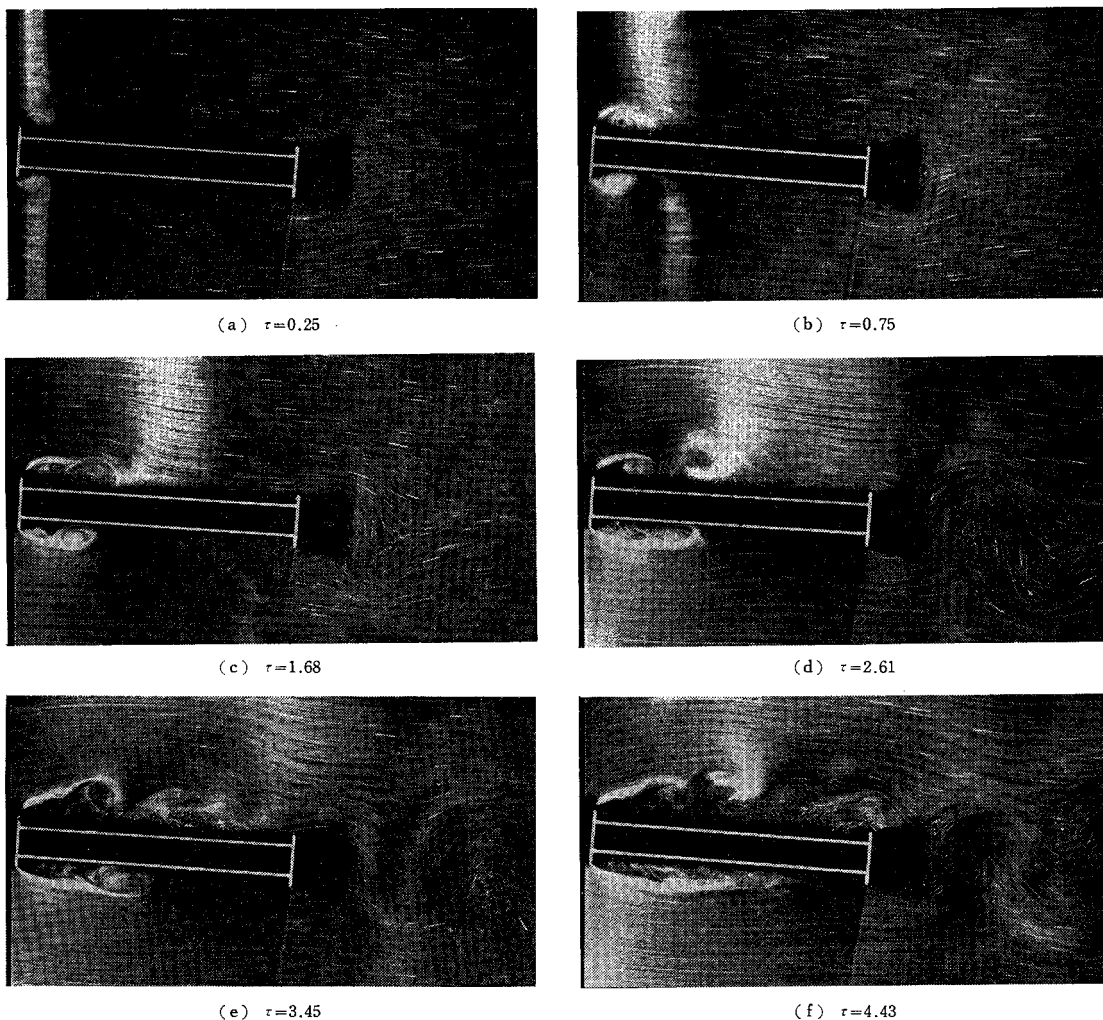


写真-3 出発流れ (プレート付矩形断面模型)

定性的一致は、これら二種の過渡的の流れに共通にみられるはく離バブルの発生と成長により生じたものと思われる。

4. 今後の研究

本研究では、比較的縦横比の小さい充腹断面が取り上げられた。縦横比の大きい完全はく離形の充腹断面について、今後検討を加えなければならない。また、姿勢変化に基づくはく離バブルの発生と成長の現象と、これに伴う負圧の山と谷の発生と移動の現象については、より詳細な流体力学的研究が必要である。

本研究と同様の手法を用いて、ねじりフラッタの防振法や防振機構の研究を行うことができる。ねじりフラッタの防振のためには、フラッタ発生の原因であるはく離バブルの発生と成長を抑制することが必要である。フラ

ッタの防振に有効な、閉塞された中央分離帯⁵⁾を一例として取り上げ、これによるはく離バブルの成長の抑制機構について現在研究中である。

5. 結 論

ねじりフラッタの発生には、空力モーメントの履歴現象、すなわち流れの遅れが支配的である。本研究では、二種の充腹断面橋桁模型について流れ観察と圧力測定を行い、この履歴現象に対する流体力学的考察を加えた。本研究で得られた結果は次のとおりである。

(1) これら模型の上下面では、インディシャルなねじり運動時、姿勢変化に基づく非対称なはく離バブルの発生と成長がみられる。姿勢変化直後の上下面の圧力分布では、このはく離バブルの発生によって、前縁付近に非対称な負圧の山と谷もたらされる。その後、はく離

バブルの成長に伴い、この負圧の山と谷が後方へ移動する。

(2) ねじりフラッタを生じる不安定な断面では、このはく離バブルが大きく成長する。そのために、負圧の山と谷が著しく後方へ移動する。その結果、不安定な断面に特有のインディシャルモーメント応答、すなわち、姿勢変化直後の頭上げモーメントの発生とこれに続くモーメントの減少がもたらされる。負減衰モーメントは、この応答の履歴現象により生じるのであるから、結局、ねじりフラッタの発生原因は、姿勢変化に基づくはく離バブルの発生と成長にあるといえる。

(3) 縦横比の小さい充腹断面橋桁は安定であり、ねじりフラッタを生じない。この断面の過渡的流れにみられるはく離バブルは、上記不安定な断面のはく離バブルに比べて小さい。そのために、負圧の山と谷の移動が少ない。その結果、インディシャルモーメント応答は、頭上げモーメントの発生の後、減少を示さない。

結局、上記二種の断面のインディシャルモーメント応答にみられる履歴特性の差異が、はく離バブルの大きさの違いにより生じることがわかった。

(4) 出発流れに対するモーメント応答は、インディ

シャルモーメント応答と定性的に一致する。この定性的一致は、出発流れとインディシャル運動時の過渡的流れに共通にみられるはく離バブルの発生と成長により生じるものと考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、九州大学応用力学研究所の種子田定俊教授に貴重な助言をいただいた。ここに記して謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) Nakamura, Y. and Mizota, T. : Torsional Flutter of Rectangular Prisms, Jnl. E. M. Div., Proc. A.S.C.E., Vol. 101, No. EM 2, pp. 125~142, 1975.
- 2) 吉村 健・中村泰治：インディシャル応答による橋梁断面のねじりフラッタの研究，土木学会論文報告集，第264号，pp. 33~40, 1977. 8.
- 3) Ham, N.D. : Aerodynamic Loading on a Two-Dimensional Airfoil during Dynamic Stall, AIAA Journal, Vol. 6, No. 10, pp. 1927~1934, 1968.
- 4) 吉村 健・中村泰治：吊橋断面の突風応答（第2報）——インディシャル応答と流れの観察，土木学会第31回年次学術講演会講演概要集 第I部，1976.
- 5) 中村泰治・吉村 健・渡辺公彦：吊橋断面のフラッタにおよぼす中央分離帯の影響，土木学会第31回年次学術講演会講演概要集 第I部，1976.

(1978.2.9・受付)