

矩形断面柱のねじれ渦励振の発振風速について

清水建設（株）技術研究所 正会員 嶋田健司

1 はじめに 近年、数値流体解析によりはく離を伴う断面の空力弾性振動の再現が試みられている。ねじれの渦励振はScruton数で説明されるが、ねじれフラッターに関しては不明である。解析の検証に際して、減衰、慣性モーメントといった構造特性が明らかであり、かつ広範囲な風速域にわたり計測された実験データが望まれる。ところでねじれ振動はH型断面については文献[1]等で詳しく報告されているので、以下では矩形断面のねじれ振動の基礎的資料を得ることを目的として風洞実験を行い、辺長比のちがいが発現風速に与える影響を考察する。

2 実験方法 実験は一様流中で行った。自由度は回転1自由度である。回転角変位は光学式変位計により鉛直方向変位 y を計測し、ターゲットと回転中心間距離 L により $\theta = \tan^{-1}(y/L)$ として求めた。応答はほとんど sinusoidal な変動を示したが、以下に示す実験結果は振幅の r.m.s. 値を2倍して示した。模型はバルサ製で両端に薄いアルミ製の端板を付けている。実験は可能なかぎり小さな慣性モーメントおよび減衰のもとで行った。表1には実験模型の大きさおよび構造特性を示す。閉塞率は3.3～4.4%である。

3 実験結果 図1には種々の辺長比の自由振動時の結果を示す。実験を行った範囲ではねじれの渦励振は3つのグループ（図1中、「渦励振1～3」で示す）で発現している。ねじれフラッターは概ね $4 < U/n_0 B < 5$ で発現している。詳細に見ると $B/D < 4$ と $B/D = 4$ とではその発現初期に立ち上がり方にちがいが見られる。前者では増速時と減速時とで応答が異なる軌跡を描くいわゆるハードフラッター型なのに対して、後者はほとんど同一の軌跡を描くソフトフラッター型である。また $B/D=4,5,6$ では振幅がおよそ0.1rad以上の振幅では辺長比による差は小さくなり、図中に実線で示すように風速に対して一定勾配で応答が増加している。久保・加藤ら[1]および白石・松本[2]は前縁からはく離した渦の流下パターンの考察に基づいて、渦励振の発現無次元風速に関して推定式を示した。それらは以下のように表すことができる。

$$\frac{U_{cr}}{n_0 D} = \frac{1}{n \cdot St^*} = \frac{U^*}{n} \quad (1)$$

ここに U_{cr} は渦励振の発現風速、 n_0 は固有振動数、 U^* は impinging-shear-layer instability による並進の渦励振の発生無次元風速 ($=1/St^*$) である。 n は並進の渦励振については整数倍 ($n=1,2,\dots$)、ねじれについては0.5の奇数倍 ($n=0.5, 1.5, 2.5,\dots$) である。 U^* として例えば白石・松本による値を用いれば $U^*=1.67(B/D)$ である。図2には本実験により得られた辺長比 B/D とねじれ渦励振およびねじれフラッターの発現無次元風速の関係を示す。同図には吉村ら[3]によるねじれの渦励振の発生要因別の分類（図中の領域I～V）と(1)式で $n=1.5$ と 2.5 に対応する無次元風速を示す。

キーワード：ねじれ渦励振，ねじれフラッター，発振風速，風洞実験，Strouhal 数

連絡先：〒135-8530江東区越中島3-4-17 TEL 03-3820-5527 FAX 03-3820-5955 shimada@sit.shimz.co.jp

表1 実験諸元

B/D	B × D × H(mm)	f_n (Hz)	I (kgfs ²)	h (%)	$Sc(2I)$	$I/(B^2 D^2)$
2	40 × 80 × 300	21.50	1.73×10^{-4}	0.3-0.4	5-6.8	(0.05-0.1rad)
2.5	40 × 100 × 300	19.10	2.31×10^{-4}	0.29-0.40	4.2-5.8	
3	40 × 120 × 300	18.72	2.44×10^{-4}	0.31-0.38	3.3-4.0	
3.3	40 × 132 × 300	18.15	2.39×10^{-4}	0.36	3.1	
3.5	40 × 140 × 300	18.25	2.36×10^{-4}	0.28	2.1	
4	30 × 120 × 300	19.15	2.35×10^{-4}	0.24-0.63	4.4-11.5	
5	30 × 150 × 300	18.12	2.57×10^{-4}	0.35	4.4	
6	30 × 180 × 300	11.10	6.70×10^{-4}	0.25-0.37	5.7-8.5	
8	30 × 240 × 300	10.35	7.86×10^{-4}	0.44	6.7	
2	スプリッター板	21.44	1.70×10^{-4}	0.36-0.44	6.0-7.3	(0.05-0.1rad)
3.3	スプリッター板	19.40	2.68×10^{-4}	0.33-0.52	3.2-5.0	(0.04-0.11rad)

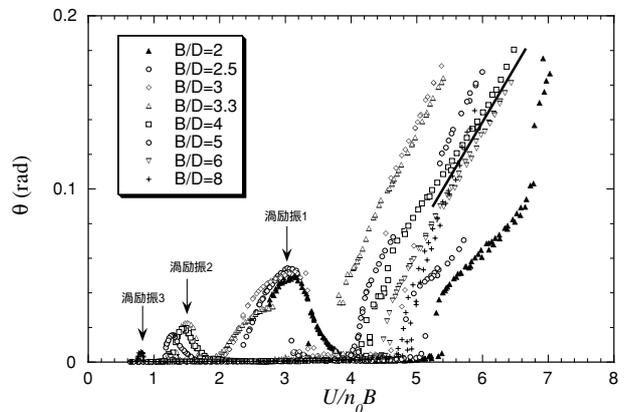


図1 種々の辺長比のねじれ自由振動時における実験結果

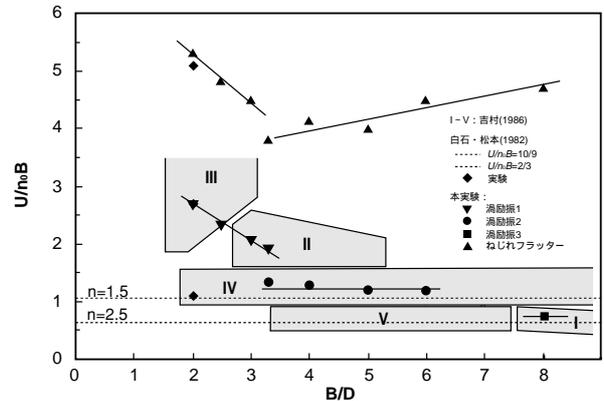


図2 ねじれ振動（渦励振，フラッター）の発現無次元風速と辺長比の関係。吉村[3]の分類は以下のとおり。I, II: Karman 渦に起因する渦励振, III: Impinging-shear-layer instability の基本波の渦との分数調波共振, IV: ISLI の第1高調波の渦に起因する渦励振, V: ISLI の第2高調波の渦に起因する渦励振

また、図3には Strouhal 数および impinging-shear-layer instabilityの無次元振動数とねじれ振動の発生無次元風速の関係を示す。本実験で得られた渦励振2, すなわち $3.3 < B/D < 6$ では辺長比 B/D によらず発現無次元風速 $U/n_0 B$ が一定であり、吉村らのIV (impinging-shear-layer instabilityの第1高調波の渦に起因する渦励振)の分類に属する。この部類の渦励振は図中破線で示す $n=1.5$ に対応する値によって推定できる。 $B/D=8$ の渦励振3は分類Iに属する。吉村らによればこの領域の渦励振は、Strouhal 数の逆数によって定まる共振風速と一致 ($B/D=8$ では $St=0.15$ 。したがって $U/n_0 B=0.83$) するため、定常的再付着型のKarman渦励振であるとしている。ただしスプリッター板を設置した場合にも消失せず、impinging-shear-layer instabilityによる渦励振が生じることを報告している。またこの領域の発現無次元風速は $n=2.5$ に対応する渦励振とも一致することから、この領域はKarman渦の発生周波数とimpinging-shear-layer instabilityの第2高調波が極めて近接した領域であるといえる。渦励振1は $2 < B/D < 3.3$ で見られ、発現無次元風速 $U/n_0 B$ は辺長比 B/D に伴って変化する。この領域の渦励振は吉村らの分類のIIとIIIに属する。吉村らによれば分類IIはKarman渦励振、分類IIIはimpinging-shear-layer instabilityの基本波の渦との分数調波共振であるとしている。図2では $B/D=3.3$ のねじれ振動は分類II, IV, Vに属することが示されているが、本実験ではその内IIとIVに属するものが再現された。図4にはスプリッター板を設置した場合の応答の変化について示す。 $B/D=3.3$ ではスプリッター板を挿入することで渦励振1は消失するが、渦励振2にはほとんど変化がない。この結果は吉村らの結果と一致し、吉村らが示しているように渦励振1はKarman渦に基づくものであることが考えられる。図3からは、渦励振1と渦励振3はStrouhal数の曲線に近いことからこれらの渦励振はKarman渦の影響を強く受けていることが考えられる。この内、特に渦励振1の $B/D=2$ および $B/D=2.5$ は $B/D > 2.8$ のStrouhal数のbranchの延長上に位置している。それらはそれぞれの固有のStrouhal数の約2倍に相当する。図5に示す $B/D=2$ にスプリッター板を設置した場合では $Ur=5.5$ 付近から始まる渦励振は発生していない。したがってこの渦励振はImpinging-shear-layer-instabilityに基づくものではないことが考えられる。渦励振発生時の渦放出の無次元振動数は $f_v=1/5.5=0.182$ で、この断面の静止時のStrouhal数の2.1倍の値となっている。これらのことから類推するとこの $Ur=5.5$ から始まる渦励振はStrouhal数の2倍の振動数の不安定性に対応するKarman渦に起因する励振であると考えられる。

ねじれフラッターの発現無次元風速は渦励振1が発現するグループと渦励振2および渦励振3が発現する $B/D < 3.3$ の2つに分けて見ることができる。この内、渦励振1のグループである $B/D < 3.3$ では渦励振の発現無次元風速とねじれフラッターの発現無次元風速の間におよそ2倍の関係が見られる。以上のことより $2 < B/D < 8$ の辺長比領域では、 $B/D=3.3$ 付近を境にねじれ振動の発現風速に関して性状を異にしている。

4 まとめ 矩形断面のねじれ振動について、(i) $B/D=2$ 断面に関して、 $Ur=6$ 付近から生じる渦励振はStrouhal数の2倍の振動数に対応した渦励振であると考えられる。(ii) $B/D=3.3$ 付近を境にねじれ振動の発現風速性状は異なる。

【参考文献】1]久保他：第9回風工学シンポジウム論文集，1986，169-174 [2]白石他：土木学会論文報告集，第322号，1982.6，37-50 [3]吉村他：第9回風工学シンポジウム論文集，1986，157-162 【謝辞】本研究にあたり京都大学大学院の松本勝教授ならびに東京大学大学院の石原孟助教授には御指導，有益なご議論を賜りましたことに謝意を表します。

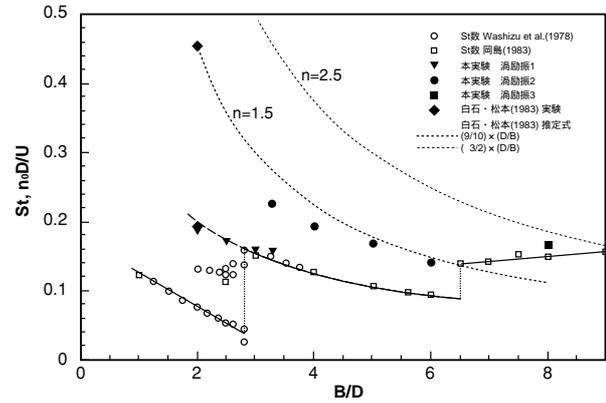


図3 ねじれの渦励振の発生無次元振動数と辺長比の関係

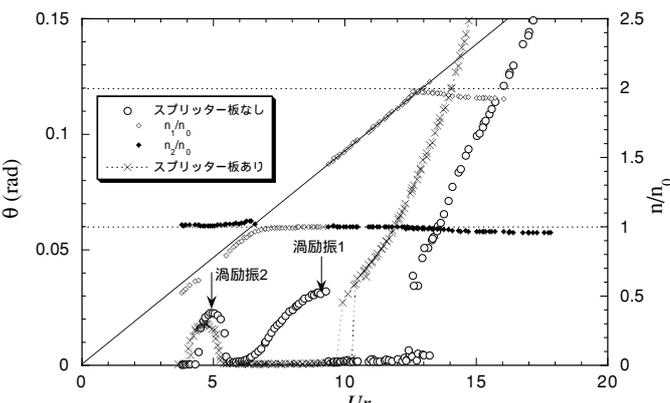


図4 ねじれ振動時の応答と卓越振動数の関係 ($B/D=3.3$)。ねじれ振動に及ぼすスプリッター板の影響。

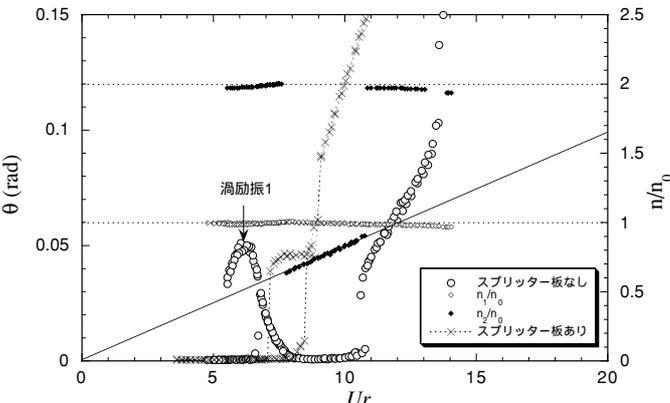


図5 ねじれ振動時の応答と卓越振動数の関係 ($B/D=2.0$)。ねじれ振動に及ぼすスプリッター板の影響。