

隅切り矩形断面のレイノルズ数効果に関する研究

ON REYNOLDS NUMBER EFFECTS OF RECTANGULAR CYLINDERS WITH CORNER-CUTS

松本 勝* 白石成人** 白土博通*** 桂 一詞**** 西崎孝之*****

By Masaru MATSUMOTO, Naruhito SHIRAISHI, Hiromichi SHIRATO,
Kazunori KATSURA and Takayuki NISHIZAKI

The flow separation of rectangular cylinders, in general, is initiated at their sharp edges in their corners. Therefore it is known that their aerodynamic characteristic is not so much influenced by Reynolds number. However, it has been recently reported that the aerodynamics of rectangular cylinders with their corner-cuts are so sensitively affected by Reynolds number. In this study, rectangular cylinders with various corner-cuts investigated from not only the aerodynamic stabilization concerned but also the Reynolds number influence through a series of wind tunnel tests.

1. まえがき

斜張橋や吊橋といった橋梁構造物の支間長は、近年、ますます長大化する傾向にある。また、それとともに主塔の塔高も高くなり、塔の動的挙動が大きな問題となっており、その制振対策についてもさまざまな研究が行われてきた。

従来、塔の制振対策としては、オイルダンパーやTMDなどのように構造力学的に振動特性を変化させる手法がとられてきた。¹⁾ しかし、これらの方法は美観、施工、維持などの面で問題になることが多い。そこで、最近では、デフレクターやサイドプレートなどを付設したり、スリット、隅切りを設けるなど断面形状を変化させることによって空気力学的に振動を抑える方法がとられるようになってきている。^{2) 3) 4)} この方法は、断面ごとに対策が異なることや気流の乱れ、風の傾斜角などによって制振効果が変化するためその選定は容易でないものの、空力不安定現象を基本的に抑制することが可能となる。

しかし、このような断面においては、レイノルズ数の影響を受けることが最近問題になってきている。一般に、矩形断面柱など鋭い隅角部を有する断面では流れの剝離点が隅角部に限られており、その応答特性はレイノルズ数の変化による影響を受けないと考えられている。そのため、このような断面において風洞実験を行う場合の相似条件としてレイノルズ数の一致という条件は無視できると考えられている。

しかし、矩形断面にデフレクターやサイドプレート、隅切りなどを設けることによる空力安定化効果は、

- | | | | |
|--------|---------|----------|-------------------|
| * 工博 | 京都大学助教授 | 工学部土木工学科 | (〒606 京都市左京区吉田本町) |
| ** 工博 | 京都大学教授 | 工学部土木工学科 | (〒606 京都市左京区吉田本町) |
| *** 工博 | 京都大学助手 | 工学部土木工学科 | (〒606 京都市左京区吉田本町) |
| **** | 京都大学大学院 | | (〒606 京都市左京区吉田本町) |

隅角部の剥離流れを微妙にコントロールすることによるものであり、よって、レイノルズ数の影響を無視することができないと考えられる。

本研究では、このような状況を踏まえて、まずはじめに、種々の断面について隅切りサイズを変化させて動的実験を行い、各断面比の矩形断面における渦励振に対する最適隅切りサイズを決定する。次に、最適隅切りサイズの断面においてレイノルズ数の影響について、動的応答特性、静的空気力特性、および流れの可視化実験などを通じて考察する。

2. 実験概要

京都大学工学部土木工学教室に設置された吹き出し式エッフェル型風洞（測定部 長さ 5000mm、高さ 1000mm、幅 700mm）を用いて、応答振幅測定実験、ならびに静的空気力測定実験を行った。また、同風洞で油膜法によって可視化実験を行った。

本実験では、各々の断面辺長比において最も大きな切り欠きを設けた模型に順次アタッチメントを取り付けることによって隅切りサイズを変化させた。ここで隅切りサイズ a/D は隅切りの大きさと断面の流れに直角方向長さとの比を表している。

3. 隅切りの渦励振振幅に対する効果

断面辺長比 B/D が 2.8、1.0、0.62、0.4 の矩形断面において、隅切りサイズを変化させて渦励振振幅への影響を調べた。隅切り部分の形状は正方形のみとした。

図1に B/D が、2.8、1.0、0.62、0.4 の矩形断面において、各隅切りサイズにおける渦励振の最大振幅を示す。

各隅切りサイズにおける渦励振の最大振幅を比較すると、 $B/D=2.8$ および 0.62 の断面では $a/D=1/18$ が、また、 $B/D=1.0$ および 0.4 では $a/D=2/18$ がそれぞれ最小となった。これらを各断面における最適隅切りサイズとする。

最適隅切りサイズより隅切りサイズ a/D を大きくした場合は制振効果が弱まり、渦励振振幅が原型矩形断面の場合より大きくなって、より不安定化の特徴を示した。また、断面比によって隅切りの渦励振に対する効果が異なった。隅切りによる制振効果は、隅切りによってできる2つの角からの剥離流れが干渉し合うことによって現れるものと考えられる。よって、隅切りサイズのわずかな違いや断面比の違いによる剥離流のパターンが変化することによって微妙にその効果が変わってくるものと考えられる。

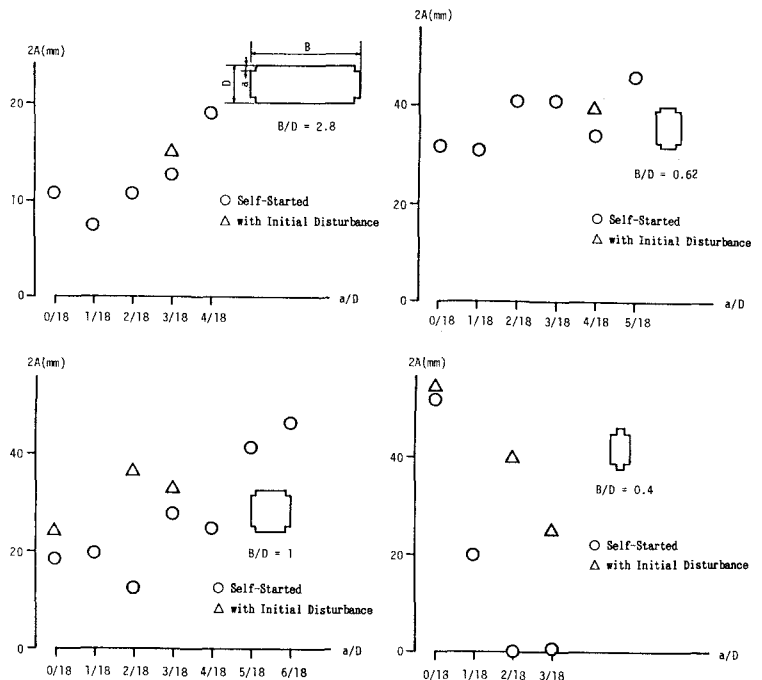


図1 隅切りサイズによる渦励振最大振幅の変化

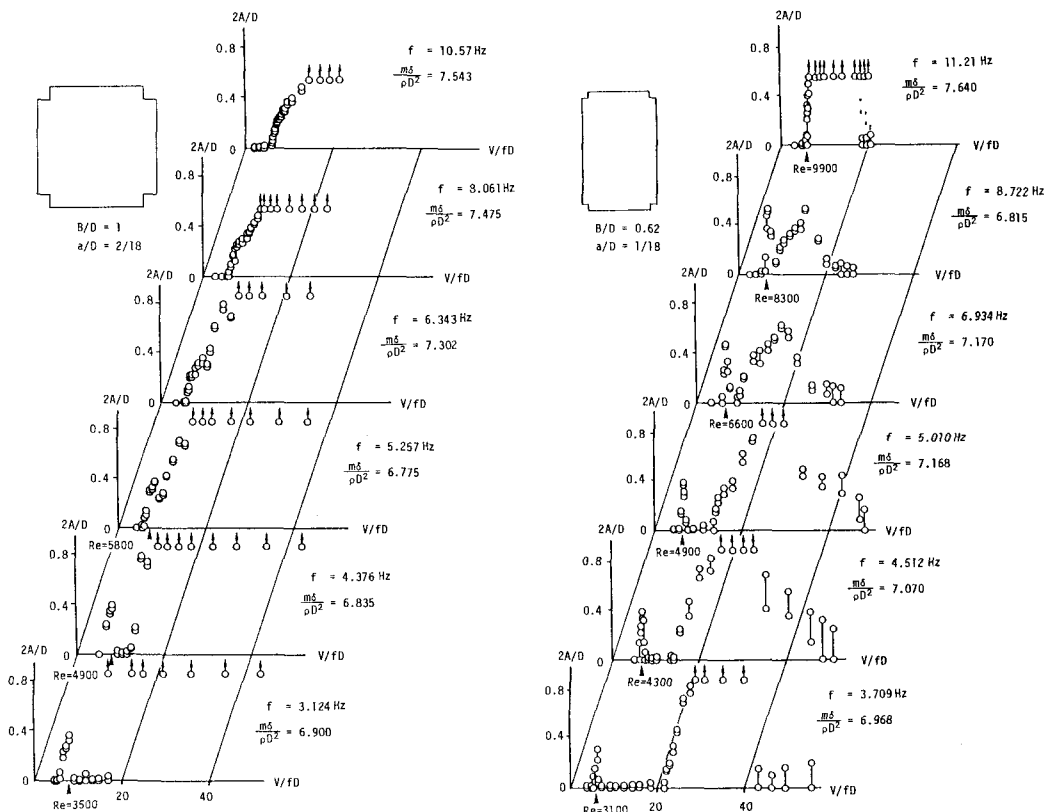


図2 空力振動応答図

4. レイノルズ数の影響

①レイノルズ数の動的応答特性に及ぼす影響

$B/D=1.0$ および 0.62 の断面に、それぞれ前節で最適な隅切りサイズであると判断された $a/D=2/18$ 、 $1/18$ の隅切りを施した断面について、レイノルズ数が動的応答特性に及ぼす影響を検討する。

今回は、模型の固有振動数を変えることによって、渦励振の発現風速を変化させた。また、実験の際には、質量減衰パラメータ $m\delta/\rho D^2$ を一定値として 7 にできるだけ近づけた。

図2に $B/D=1.0$ および 0.62 の各固有振動数における応答特性を示す。また、図3に各々の応答発現に対応するレイノルズ数における渦励振最大振幅を表した。

断面辺長比 $B/D=1.0$ について (隅切りサイズ $a/D=2/18$)

図2に示されるように、渦励振の発現レイノルズ数を高くしても渦励振振幅に大きな変化はみられない。ただし、固有振動数 $f=6.3\text{Hz}$ 以上ではギャロッピングの発生風速に含まれてしまうため評価ができない。また、模型の固有振動数が高くなるにつれて、ギャロッピングの発現無次元風速が低くなっている。

断面辺長比 $B/D=0.62$ について (隅切りサイズ $a/D=1/18$)

図2に示されるように、渦励振の発現レイノルズ数を高くす

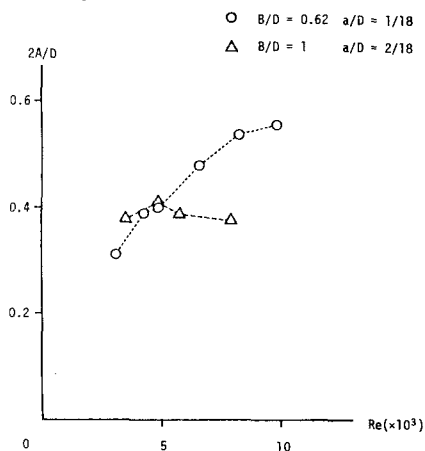


図3 渦励振最大振幅の変化

ると、渦励振振幅が徐々に大きくなっていく。ただし、固有振動数 $f=7.6\text{Hz}$ になると風速域の限定された他の種類の振動の発生風速域に含まれる形となって評価が困難である。

さらに、渦励振より高風速側においてどの固有振動数においても風洞風速にして 3m/s 付近から発現し、 10m/s 付近で安定化している風速域の限定された振動が発生しており、模型の固有振動数が高くなるのにつれて、発現無次元風速が低くなっている。

このように、 $B/D=1.0$ 、 $a/D=2/18$ の断面におけるギャロッピングの発現風速、 $B/D=0.62$ 、 $a/D=1/18$ における渦励振振幅や風速域の限定された振動の発現風速などより、レイノルズ数によってその流れのパターンが変化している可能性が考えられる。

②レイノルズ数の静的空気力特性に及ぼす影響

上記の結果より、断面比 $B/D=0.62$ 、 $a/D=1/18$ の断面においては、模型の固有振動数によらず、風速域の限定された振動が発生しており、レイノルズ数によって静的空気力特性に変化が生じている可能性が考えられる。そこで、この断面について、静的空気力の測定を行い、レイノルズ数の影響を静的空気力特性の面から検討する。

図4に風速 1.5 、 2.5 、 4.0 、 6.5 、 10m/s における各迎角での静的揚力係数 C_F を示す。レイノルズ数はそれぞれ 0.46×10^4 、 0.77×10^4 、 1.23×10^4 、 2.00×10^4 、 3.08×10^4 となっている。

静的揚力係数 C_F について、各レイノルズ数における迎角 $\alpha=0^\circ$ 近傍における $dC_F/d\alpha$ を比較する。レイノルズ数が 0.46×10^4 (1.5m/s) の場合には、 $dC_F/d\alpha$ が正の値を、 0.77×10^4 (2.5m/s) では、ほぼ0の値を示しているのに対して、風速域の限定された振動が発生しているレイノルズ数域に属する $Re=1.23 \times 10^4$ (4.0m/s)、 2.00×10^4 (6.5m/s) では負の値を示している。また、 $Re=3.08 \times 10^4$ (10m/s) においては、再び正の勾配となっており、動的応答特性とおおよそ対応している。

これらの結果により、動的応答特性にみられた風速限定型の振動は、準定常的な要因によって発現している振動であり、隅切りを設けた矩形断面柱の静的空気力特性がレイノルズ数によって大きく影響を受けていることが原因であることがわかる。

③流れのパターンにおけるレイノルズ数の影響

上記に示したように、静的空気力特性がレイノルズ数によって大きく影響を受けていることがわかったが、これは流れのパターンがレイノルズ数によって影響を受けていることによるものと考えられる。

ここでは、断面比 $B/D=0.62$ 、 $a/D=1/18$ の断面について、油膜法による流れの可視化より、流れのパターンに着目してレイノルズ数の影響について検討する。

風速を変化させて、それぞれ迎角 $\alpha=0^\circ$ 、 2° 、 5° 、 10° において断面周

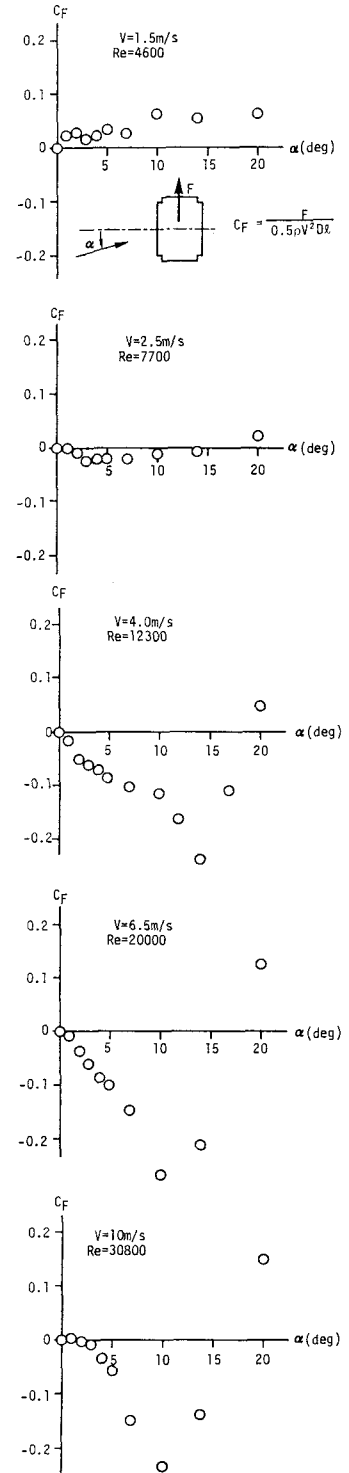


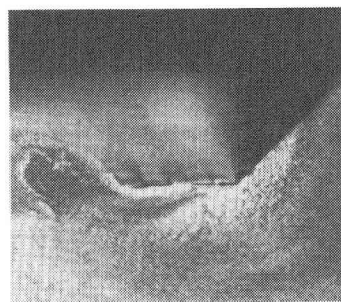
図4 静的空気力係数



V=1.5m/s



V=2.5m/s



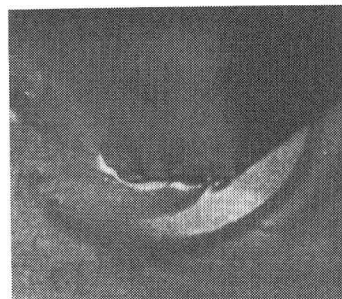
V=4.0m/s

りの流れの様子の可視化を行った。
写真1は、 $\alpha=0^\circ$ の場合である。
風速は静的空気力測定と同じ1.5m/s
($Re=0.46 \times 10^4$)、2.5m/s (0.77×10^4)、
4.0m/s (1.23×10^4)、
6.5m/s (2.00×10^4)、10m/s (3.08×10^4)
において行った。

これらの写真によって、隅切りを
設けた矩形断面柱($B/D=0.62$ 、 $a/D=$

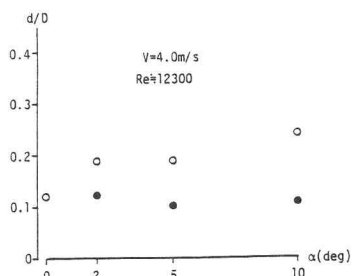
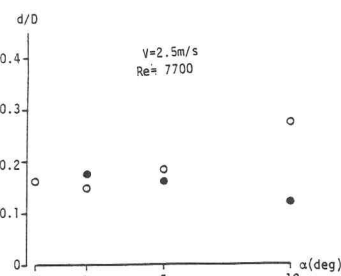
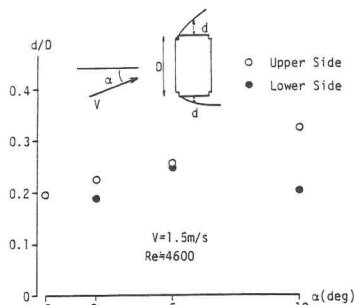


V=6.5m/s



V=10m/s

写真1 隅切り矩形柱周りの流れ



1/18)は、レイノルズ数によって剥
離流れの様子が異なることがわか
る。また、隅切りを設けない場合
の矩形断面柱 ($B/D=0.62$ 、 $a/D=$
0/18) の各レイノルズ数における
流れの様子は、レイノルズ数が大
きくなるにつれて、剥離せん断層
がやや狭まる傾向にあるものの、
その変化は比較的小さいものとな
った。

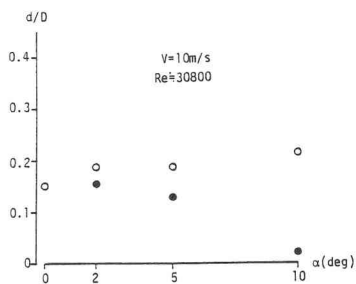
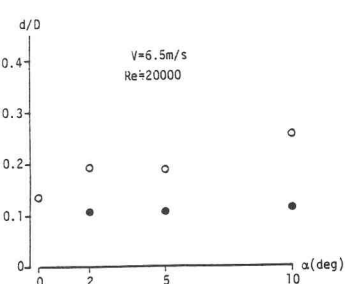


図5 断面側面中央部から剥離せん断層の境界までの距離 d

図5は、各レイノルズ数において断面側面中央部から剥離せん断層の境界までの距離 d/D を示したものである。 $Re=0.46 \times 10^4$ (1.5m/s) の場合には、各迎角とも d/D の値が 0.2 より大きくなっており、他のレイノルズ数域と比較して、剥離せん断層が広がっている傾向を示した。しかし、 $Re=0.77 \times 10^4$ (2.5m/s) 以上においては、 d/D の値が小さくなって、全体的に剥離せん断層が狭まり、内部循環流が形成されやすい流れのパターンに変化しているものと思われる。

また、各風速域の各々の迎角における上下面の流れのパターンは、法線方向の静的空気力特性と定性的に対応づけられるものとなっている。つまり、図5において、迎角 $\alpha=0^\circ$ の d/D と比較して、各迎角における上面側での d/D が大きく、下面側での d/D が小さい場合に、 C_F の負値の絶対値が大きくなる傾向がみられる。

以上のことより、隅切りを設けた矩形断面柱($B/D=0.62$ 、 $a/D=1/18$)は流れのパターンがレイノルズ数によって敏感に影響を受けていることがわかる。

5. まとめ

本研究の主な成果をまとめれば以下のようになる。

(1) 最適隅切りサイズについて

- ・断面辺長比 $B/D=2.8$ 、 1.0 、 0.62 、 0.4 の各断面における最適隅切りサイズは、いずれも $a/D=1/18 \sim 2/18$ の範囲であり、比較的小さいものとなった。そして、さらに隅切りサイズを大きくした場合は制振効果が弱まり、渦励振振幅が原型矩形断面より大きくなり、より不安定化の特性を示した。

(2) 隅切りを設けた断面におけるレイノルズ数の影響

<断面辺長比 $B/D=1.0$ 、隅切りサイズ $a/D=2/18$ の断面>

- ・渦励振の発現レイノルズ数を変えても渦励振振幅にあまり変化はみられなかった。また、模型の固有振動数を高くしていくとギャロッピングの発現風速は低くなった。

<断面辺長比 $B/D=0.62$ 、隅切りサイズ $a/D=1/18$ の断面>

- ・渦励振発現レイノルズ数が大きくなるほど、その振幅も徐々に大きくなる傾向にある。また、風速域の限定された振動が発生し、その振動は模型の固有振動数が高くなるとともに発現無次元風速が低下した。
- ・静的空気力特性がレイノルズ数により変化し、各レイノルズ数における迎角 $\alpha=0^\circ$ 近傍での法線方向の空気力係数勾配が定性的に応答を裏付ける結果となった。
- ・油膜法による可視化実験から断面周りの流れのパターンがレイノルズ数によって変化していることが明らかとなった。

謝 辞

本研究を行うにあたり、有益な助言を頂きました本州四国連絡橋公団 保田雅彦氏、また実験およびデータ解析等において多大なる協力を得ました鴻池組 佐野祐一氏に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 辻 松雄：構造力学的耐風制振対策，日本風工学会誌20号，1984
- 2) 白石成人，松本 勝，白土博通，石崎 浩，長田 信，松井俊彦：隅切りによる矩形断面の空力安定化効果，第9回風工学シンポジウム論文集，1986
- 3) 武内隆文，北原俊男：超長大橋主塔の渦励振の発現と空力制振法に関する基礎的研究，第9回風工学シンポジウム論文集，1986
- 4) 武内隆文，北原俊男：タンDEM角柱の断面形状と耐風性の関係について，第10回風工学シンポジウム論文集，1988

(1991年9月30日受付)