

無補剛吊形式水管橋の空力的制振法

Suppression method for aerodynamic vibrations of unstiffened suspended aqueduct

久保喜延*¹ 中原智法*² 中村聖三*³ 加藤九州男*⁴

By Yoshinobu KUBO, Tomonori NAKAHARA, Seizou NAKAMURA and Kusuo KATO

An unstiffened suspended aqueduct may be used for sending water to an isolated place from a water supply plant. If a circular pipe is used as the aqueduct, a lot of study results on aerodynamic vibration of circular cylinders can be referred. But the present aqueduct needs an inspecting walk-way on behalf of longer span than 150m. Therefore, the section shape of aqueduct is different from the circular section.

The present research investigates the possibility of suppressing the aerodynamic vibrations of the aqueduct by changing the arrangement of the inspecting walk-way. One type has the inspecting walk-way on the aqueduct, another type has it on both sides of the pipe. The former type which has strong vortex-excited vibrations, were modified by attaching two small bars near separated points on the circular cylinder as the separated flow controller. For the latter one, the aerodynamic instability was improved by only choosing the height of walk-way.

1. まえがき

我が国においてこれまでに架設されている水管橋の多くは、水管のみを桁としたパイプビーム形式水管橋と、水管をトラスなどで補剛した補剛形式水管橋が主である。将来、現在よりも支間の長い水管橋が必要となることが予想されるが、このような形式の水管橋では、支間が長くなるにつれその構造は複雑かつ大型化し、経済性・施工性などが大きな問題となる。本研究で対象としているFig.1のような無補剛吊形式水管橋は、カナダで数多くの施工例があり、従来架設不能であった長い支間を有する水管橋に有効な形式であると考えられる。しかしながら、無補剛吊形式水管橋はケーブルにより水管を支持しているので、支間を長くすることができる反面、無補剛のため剛性が小さく、吊橋と同様に風による振動が大きな問題となることが予測される。

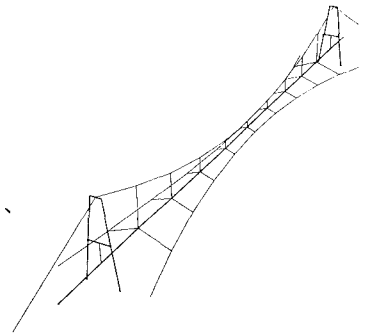


Fig.1 無補剛吊形式水管橋

吊形式水管橋の断面が円形であれば、その耐風安定性はこれまでに数多く研究されてきた円柱に関する風

*1 工博 九州工業大学 助教授 工学部設計生産工学科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)

*2 九州工業大学 大学院生 工学部設計生産工学科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)

*3 川崎製鉄株式会社 研究員 研究開発センター (〒281 千葉市長沼町351)

*4 九州工業大学 助手 工学部設計生産工学科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)

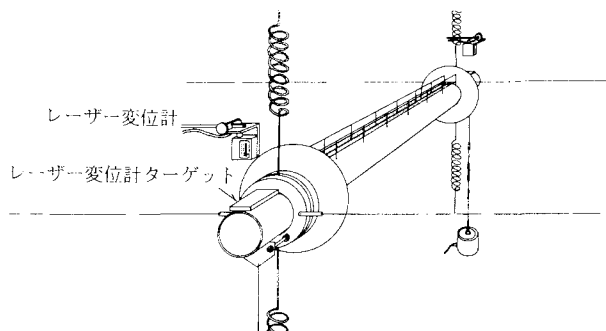


Fig.2 模型設置状況

洞実験の結果から推定することができる。しかしながら、本研究で対象としている無補剛吊形式水管橋の断面は、メインテナンスの関係から水管に点検用歩廊などの付属物が取り付けられており、円柱のような円形断面のものとは比べ耐風安定性が異なる恐れがある。そこで本研究では、我が国において無補剛吊形式水管橋を設計・施工する場合、この点検用歩廊の形状および配置が、水管橋の渦励振やギャロッピングなどの耐風安定性にどのような影響を与えるかを検討すること、合わせて耐風安定性の向上を検討することを目的としている。

2. 実験方法および実験条件

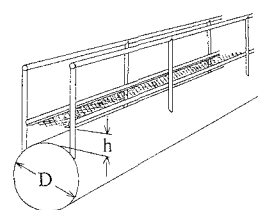
実験には、九州工業大学設計生産工学科建設教室所属の空力弾性試験用風洞（測定断面1070×1070mm）を用いた。この風洞内に模型（水管部： $\phi 50\text{mm}$ のアルミパイプ製、点検用歩廊部：充実率が同じ木製）をFig.2のように鉛直曲げ1自由度振動系に両端をコイルスプリングで支持し、自由振動実験を行った。応答変位は模型両端部に配置したレーザー変位計により測定し、スペクトルアナライザーでスペクトル解析を行い、応答振幅を得ると同時に、スペクトルアナライザーより振動波形のピーク値をパソコンに転送後、転送されたピーク値より減衰率の計算を行った。

模型断面はFig.3に示すように、

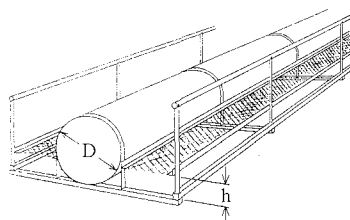
- 1) Type 1 ; 水管上部に点検用歩廊を配置した断面で、水管上部から歩廊までの距離を歩廊高さ h とする。
- 2) Type 2 ; 水管の左右両側に点検用歩廊を配置した断面で、水管下部から歩廊までの高さを歩廊高さ h とする。

である。2種類の基本断面、および耐風安定性の改善が充分になされなかったType 1について、施工法との関連から取り付けの可能性が高い施工時の水管固定用ケーブルを耐風安定化用に用いることが可能であるか否かを検討する断面として、Fig.4に示すような、

- a) Type U ; 水管固定用ケーブルをType 1の上側に2本配置した断面。
- b) Type L ; 水管固定用ケーブルをType 1の下側に2本配置した断面。
- c) Type W ; 水管固定用ケーブルをType 1の上側と下側にそれぞれ2本ずつ、計4本配置した断面。

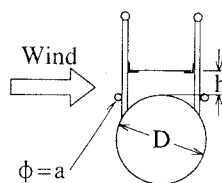


(1) Type 1

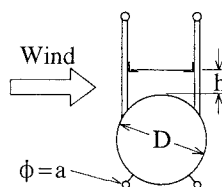


(2) Type 2

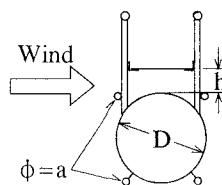
Fig.3 水管橋模型



(a) Type U



(b) Type L



(c) Type W

Fig.4 Type 1改良断面

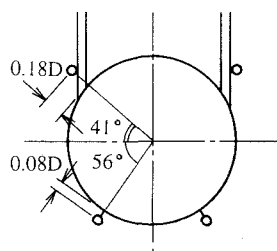


Fig.5 水管固定用ケーブル配置位置

の3種類のType 1 改良断面を用意した。なお、この改良断面は、水管固定用ケーブル位置によって渦励振を抑制できるとの観点にたって検討したもので、Fig.5のケーブルの位置は剥離点での流れを乱すことを目的にして決められており、他の実験結果からすでに渦励振の抑制に対して効果的であることを確認していたものである。¹⁾

また、模型振動諸元はTable.1のとおりであり、水管固定用ケーブル取り付けによる振動諸元の変化はほとんど無かった。

3. 実験結果

Type 1 については、歩廊高さ h を $h=0, 0.1D, 0.2D, 0$ （ここで $h=0$ は、Fig.6に示すように、通常一向きに取り付けられる点検用歩廊を一向きに取り付けた場合であり、 $h=0$ と $h=0$ では歩廊の取り付け向きが天地逆である。）と変えた場合について実験を行った。

Type 1 改良断面（TypeU, TypeL, TypeW）については、歩廊高さ h を $h=0.2D$ に固定し、水管固定用ケーブル径 a を $a=0.04D, 0.06D, 0.08D$ と変化させ、さらに耐風安定性が良いとされたケーブル径 a に対して、歩廊高さ h を $h=0, 0.05D, 0.1D$ と変化させ、同時に迎角を変えた実験を行った。

Type 2 については、歩廊高さ h を $h=0$ から $0.1D$ 間隔で $h=0.4D$ まで変えた場合と $h=-0.2D$ （点検用歩廊を歩廊取り付け用型鋼の下側に取り付けた断面。）の場合について実験を行い、さらに耐風安定性の良い歩廊高さ h については迎角を変化させた。

なお、応答図中にはスペクトル解析の結果得られた固有振動数成分の定常振動時の振幅を記している。

3-1 Type 1 の場合

水管上部に点検用歩廊を配置した場合について、迎角 $\alpha=0^\circ$ で歩廊高さ h を変化させたときの代表的応答である $h=0, 0.2D$ の応答図がFig.7である。この応答は、換算風速 $V_r (=V/fD) = 6$ あたりから振動が発生し、 $V_r = 6.5$ 程度で最大振幅となり、 $V_r = 10$ あたりで振動が止まるという円柱と同様な典型的渦励振の発生が認められる。このようにType 1 では全ての歩廊高さ h について比較的振幅の大きな渦励振が発現した。

迎角 $\alpha=0^\circ$ の歩廊高さ h と渦励振域での最大振幅の関係を図示したものがFig.8である。この関係によれば、歩廊高さ $h=0$ の場合が $h=0$ の場合に比べて2倍近い振幅を有する渦励振が発生していることを除くと、歩廊高さ h が小さいほど渦励振域での応答振幅が小さくなっていることがわかる。また、円柱の渦励振の最大振幅は無次元倍振幅で $2A/D = 0.9$ 程度であることから、点検用歩廊はわずかではあるが、制振効果があると考えられる。しかしながら、応答振幅が最も小

Table.1 模型振動諸元

	Type 1	Type 2
模型長 L [m]	0.950	0.950
水管径 D [m]	0.050	0.050
質量 m [kg]	2.821	2.856
振動数 f [Hz]	8.175	8.120
対数構造減衰率 δ	0.003	0.003

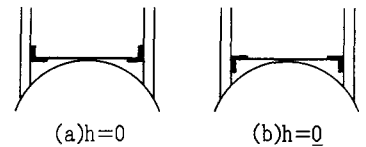


Fig.6 Type 1 点検用歩廊取り付け部拡大図

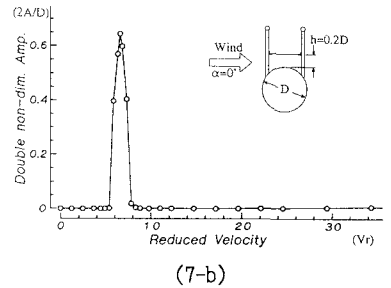
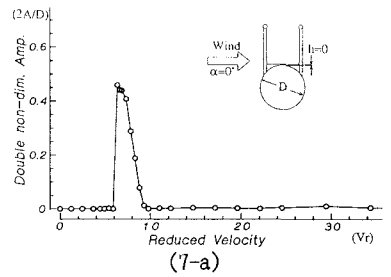


Fig.7 Type 1 応答図

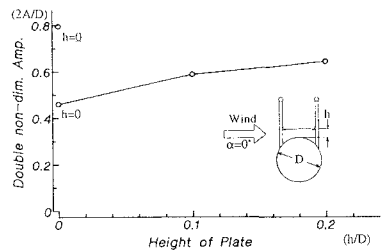


Fig.8 Type 1 歩廊高さ-渦励振最大振幅の関係

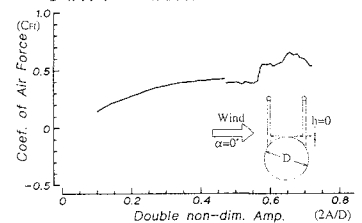


Fig.9 Type 1 ($h=0, V_r=6.61$) 渦励振時の変動空気力係数

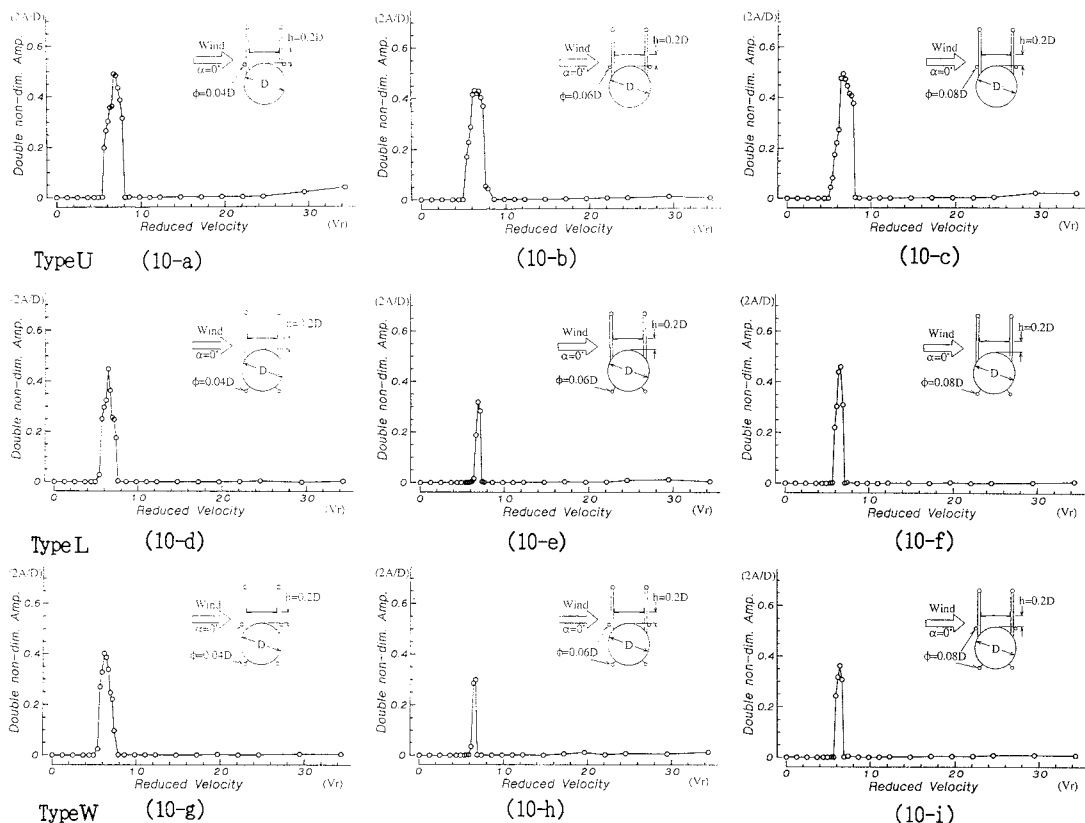


Fig.10 Type 1 改良断面の応答

い歩廊高さ $h=0$ の場合でも、応答振幅は無次元倍振幅で $2A/D=0.45$ と大きい。また、このときの変動空気力係数がFig.9であるが、この図より変動空気力係数 C_{F1} は $C_{F1}=0.42$ であり、これは一般に考えられている円柱の空気力係数 $C_F=0.4\sim0.6$ と同じである。

$$C_{F1} = -\frac{m \delta_a}{\pi \rho D^2 L} \times \frac{4\pi^2}{Vr^2} \times \frac{A}{D} \quad \delta_a : \text{対数空力減衰率} \quad \rho : \text{空気密度}$$

よって、この断面では構造減衰率がかなり大きくなければ、風作用下での渦励振の発生は免れないと考えられる。

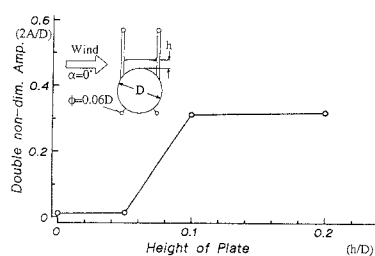


Fig.11 Type L
歩廊高さ－渦励振最大振幅の関係

3-2 Type 1 改良断面の場合

耐風安定性の改善が充分になされなかったType 1 の渦励振対策として考えたのが、水管固定用ケーブルを取り付けたType 1 改良断面 (Type U, Type L, Type W) である。この断面を迎角 $\alpha=0^\circ$ 、歩廊高さ $h=0.2D$ として水管固定用ケーブル径 a を変化させた場合の応答結果がFig.10である。この図より、すべての断面において換算風速 $Vr=5\sim9$ で渦励振が発生しているが、Type U, Type L, Type W の順に渦励振の最大振幅が小さくなっていることがわかる。また、水管固定用ケー

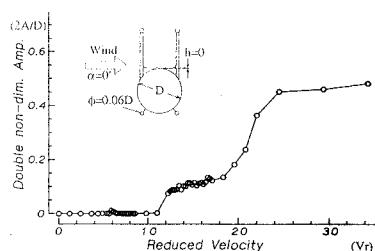


Fig.12 Type L ($a=0.06D, h=0$) の応答

ブル径 $a=0.06D$ のものが振幅が最も小さくなっている。Type LおよびType Wの水管固定用ケーブル径 $a=0.06D$ の場合では、渦励振の最大振幅が無次元倍振幅で $2A/D=0.3$ 程度で、水管固定用ケーブルの無いType 1の場合 (Fig.7-a) の半分程度の振幅となっており、制振効果が大きいと言える。Type Lに比べてType Uの制振効果が小さい原因として、歩廊の存在によりType 1でわずかではあるが制振効果が得られているので、歩廊側に水管固定用ケーブルを配置したType Uでは、Type Lと同様な効果が現れなかったことが考えられる。

制振効果の大きかったType Lの水管固定用ケーブル径 $a=0.06D$ について、歩廊高さ h を変化させた場合について検討する。歩廊高さ h と渦励振の最大振幅の関係を示したものがFig.11である。この関係より、歩廊高さが小さいほど渦励振の最大振幅が小さくなっていることがわかる。歩廊高さ $h=0$ と $h=0.05D$ の場合では、渦励振の最大振幅は無次元倍振幅でそれぞれ $2A/D=0.012$ と $2A/D=0.014$ で大差無いが、Fig.12に示すように歩廊高さ $h=0$ の場合には換算風速 $Vr=12$ から発散的な振動が発生した。

次に、渦励振の最大振幅が小さく発散的な振動が発生しなかったType L,水管固定用ケーブル径 $a=0.06D$,歩廊高さ $h=0.05D$ について、迎角を $-6^\circ \leq \alpha \leq 6^\circ$ の範囲で変化させた場合を検討する。迎角 α と渦励振の最大振幅との関係を図示したものがFig.13であるが、この図によると迎角が $0^\circ \leq \alpha \leq 2^\circ$ の範囲では渦励振の振幅を無次元倍振幅で $2A/D=0.1$ 以下に抑えることが可能である。また、この時の変動空気力係数はFig.14より $C_F=0.11$ で小さい。しかしながら、迎角が $\alpha \leq -2^\circ, 4^\circ \leq \alpha$ では渦励振の最大振幅が無次元倍振幅で $2A/D=0.4$ 程度まで大きくなる。

よって、Type 1の渦励振対策として水管固定用ケーブルを取り付けたType 1改良断面を用いても、迎角 α が大きな場合は渦励振を抑制することは困難である。

3-3 Type 2 の場合

水管横側に点検用歩廊を配置した場合について、迎角 $\alpha=0^\circ$ で歩廊高さ h を変化させた場合の応答例として、歩廊高さ $h=0, -0.2D$ の場合の応答をFig.15に示す。歩廊高さ $h=0$ についてみると、振幅は小さいがType 1の場合と同様に、換算風速 $Vr=5.5$ あたりから振動が発生し、 $Vr=6$ 程度で最大振幅となり、 $Vr=6.5$ あたりで振動が止まるという典型的な渦励振が発生している。また、歩廊高さ $h=-0.2D$ についてみると、大振幅の渦励振が発生したのみならず換算風速 $Vr=12$ あたりからギャロッピングが発生している。これは歩廊高さ h によって応答特性が極端に異なることを意味しており、点検用歩廊位置の決定には充分な検討が必要であることを示唆している。

歩廊高さ h と渦励振の最大振幅との関係を示したものがFig.16であ

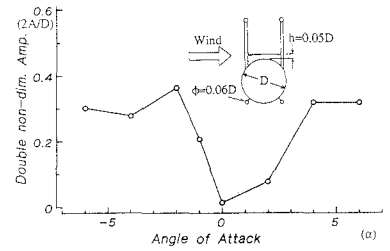


Fig.13 Type L ($a=0.06D, h=0$)
迎角-渦励振最大振幅の関係

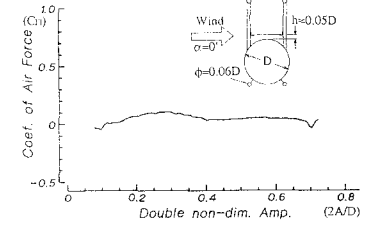
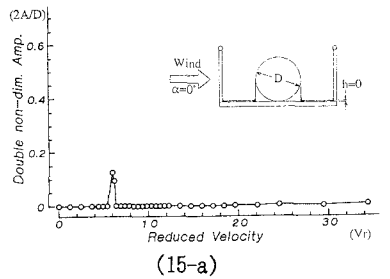
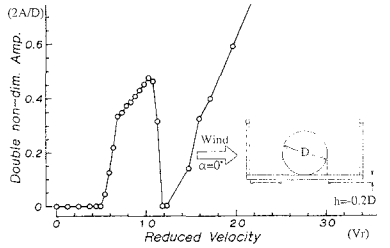


Fig.14 Type L ($a=0.06D, h=0, Vr=6.36$)
渦励振時の変動空気力係数



(15-a)



(15-b)

Fig.15 Type 2 応答例

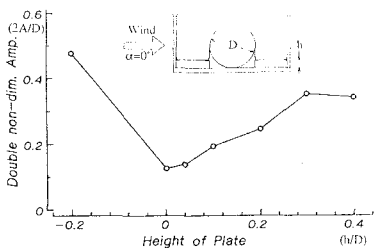


Fig.16 Type 2

歩廊高さ-渦励振最大振幅の関係

る。これによると歩廊高さ $h=-0.2D$ の場合を除いて歩廊高さ h を小さくするほど渦励振の最大振幅は小さくなり、歩廊高さ $h=0$ のとき無次元倍振幅 $2A/D=0.18$ で最小となる。

耐風安定性が最も良い歩廊高さ $h=0$ について迎角 α を変化させたときの渦励振域での最大振幅の変化をFig.17に示す。この図によると、迎角 α が比較的小さい $-6^{\circ} \leq \alpha \leq 8^{\circ}$ の範囲においては、最大振幅は迎角 $\alpha=0^{\circ}$ または $\alpha=-2^{\circ}$ の場合であり、その振幅は無次元倍振幅で $2A/D=0.18$ と小さいことがわかる。また、このときの迎角 $\alpha=0^{\circ}$ の場合の空気力係数 C_{Fi} はFig.18より $C_{Fi}=0.18$ で、円柱に比べて半分以下と小さい。一方、負の迎角 α が小さい $\alpha=-10^{\circ}$ の場合には、渦励振域の最大振幅は無次元倍振幅で $2A/D=0.55$ にも達する大きな振動が発生している。

Type2についてまとめると、負の迎角 α が小さい $\alpha \leq -8^{\circ}$ では大きな振動が発生するが、一般に設計において考えられる迎角 α の範囲は $-6^{\circ} \leq \alpha \leq 6^{\circ}$ 程度であることを考えると、この断面は実用的であると考えられる。

4. まとめ

無補剛吊形式水管橋について、点検用歩廊の形状および配置が耐風安定性にどのような影響を与えるかを二次元模型を用いて検討した。以下に結果をまとめる。

(1) Type1（点検用歩廊上側配置）の断面は、渦励振の最大振幅が最も小さな場合でも無次元倍振幅で $2A/D=0.45$ と大きい、渦励振対策として水管固定用ケーブルを剥離点制御に利用した改良断面Type L（水管固定用ケーブル径 $a=0.06D$,歩廊高さ $h=0.05D$ ）を用いると、迎角が小さな場合には渦励振を無次元倍振幅で $2A/D=0.1$ 以下に抑制することができる。

(2) Type2（点検用歩廊横側配置）の断面は、歩廊高さ $h=0$ の場合の耐風安定性が良く、この断面は実用的であると言える。

(3) Type1,Type2 どちらの断面においても、歩廊高さ h の違いにより渦励振の応答振幅に大きな差があり、また歩廊高さ h によってはギャロッピングが発生するので、歩廊位置の決定には細心の注意が必要である。

以上より、点検用歩廊の形状や配置、および水管固定用ケーブルの剥離点制御が耐風安定性向上に有効であることが判明したが、レイノルズ数の影響や風作用下での抗力および揚力などによる静的変形について不明瞭な点も多い。今後、これらの問題について静的3分力の測定などを行うことによって検討を進める予定である。

（謝辞）

本研究の遂行にあたり、多大な御援助を賜った熊本大学工学部崎元達郎教授に深甚の謝意を表します。

（参考文献）

- 1) 久保,加藤,金尾：「直列二本円柱の空力弾性挙動と振動抑制に関する一考察」,土木構造・材料論文集 第4号 (1989.1)

(1991年9月30日受付)

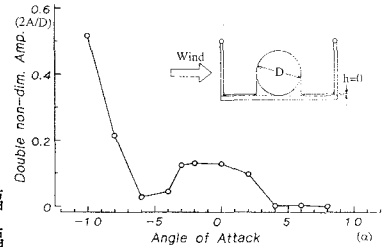


Fig.17 Type2
迎角-渦励振最大振幅の関係

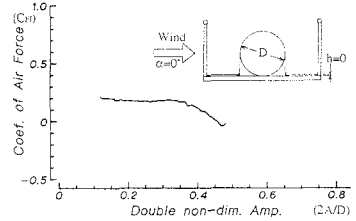


Fig.18 Type2 ($h=0, V_r=5.91$)
渦励振時の変動空気力係数