

タンデム配置偏平矩形断面のフラッタ特性の断面辺長比の依存特性

EFFECT OF WIDTH/HEIGHT RATIO ON FLUTTER CHARACTERISTICS OF
FLAT RECTANGULAR SECTIONS IN TANDEM ARRANGEMENT

松本 勝*

白石 成人**

周 春明***

By Masaru MATSUMOTO, Naruhito SHIRAIISHI and Chunming ZHOU

This paper investigates the flutter characteristics of $B/D=10$ and $B/D=20$ rectangular sections in tandem arrangements of one degree of freedom, two degree of freedom, three degree of freedom and four degree of freedom. By comparing the flutter response between $B/D=20$ and $B/D=10$ sections, the differences are emphasized by the different response generation mechanism related to the flow pattern. The common flutter characteristics are discussed for the tandem arrangements of various degree of freedom. Aerodynamic instability characteristics of tandem system obtained from the forced vibration method shows the good correspondence to the results from the spring supported experiment.

1. まえがき

近年、交通量の増加、経済性などの要求より、並列配置橋梁が益々増加する傾向がある。並列橋梁の空力特性、或は、上下流断面間の相互干渉の空力特性について、いままで数々の研究によって検討されてきた。横山ら¹⁾は六角形桁断面をタンデム配置することにより、上下流断面の渦励振に対する影響を実験的に検討されている。永田ら²⁾は二次元剛体模型実験により偏平箱桁断面をタンデム配置する場合のフラッタ発現風速が低下し、振れフラッタが生じることを報告されている。最近、著者らは、タンデム配置された偏平矩形断面を対象とした場合、一般的に、タンデム配置偏平断面系の上流断面のフラッタ発現風速がタンデム配置することにより低下するが、下流断面の振動数の変化により上流断面のフラッタ発現風速が一層増加し得る実験結果を報告している³⁾。その後、著者らはポテンシャル理論により、タンデム配置の偏平断面の定常空力特性について検討を加え、得られた結果に基づいて、タンデム配置偏平断面の非定常空力解析を進めている状態である⁴⁾。ところが、偏平断面とは、単独断面の場合の空力特性が断面辺長比に強く関連しているものである⁵⁾。断面辺長比20付近の断面では、主にポテンシャル流れが作用しているため、一般的にたわみ振れ二自由度連成フラッタのような発散振動が発生している。断面辺長比が小さくなると、はく離流の作用が強くなり、断面辺長比10付近の断面では、振れフラッタと連成フラッタが混在している⁶⁾。この様な特性を

* 工博 京都大学助教授 工学部土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

** 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

*** 工修 京都大学大学院 (〒606 京都市左京区吉田本町)

有する断面に対して、タンデム配置することによりフラッタ振動特性がどのように変化するかという問題を考察することはタンデム配置偏平断面系の空力特性を正しく把握することに対して意義深いと考えられる。このような観点から、本研究では、断面辺長比 $B/D=10$ と $B/D=20$ の二種類の断面に対するタンデム配置による影響を比較し、タンデム配置偏平断面の空力特性に関して更に実験的に説明を行うものである。

2. 実験概要

タンデム配列偏平断面の空力特性に大きな影響を及ぼすパラメータとして、上下流断面の幅(B_1 、 B_2)と上下流断面間の間隔 d が考えられる(図1)。

使用した風洞は、京都大学土木工学教室に設置されたエッフェル型風洞(測定部:高さ1.0m、幅0.7m、長さ5.0m)であり、実験に供した模型は、 $B/D=20$ ($B=20\text{cm}$ 、 $D=1\text{cm}$)、 $B/D=10$ ($B=10\text{cm}$ 、 $D=1\text{cm}$)二種類の二次元矩形模型である。

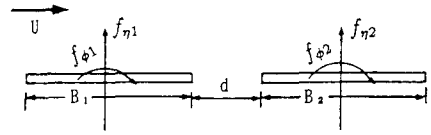


Fig.1 Plate sections in tandem

模型はそれぞれ独立に支持し、上下流模型の設定状態は各々、一自由度、二自由度、三自由度および四自由度の四種類である。本実験では、主にこの四種類のタンデム配置系のフラッタ振動特性について考察を行う。ここで、上下流断面の相互干渉、特に、上下流断面の振動数の変化を考察する便宜を図るため、上下流断面の捩れたわみ振動数比はほぼ同じ1.15としたが、下流断面の振動数を上流断面の振動数よりおよそ1.05倍に高く設定した($f_{\eta 1}=3.02\text{Hz}$ 、 $f_{\phi 1}=3.57\text{Hz}$ 、 $f_{\eta 2}=3.21\text{Hz}$ 、 $f_{\phi 2}=3.75\text{Hz}$)。なお、本研究は高風速域のフラッタ振動に着目しているため、振動の安定化特性を表示する図には断面の低風速域の応答は省略した。たわみ捩れ二自由度支持の断面では、あるいは片方の断面を捩れ一自由度支持し、もう一方の断面をたわみ一自由度支持する場合では、たわみ振動の応答と捩れ振動の応答とは似通っており、多くの場合、捩れ振動の応答がたわみ振動の応答より卓越しているため、一応、問題を単純に説明するため、本文は断面の捩れ応答だけを基にして検討する。

3. 一自由度のタンデム配置に関して

ここでは、片方の断面を固定し、もう一方の断面を捩れ一自由度支持した場合について考察を行う。

図2には、下流断面を固定した場合の上流断面のフラッタ振動の変動特性を示す。また、図3には上流断面を固定した場合の下流断面のフラッタ振動の変化特性を示す(これらの図には、U.T.D.Fが上流断面を捩れ一自由度支持し、下流断面を固定することを意味し、U.S.とD.S.がそれぞれ単独上流断面と単独下流断面を捩れ一自由度支持することを意味している)。これらの図から、捩れフラッタと連成フラッタが混在している $B/D=10$ 断面に特有な特性は、ある風速、ある振幅以上になると、特殊な捩れ振動の不安定なリミットサイクルが存在することであると

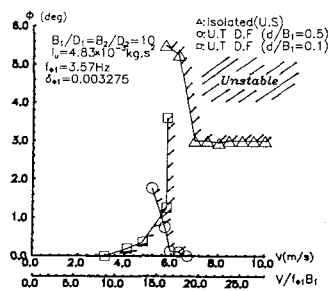


Fig.2 Torsional response (U.T.D.F $B/D=10$)

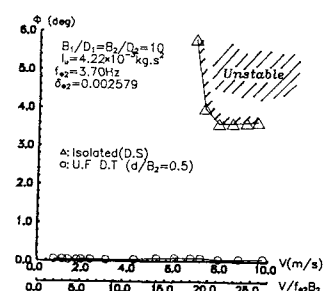


Fig.3 Torsional response (U.F.D.T $B/D=10$)

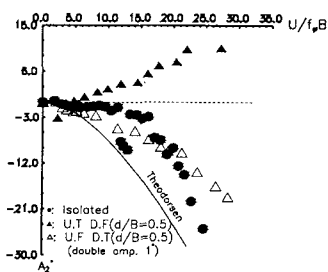


Fig.4 Unsteady aerodynamic coefficient A_2^* ($B_1/D_1=B_2/D_2=10$)

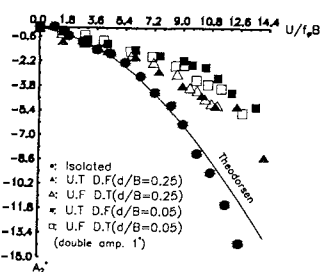


Fig.5 Unsteady aerodynamic coefficient A_2^* ($B_1/D_1=B_2/D_2=20$)

える。これに比べ、固定された下流断面が存在する場合の上流断面のフラッタ振動特性は上下流断面間の間隔に依存しながら、大きく変化している。間隔比0.5における上流断面はおよそ6m/sで振れフラッタが起こり、間隔比が0.1とかなり小さい場合の上流断面は安定なリミットサイクルをもち、およそ3m/sで振れフラッタが始まっている。ところが、固定された上流断面を配置した場合の下流断面の振れ振動は不安定なリミットサイクルが消えてしまい、かなり安定化している。この結果から、単独断面において特殊なリミットサイクルが存在することが断面の前縁剥離流の作用によるのであれば、タンデム配置することによって上流断面への剥離流の作用が増幅され、下流断面への剥離流の作用が抑えられることが推測できる。

図4と図5には、 $B/D=20$ 、 $B/D=10$ の二種類の断面の上流断面、下流断面および単独断面とした場合のそれぞれの非定常空気力係数 A_2^* を示す。 $B/D=10$ と $B/D=20$ 断面、いずれも上流断面のほうが単独断面のそれよりプラス側に増加している。ある風速以上で、 $B/D=10$ の上流断面の A_2^* がプラスになる。即ち、振れフラッタが生じているのである。下流断面の場合、 $B/D=10$ 断面の A_2^* が単独断面の A_2^* よりややマイナス側に低減しているが、 $B/D=20$ 断面の A_2^* は上流断面とほぼ同様である。この結果からタンデム配置することにより $B/D=10$ の上下流断面に対してはかなり異なる影響を与えているが、 $B/D=20$ の上下流断面に対しては影響がほぼ同程度であることがわかる。

4. 二自由度のタンデム配置に関して

ここでいう二自由度タンデム配置とは、片方の断面をたわみ振れ二自由度支持し、もう一方の断面を固定することおよび上下流断面をそれぞれ一自由度支持することを意味している。

図6には、 $B/D=10$ 断面の上流断面を振れ一自由度支持した際に、下流断面をそれぞれたわみ一自由度、振れ一自由度および固定として設置

したタンデム配置系の上流断面のフラッタ振動の変動特性を示す。この図より、下流断面を固定した場合、上流断面の振れフラッタ発現風速がおよそ7m/s、下流断面を振れ一自由度支持した場合、上流断面のフラッタ発現風速はおよそ10m/sであり、下流断面をたわみ一自由度支持した場合、上流断面はフラッタ振動が消えてしまい、安定化していることが分かる。即ち、上流断面の振れ振動は下流断面の一自由度の支持方式(たわみ一自由度支持、振れ一自由度支持、あるいは固定)と深い関係がある。

図7には、たわみ振れ二自由度支持された $B/D=10$ の上流断面の二

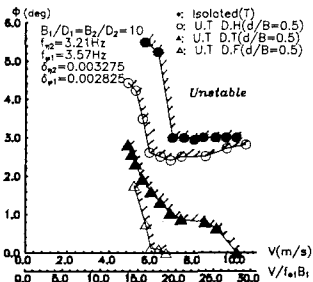


Fig.5 Torsional response of upstream section of one D.O.F ($B/D=10$)

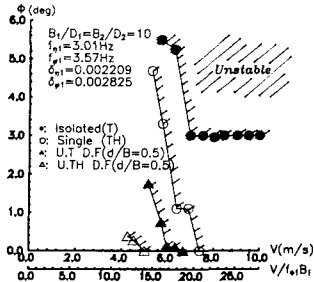


Fig.7 Torsional response of upstream section in various setting ($B/D=10$)

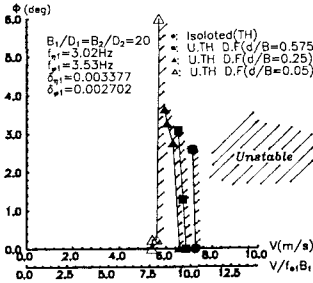


Fig.8 Torsional response of upstream section of two D.O.F ($B/D=20$)

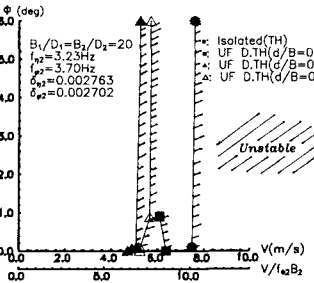


Fig.9 Torsional response of downstream section of two D.O.F ($B/D=20$)

自由度フラッタ振動の固定された下流断面による影響を示す。同図に、比較するために、単独断面二自由度、単独断面振れ一自由度および下流断面固定時の上流断面振れ一自由度のフラッタ振動の変動特性も示す。明らかに、下流断面固定においては上流断面のたわみ振れ二自由度のフラッタ発現風速が最低になっている。

度支持する場合、フラッタ発現風速が二自由度支持のそれより増加するが、単独断面の二自由度および捩れ一自由度タンデム支持、いずれのフラッタ発現風速より低いことがわかる。簡単に言えば、下流断面の固定により上流断面のフラッタ発現風速が単独断面のそれより低下する。上流断面のたわみ捩れ二自由度のフラッタ発現風速は捩れ一自由度のそれより低い。

図8と図9には、 $B/D=20$ 断面の片方の断面を固定し、もう一方の断面をたわみ捩れ二自由度支持した時の連成フラッタの変化特性を示す。この場合、上下流断面の連成フラッタ発現風速が共に、単独断面のそれより低くなっている。また、間隔比が小さいほど、その低下程度が大きくなる。即ち、上流断面を固定した場合、 $B/D=20$ の下流断面の振動がより不安定化している。これと前節の $B/D=10$ 断面では上流断面を固定した場合の下流断面の捩れ振動がより安定化している結果と異なっている。この違いについては、つぎのように説明できる。 $B/D=10$ 断面では、剥離流の作用がかなり強いが、タンデム配置することにより下流断面への剥離流による励振効果が抑えられることにより下流断面が更に安定化する。 $B/D=20$ 断面では、剥離流の作用が無視できるから、ポテンシャル流れに対応する上下流断面の空力的な相互干渉により下流断面のフラッタ発現風速が低下する。

5. 三自由度のタンデム配置に関して

三自由度タンデム配置というのは上下流断面のうち、片方の断面を二自由度支持し、もう一方の断面を一自由度支持するものである。ここで着目するのは上流断面を二自由度支持し、下流断面をたわみ一自由度支持した場合である。

図10と図11には、それぞれ0.25と0.05の間隔比における $B/D=20$ 断面のたわみ一自由度に支持された下流断面

面のたわみ振動数が変化することにより、上流断面のたわみ捩れ二自由度のフラッタ振動にいかなる影響を与えるかを示す。明らかに

、上流断面の振動特性が下流断面のたわみ振動数に強く依存していることがわかる。下流断面のたわみ振動数が上流断面の捩れ振動数(3.53Hz)とたわみ振動数(3.02 Hz)の間にある時の上流断面のフラッタ発現風速が一層増加される。間隔比が0.25である場合の上流断面のフラッタ発現風速がおおよそ8m/sになっており、間隔比が0.05である場合の上流断面のフラッタ発現風速がおおよそ9.5m/sになっている。下流断面のたわみ振動数が上流断面のたわみ振動数より低い時、或は上流断面の捩れ振動数より高くなる時の上流断面のフラ

ッタ発現風速が下流断面固定時の結果に比べ、あまり変化していない。この現象は下流断面の減衰にも依存している。図12から、下流断面のたわみ振動数が3.20Hzである時、下流断面の減衰が増加すると、上流断面のフラッタ発現風速が低下することが分かる。これは空力的な相互干渉、もしくは多自由度的な空力連成作

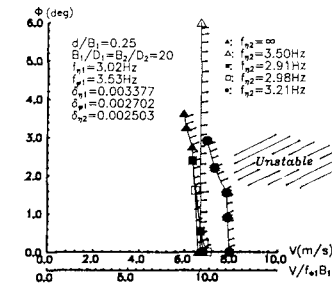


Fig.10 Torsional response of upstream section in two D.O.F. & downstream section in heaving

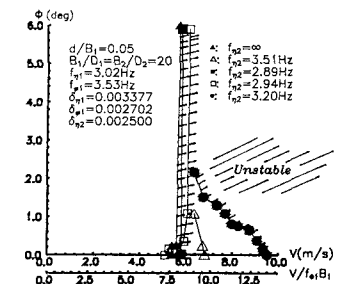


Fig.11 Torsional response of upstream section in two D.O.F. & downstream section in heaving

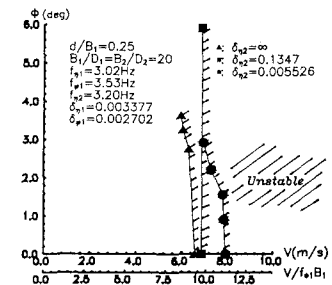


Fig.12 Torsional response of upstream section in two D.O.F. vs. damping of downstream section

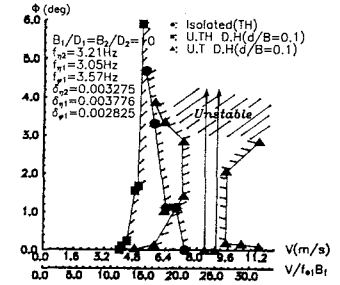


Fig.13 Torsional response of upstream section with downstream section heaving

用によるものではないと思われる。このような多自由度空力連成作用が上流断面及び下流断面の振幅に強く依存していることは当然だと思われる。

しかしながら、 $B/D=10$ 断面の場合、図13に示している様に下流断面を3.21Hzのたわみ振動数でたわみ一自由度に設定すると、上流断面の二自由度フラッタ発現風速が更に低下している。同図には、同様な間隔比における上流断面の捩れ一自由度のフラッタ振動も示されている。この時、上流断面の捩れ一自由度フラッタ振動がかなり複雑に変化している。低風速域と高風速域において捩れ振動がともに安定化する。捩れフラッタ振動が限定された風速だけで起こる。このことから、たわみ一自由度支持された下流断面による上流断面のフラッタ振動に対する影響が $B/D=10$ 断面と $B/D=20$ 断面とはかなり大きな差異があると考えられる。明らかにしたように、上流に配置される $B/D=10$ 断面のフラッタ振動が捩れフラッタ振動であり、捩れフラッタについては、いままで、流れの遅れが支配的な役割を演じていると考えられているが⁷⁾、その他に断面の背面のwake flowもある程度作用しているのではないかとということがここで推測できる。このような考えに基づいて、たわみ一自由度に支持される下流断面が上流断面のwake flowに干渉することを通じて、上流断面の捩れフラッタに影響を与えていることが判断できる。即ち、“流れ干渉”ということである。上流断面をたわみ捩れ二自由度支持した時の下流断面のこのような干渉効果が変化することにより、上流断面のフラッタ発現風速が更に低下する。このメカニズムを解明するために、また他の補助実験が必要だと思われる。

6. 四自由度のタンデム配置に関して

四自由度タンデム配置というのは上下流断面を同時に二自由度支持するものである。これは並列橋梁の支持状態と近似しているといえる。四自由度支持のフラッタ振動特性が三自由度、二自由度および一自由度のタンデム配置におけるフラッタ振動特性とどのような差異があるかを解明することがここでの検討目的である。

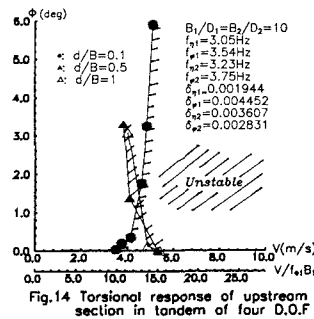


Fig.14 Torsional response of upstream section in tandem of four D.O.F

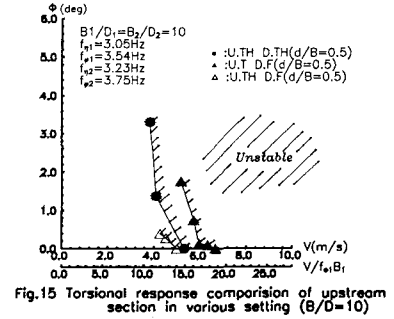


Fig.15 Torsional response comparison of upstream section in various setting ($B/D=10$)

図14には、上下流断面を同時に二自由度支持する間隔比0.1と0.5に対する $B/D=10$ 断面の上下流断面のフラッタ振動の変化特性を示す。明らかに、間隔比が小さくなるに従って上流断面のフラッタ発現風速は低下している。これといままでの三自由度タンデム配置と二自由度タンデム配置に関する結論と一致していることが分かる。図15に間隔比0.5における四自由度タンデム配置の上流断面のフラッタ振動特性と一自由度、二自由度タンデム配置の結果とを示す。四自由度支持の結果と二自由度支持の結果とが一致していることが分かる。

以上の検討結果から、 $B/D=10$ 断面に対して、基本的に四自由度支持の上流断面のフラッタ振動特性が二自由度、或は三自由度のタンデム配置の上流断面のフラッタ振動特性に比べて、それほど変化していないことがわかる。ここでは $B/D=10$ 断面だけに対する四自由度支持のフラッタ振動特性について検討したが、 $B/D=20$ 断面を四自由度支持すれば、どのような結果になるかについてはまだ判断できない。これは今後の検討課題である。

7. 強制加振による検討

バネ支持実験によって得られた結果の妥当性を確かめるために、 $B/D=10$ 断面に対して、捩れ一自由度の強制加振実験を実施した。加振振動数は2.7Hzであり、加振倍振幅は0.07radである。

図16には、間隔比0.5、無次元風速16.27の場合の表面非定常圧力分布を示す。明らかに、単独断面の結果と比べ、タンデム配置によって上下流断面の非定常圧力の分布特性が大きく変化していることがわかる。

図17には、非定常圧力より断面に対してなされる仕事の積分値を示している。単独断面と比べて、

明らかに上流断面の値は増加している。高風速で、正に転じている。即ち、バネ支持の実験結果は、振れフラッタが起こっていることに対応している。下流断面についてはこの仕事の積分値は単独断面のそれより大きくなるが、連成フラッタ振動に対する影響が振れ一自由度の結果だけからまだ判断できないと思われる。

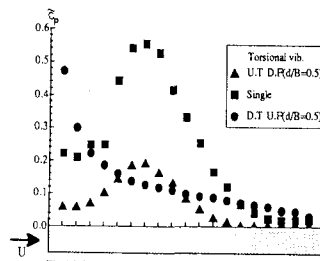


Fig.16 Distribution of fluctuating pressure coefficient
($B/D=10$, $f=2.701\text{Hz}$, $U=8.79\text{m/s}$, $2\phi=0.07\text{rad}$)

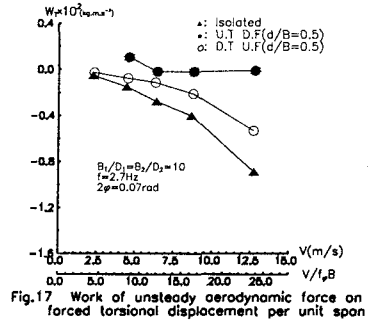


Fig.17 Work of unsteady aerodynamic force on forced torsional displacement per unit span
($B_1/D_1=B_2/D_2=10$, $f=2.7\text{Hz}$, $2\phi=0.07\text{rad}$)

8. 結論

1). $B/D=10$ 断面と $B/D=20$ 断面では、タンデム配置することによるフラッタ振動特性に対する影響がかなり異なる。 $B/D=10$ の上流断面では振れフラッタが誘発され、 $B/D=20$ の上流断面では連成フラッタの発現風速が低下する。 $B/D=10$ の下流断面は更に安定化するが、 $B/D=20$ の下流断面はもっと不安定になる。

2). 下流断面のたわみ一自由度振動の設定することによって上下流断面のフラッタ振動の変化特性は大きく変化する。ある程度の間隔比の範囲では、たわみ振動数の変化によって $B/D=10$ の振れ一自由度支持された上流断面の振れフラッタが消え、また、 $B/D=20$ 断面の連成フラッタ発現風速が一層増加するような傾向が見える。

3). $B/D=10$ 断面では、四自由度タンデム配置のフラッタ振動の変化特性と二自由度あるいは三自由度タンデム配置のフラッタ振動の変化特性との間に著しい差異は見られない。

本研究では、京都大学工学部 白土博通氏 余乃儒氏、京都大学大学院 新原雄二氏 西崎孝之氏 山岸稔氏及び建設省 重高浩一氏(前京都大学大学院)をはじめとするおおくの方々よりご協力をいただいた。ここに謝意を表すものである。

参考文献

- (1) 横山 功一、佐藤 弘史他、並列する構造物の風による振動、土木技術資料、28-3(1986)。
- (2) 永田・森河他、鶴見航路橋の耐風検討、土木学会年講、1991。
- (3) 周・松本・白石他、タンデム配列偏平矩形断面の動的空気特性に及ぼす下流断面の影響に関する研究、土木学会年講、1992。
- (4) 松本・白石・周、並列配置偏平断面の空気特性に関する評価、風工学シンポジウム、1992。
- (5) 橋と風、橋と風編集グループ、平成2年。
- (6) 松本・白石・白土他、構造基本断面の非定常空気力に関する研究、京都大学防災研究所年報、1992。
- (7) 中村 泰治、溝田 武人、矩形断面の振りフラッタについて、九州大学応用力学研究所所報、第39号、昭和48年。

(1992年9月21日受付)