

P C斜張橋の閉断面桁および開断面桁の剥離流相互干渉法による耐風性能改善策に関する研究

A study on improving aerodynamic instability of closed and open decks for
PC cable-stayed bridge by means of separation flow mutual interference method

久保喜延* 本多健二** 野上千秋*** 加藤九州男**** 田崎賢治*****

By Yoshinobu KUBO, Kenji HONDA, Chiaki NOGAMI, Kusuo KATO, Kenji TASAKI

A PC cable-stayed bridge has been extending its span length year by year. Therefore, it comes to be more important to develop an improvement method for aerodynamic instability of PC girders. The present paper discusses new idea for improving aerodynamic instability of closed and open decks of PC cable-stayed bridges. The idea is following. More than two separation points are set on a fairing of the bridge decks. The separation from a leeward separation point is controlled by a separated flow from a windward separation point. By using this method, non-streamlined shape deck can be chosen as the PC cable-stayed bridge girder and this method makes it possible to reduce the dead load of girder. This is the idea of "Separation flow mutual interference method". This idea was established during the study on improving the aerodynamic instability of closed PC decks. And the authors also got a good result for improving aerodynamic instability of open PC decks. In future, this idea will be also applied on steel girder.

1. まえがき

わが国における近年の斜張橋の建設はめざましいものがあり、そのスパン長も次第に伸びており、800mを超えるような長径間斜張橋もいくつか計画されているほどである。使用材料も鋼中心であったものが最近ではプレストレストコンクリートを用いるものが増えてきており、プレストレストコンクリートを用いたP C斜張橋桁の耐風安定性の検討が重要な課題となってきた。これまでに行われてきた耐風制振法のうち、断面形状を修正する空力的手法を大別すると、基本断面を流線形化して耐風性能を向上させる方法と、基本断面にフラップやスポイラーなどの付加物を取り付けて耐風性能を向上させる方法とになる。P C斜張橋の場合は、鋼斜張橋に従来用いられてきた基本断面に付加物を取り付ける方法は、施工性あるいは維持・管理上好ましくない。そこで、最近ではP C斜張橋の耐風制振法として、桁断面と一体化したフェアリングを用いる方法が採用されている。しかし、鋼斜張橋にこれまで用いられてきたような先端を鋭角にしたフェアリングを用いることは、死荷重を増大させることになると同時に施工性あるいは維持・管理上好ましくない。そこで、P C斜張橋にフェアリングを用いる場合には、死荷重をできるだけ減少し、施工性のよい小規模の

*) 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)

**) 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)

***) 川崎重工工業株式会社 西部橋梁設計部 第二課 (〒675-01兵庫県加古郡播磨町新島8番地)

****) 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)

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

フェアリングによって耐風安定性を向上させることが重要な課題となる。

本研究では、橋梁断面に生じる空力弾性振動は、構造物の上流側隅角部から剥がれた流れが流下するとき生じる剥離渦が引き起こす現象であるとの考えに立ち、上流側で生じる剥離渦を何らかの方法で制御することにより、空力弾性振動を抑制することを試みた。特に、フェアリングをできるだけ小規模なものとするために、フェアリング上に複数の剥離点を設けて剥離流の相互干渉作用を利用することによって、空力弾性振動を抑制する方法（剥離流相互干渉法）の有効性を検討している。検討方法としては端部形状の異なる種々のフェアリングについて、ねじれおよびたわみの自由振動実験を行い、その空力特性を比較する方法を用いた。また、応答特性と物体周辺流れとの関係を把握するために可視化実験も併せて行った。

2. 実験方法

実験には測定断面が $1.07 \times 1.07 \times 6\text{m}$ の風洞を使用し、ねじれおよびたわみ1自由度振動実験を行った。また、それぞれのフェアリングの相対的な耐風安定性の評価を、測定減衰率から構造減衰率を振幅ごとに差し引いて求めた空力減衰率を用いて行った。フェアリングのみの効果を検討するために、Fig.1(a)に示すような呼子大橋の断面を基本断面として、斜線部にFig.1(c)に示す形状の異なる15個のフェアリングを取り付けて実験を行った。また、Fig.1(c)に示すフェアリングは、Fig.1(b)に示すように上面傾斜角(θ)、フェアリング桁先端厚さ(H)および、フェアリング長さ(L)を変化させたものである。Fig.1(c)に示す各フェアリングの名称は数字がフェアリング上面傾斜角を示し、A,B,Cは順にフェアリング先端厚さが大きくなることを示している。また、これらのRe数は $1.7 \times 10^3 \sim 4.1 \times 10^4$ である。

さらに、模型の周辺流れと応答特性との関係を把握するために、測定断面が $0.4 \times 0.4 \times 2.0\text{m}$ の風洞で可視化実験も行った。可視化の方法は、流動パラフィンを用いたスモークワイヤー法である。

3. フェアリングの空力特性

3-1 振幅に対するフェアリングの空力特性

a) たわみ1自由度振動実験

Fig.2~Fig.4は、一定の風速に着目したときの各フェアリングにおける無次元倍振率 $2A/D$ (A:片振幅、D:桁高)と空力減衰率 δ (対数減衰率)の関係を示したものである。このうちFig.2およびFig.3は渦励振風速域におけるA- δ 曲線(振幅-空力減衰率曲線)を示したもので、それぞれ迎角 $\alpha=0^\circ$ および $\alpha=+3^\circ$ の場合である。また、Fig.4はギャロッピングが生じるとされる高風速域における迎角 $\alpha=+3^\circ$ でのA- δ 曲線である。なお、各図の(a),(b),(c)はフェアリング先端厚さA,B,Cに対応した特性を示している。

Fig.2によれば、全体的にF30が最も不安定な空力特性を示している。また、先端厚さA,BのフェアリングではF10を除くとはほぼ同じような傾向を示している。これに対し、フェアリング先端厚さが最大のCでは、F10とF50が同じような傾向であり、F20,F30,F40よりも安定な空力特性を示している。

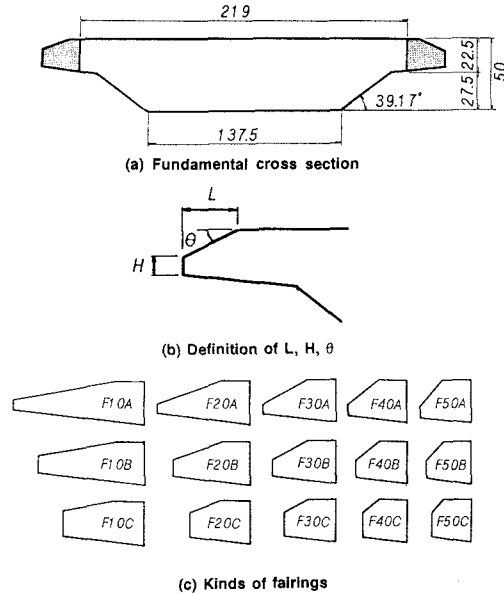


Fig.1 Fundamental section and fairings for experiments.

Fig.3は迎角 $\alpha=+3^\circ$ の場合でのA- δ 曲線であるが、 $\alpha=0^\circ$ の場合と同様に各フェアリングの中でもF30が最も不安定な空力特性を示している。また、先端厚さCのフェアリングはAに対して上面傾斜角 θ の違いによる特性変化が小さく、 $\alpha=0^\circ$ と同様にF10とF50が同じような傾向を示している。

Fig.4は高風速域におけるA- δ 曲線であるが、全体的にF20およびF30の空力減衰が小さいため、F10、F40およびF50より相対的に不安定な空力特性を示している。また、フェアリング先端厚さAではF10が最も安定な空力特性を示しているのに対し、BおよびCではF10よりF40、F50の方が安定した空力特性を示している。

b) ねじれ1自由度振動実験

Fig.5は換算風速 $V_r=3.8$ 、迎角 $\alpha=+3^\circ$ でのねじれ1自由度振動実験における振幅と空力減衰の関係を示したものである。F10はフェアリング先端厚さが増加するにしたがって不安定な空力特性を示しているのに対し、F50ではF10とは逆に先端厚さの増加に対して安定な空力特性を示している。このような傾向は、たわみ振動実験の結果と対応している。

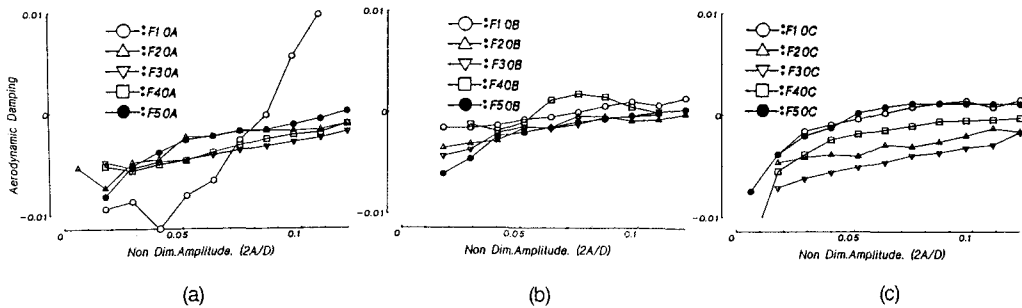


Fig.2 Aerodynamic damping to nondim. double amplitude of heaving vibration in vortex-excited vibration region at specified angle of attack ($\alpha=0$ deg.)

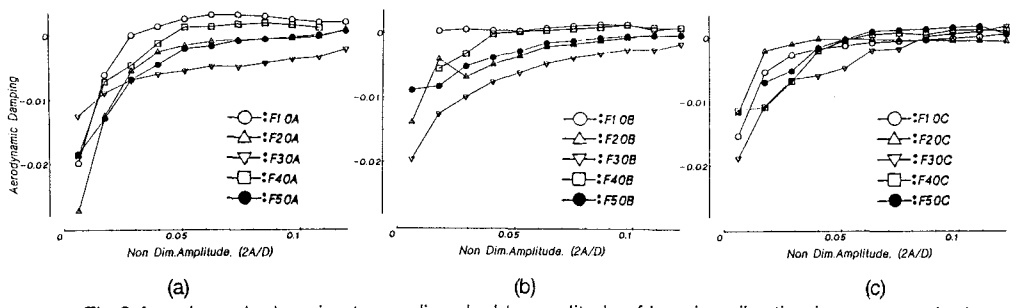


Fig.3 Aerodynamic damping to nondim. double amplitude of heaving vibration in vortex-excited vibration region at specified angle of attack ($\alpha=+3$ deg.)

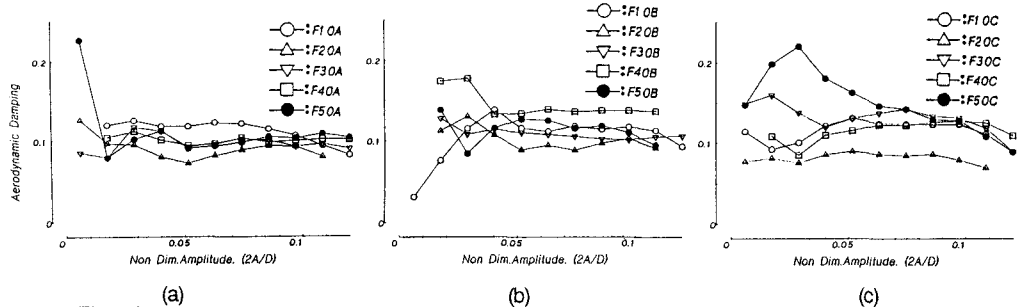


Fig.4 Aerodynamic damping to nondim. double amplitude of heaving vibration in high wind velocity region at specified angle of attack ($\alpha=+3$ deg.)

3-2 換算風速に対するフェアリングの空力特性

Fig.6およびFig.7は、たわみ振動およびねじれ振動において、一定の振幅に着目したときの各フェアリングの換算風速 $V_r (=V/fB)$ 、 V :風速、 f :振動数、 B :桁幅と空力減衰率 δ (対数減衰率)の関係を示したものである。

Fig.6は、迎角 $\alpha=+3^\circ$ での無次元倍振幅 $2A/D=0.063$ におけるたわみ振動の $V_r-\delta$ 曲線を、Fig.7は迎角 $\alpha=+3^\circ$ での無次元倍振幅 $2\phi=1.44(\text{deg.})$ におけるねじれ振動の $V_r-\delta$ 曲線を示したものである。

Fig.6によれば、上面傾斜角 θ の増加に伴い、フェアリング先端厚さの違いによる空力特性の差が減少しており、 $V_r=1.5$ 付近で空力減衰の値が小さくなっている傾向がある。また、最も流線形状に近いF10A断面が他のフェアリングと比べて、最も不安定な空力特性を示していることは興味深いことである。

Fig.7によれば、F30の断面では空力減衰の値が先端厚さの大きさに依存していないことを示している。また、F10のフェアリングでは、先端厚さが最も大きいCの断面が最も不安定な傾向を示しているのに対して、F50ではF10とは逆に先端厚さが最も大きいCの断面が最も安定な空力特性を示している。一方、F50AとF50Bではフラッターが発生している。以上の結果より、F50CはF10と同じように良好な空力特性を示しており、F10に比較すると非流線形断面であるF50Cは死荷重の減少あるいは施工性などの観点から、P C桁断面として有利な断面であると考えられる。

4. フェアリングの空力特性のメカニズム

フェアリングの空力特性に及ぼすメカニズムについて検討する場合、桁断面の周辺流れを把握する必要がある。そこで、スモークワイヤー法による流れの可視化実験を行った。Fig.8は可視化写真をもとにその物体

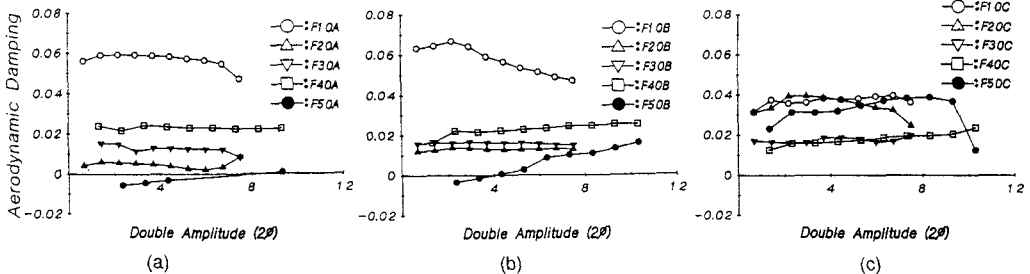


Fig.5 Aerodynamic damping to double amplitude of torsional vibration in high wind velocity region at specified angle of attack ($\alpha=+3^\circ$ deg.)

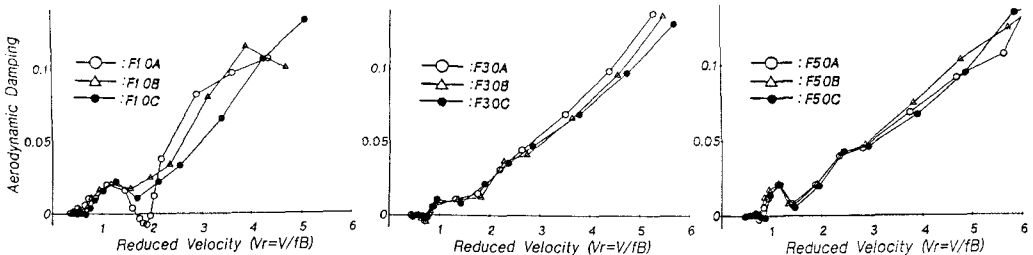


Fig.6 Aerodynamic damping to reduced wind velocity at specified double amplitude of heaving vibration($2A/D=0.063$) at specified angle of attack ($\alpha= 0^\circ$ deg.)
D and B are depth and width of model.

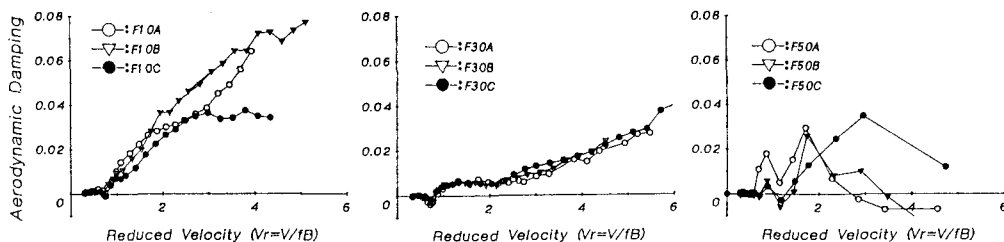


Fig.7 Aerodynamic damping to reduced wind velocity at specified double amplitude of torsional vibration ($2\phi=1.44$ deg.) B is width of model. ($\alpha=+3$ deg.)

表面上の流れをスケッチしたものである。Fig.8(a)に示すようにフェアリング表面には剥離点となるエッジが2つ存在しており、ここでは便宜上、フェアリング先端で生じる剥離を1次剥離、フェアリング表面で生じる剥離を2次剥離と呼ぶことにする。Fig.8(b),(c)および(d),(e)は、F10およびF30の静止時における可視化のスケッチである。これによると、F10のフェアリングでは、1次剥離点で剥離が生じているのに対し、F30のフェアリングでは2次剥離点で剥離が生じている。すなわち、フェアリング上面傾斜角が大きくなるにしたがって、1次剥離より2次剥離が卓越する傾向を示している。また、フェアリング先端厚さも2次剥離に影響を与える傾向がある。したがって、1次剥離点と2次剥離点の間の距離を適当に選ぶことにより、1次剥離点で生じた剥離流が再付着した後に、2次剥離点で生じる剥離を制御すると考えられる。前述の最も非流線形をしているF50Cが安定な空力特性を示したのは、この2つの剥離点から生じる剥離流の相互干渉作用によるものであると考えられる。

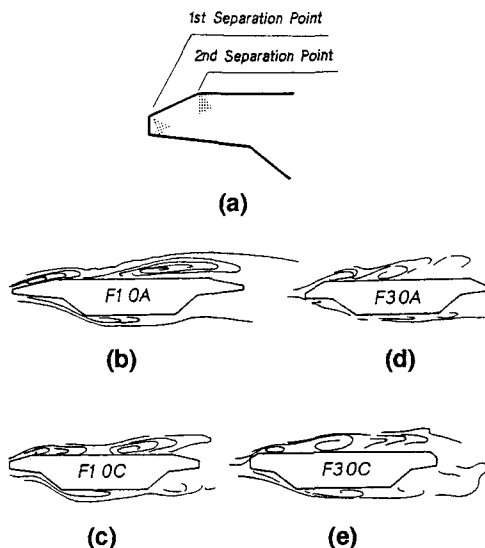


Fig.8 Sketches of flow pattern. ($Re = 820$)

5. PC開断面桁のフェアリングによる空力特性の改善

Fig.9(a)に示す開断面桁は、負の迎角に対して不安定な空力特性を示したので、この空力特性改善に、上述の剥離相互干渉法が適用可能か否かを検討した。この桁の場合、上述のF50Cの結果をもとに、フェアリング上面傾斜角を $\theta_u=50^\circ$ に固定し、Fig.9(b)に示すように、下面傾斜角 θ_L を変化させることでFig.9(a)の断面を大きく変えることなく、できる限り死荷重を減少させ、空力特性の改善を試みた。Fig.10(a)は迎角 $\alpha=0^\circ$ で、フェアリング下面傾斜角 θ_L が $20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ のときの換算風速に対する無次元倍振幅を示したものである。これによると、フェアリング下面傾斜角

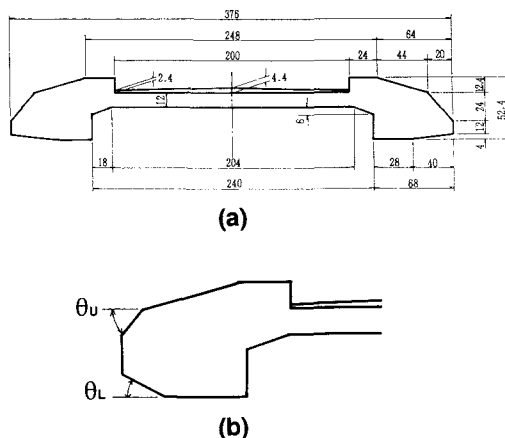


Fig.9 Open deck section.

θ_L が 30° に近づくにしたがって渦励振も小さくなり、 $\theta_L=30^\circ$ で渦励振は発生していないことがわかる。また、Fig.10(b)は同様に $\alpha=0^\circ$ で、フェアリング下面傾斜角 θ_L が $35^\circ \sim 50^\circ$ の場合の応答図である。 θ_L が 35° から増大するにつれて渦励振が大きくなり、 $\theta_L=45^\circ, 50^\circ$ ではフラッターが生じている。

以上の結果から、迎角 $\alpha=0^\circ$ のときには、フェアリング下面傾斜角 $\theta_L=30^\circ$ のときが最も安定した耐風特性を示している。このことは、負の迎角の場合のフラッター発振風速とフェアリング下面傾斜角 θ_L との関係を示したFig.11からも理解できる。すなわち、フェアリング下面傾斜角 θ_L が 30° でフラッター発振風速が共に最大を示しており、フェアリング下面傾斜角を適当に選ぶことで、1次剥離と2次剥離の相互干渉作用を促進させることができ、空力特性を向上させることができる。以上の結果に対して、上述の流れの可視化結果を用いて考察すると、 $\theta_L \leq 25^\circ$ では1次剥離が主となり、 $\theta_L \geq 35^\circ$ では2次剥離が主となっており、 $\theta_L=30^\circ$ 付近で1次剥離と2次剥離の相互干渉作用が生じて空力特性を向上させていると考えられる。

6. まとめ

以上の結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 箱桁断面の場合、流線形に近いF10断面と非流線形性の高いF50C断面とが同程度の空力特性を示しており、空力的に安定な断面は必ずしも流線形断面である必要はないことを意味している。
- 2) 箱桁断面に有効であった剥離相互干渉法は、開断面にも有効に働くことが判明した。
- 3) P C斜張橋の場合、死荷重を減少させ、空力安定性を増す方法として、フェアリングによる剥離流相互干渉法が有効であると考えられる。
- 4) 剥離流相互干渉法を用いることで、フェアリング断面を小さくすることは、鋼桁の場合にも有効であり、フェアリングを構造部材の一部として用いることも可能となる。

今後はレイノルズ数の影響を考慮した形で、定量的な把握ができるように研究を遂行していく計画である。

<参考文献>

- 1) Kubo, Y., Yoshimura, T. and Watanabe, A.: Aerodynamic Characteristics of Yobuko Bridge, Proc. of Int. Conf. on Cable-stayed bridge, Bangkok, Thailand, pp.593-605, 1987

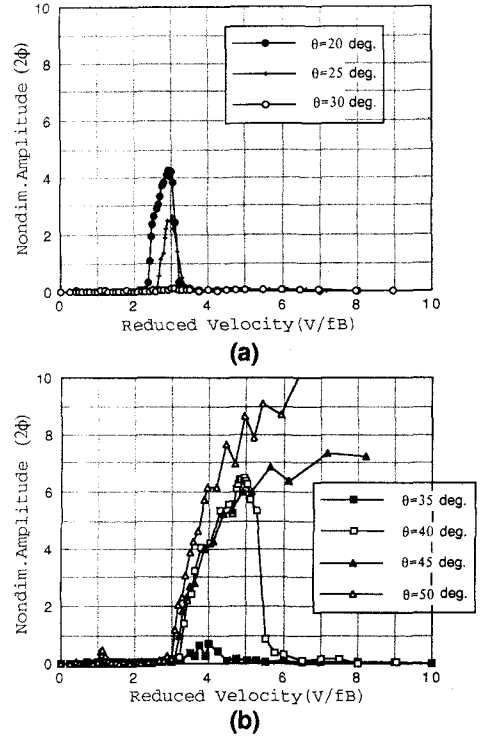


Fig.10 Aerodynamic responses
at angle of attack $\alpha=0^\circ$.

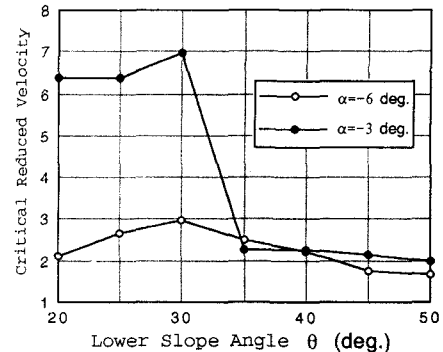


Fig.11 Critical velocity for flutter.

(1991年9月30日受付)