

長大橋梁のガスト応答に関する研究(第1報) : sharp-edged gustの発生装置について

吉村, 健
九州産業大学助教授, 工学部土木工学科

中村, 泰治
九州大学応用力学研究所 : 教授

石田, 良三
九州産業大学大学院 : 修士課程

<https://doi.org/10.15017/4743639>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 56, pp.1-10, 1982-02. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



長大橋梁のガスト応答に関する研究 (第1報)

—sharp-edged gust の発生装置について—

吉	村	健*
中	村	泰 治**
石	田	良 三***

概 要

吊橋・斜張橋など長大橋梁の耐風設計にあたっては、フラッタ防止に対する配慮と、自然風の乱れに起因するガスト不規則振動特性の推定が重要である。ガスト不規則振動特性は、周波数領域と時間領域において推定されるが、後者の推定には、sharp-edged gust に対する過渡揚力応答（非定常翼理論における Küssner 関数）あるいは過渡モーメント応答が必要である。

本研究では、吊橋・斜張橋断面模型に対する上記過渡応答を実測し、時間領域においてガスト不規則振動を推定することを目的とする。この目的のため、曳航式水路の一端に、この水路と直交するガスト水路を接合した特殊水路を製作し、sharp-edged gust の発生を試みた。

流れの可視化実験と熱線流速計を用いた計測により、本実験装置の性能試験を行なった。その結果、ほぼ理想的な sharp-edged gust が得られることがわかった。

Key words: Long-span bridge, Gusty wind, Sharp-edged gust, Aerodynamic response, Time domain

1. は し が き

吊橋・斜張橋など長大橋梁の耐風設計にあたっては、フラッタ防止に対する配慮と、自然風の乱れに起因するガスト不規則振動特性の推定がきわめて重要である。ガスト不規則振動においては、振動振幅は比較的小さく、フラッタのように破壊的振動振幅に成長することはないが、一方、比較的低風速域でも振動が発生し、その発生頻度はきわめて高い。したがって、ガスト不規則振動特性を推定し、橋梁の疲労に対する安全性や車両の走行安定性等を検討しておかなければならないわけである。この種の振動の発生には、自然風の乱れの鉛直成分——鉛直ガスト——によりもたらされる変動空気力成分の寄与が支配的であり、乱れの主流方向成分の寄与は小さい。そこで、本研究では、鉛直ガストの寄与のみを考えることにする。

* 九州産業大学助教授 工学部土木工学科

** 九州大学教授 応用力学研究所

*** 九州産業大学大学院修士課程在学

さて、不規則入力に対する系の応答特性は、周波数領域と時間領域において求められ、それぞれ、スペクトルと過渡応答の形で表わされることは周知のとおりである。吊橋・斜張橋のガスト応答については、Davenport の研究^{1)~3)}以来、周波数領域における多くの研究がなされて来た（たとえば、文献 4)~9)）。一方、時間領域における研究も行なわれつつある^{9)~14)}。時間領域においてガスト不規則振動を正確に推定するには、sharp-edged gust に対する過渡揚力応答（非定常翼理論における Küssner 関数）あるいは過渡空力モーメント応答が必要である。ところが、風洞気流中で sharp-edged gust を発生することはさきわめて困難なため、sharp-edged gust に対する吊橋・斜張橋断面模型の過渡応答の実測値はいまだ得られていない。文献 9)~12) では、上記過渡応答を用いずに、統計的手法によって時間領域におけるガスト不規則振動が推定されている。また、文献 13), 14) では、吊橋・斜張橋断面模型について、周期的ガストに対する周波数応答（非定常翼理論における Sears 関数）を風洞実験により求め、この実験値から上記過渡応答を推定している。

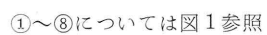
本研究では、吊橋・斜張橋断面模型について、sharp-edged gust に対する過渡揚力応答と過渡空力モーメント応答を実測し、時間領域においてガスト不規則振動を推定することを目的とする。文献 15) に示したように、過渡応答の測定には、風洞より曳航式水路を用いる方が都合が良い。そこで、既設の曳航式水路を改造して sharp-edged gust 発生用特殊水路を製作した。本論文は、この装置ならびにその性能試験結果について報告するものである。

2. 実験装置

2.1. 実験装置の概要

実験装置の概略図と写真を、それぞれ図 1 と写真 1 に示す。本装置は、既設の曳航式水路（九州大学応用力学研究所所属）を改造したものであって、曳航水路①の一端に、この水路と直交するガスト水路②を新たに接合したものである。曳航水路とガスト水路の寸法は、それぞれ、幅×深さ×長さ=0.4×0.4×6 m と 0.6×0.4×2.7 m である。ガスト水路の下流端には、排水装置③と、一様な流速分布の遅いガストを作る流速調整装置④が設けられている。これら二種の水路の流体は、水路接合部に設けられた二枚の翼形断面シャッター⑤により遮断することができる。

いま、曳航台車⑥に鉛直に支持された二次元橋梁断面模型⑦が、一定速度 $U=15\sim40$ cm/s でガスト水路方向へ曳航されて来る場合を考える。一方、ガスト水路では、 $w=0.5\sim2$ cm/s の遅い一様な定常流が流れている。この間、シャッターは閉ざされている。模型がシャッターの直前に達した時、シャッターがすばやく開放される。この時、曳航水路の流体は静止しているが、一方、ガスト水路の流体は流速 w で流れており、これら二種の流体の境界面では、ステップ状の不連続面が形成される。この不連続面が sharp-edged gust の前面であり、模型がこの不連続面を通過する時の過渡揚力応答あるいは過渡空力モーメント応答として、sharp-edged gust に対する応答が得られるわけである。



2.2. ガスト流速調整装置

図2はガスト水路の側面図である。図中、流速調整装置④は、三角形に整形された金網の内部に相馬標準砂を充填した一種のフィルターである。砂粒子の間隙を流れる浸透流はダルシーの法則に従う。この浸透流が水平に流れるものとすれば、流速 w の一様流速分布の定常浸透流が実現され、したがって、ガスト水路でも同様の定常流が実現されよう。なお、ガスト流速の調整は流速調整装置の頂角 β を変化させることにより行なうことができる。また、排水に伴うガスト水路の水位低下を解消する目的のため、容積の充分大きい貯水槽（図1の図中⑧）がガスト水路の上流端に接合されている。

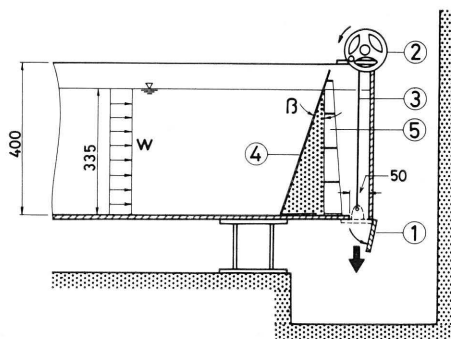


図 2 ガスト水路の側面図

- ① 排水扉 ② 巻き上げハンドル ③ 吊 索
④ 流速調整装置 ⑤ 補 剛 材

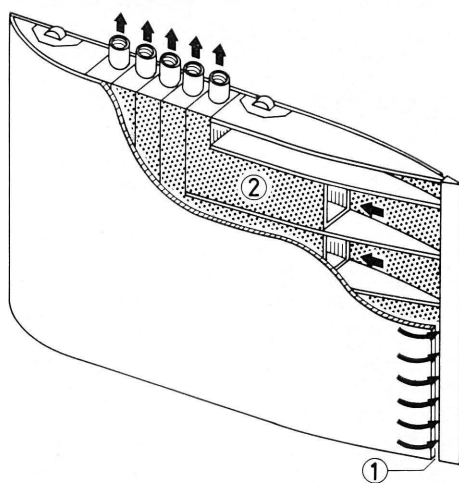


図 3 シ ャ ッ タ ー

- ① スリット ② 角パイプ

2.3. シャッター

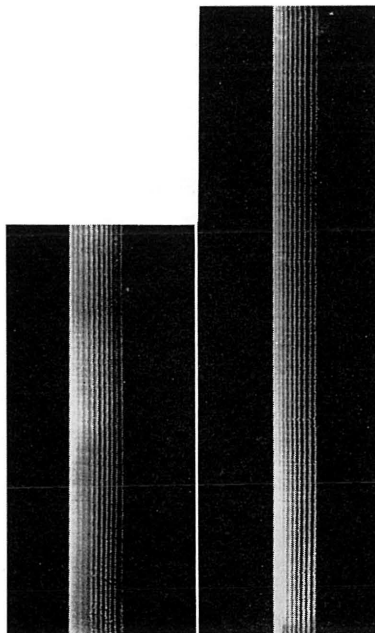
次に、シャッター (図1⑤) について二・三説明を加えたい。シャッターの駆動はエアーシリンダーにより行なっている。駆動の ON-OFF には電磁弁とリミットスイッチが用いられ、駆動速度は調圧器で調整される。

ところで、シャッター駆動時に、シャッター後方では後流渦が形成され、この渦により流れの不連続面が攪乱されることが予備実験でわかった。後流渦は、シャッター駆動時に、シャッター表面に形成される境界層により生じるものである。そこで、本装置では、図3に示すように、シャッター後縁付近に設けたスリット①から境界層を吸収し、後流渦の発生を抑制している。スリットから吸収された流体は、シャッター内部に埋め込まれた角パイプ②、吸収 ON-OFF 用の電磁弁ならびに流量調整器を経て、真空エアーチャンバーに流入する。境界層の吸収は、シャッター駆動時のみ行なわれるようリミットスイッチで制御されている。

3. 性能試験結果

3.1. ガスト水路の定常流速分布

まず、シャッターを閉鎖した状態で、ガスト水路の定常流速分布を水素気泡法により観察した。写真2. aと写真2. bに、それぞれ、鉛直流速分布と水平流速分布の観察写真を示す。流れは写真の左から



(a) 鉛直流速分布 (b) 水平流速分布

写真2 ガスト水路の定常流速分布

右へ流れており、流速 w は 1.5 cm/s である。前記流速調整装置により、ほぼ様な流速分布の流れが得られることを写真のタイムラインは示している。

図4の図中(1)の曲線は、排水扉開放 ($T=0 \text{ sec}$) の後におけるガスト水路の流速測定記録である。計測には低流速用熱線流速計を用いたが、微小流速 $w=0 \sim 2 \text{ cm/s}$ の範囲では、流速—出力は非線型となる。そこで、流速—出力の検定を行ない、測定値を修正して図の結果を得た。排水扉を開放して約1秒経過の後に、ほぼ一定流速の流れとなることが図の結果よりわかる。

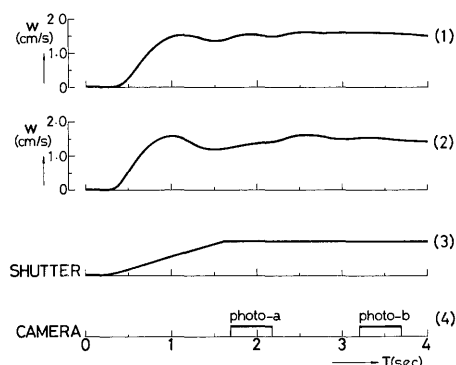


図 4 排水扉開放後におけるガスト流速の記録

3.2. 不連続面近傍の流れの特性

図4の図中(2)と(3)の曲線は、それぞれ、排水扉開放後におけるガストの流速と駆動シャッターの変位（速度は約 20 cm/s ）の記録である。図中(1)の曲線と比較すると、シャッターの開放に伴ない、いくつかの流速変動を生じることがわかる。

さて、シャッター開放後における不連続面近傍の流れの特性であるが、シャッター開放終了直後とその後約1.5秒後（図4の図中(4)参照）における流れをアルミ粉法により写真観察した。その結果が、それぞれ、写真3.aと写真3.bである。これらの写真は、シャッター近傍の約 $20 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ の部分（図1の図中破線で囲まれる部分）の流れを示す。写真の右半分がガストであり、その流れは写真の下から上へ向かう。写真3.aに見るように、模型が通過する付近（写真の中央）では、ほぼ理想的な不連続面が形成されている。この時、写真の左半分の曳航式水路では、模型曳航方向（写真の右方向）に小さい流速 u の流れが認められるが、曳航速度 U と比べると $U \gg u$ であり、過渡応答の計測上問題はない。ただし、写真3.aの不連続面の下方に巻き込み渦が認められ、いくつかの問題を残しているといえる。この渦は、二枚のシャッターの出発渦であり、写真3.bではかなり大きく成長している。しかしながら、この時刻においては、模型は不連続面の後方約 40 cm の位置に達しており、模型近傍の流れに及ぼすこの出発渦の影響は小さいものと思われる。

写真4.aと写真4.bは、シャッター表面の境界層を吸収しない場合の流れ観察写真であって、それぞれ、写真3.aおよび写真3.bの時刻とほぼ対応している。後流渦が不連続面を攪乱する様が見られ

よう。また、シャッターを開放したままの状態で排水扉を開放した場合について、写真3と同一場所における流れを観察した。その結果を写真5に示す（排水して約2秒後）。不連続面は全く認められない。

3.3. 若干の補足

図1に示した曳航式水路を用いて橋梁断面模型の過渡応答を精度良く測定するには、流速を $U=15\sim 40$ cm/s に設定すれば良いことが経験的にわかっている¹⁵⁾。そこで、上記実験装置において、 $U=15\sim 40$ cm/s, $w=0.5\sim 2$ cm/s に流速を設定すると、ガスト水路で模型に与えられる有効迎角 $\alpha=w/U$ は $0.7\sim 7.6$ deg となる。この有効迎角範囲は、過渡応答の測定に要求される値、すなわち、模型が線型応答～非線型応答を示す有効迎角範囲を充分カバーする¹⁵⁾。なお、写真3. aによれば、曳航水路における流速ベクトル $\vec{u}$ には、わずかに w 成分 ($=\Delta w$) が認められる。この成分を考慮に入れると、ガスト突入の前後における有効迎角は、 $\alpha_0=\Delta w/U$ から $\alpha=(w-\Delta w)/U$ に変化する。

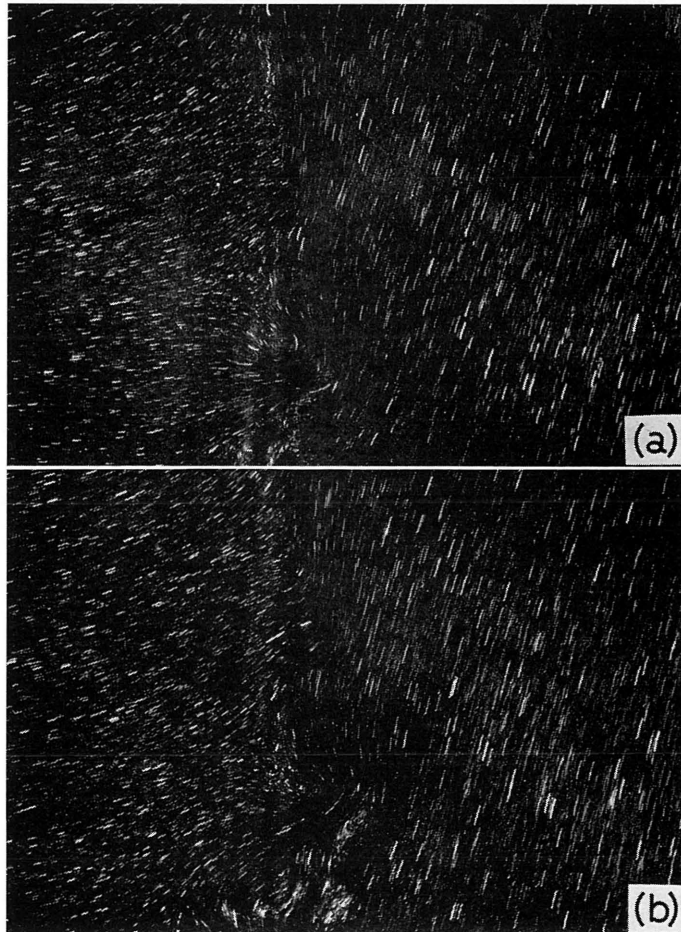


写真 3 シャッター開放後における流れ（境界層を吸収した場合）

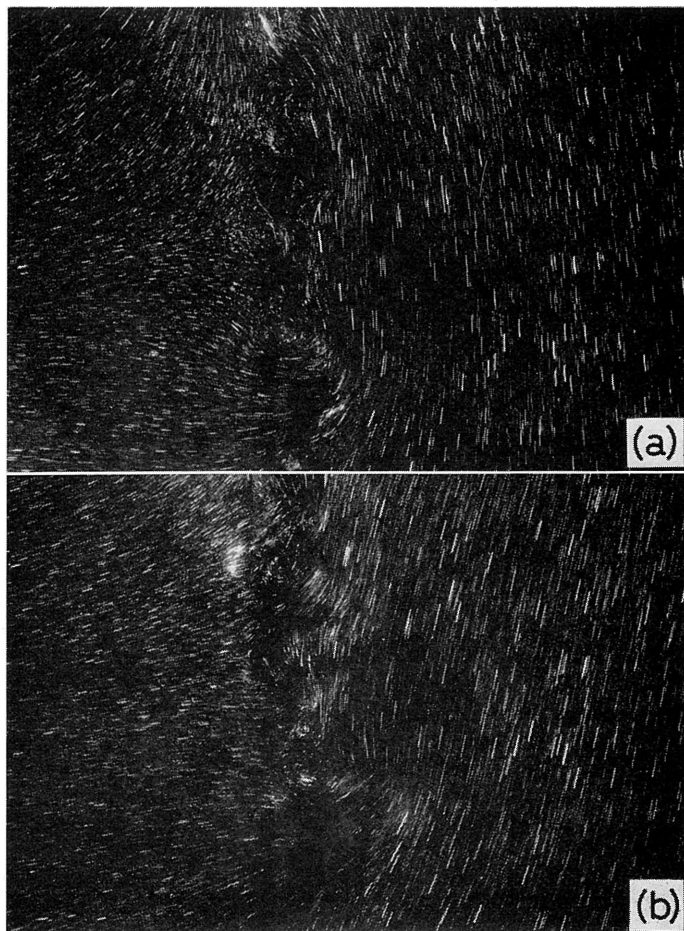


写真 4 シャッター開放後における流れ（境界層を吸収しない場合）



写真 5 シャッター開放の状態で排水した場合の流れ

4. む す び

吊橋・斜張橋断面模型について、sharp-edged gust に対する過渡揚力応答と過渡空力モーメント応答を測定する目的のため、曳航式水路の一端に、この水路と直交するガスト水路を接合した特殊水路を製作し、sharp-edged gust の発生を試みた。曳航台車に鉛直に支持された模型が、ガスト水路内のガスト流に突入する時の過渡応答を測定するわけであるが、ガストの流速が一樣で、かつ、ガストの前面がステップ状 (sharp-edged) となるように、二・三の工夫がこらされている。

流れの可視化実験と熱線流速計を用いた計測により、本装置の性能試験を行なった。その結果、ほぼ理想的な sharp-edged gust が得られることがわかった。

現在、本装置を用い、翼型断面模型と吊橋・斜張橋断面模型に対する過渡応答を測定中であり、その結果を後日報告する予定である。

謝 辞

本研究を行なうにあたり、九州大学応用力学研究所の井上進氏、九州産業大学工学部の亀井頼隆氏ならびに同学部学生の今村実夫君、木村研介君、古賀稔二君の援助を受けた。また、本研究の一部は、文部省科学研究費の援助によって行なわれた。ここに記して謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) Davenport, A. G.: The application of statistical concepts to the wind loading of structures, Proc. ICE, Vol. 19, 1961, pp. 449-472.
- 2) Davenport, A. G.: The response of slender, line-like structures to a gusty wind, Proc. ICE, Vol. 23, 1962, pp. 389-408.

- 3) Davenport, A. G. : Buffeting of a suspension bridge by storm winds, J. S. T. Div., Proc. ASCE, Vol. 88, No. ST3, 1962, pp. 233-268.
- 4) Scanlan, R. H. and Gade, R. H. : Motion of suspended bridge spans under gusty wind. J. S. T. Div., Proc. ASCE, Vol. 103, No. ST9, 1977, pp. 1867-1883.
- 5) Scanlan, R. H. : The action of flexible bridges under wind, II. buffeting theory, J. Sound and Vibration, Vol. 60, No. 2, 1978, pp. 201-211.
- 6) Holmes, J. D. : Prediction of the response of a cable stayed bridge to turbulence, Proc. 4th Int. Conf. Wind Effects on Buildings and Structures, Cambridge University Press, 1975, pp. 187-197.
- 7) Okubo, T. et al. : Field observation of aerodynamic behaviour of long-span bridges, Proc. 5th Int. Conf. Wind Engineering, Pergamon Press, 1979, pp. 825-839.
- 8) Okauchi, I. et al. : Response of the large scale bridge model to natural wind, Proc. 5th Int. Conf. Wind Engineering, 1979, pp. 841-852.
- 9) 伊藤 学他: 併用吊形式橋梁等の耐風安定性に関する研究, 東大橋梁研究室報告, BEL Report No. 74201, 1974.
- 10) Shinozuka, M. : Simulation of multivariate and multidimensional random processes, J. Acoustical Society of America, Vol. 49, No. 1, 1971, pp. 357-367.
- 11) Beliveau, J. G. et al. : Motion of suspension bridge subject to wind loads, J. S. T. Div., Proc. ASCE, Vol. 103, No. ST6, 1977, pp. 1189-1205.
- 12) 篠塚正宣他: 風の乱れによる吊橋の応答解析 (その3), 本州四国連絡橋耐風研究小委員会資料 1-5, 1975.
- 13) Konishi, I. et al. : Aerodynamic response characteristics of bridge structures, Proc. 4th Int. Conf. Wind Effects on Buildings and Structures, 1975, pp. 199-208.
- 14) 白石成人他: 構造基本断面のガストに起因する空気力に関する基礎的研究, 第六回風工学シンポジウム論文集, 1980, pp. 295-302.
- 15) 吉村 健, 中村泰治: インディシャル応答による橋梁断面のねじりフラッタの研究, 土木学会論文報告集, 第 264 号, 1977, pp. 33-40.

(昭和 56 年 10 月 30 日 受理)