

台風時構造物に加わる風圧変化について

石 崎 潑 雄

ON THE WIND PRESSURE VARIATIONS AGAINST STRUCTURES IN THE EVENT OF TYPHOONS

by Dr. Eng. Hatsu ISHIZAKI

Synopsis

Natural wind is not an uniform flow of air and the wind pressure against a structure is different partially at the same moment. The strong wind pressure distributions and variations are discussed on some records of typhoons.

1. ま え が き

構造物に加わる設計用風圧力を算定する際には、風を一様な空気の流れと仮定し、適当に設計用風速を定め、構造物の形状に応じてこの風速に基づく圧力を求めるというのが現在、通常行なわれている方法である。このような算定方法には風に関して二つの大きな問題を含んでいる。すなわち設計用風速の値をいかにするかということ、風が一様な空気の流れでない点をいかに修正するかということである。

前者は過去の強風の記録によつて統計的に調べられるべきもので、今後この値を検討することは必要であるが、一応現在、設計用に基準とすべき風速が定められている。後者は強風時における瞬間的な風圧力の分布、およびその時間的変化が究明された上で求められるものである。本文はこの後者の問題を明らかにするために、わが国を襲う代表的な強風である台風の風圧を測定し、その空間的、時間的変化について若干の考察を加えたものである。したがつて前者の問題、すなわち強風時の最大風速の絶対値についてはふれず、風圧力の相対的な変化の問題を明らかにすることを、こゝでは目的とした。またこのような変化も、ごく微細なものから、規模のきわめて大きなものまでであると考えられるが、以下にはある一つの構造物に影響を与える程度のものを対象とする。

このような立場によつて、ある一点における風速または風圧力が時間的にどのような変化をするかについては今日までに多くの観測が行なわれ、あるいはこれに附随する若干の研究がなされている。しかし風圧力の変化はきわめて不規則であるために、未だその本質は解明されていないといえると思う。これは過去の観測がたゞ一点において行なわれたものであることが一つの理由であるが、二点以上の多くの点における風速や風圧の同時観測が行なわれた例はきわめて少なく、公表せられたものでは R. H. Sherlock が行なつたもののみである。Sherlock の観測およびその結果に基づく研究は、¹⁾ われわれにとつて興味深いものであり、古くよりかゝる観測を行なわれたことは敬服に値するが、対象としているものが冬季の季節風であり、観測点間の距離がやゝ遠く、(水平方向については 60', 高さ方向については 50' 間隔)、また発表されている観測結果もあまり多くはない。まず、以下にこの問題に対するわれわれの立場を明らかにしたい。

地上附近の風が非常に乱れたものであることはよく知られた事実であり、この乱れの問題は複雑で、風のように周囲の地形その他障害物などの影響を受けやすい自然現象も少ない。このような複雑な対象を取り上げる場合には、これをできるかぎり局所的に観測する方が効果的であると考えられる。われわれの問題とする構造物にはおのづから大きさがあるから、こゝでは数メートルないし数十メートル程度の範囲における風速や風圧の変化を問題とし、あまり広範囲なものは考えない。また非常に微細な風圧変化も構造物に影響を与え

ないと思われるから取り上げない。時間的には、構造物の基本固有振動周期が多くは 0.1 秒ないし 2 秒位の範囲にあるから、この程度の時間的な変化を問題とする。後述するが、このような時間を周期とする風速変化を与える空気塊の空間的な広がりには、はゞ上記の大きさに一致するようである。今日までに行なわれた風の観測においては、1 秒以下の周期をもつ風速変動をとらえたものが少ないけれども、構造物の固有周期は 1 秒以下のものが多いから、上述のような立場にもとづく観測は重要であると考えている。

2. 観測に用いた計器

われわれが問題とするのは強風時の風圧力の変化であるから、観測においては風速ではなく、風圧を直接測定することとした。また構造物は一定の固定した面を有するから、風圧も固定した面における変化を測定した。このような観測では一定方向の風圧変化をとらえられるだけで、風速の絶対値や風向の変化を求めることができないから、風そのものの性状を究明するためには不適當であるかも知れないが、一定方向の風圧変化はほとんどそのまま構造物に加わる風圧変化と見なせるので、これを求めるには最も簡便であると考えられたからである。この意味においても本文に述べる風の観測は従来のものと異なっている。

このような目的をもつて試作したのが Fig. 1 に示す風圧計である。受圧板は直径 10 cm の金属製の円板で、その後方に非接着型電気抵抗線歪計をとりつけた。これを電磁オシログラフに接続して記録をとるようにしたもので、ガルヴァノーターは 15 cycle/sec のものを使用した。

この風圧計を風洞内で検定したところ、風圧力に対しほぼ直線的に応答することがわかった。その結果を Fig. 2 に示す。

3. 台風の観測

前記風圧計を用いて行なつた観測による記録の一部を次に示す。Fig. 3 は 1956 年 9 月 27 日 (15 号台風)、ある海峡附近において台風時の風圧を測定して得られた記録の一部である。風圧計を同地点にある燈台の手すりにとりつ

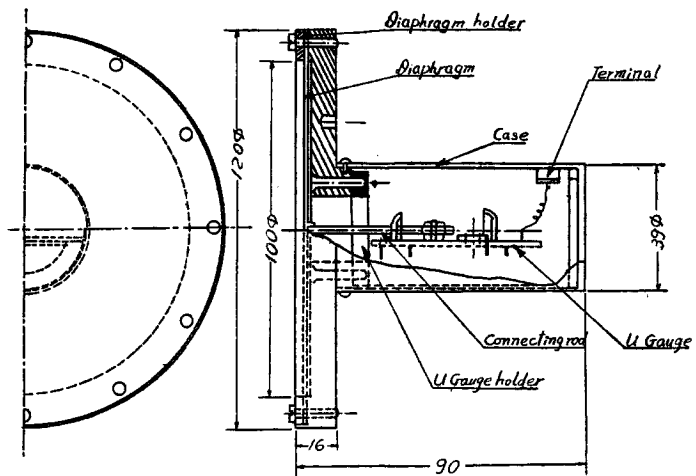


Fig. 1

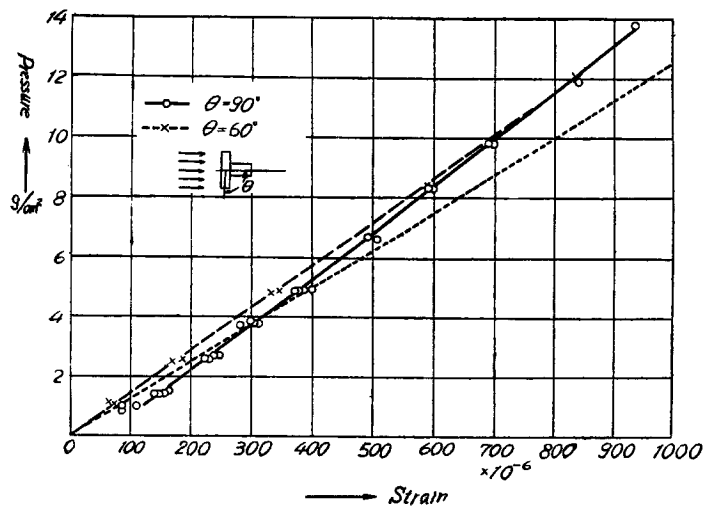


Fig. 2

け、ほぼ平均風向の圧力を測れるようにした。計器の地上からの高さは9.5 m, 7.0 m で、取付状況を **Photo. 1** に示す。写真の中央附近、手すりの右端に小さく見えるのが風圧計である。測定地点は岬の先端に近く、その両側は崖になっており、海面から地上面までの高さは約 40 m で、海面上を通ってきた風をそのまま測定したことになる。

Fig. 4 は同地点において、間隔 1.5 m, 2.5 m, 高さ 1 m の三木の杭の上にそれぞれ風圧計を据え、1956 年 9 月 10 日 (12 号台風) に得られた

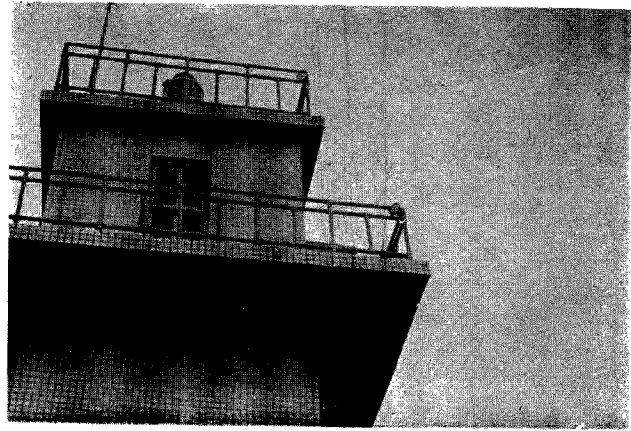


Photo. 1

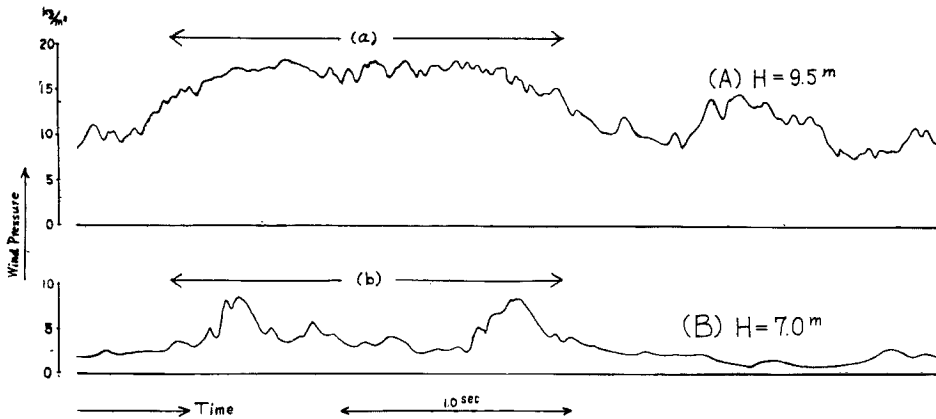


Fig. 3

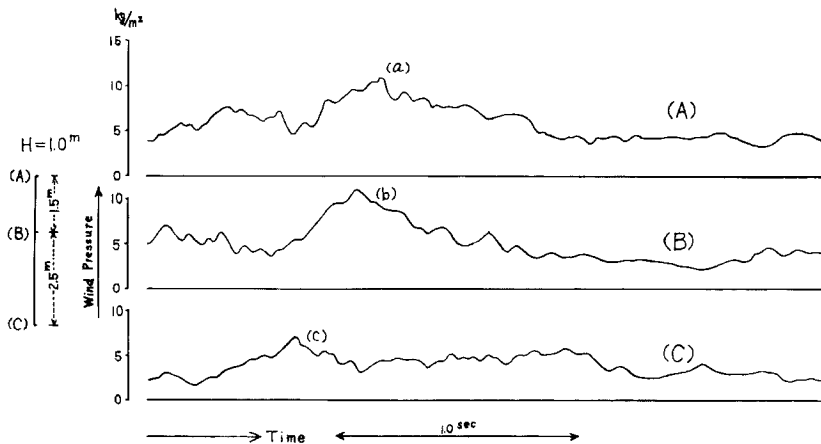


Fig. 4

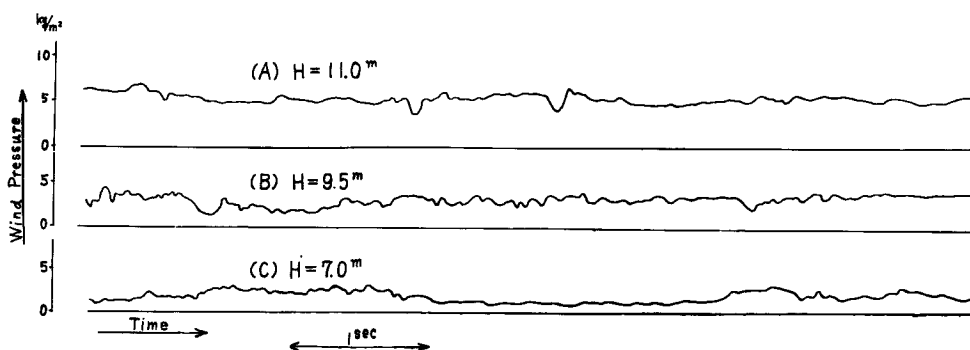


Fig. 5 — 1

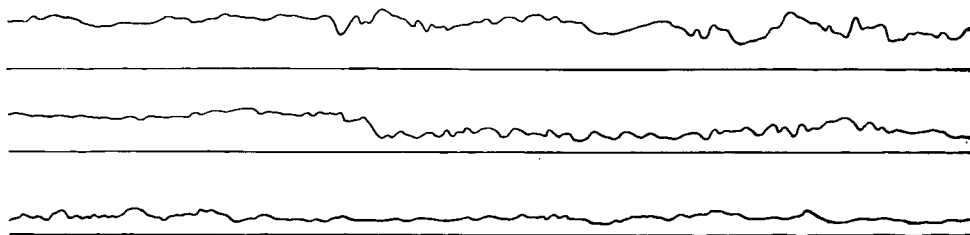


Fig. 5 — 2

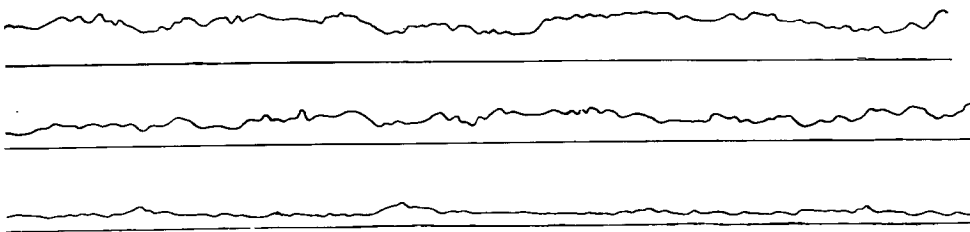


Fig. 5 — 3

記録である。Fig. 5 は1957年9月27日、同じ地点で風圧計3個を地上から11 m, 9.5 m, 7.0 m に据えて得られた記録の一部である。

これらの測定に際し、台風の中心が同地点を通らなかったため、あまり強い風は記録されていないが、これによつて強風時の風の性状の一端が知ることができた。

4. 観測結果の考察

風速あるいは風圧の時間的変化は一般にきわめて不規則で、前記の記録の一部もまたそれを示している。このような不規則な性状を有する対象を整理するのに従来多く行なわれた方法は統計的方法で、ある一定時間内の風速変化の頻度分布や、ペリオドグラムが今日までにいくつか求められている^{2),3),4)}。また風の観測が通常ロビンソン型風速計のように平均風速を測定する計器によつて行なわれているので、最大瞬間風速に対する平均風速の比、すなわち突風率を求めているものも多い^{4),5)}。しかしこれらはすべて一点における風速あるいは風圧変化に関するもので、その時間的変化のみを考察しているにすぎないから、その構造物に対する影響を知るためには不十分であつて、その距離に対する変化、すなわち空間的变化を考慮しなければなら

らない。たとえば風速変化の周期の頻度分布を求めてみると、観測計器が非常に短周期のものをとらえ得るものを使用さえすれば、周期のきわめて短いものが長いものに比べて圧倒的に多くなる。前述の風圧計による記録では0.1~0.2秒程度の周期をもつ変動がきわめて多い。といつても、このような周期の短い変動はその振幅も小さいために構造物に与える影響はきわめて小さいものとなり、おそらく特殊な場合以外には無視してもさしつかえないようなものであろう。こう考えると、たゞ単に風速変化の頻度分布だけを取り上げることは無意味に近い。各周期に対する振幅を求めると、これは若干の意味をもつてくることゝ思われるが、それにしてもこのような変動を伴う空気塊の拡がりを考えることは前述したように是非とも必要である。以下にはこのような空気塊の大きさを求めるために、これを渦と仮定した場合について考察する。また元来、われわれの用いた風圧計はそのような渦の大きさを求めるため製作したものではなく、実際に構造物に加わる最大風圧力が距離によつて、どの程度減少するかを求めるために作ったものであるから、突風率の距離による減少を考察してみることにする。

(1) 突風率の距離による減少

通常突風率と呼ばれているものは前述したように風速に関する値であるが、われわれの記録では風圧を測定したので、こゝでは便宜上、最大圧力と平均圧力との比をとり、これを仮りに突風率と呼んでおく。

さて Fig. 5 に示した記録に基づいて、高さ方向の瞬間的な圧力分布を描くと Fig. 6 のようになる。図中 (A), (B), (C) の点は Fig. 5 の (A), (B), (C) 曲線に対応するもので (D) 点の圧力はほとんど 0 に近かつたので Fig. 5 には省略しておいた。また各測定点間の圧力は不明であるが、わかりやすいように直線で結んでおいた。この図によつて圧力分布が時間的にかなり変るものであることがわかると思う。

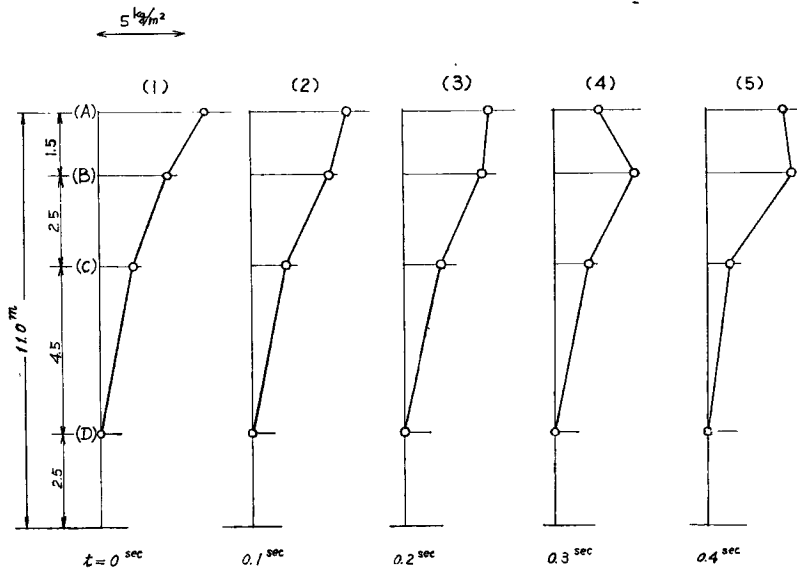


Fig. 6 Wind pressure distributions

さて Fig. 5 の曲線から 10 秒間の長さを取り、0.1 秒おきに風圧力の値を求め、まづ曲線 (A) についてこれらの値の最大値と、平均値を出して、最大値を平均値で割ると (A) 点だけに関する突風率が求まる。次に (A), (B), (C) 点における圧力の大きさを (A)-(A'), (B)-(B'), (C)-(C') で表わし (A), (B) 間の風圧は直線的に分布するものと仮定し、(A), (A'), (B'), (B) のかこむ面積の最大値を平均値で割れば (B) 点まで含めた場合の突風率となる。同様に (C) 点まで考えるときは (A), (A'), (B'), (C'), (C), (B) の点のかこむ面積の最大値と平均の比をとればよい。このようにして (D) 点までについて突風

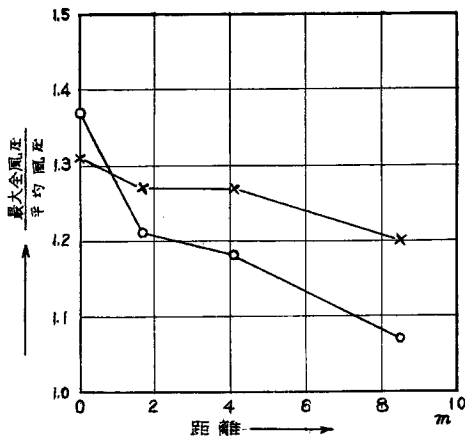


Fig. 7

数が少ないので定められない。さらに多くの資料を検討する必要がある。しかし Fig. 7 からわかるように、距離を 10 m 位とつて考えれば最大風圧力は少なくとも 10% 程度は減少させてとつてもよいのではないと思われる。

以上の考察は高さ方向の風圧分布について行なつたものであるが、高さ方向には平均風速そのものも大きく変るから、このような考察を始めるには横方向（水平方向）の風圧分布について行なう方が適当かも知れない。これについては目下、資料を整理中で、いづれ近く発表したい。

(2) 渦運動に関する考察

前記の記録に現われた風圧変化の不規則性が何に基づくものであるか、すなわち風のいかなる構造によるものであるかは、よくわかつていない。しかし一般に空気のような不規則な運動の中に渦運動が含まれているであろうことは推定されるところであり、R.H. Sherlock もこれによつて説明している¹⁾。この場合の渦 (Vortex) がまたどのようなものであるかも不明であるが、従来しばしば他の問題にも引用せられている Rankine の複合渦を以下に考えてみることにする。

たゞしこゝに Rankine 渦を引用するのは、得られた記録の一部が Rankine 渦に近いものによつて説明できる場合があることと、このような渦が存在すると仮定した場合に、構造物がいかなる影響を受けるかについて考察するのが目的であつて、風の構造を究明するためには勿論、不十分なものである。風に含まれている渦はおそらく非定常的なもので、常に成長したり衰えたり、あるいは発生したり消滅したりしていることと思われる。このようなものは簡単な構造をもつ渦だけでは説明できないのかも知れない。

(i) Rankine の複合渦にもとづく風圧変化

空中に Rankine 渦が存在すると仮定した場合に、これがある固定した面に対し、いかなる圧力変化を与えるかを求めたものが見あたらないので、はじめにこれを計算しておく。

よく知られている通り、Rankine の複合渦の半径を a とすれば、実質部分の速度の大きさ v はその内部および外部について次のようになる。

$$\begin{cases} r \leq a & v = \frac{\kappa r}{2\pi a^2} \\ r \geq a & v = \frac{\kappa}{2\pi r} \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

こゝに κ は渦動の循環である。これらの風速による風圧をわれわれは問題としているから (1) 式より動圧 p_0 を求めると、

率を求め図示したのが Fig. 7 である。図には二つの例を示しておいたが、突風率が距離の遠くなるにつれて減少することが知られる。

以上のように定義して得られた突風率が距離によつて減少していくということは、瞬間的な最大風圧力は一点にのみ加わるものであつて、ある面の拡がりを考えるときはその全面に最大圧力が同時に加わるものではないことを示す。すなわち構造物設計用の風圧力も、対象とする構造物の部分の大きさによつて減少させてよいことになる。極端な場合として距離を無限大までとれば、上述の突風率は 1 に近づくと考えられ、この場合は一定時間内の平均風圧力をとればよいことになる。

実際問題として距離に対し、突風率をどの程度減少させてとつてもよいかは、Fig. 7 の例だけでは

$$\begin{cases} r \leq a & p_0 = \frac{\rho}{2} \left(\frac{\kappa r}{2\pi a^2} \right)^2 \\ r \geq a & p_0 = \frac{\rho}{2} \left(\frac{\kappa}{2\pi r} \right)^2 \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 8 に示すように風圧計 G が一般流 V_0 に直角に据えられているとき、渦の中心 O が G に最も近い瞬間の時刻を $t=0$, $OG=r_0$ とし、渦の移動速度を V , 圧力 p_0 と風圧計 G の受圧板とのなす角を α とすれば、 G に加わる圧力 p は

$$\begin{cases} r \leq a & p = \frac{\rho}{2} \left(\frac{\kappa}{2\pi a} \right)^2 \left\{ \left(\frac{r_0}{a} \right)^2 + \left(\frac{V_0 t}{a} \right)^2 \right\} \sin \alpha \\ r \geq a & p = \frac{\rho}{2} \left(\frac{\kappa}{2\pi a} \right)^2 \left\{ \frac{1}{\left(\frac{r_0}{a} \right)^2 + \left(\frac{V_0 t}{a} \right)^2} \right\} \sin \alpha \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

一般に

$$p = p_0 \sin \alpha \dots\dots\dots (4)$$

は成立たないかも知れない。しかし、圧力変化の傾向を知る意味で、ごく近似的には(4)式によつてもさしつかえなからうと思われる。(3)式はその程度の意味をもつ式である。

一般流の方向と渦の進行方向とのなす角を θ とし、 $\theta=0^\circ, 90^\circ, 45^\circ$ の三つの場合について、(3)式から p の値の変化を計算し曲線で表わしたのが Fig. 9, 10, 11 である。Fig. 9 は $\theta=0^\circ$ 、すなわち一般流の方向と渦の進行方向とが一致した場合で、圧力 p の変化のしかたは、渦の中心が受圧面の近くを通るときと、遠くを通るときとで異なるから、 $r_0/a=1.0, 0.8, 0.6, 0.2$ の四つの場合について示しておいた。Fig. 10 は $\theta=90^\circ$ 、すなわち渦の進行方向が一般流の方向に直角な場合で $r_0/a=1.0, 0.6, 0$ の三つについて示したものである。

Fig. 11 は上記両者の中間、すなわち $\theta=45^\circ$ の場合の圧力変化を示す。

(ii) 観測記録と渦による計算値との対照

Rankine 渦による圧力変化を計算すると以上の通りであるが、もしも実際の風の圧力変化の中に Rankine 渦によるものがあれば、計算値と実測値の一致する部分があるはずである。一般に観測記録に現われた風圧変化はきわめて不規則であり、他方 Fig. 9, 10, 11 の曲線には種々の形

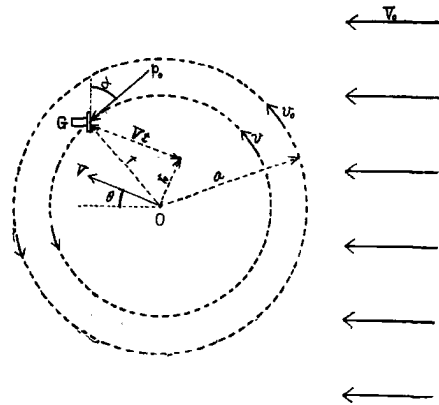


Fig. 8

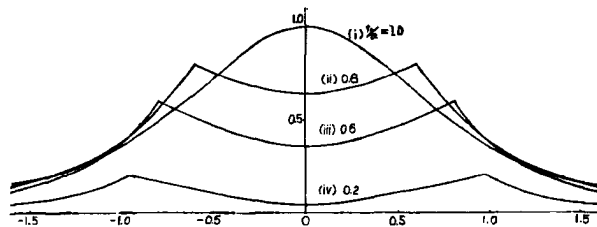


Fig. 9

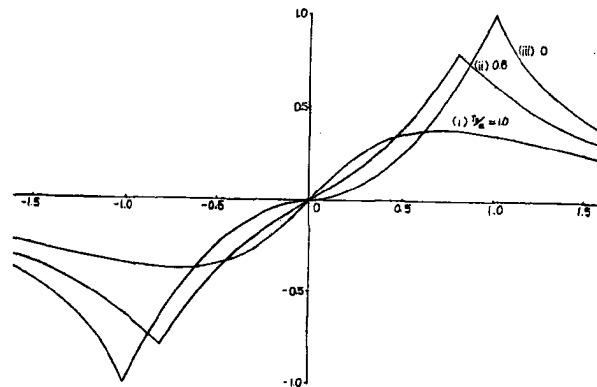


Fig. 10

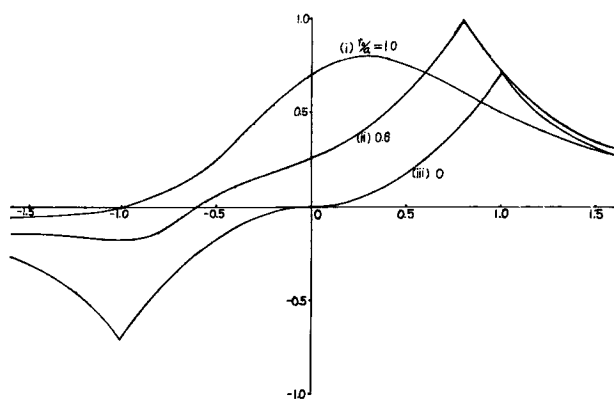


Fig. 11

Fig. 3, 曲線 (A) の (a) 部分は、細かい凹凸を無視すると、Fig. 9 (i) の曲線に近い形をしている。同様に Fig. 3 (B) 曲線の (b) 部分も、全体の曲線の傾向としては Fig. 9, (iii) あるいは (iv) の曲線に近い。このことから、(a), (b) の風圧変化は Rankine 渦とまったく同様ではないにせよ、これに近い風速分布をもつ渦にもとづくものであると推定されよう。さて、(a) 部分が Fig. 9 の曲線 $r_0/a=1.0$ に対応し、(b) 部分が $r_0/a=0.5$ 程度に対応するものとすれば、(a), (b) の測定位置間の距離は 2.5 m であるから、渦の半径 a は

$$a = \frac{2.5}{0.5} = 5.0 \text{ m}$$

となる。またこの渦による風圧変化の最大値は Fig. 3, (A) 曲線から $p=12 \text{ kg/m}^2$ 程度であるから、渦の外周速度 v_0 は

$$v_0 = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \times 12}{1/8}} \doteq 14 \text{ m/sec},$$

渦の通過時間 T は約 1.6 sec であるから、渦の移動速度 V は

$$V = \frac{a}{T/2} = \frac{5.0}{1.6/2} \doteq 6 \text{ m/sec}$$

となる。

上に対照させた記録を得たときの、平均風速は正確に求められていないが、(A) の測定点よりさらに 2 m 高い位置に取りつけたロビンソン型風速計による 5 分間平均風速は 20 m/sec であった。一般に本観測に用いた風圧計による記録から求めた平均風速は、ロビンソン型風速計により求めた平均風速より小さいが、それにしても、この場合の平均風速は 10 m/sec を超えているものと思われ渦の移動速度 6 m/sec よりは大い。

こゝには渦にもとづく風圧変化と思われるものの中、最も著しいものを取り上げて、その大きさその他を推算してみたわけであるが、前述した通り、このような渦は定常的なものではなく、おそらく時々刻々にその形状を変化させているものと思われる。したがって上に求めた諸数値は、ある瞬間における値に過ぎないが、この程度の大きさの渦が強風中に存在することがあり、これが一般流とは別な影響を構造物に与えると考えられる。またこの例の場合にはちょうど渦の軸が水平になつて一般流の方向に測定点を通過したことになるが、このようなことも少ないかも知れない。次に示すのは、渦の進行方向が一般流の方向に対し斜になつていると思われる例である。

Fig. 4, (B) 曲線 (b) の部分は Fig. 11 (ii) の曲線の形に近く、Fig. 4 (A) 曲線 (a) の部分も、

のものがあるから、記録の風圧変化の大部分は計算による曲線のいずれかで説明できる。したがって観測値と計算値の曲線が一致したからといって、実際の風圧変化が Rankine 渦にもとづくかと断定はできないかも知れない。しかしながら、Sherlock 等の研究によつても渦の存在が認められていることと、2 点以上の点における圧力変化が渦によつて矛盾なく説明できることを考えるならば、こゝに渦の存在を仮定し、その性状について考察することも無駄であるまいと思う。

これと似たような傾向を示している。**Fig. 11** は渦の進行方向が一般流の方向に 45° の角をなす場合であるから、もしも **Fig. 4** の風圧変化が渦にもとづくものであれば、渦の進行方向が平均風向と一致しないことを示すものと思われる。この記録のみから渦の大きさを求めることは難かしいが、渦の半径はせいぜい数メートルのものであり、風圧最大になる点の移動速度 V は、(A), (B), (C) 間の距離がそれぞれ 1.5 m, 2.5 m で、それらの点において圧力最大になる時間間隔は 0.14 sec, 0.26 sec であるから、およそ $V \approx 10$ m/sec となる。

5. 渦による風圧変化の構造物に対する影響

前節においては半径数メートルの渦をとり上げて問題としたが、観測記録にはきわめて小さい渦によると思われる風圧変動も現われているし、またおそらく直径がこれよりはるかに大きい渦も存在するであろう。しかし今日までに得られた記録を検討すると、小さな渦の場合には風圧の変化量も小さく、構造物に加える影響も小さいようである。このことについては Heywood, Deacon も同様の意見を述べている^{(6),(7)}。他方、直径の非常に大きい渦による空気の流れは、構造物にとって一様な流れに近いものとなるであろう。自然風中の渦は Rankine 型のような単純なものばかりでなく、種々に複合したものが存在したり、また単純な渦としてもその風速分布は典型的なものとは異なるようであるが、はじめにも述べた通り、構造物にとってその問題となるべき大きさは存在すると思われる。この渦の大きさと強さとの間にも、なんらかの関係が見出されるべきであり、これが明らかにならなければ、構造物に対する影響も判明しないが、この結論を求めるには未だ資料が不十分である。以下には、前節に述べた事柄にもとづいて若干の考察を加えることにする。

自然風中の圧力変化に渦によるものがあるとすれば、構造物の前面に加わる圧力分布は **Fig. 10** 中の曲線で示す圧力と一般流の圧力を加えたものとなる。特に渦の中心が構造物の前面に近づいたとき、渦は元の形状を保つか否かは疑問であるが、構造物に著しい振り作用、または曲げ作用を加えることになる。たゞし渦の中心が構造物の中央に近いときは、渦による風速はその両側で向きが異なるから、全圧力はむしろ減少することになる。またこのように構造物の大きさを渦の直径程度に比べて考えなくても、ある大きさをもつ面に加わる全圧力は一般に最大風圧に面積を乗じたものより小さいことは明らかである。例えば、渦の半径を 5 m とした場合に、**Fig. 10** (iii) の曲線の最大値附近を考えれば、長さ 1 m の拡がりをとつたとき渦による最大圧力の約10%、長さ 3 m をとつたとき20%以上を減少させてこれに受圧面積を乗じたものが、この間に加わる全風圧力に等しくなる。実際には **Fig. 10** (iii) の曲線に示すような著しい圧力の頂点が現われないかも知れないから、上述の値の通りに最大風圧を減少させて、構造物設計用風圧力とするわけにはいかないかと思う。しかし 4. (1) において考察した突風率の距離による減少に関して得られた結論と、数量的には異なるとはいえ、同様な結果がこの点からも求められることを示したわけである。

Fig. 9 (ii), (iii), (iv) の曲線には圧力の極大値が二つ表わされている。これは当然のことではあるが、風圧力の構造物に対する動的効果を考える上において重要であると思う。すなわち、ある点を渦の外側が通るときにはその点に加わる圧力変動は1回だけであるが、渦の中心に近い部分が通るときには、ほぼ周期の等しい圧力変動が2個連続して加わることになる。構造物上のある点に加わる風圧変動の性状は、その点が渦の中心に近いか、遠いかによつて、またその進行方向によつて、まったく異なるわけである。

6. む す び

台風時の風圧力の観測記録によつて、その瞬間的な風圧分布の構造物に対する影響を二三考察した。記録の中に渦によると思われる著しい風圧変化を見出したので、その大きさも推定してみたが、この問題に関しては未だ不明の点も多いから、さらに今後も観測を続け、これらの点を明らかにしたい。

参 考 文 献

- 1) R.H. Sherlock, M.B. Stout, J.S. Gault, W.G. Dow & R.S. Swinton : Storm Loading and Strength of Wood Pole Lines and a Study of Wind Gusts, Edison Electric Institute, 1936.
- 2) 球型風速計による昭和30年台風22号測定記録, 鉄塔, 第3号, 38頁, 昭和32年1月.
- 3) 久田俊彦 : 建築と風災, 26頁, 昭和23年6月.
- 4) 亀井勇 : 構造物の風圧力に関する研究 (1), 建築研究報告, 16号, 16頁, 昭和30年3月.
- 5) R.H. Sherlock : Variation of Wind Velocity and Gusts with Height, Proceedings of A.S.C.E., Vol. 78, No. 126, Apr. 1952.
- 6) G.S.P. Heywood : The Pressure of Typhoon Winds on Structures, Proceedings of the Unesco Symposium on Typhoons, pp. 11~15, Nov. 1954.
- 7) E.L. Deacon : Gust Variation with Height up to 150 m, Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 8, pp. 562~573, Oct. 1955.