

衝撃波圧とその測定について

谷本勝利*・高橋重雄**・吉本靖俊***

1. ま え が き

港湾構造物や、海洋構造物に作用する波力を模型実験や現地実験で測定することがある。こうした構造物全体やその部材に作用する波圧を測定するには、波圧計によって局所的な波圧を測定する方法、歪ゲージによって部材に生じる歪を測定する方法、ロードセル等で全体の波力を測定する方法等がある。いずれの場合も波圧が比較的静的なものであれば問題は少ない。しかしながら、直立壁に巻波状の砕波が作用した時や、海面上の部材を波がたたくとき等には衝撃的な波圧が作用する。このような衝撃的な波圧を測定する際には、測定系の動的応答効果が問題となる¹⁾。本研究では、衝撃的な波圧の成因と特性を考察し、動的応答効果を考慮した衝撃波圧の測定法について検討を行った。

2. 衝撃波圧の特性

急勾配斜面上の直立壁や高マウンドの混成防波堤、あるいは栈橋の上部工等に衝撃波圧が作用することはよく知られている。衝撃波圧は波面と構造物の衝突によって生じており、そのことは構造物が異なっても変わらない。構造物と波面の衝突には2種類あり、衝撃波圧も2種類に分けられる。すなわち、一つは波面と壁面とのなす角度がやや大きいときに生じ、局所的に高い波圧が波面の進行とともに移動するもので、時間的には立ち上がりの鋭い三角型の波形である(Wagner型²⁾)。もう一つは波面が空気を閉じ込めて圧縮する場合に生じるものであり、空気圧縮による比較的なめらかな減衰振動波形である(Bagnold型)。この波圧は水中音速で伝播し、圧縮された空気に直接接しない部分にも生じる。たとえば、ケーソンの底面や、この構造物の前方に波圧計を置いても、大きさは異なるけれども、ほぼ同時にこの波圧が記録される。

空気を閉じ込めるように壁面に衝突する場合には、必ず波面が壁面に直接当たる位置があり、そこでは、ま

ず立ち上がりの非常に急なWagner型の波圧が現われ、続いてBagnold型の波圧が発生する。波面と壁面の衝突が衝撃的であればあるほど、二つの波圧の間隔は短くなり両者を区別することができなくなる。図-1はこれらの波圧波形の例を示したものである。

図-2は横軸に衝撃波圧の作用時間 τ をとり波圧の大きさ p_{max} をプロットしたものである。これは1/10勾配の斜面に続く水平床におかれた直立壁に作用する衝撃波圧の測定結果である。ただし、水平床前端から直立壁までの距離 B_1 は25, 50, 75 cmの3種類であり、水深 h が30 cm, 周期 T が3 s, 波高 H が35.1 cmである。この図より単位面積当り衝撃波圧の力積に相当する $1/2 p_{max} \tau$ はBagnold型でもWagner型でも変わりなく、 $1.0 (9.8 \times 10^3) \sim 3.0 (29.4 \times 10^3) \text{ gfs/cm}^2 (\text{gcm/s/cm}^2)$ の間であり、幅があるが一定値となる傾向にあるこ

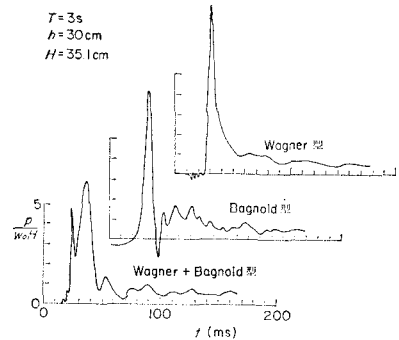


図-1 衝撃波圧波形

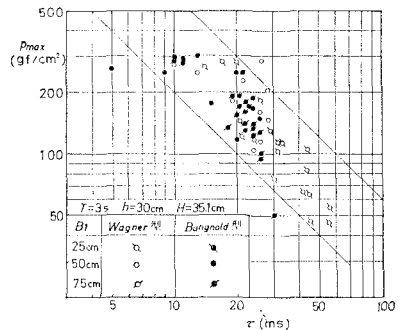


図-2 最大波圧とその作用時間

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部防波堤研究室長
 ** M.S 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官
 *** 工修 運輸省港湾技術研究所水工部防波堤研究室

とがわかる。ただし、この力積は、たとえば波高が異なれば違う値を取り、衝突速度や衝突する水塊の量がわかればある程度推定可能である。

しかし、力積がある一定値となるとしても τ の値は広い範囲の値を取りうる。ただし、実際には水の弾性圧縮性や閉じ込めた空気の影響によりその値に下限値がある。この下限値がどの程度の値になるかについては明白ではないけれども、その値が力積の大きさによって変っており、力積が大きいくほど τ の値が大きいくである。今回の実験では $1/2 p_{\max} \tau$ の平均値は 2.0 gfs/cm^2 ($19.6 \times 10^5 \text{ gcm/s/cm}^2$)であり、 τ の下限値が5ms程度であった。合田³⁾の行なった実験では $1/2 p_{\max} \tau$ の平均値が 0.9 gfs/cm^2 ($8.82 \times 10^5 \text{ gcm/s/cm}^2$)であり、 τ の下限値は1ms程度となっている。通常の模型実験では衝撃波圧の作用時間は数ms～数十msの間と思われる。

今回の測定では、固有振動周期 T_N が1.25ms、減衰率 β が0.008、受圧面の内径が2.45cmの波圧計を使用している。固有振動周期に比して作用時間が長い場合、応答を考慮する必要がある。後掲の図13の例のように若干固有振動が残る例が見られた。作用波高が小さいときなど、実験条件や対象構造物などによっては作用時間がこれより短いことも十分考えられ、また測定系の固有振動数が低いことも多い。衝撃波圧の測定においては、衝撃波圧の特性を十分理解し、かつ測定系の動的効果を考慮して行うことが重要である。

なお、Wagner型の波圧が作用する場合、局所的に高い波圧が波面とともに移動するため、波圧計の受圧面の大きさによって測定値が変わる可能性があることに留意する必要がある。Wagner型の波圧の方が立ち上がり急であるため、Bagnold型と同じ作用時間 τ でも応答が問題となりやすい。

3. 測定応答波形から作用波圧波形を推定する方法

波圧計等は固有角振動数 ω_N 、減衰定数 β の1自由度振動系と考えられ、外力を $\xi(t)$ 、応答を $x(t)$ とすると次式で表わされる。

$$\ddot{x}(t) + 2\beta\omega_N \dot{x}(t) + \omega_N^2 x(t) = \omega_N^2 \xi(t) \quad (1)$$

実際に測定されるのは応答波形 $x(t)$ であり、作用波圧波形(入力波形) $\xi(t)$ は $x(t)$ より推定しなければならない。本章ではこの $\xi(t)$ の推定法を検討する。

$x(t)$ が次のようにフーリエ級数で表わされるとする。

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} x_n(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \sin(\sigma_n t + \varepsilon_{0n}) \quad (2)$$

ここに、 a_n 、 σ_n 、 ε_{0n} はそれぞれ成分波の振幅、角振動数、位相である。

したがって、式(1)より $\xi(t)$ は $x(t)$ のフーリエ成分 $x_n(t)$ によって次のように表わされる。

$$\xi(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n D_n \sin(\sigma_n t + \varepsilon_{0n} + \varepsilon_{1n}) \quad (3)$$

$$\text{ここに、} \quad \alpha_n = \sigma_n / \omega_N \quad (4)$$

$$D_n = \sqrt{(1 - \alpha_n^2)^2 + (2\alpha_n \beta)^2} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{1n} = \tan^{-1} \{2\alpha_n \beta / (1 - \alpha_n^2)\} \quad (6)$$

今、 $\xi(t)$ もフーリエ成分 $\xi_n(t)$ で表わし、式(3)において、各成分波ごとに等しいとすれば

$$\begin{aligned} \xi_n(t) &= a_n D_n \sin(\sigma_n t + \varepsilon_{0n} + \varepsilon_{1n}) \\ &= D_n x_n(t + \varepsilon_{1n} / \sigma_n) \end{aligned} \quad (7)$$

となる。したがって、測定応答波形をフーリエ分解し、各成分波に D_n を乗じ、位相差 ε_{1n} を考慮して再び合成すれば、作用波圧波形が求まることになる。なお、 D_n は通常の正弦外力による応答波形増幅率の逆数である。

図3に横軸に α_n をとり D_n と ε_{1n} を示した。

図4は、 $\tau/T_N = 0.625, 1.250, \text{および} 2.500$ である対称三角形型の入力波形の振幅スペクトル(○印で示す)と、これに対する応答波形の振幅スペクトルを種々の β について示したものである。この図からわかるように、応答振幅スペクトルには、種々の周波数成分が含まれており、 τ/T_N や β によって卓越する周波数成分が異なり、入力振幅スペクトルとの一致度も異なっている。たとえば、 τ/T_N が大きく β も大きい場合には、応答振幅スペクトルは $\alpha_n = 0$ 付近で大きく、 $\alpha_n = 1.0$ ではほとんど0となり、入力振幅スペクトルとほぼ一致しているが、 τ/T_N が小さく β も小さい場合には、応答振幅スペクトルは $\alpha_n = 1.0$ 付近で卓越し、入力振幅スペクトルと大きく異なっている。ただし、数値計算では若干の計算誤差はあ

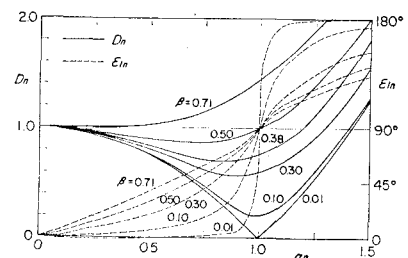


図3 D_n および ε_{1n} の値

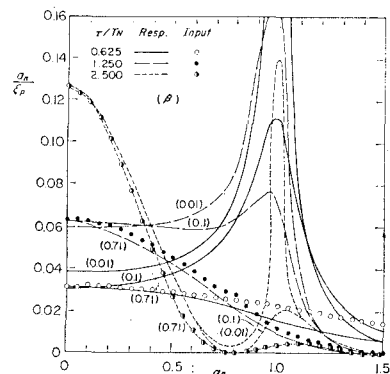


図4 応答波形および入力波形の振幅スペクトル

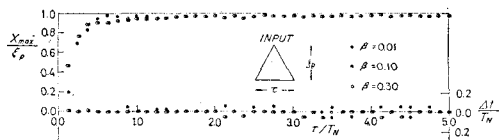


図-5 数値計算による入力波形の推定結果 ($x_{\max}$, Δt)

ものの、式 (7) で示されるように応答振幅スペクトルに D_n を乗ずれば入力振幅スペクトルとなっている。

図-5 は、数値シミュレーションで応答波形から入力波形を推定した結果を示したものであり、横軸に τ/T_N を取り、推定入力波形のピーク値と実際に入力波形のピーク値の比 $x_{\max}/\varepsilon_p$ および二つのピーク値の位相差 $\Delta t/T_N$ を示している。ここに、数値シミュレーションは、1) 対称三角形型の入力波形に対して応答波形を Duhamel 積分の数値計算で求め、2) これをフーリエ級数に展開し 3) 各成分波の振幅に D_n を乗じ、位相差 ε_{1n} を考慮して波形を再合成した。その際、 $\tau/T_N \leq 0.5$ では $\tau/40$ 、 $0.5 < \tau/T_N \leq 1.0$ では $\tau/20$ 、 $\tau/T_N > 1.0$ では $T_N/10$ の時間間隔で計算を行っている。

$x_{\max}/\varepsilon_p$ は τ/T_N が小さいところを除きほぼ 1.0 であり、位相差もほとんど 0 である。 τ/T_N が小さいところで $x_{\max}/\varepsilon_p$ の値がやや小さいのは、主にこの領域で応答波形を計算する数値積分の誤差が大きくなっているためと思われる。全般的にはこの推定法が正しいことを証明しており、測定波形を AD 変換器によってデジタル量に変換して同様な計算を行えば、原理的に作用波圧波形を推定可能である。ただし、このためには固有振動周期の 1/10 以上の細かいサンプリングが必要となり、データ数が大量のものとなる。以下、アナログ量のままこうした方法を適用することについて検討する。

4. アナログ処理による入力波形の推定

4.1 ローパスフィルター

一般にローパスフィルターは、測定系のノイズや固有振動を消去するために用いられている。ここではより積極的にローパスフィルターを通すことによって、作用波圧波形を推定することについて考える。 β が小さければ $\alpha_n < 1$ の範囲で α_n が大きいほど D_n は小さくなっており、もし前掲の図-3 に示されるような D_n , ε_{1n} と同じ減衰率 γ , 位相特性 ϕ を持つローパスフィルターがあれば、応答波形をこのローパスフィルターに通すことにより作用波圧波形が求まる。このようなローパスフィルターの設計は不可能ではないかもしれないが、現在では入手不能である。ただし、通常のローパスフィルターでも比較的似た特性を持つものもある。図-6 にはローパスフィルター FV-624 (NF 回路設計ブロック社製) の減衰位相特性を示している。同図には、 $D_n=0.7$ のときの α_n を

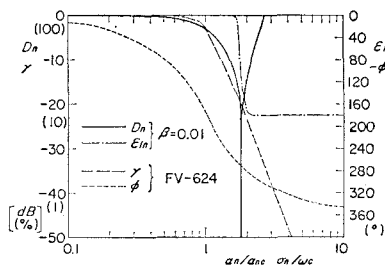


図-6 ローパスフィルターの特性と D_n , ε_{1n} の比較

α_{nc} (最適カットオフ周波数と固有振動数の比) として、 α_n/α_{nc} を横軸にとって $\beta=0.01$ の場合の $-20 \log_{10} D_n$ および ε_{1n} もあわせて示してある。この $\beta=0.01$ のとき α_{nc} は 0.55 となり、例えば固有振動数が 500 Hz であればカットオフ周波数は 275 Hz となる。

なお、最適カットオフ周波数 (すなわち α_{nc} の値) は原則としてフィルターを通した波形が最も入力波形に近くなるものを選ぶ必要がある。一方、ローパスフィルターの特性は器種によって異なり、かつ応答波形のスペクトルは入力波形によって異なるため、 α_{nc} の値を一義的に決めることはできない。しかしながら、多少の誤差を無視しても α_{nc} の値を一義的に決めておいた方が利用上好都合なことが多い。一般にローパスフィルターでは $D_n=0.7$ に相当する 3 dB の減衰を受ける周波数をカットオフ周波数としており、またこの場合 β が小さいときには β の違いにかかわらず D_n がどのローパスフィルターの減衰特性とも比較的よく一致する。したがって、ここでは $D_n=0.7$ のときの α_n を α_{nc} とした。 α_{nc} の値は β の関数として次式で求められる。

$$\alpha_{nc} = \{1 - 2\beta^2 - \sqrt{(1 - 2\beta^2)^2 - 0.501}\}^{1/2} \dots (8)$$

β が 0 に近いときには、 α_{nc} の値は 0.55 程度である。ただし、前掲の図-3 からわかるように β が大きくなるほど D_n の最小値は大きくなり、 $\beta > 0.38$ では常に $D_n > 0.7$ となるため、ローパスフィルターの特性と大きく異なりその適用が有効でない。また、 β のこの範囲では α_{nc} の解は存在しない。

なお、 ε_{1n} と ϕ は違いが大きく、例えば $\beta=0.01$ のときのカットオフ周波数では $\varepsilon_{1n}=0^\circ$ であるが、 ϕ は -180° である。これはローパスフィルターを通すとカットオフ周波数付近の位相が大きく違ってしまふことを意味し、ローパスフィルターによる作用波形推定上の問題点である。

ローパスフィルターが衝撃波圧の測定波形から作用波形の推定においてどの範囲まで適用可能であるか、対称三角形型 (ピーク値 ε_p , 作用時間 τ) の作用波形を用い FV-624 を例に検討してみた。なお、このフィルター処理は数値計算にて行ったものである。

図-7 は、 $\tau/T_N=1.25, 2.50$ での波形を比較したもの

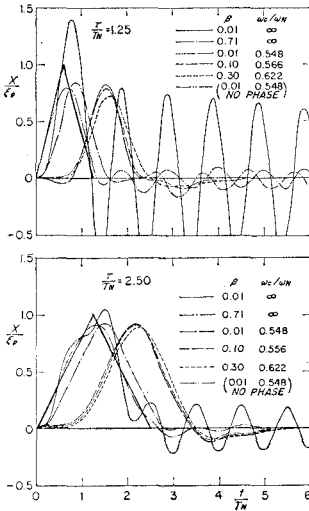


図-7 波形の比較 (ローパスフィルター)

である。 $\tau/T_N=1.25$ の場合には $\beta=0.71$ のとき応答波形そのものが若干の位相遅れ、ピーク値の減少があるものの比較的よく作用波形に一致しているのに対し、 $\beta=0.01$ のときにはピーク値が大きく増大し、固有振動が生じている。そこで、 $\beta=0.01$ および同図では応答波形を示していないけれども $\beta=0.1, 0.3$ のケースについて、最適カットオフ周波数のローパスフィルターを通した推定入力波形を示す。これによると、 $\beta=0.01$ のときに若干固有振動波形が残っているものの比較的よく作用波形を表現していることがわかる。ただし、約1固有周期分の位相遅れが生じる。2点鎖線で示してある波形は、ローパスフィルターの位相遅れを0として行なった数値計算結果を参考に示したものである。こうすると若干固有振動が残るけれどもピーク値の位相差は小さくなることが確認される。

一方、 $\tau/T_N=2.50$ の場合には、 $\beta=0.01$ でも固有振動波形の振幅は小さく、応答波形のピーク値も比較的よく作用波形と一致している。ローパスフィルターを通した場合は、 $\tau/T_N=1.25$ のときと同様にピーク値は約1固有周期分の位相遅れを生じる。

図-8は、 $\beta=0.01, 0.1, 0.3, 0.71$ の場合の応答波形のピーク値 $x_{\max}$ および $\beta=0.01, 0.1, 0.3$ の場合のロー

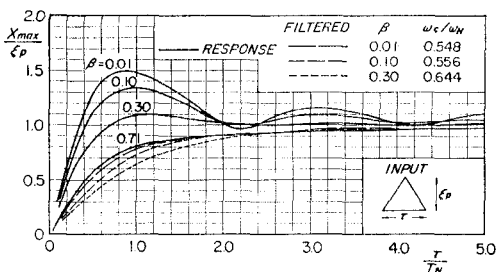


図-8 ピーク値の比較 (ローパスフィルター)

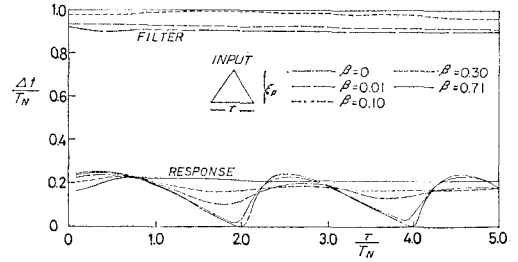


図-9 位相の比較 (ローパスフィルター)

パスフィルターを通した推定入力波形のピーク値 $x_{\max}$ を ξ_p で無次元化して示したものである。応答波形のピーク値は $\beta=0.01\sim 0.3$ において約10~50%も ξ_p より大きくなるときがある。しかし、 $\beta=0.71$ では逆に全ての τ/T_N について ξ_p より小さく、 τ/T_N が大きくなるにつれて $x_{\max}/\xi_p$ は1.0に近づく。推定入力波形は、フィルターを通さない応答波形の $\beta=0.71$ のときとほぼ同様な傾向であるが、 τ/T_N が小さい領域では β が増すにつれてより小さくなっている。

図-9はピーク値の位相差 Δt を T_N で無次元化して示したものである。図中下方は応答波形そのもののピーク値位相差であるが、 β が小さくなるにつれて $\tau/T_N=2.0, 4.0$ での位相差が小さくなっている。しかし、全体にピーク値位相差は $\Delta t/T_N \leq 0.25$ と小さい。同図上方には、フィルター処理した推定入力波形のピーク値位相差を示してあるが、これは $\Delta t/T_N=0.9\sim 1.0$ の範囲にあり、約1固有周期分の位相遅れが生じることがわかる。しかし、応答波形そのものの位相差と異なり、 β が小さくても τ/T_N によらずほぼ一定である。これは複数の波圧計を用いた測定の場合、非常に好都合な特性である。

以上のことより、 τ/T_N が2.0以上では比較的精度よく波形やピーク値を推定できると考えられる。 τ/T_N が小さいほど、特に1.0以下では精度が悪い。位相は固有振動周期分程度遅れるが、 τ/T_N の値にかかわらず一定となる利点がある。なお、比較的 β が大きく、 τ/T_N が2.0以上では応答波形そのものを、ほぼ作用波形とみなすことができる。

4.2 応答入力変換器

電気回路による微分器を用いて式(1)をアナログ的に直接計算するのが応答入力変換器(R-Iコンバーター)である。この変換器を実用化したものに衝撃荷重演算器(日章電機社製)があり、これを例にその適用性について、4.1と同様の検討を行った。

図-10は $\tau/T_N=1.25, 2.50$ で $\beta=0.01, 0.71$ の場合の応答波形と、これを応答入力変換器に通して得られた波形を示したものである。この推定入力波形については、 $\beta=0.1$ と 0.3 のケースも示している。 $\tau/T_N=1.25, 2.50$ の場合とも、非常によく作用波形を再現しており、

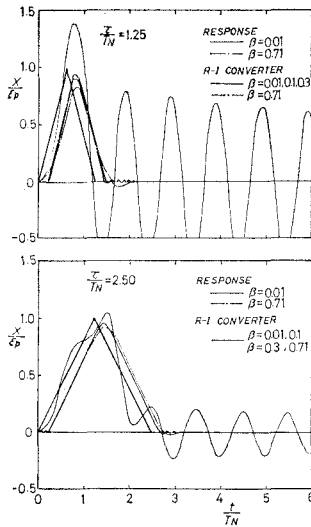


図-10 波形の比較 (応答入力変換器)

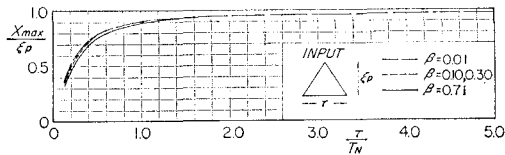


図-11 ピーク値の比較 (応答入力変換器)

β の違いによる影響はほとんどないと言って良い。ピーク値の位相差も小さいことがわかる。

図-11 は、種々の τ/T_N について応答入力変換器を通して得られる波形のピーク値 x_{max} と ϵ_p の比を示したものである。 $\tau/T_N < 1.0$ の領域では τ/T_N が小さくなるにつれて x_{max}/ϵ_p が急激に減少するけれども、ローパスフィルターを通した場合 (図-8) と比較すると、作用波形の振幅により近い値が得られる。 $\tau/T_N \geq 1.0$ の領域では $x_{max}/\epsilon_p \approx 0.9 \sim 0.97$ の範囲でピーク値を推定できる。また、 β による影響はほとんどないと言える。

図-12 はピーク値の位相差 $\Delta t/T_N$ について示したものであるが、 τ/T_N および β によらず $\Delta t/T_N = 0.15 \sim$

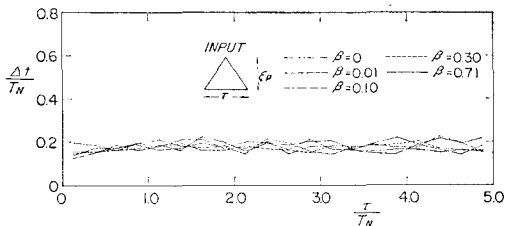


図-12 位相の比較 (応答入力変換器)

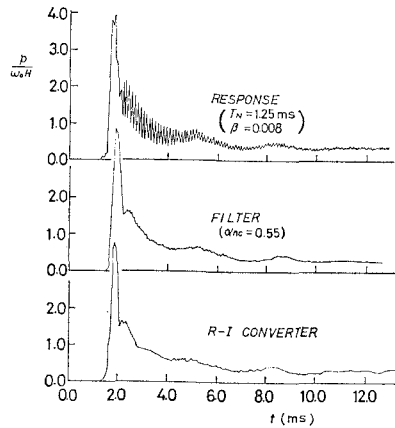


図-13 実測波形の適用例

0.20 とほぼ一定であり、ローパスフィルターの場合より小さい。

このように、応答入力変換器は β の値のいかんにかかわらず、波形、振幅、位相差においてローパスフィルターより精度よく作用波形を再現していると言える。

図-13 には、混成堤に作用する Wagner 型の衝撃波圧について、ローパスフィルターおよび応答入力変換器を通した後の波形を示したものである。用いた波圧計は 2. で述べたものであり、測定波形には固有振動がみられる。ローパスフィルターを通した波形および応答入力変換器を通した波形とも、固有振動が消え、ほぼ同じ大きさの波圧ピーク値を与えている。ピーク値の位相差については、前述した様にローパスフィルターを通した波形の方が若干遅れている。

5. ま と め

衝撃波圧を測定する場合には、その特性を理解し、測定系の動的応答効果を考慮して行なうことが必要である。測定系が 1 自由度の振動系であれば、測定応答波形をフーリエ級数に展開することにより数値的に作用波圧波形を推定できる。また、ローパスフィルターや電気回路による微分器を持つ応答入力変換器を適切に用いることによって、アナログ量のまま作用波圧波形を推定することも可能である。

参 考 文 献

- 1) 合田良実: 衝撃荷重の測定について, 港研資料 No. 33, pp. 1~41, 1967 年 11 月.
- 2) 谷本勝利・高橋重雄・和泉田芳和: 水平板に働く揚圧力に関する研究, 港研報告第 17 巻, 第 2 号, pp. 3~47, 1978 年.
- 3) 合田良実・原中祐人: 衝撃波圧に関する一実験, 港研資料 No. 32, pp. 1~18, 1967 年 6 月.