

円柱に作用する波力の現地観測

橋 本 宏*・山 口 修**

1. 緒 言

海洋構造物の部材としては円柱が多く使用されており、作用する波力は Morison の式に基づいて慣性力と抗力の和として表現される。その際には質量係数や抗力係数の適切な選定と水粒子の速度や加速度の正確な算定が前提である。しかしながら、これらの諸量は波の条件によって複雑に変化し、特に浅海域においては波の浅水変形のために現象が一層複雑になることから、係数の選定や水粒子の速度及び加速度の算定にはとまどうことが多い。本研究は、浅海域に設置された円柱状構造物に作用する波力の現地観測から得られた実測波力と、既往の理論式から算定される波の水粒子速度や加速度を用いて Morison の式から計算される計算波力とを比較検討することによって、これまで主として模型実験によって検証されてきたり波力計算式の妥当性を検討するものである。

2. 現地観測の概要

現地観測は茨城県阿字が浦海岸の土木研究所深砂観測用棧橋で実施した。この地点は太平洋に面した海域であり、荒天時になると棧橋の少し先端から碎波帯となる。したがって、得られた観測データの中には碎波帯内のものが数多く含まれている。海底勾配は棧橋から 1 km 程度沖合までの深浅測量の結果では 1/90~1/110 程度である。水深は潮位表による大洗の推算潮位と橋脚付近の局所洗屈を考慮に入れて決定した海底面から求めており、4~5.5 m 程度である。

現地観測において使用した測定装置は流速計と波高計、それに波力計である。波力計は 16 個の波圧計と波圧加算装置から構成されており、16 個の波圧計は等間隔で波圧計装着ベルトに装着して棧橋先端の橋脚に円周方向に取付けてある。波力の測定方式は、これら 16 個の波圧計からの出力を波圧加算装置によって加算し、その合力として部分波力を測定するものである。測定に使用した波圧計は直流差動トランス型の波圧計であり、定

格波圧は 2 kg/cm^2 、固有振動数は約 300 Hz、受圧面の有効径は 98 mm である。各波圧計からの出力信号は通信ケーブルによって観測室まで伝送され、波圧加算装置に入力されるが、この加算装置は各波圧計からの出力信号を、波圧計に固定した絶対座標で水平方向の X 軸と Y 軸に分解したあと、全チャンネルにわたって加算し、 ΣX , ΣY の 2 成分として波圧合力を出力させるものである。各波圧を加算する場合には約 500 Hz の応答特性をもつローパスフィルターを通して加算するため、各波圧計間の同時性については問題ないと考えられる。なお、波高計は抵抗線式波高計を、流速計は X-Y 2 成分型の電磁流速計を使用した。図-1 に各計測装置の取

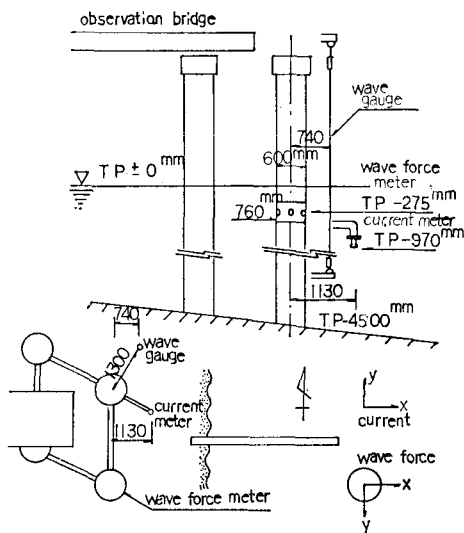


図-1 観測状況図

付状況と測定の座標系を示す。図からわかるように各測定装置は同一箇所にと取付けておらず、流速の測定位置と波力の測定位置とは約 70 cm 程度ズレている。これは測定地点が碎波帯であり、碎波による強大な波力から装置を保護するためと取付施工上の問題からである。

現地観測は 1978 年 9 月~11 月の 3 ヶ月間にわたって実施した。観測時間は毎偶数時 30 分間である。

* 正会員 建設省土木研究所海岸研究室長

** 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室

3. 観測データの整理方法

解析データを編集する際には、テープスピード 0.3 インチ/秒で記録された観測データを 15/16 インチ/秒で再生して 5 チャンネル (波高, 流速 (2 成分), 波力 (2 成分)) の準同時 A/D 変換を行ない, 解析データとした。1 観測回当りのデータ数は 2048 個, サンプルングタイムは 0.3125 秒, したがってデータ長は約 11 分である。観測データの中には碎波に近い場合のデータも含まれているため, サンプルングタイムの決定には注意を要したが, 観測データをシンクロメーターに出力させ波形をチェックした結果衝撃的な波形は生じていないことが確認されたこと, 波力のピーク値は 0.3125 秒と 0.1 秒の場合を比較してもほとんど一致したこと, などの理由により, サンプルングタイムは 0.3125 秒でも問題ないと判断した。

波力は前述のように ΣX , ΣY の 2 成分で出力されているため, 各々の出力値をベクトル合成して, 波の一波一波に対応した $\pm$ のピーク値をとり, 波力として定義した。水粒子の速度も同様に水平 2 成分で出力されるため, 波力と同様な方法で処理を行なった。波向は波力と流速の $X-Y$ 出力値からそれぞれの作用方向を求め波向を算定した。

4. 観測データの解析方法

観測データの解析は, 1) 波と波の水粒子速度との関係, 2) 波と波力の一波一波の関係, 3) 波と波力の特性量の関係, 4) 波力スペクトルの特性, の 4 点について主に検討した。

ここで水粒子速度や加速度の算定式としては微小振幅波理論と有限振幅波理論によるものを用いた。有限振幅波理論としては現地の波の状況を比較的確に表現しうると考えられる Laitone による第二次近似解のクノイド波理論²⁾を使用した。

但し, 以上の計算にあたっては, 質量係数 (C_M) と抗力係数 (C_D) は通常の設計に用いられる $C_M=2$, $C_D=1$ を使用し, Morison の式によって波力を計算した。またクノイド波による水粒子の加速度の算定にあたっては, 慣性項を無視している。なお波力スペクトルの計算には FFT 法を使用した。

5. 観測データの整理結果

5.1 波と波の水粒子速度の関係

波の水粒子速度を測定した目的は波力計算式に用いる水粒子速度をチェックするためであるが, 前述の理由により波力計より約 70 cm 低い位置で測定した。したがって, 波の水粒子速度の鉛直分布特性から, 波力計設置付近における速度より大分小さいものを観測したことに

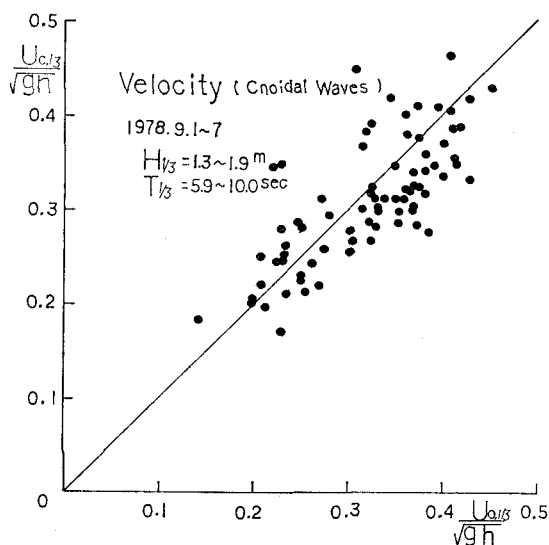


図-2 実測値と計算値の比較 (水粒子速度)

なる。図-2 はクノイド波による水粒子速度の計算値と実測値の比較である。ここで示した値は水粒子速度 (U) を $\sqrt{gh}$ (g : 重力の加速度, h : 水深) で無次元化した値 $U/\sqrt{gh}$ で示している。横軸は実測値, 縦軸は計算値である。図-2 において波力の計算に用いた波は有義波であるが, 波形と波の水粒子速度との関係は線形であるため, それぞれの特性量をそのまま比較しても問題はない。計算に用いた資料は約 1 週間の間に得られた約 82 観測回のものであり, 有義波高は 1.3~1.9 m, 有義波周期は 5.9~10.0 秒である。解析結果によれば水粒子速度を測定した水深では微小振幅波による計算値とクノイド波による計算値とは大差なく, しかも実測値とほぼ一致しているが, 傾向としては幾分クノイド波によるものがよいようである。これは一波一波の関係においても同様であり, 平均波, 1/10 最大波でも同様である。波力計設置位置での水粒子の速度は微小振幅波よりもクノイド波の方が一般に大きく, したがって, 当然ながら波力の計算値はクノイド波の方が大きくなる。

5.2 波と波力の一波一波の関係

波による波力には波の水粒子速度と同様, 鉛直分布があり, 通常静水面付近が最も大きくなる。波力計は TP-27 cm であり, 潮位は TP-50~50 cm 程度で変化するため, 波力計は潮位によっては海面上に出る場合もある。したがって, 同程度の波浪条件でも潮位によって波力は大きく異なることになる。ここでは不規則素波を一波一波の単一波とみなして, 個々の波による波力を計算した結果と実測値を比較してみる。なお, 以下の計算に使用した波の特性は図-3 に示すとおりであり, 完全碎波に近い波は数少ないものと考えられる。また, ここでは部分波力 (F) を $\rho g D^2$ (ρ : 海水の密度, g : 重力の加

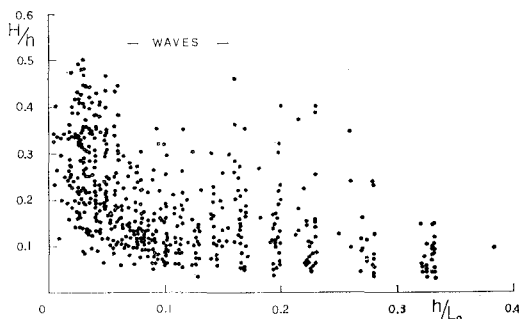


図-3 来襲波の特性

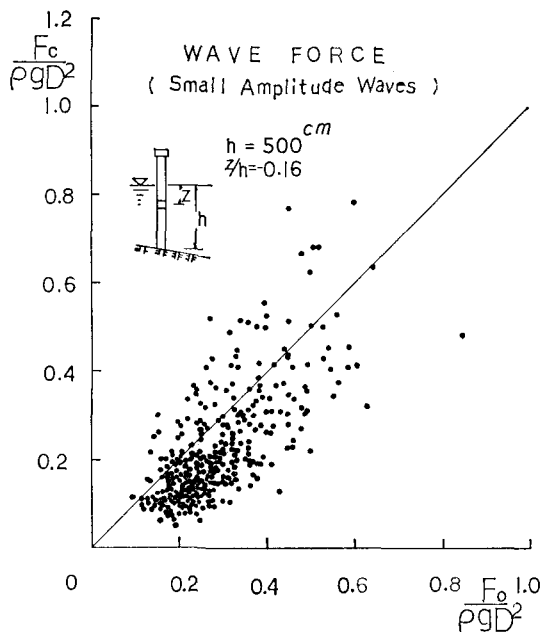


図-4 実測値と計算値の比較(一波一波)

速度, D : 円柱の直径) で無次元化した形 $F/\rho g D^2$ で両者を比較している。以下の図においては横軸が実測値, 縦軸が計算値である。

図-4, 5 は $z/h = -0.16$ (z : 静水面から波力計設置位置までの距離, h : 水深) のところに波力計が位置していた場合の実測値と計算値の比較である。図-4 は微小振幅波による場合であり, 計算値と実測値は比較的一致しているが, 計算値の方が少し小さい。図-5 はクノイド波による計算値であるが, $F/\rho g D^2$ の値が 0.4 程度から実測値より計算値の方が大きめである。一般にクノイド波を用いて波力を計算すれば, 波高が大きく周期が短い場合には微小振幅波によるものよりもかなり大きくなる。

図-6, 7 は波力計が静水面付近もしくはそれ以上に位置していた場合の解析結果である。図-6 からわかるように微小振幅波による計算値は静水面付近では実測値

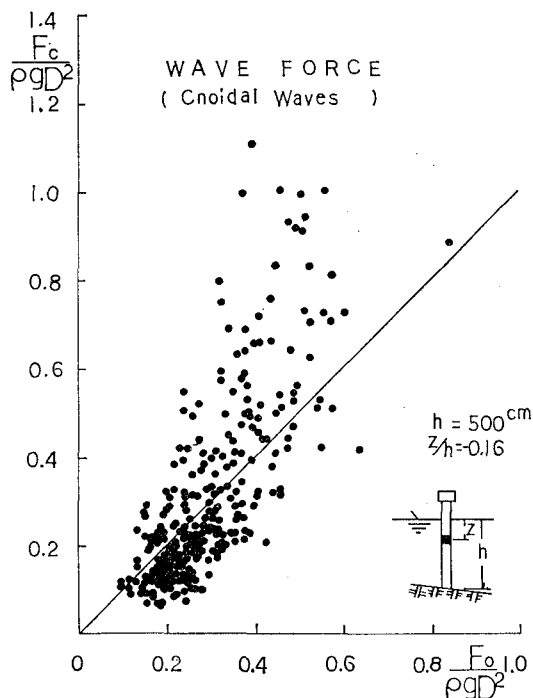


図-5 実測値と計算値の比較(一波一波)

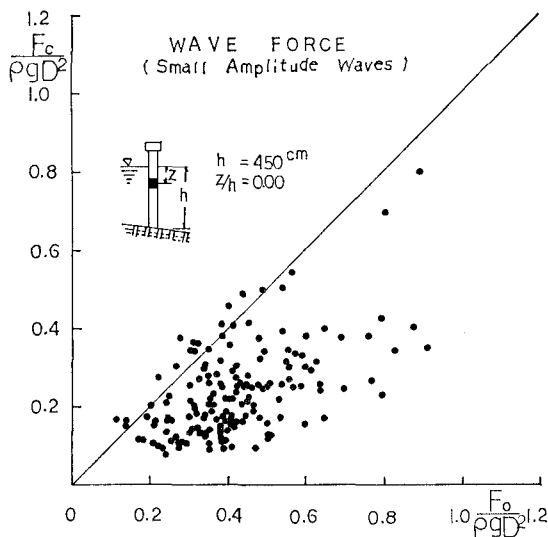


図-6 実測値と計算値の比較(一波一波)

よりかなり小さい。これに対して, クノイド波によるものは, パラッキは大きいと全体的にみれば実測値とかなり一致している。したがって, 円柱に作用する全波力を求める場合には, 静水面付近に最も大きい波力があらわれることを考えれば, クノイド波による波力の計算値でかなりの程度一致するものと考えられるが, 微小振幅波では実際より大分小さめの値になるものと推定される。これは, 観測を実施した場所が水深も浅く, 波の有限振幅性を考慮しなければならない状況であることを考えれ

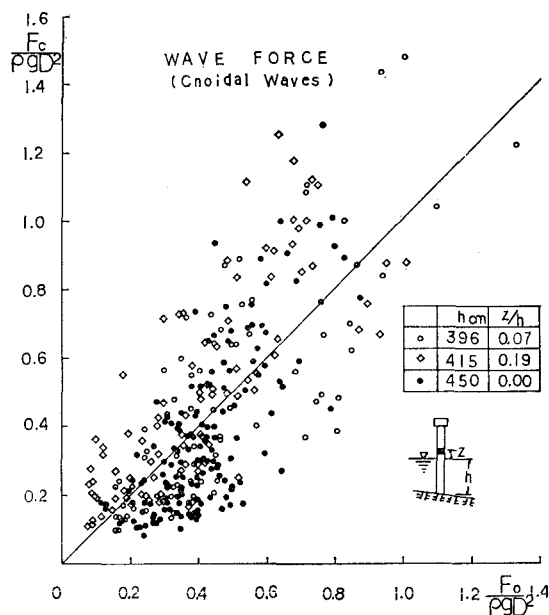


図-7 実測値と計算値の比較 (一波一波)

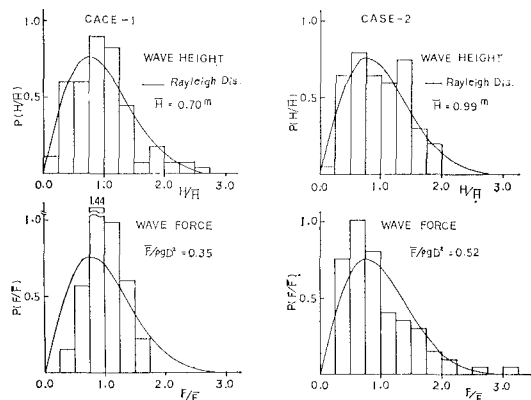


図-8 波高と波力の確率分布

ば、当然であるといえる。

5.3 波と波力の特性量の関係

波と波力の特性量間の比較は波力に抗力による非線形効果が含まれるために簡単ではない。そこで特性量相互の比較を行なうまえに、波高と波力の確率分布を調べてみたのが 図-8 である。解析データが約 11 分の記録であるため、波数は CASE 1, 2 とも約 100 波と少ない。図中の実線はレーリー分布の理論曲線である。図からわかるように、波高の確率分布は CASE 1, 2 ともレーリー分布に比較的近いが、波力の場合は必ずしもレーリー分布とは言えない。CASE 1 の場合、抗力と慣性力の最大値の割合は有義波を用いて微小振幅波で計算すれば 1:2.5, CASE 2 の場合 1:1.5 程度で抗力もかなり大きい場合である。波力の確率分布については、現在のところ波高と違って確定した分布モデルは提案されておらず、波力の中に占める抗力の成分が大きくなるにつれ

て、レーリー分布から外れてくるものと考えられるが、CASE 2 の場合のようにレーリー分布に近い場合もある。慣性力が卓越する場合には当然ながら波高の確率分布とほぼ同じものとなり、したがってレーリー分布に近いものとなる。

このように波と波力の確率分布が異なるため、有義波から計算される計算波力と実測波力の有義値とを直接比較することには問題がある。しかしながら、ここで使用した資料においては有義量でみると、有義波と波力の有義値を与える波の平均値とは波数が 100 波前後と少ないこともあって、波高周期ともほぼ一致していることが明らかとなった。したがって、両者の間に分布の違いはあっても、有義値相互間の比較を行なうことは可能であり、その比較を行なったのが 図-9, 10 である。図-9 は微小振幅波によるものであり、図-10 はクノイド

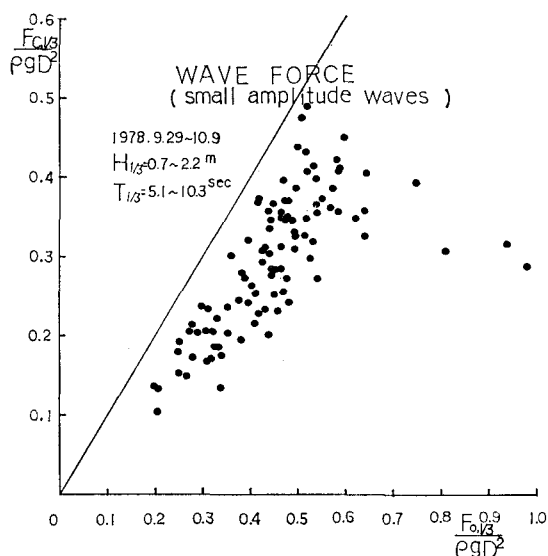


図-9 実測値と計算値の比較 (有義値)

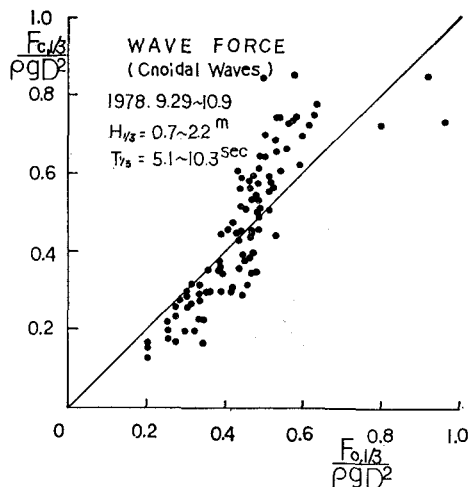


図-10 実測値と計算値の比較 (有義値)

波によるものである。波力計算に用いた資料は、波高 0.7~2.2 m, 周期 5.1~10.3 秒の有義波である。図 9, 10 からわかるように、微小振幅波によるものは相対的に実測値より小さく、クノイド波によるものは $F/\rho g D^2$ が約 0.5 以上になると多少計算値の方が大きくなってはいるが、全体としてはよく一致している。この傾向は平均波でも同様である。1/10 最大波になると確率分布の影響が表われるため、直接的な比較はできない。このように、不規則波をある規則波で代表させて対応する作用波力の計算を行なう際には、波高と波力の確率分布の違いを考慮した計算を行なう必要があるが、本研究で対象としたような波では波の有限振幅性を考慮すれば、一波一波の関係と同様に作用波力はかなりの精度で推定できると考えられる。

5.4 波力のスペクトル

これまで述べたように本研究で対象とした波は有限振幅波として解析する方が、微小振幅波として取扱うよりも実状に近いが、波の有限振幅性を取入れた波力のスペクトル算定式は未だ提案されていないため、ここでは Borgman らによる第二次近似のスペクトル算定式を用いて、実測波力のスペクトルとの比較を行なってみる。

図 11 は波向を考慮して求められた計算スペクトル

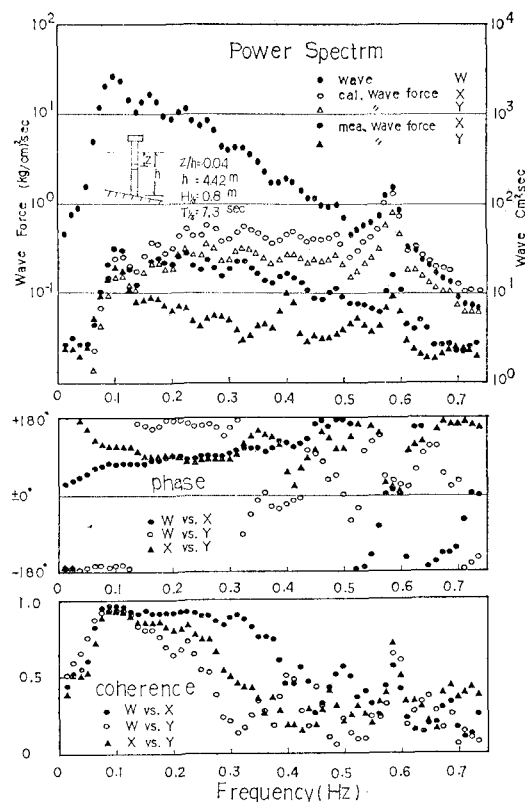


図 11 波と波力のスペクトル

と実測スペクトルの比較の 1 例である。図からわかるようにコヒーレンスが高い周波数の範囲では実測及び計算スペクトルのエネルギー密度は大略一致しているが、 $z/h = -0.04$ と波力計が静水面に近い位置に位置していたために実測値の方が計算値よりも少し大きくなっている。また、波力スペクトルの全体的な形状については大略一致しているが、エネルギー密度は高周波側に移るにつれて計算値の方が実測値より大分大きい。しかしながら、高周波側においては波と波力のコヒーレンスが悪くなっており、したがって、この付近の比較はあまり意味がない。また、0.6 Hz 付近にみられるピークは橋脚からの反射波によるものと考えられる。したがって、本研究で対象としたような浅海域における波においても、Borgman らによる波力スペクトルの計算式によって、波力スペクトルの概略の形状は推定可能であり、卓越周期の成分波による波力のエネルギー密度は定量的にも求めることができる。

6. 結 言

円柱に作用する部分波力について、現地観測の結果をもとに検討した。本研究で得られた成果を要約すれば以下のとおりである。波が海底地形の影響をうけて、かなり変形している場合においても、微小振幅波理論に基づく部分波力の計算値は実測値をかなりの程度説明しうるが、波の有限振幅性を考慮した計算（クノイド波）を行なうことによって、さらにその推定精度を高めることができる。波の水粒子の速度は水深がある程度深くなると、微小振幅波理論でもクノイド波理論でも同程度の値となり、実測値とほぼ一致する。波力の確率分布は波高と異なり、波力の中に占める抗力の成分が大きくなると必ずしもレーリー分布とはならない。Borgman らによる波力スペクトルの計算式は実測波力のスペクトルを概ね推定できる。

本論文では時間的な制約もあって、観測データの一次的な処理結果を述べたにすぎない。また、不規則波を対象としながら、確率的な観点からの解析は十分ではない。今後は波力の確率分布形をはじめとして、不規則波力の統計的な性質についても検討を行なう予定である。

参 考 文 献

- 1) 例えば、土屋義人・山口正隆：柱体に作用する全波力について、第 20 回海岸工学講演会論文集, 1973, pp. 25~29.
- 2) Laitone, E. V.: The second approximation to cnoidal and solitary waves, Jour. of Fluid Mechanics, Vol. 9, 1961, pp. 430~444.
- 3) Borgman, L. E.: Spectral analysis of ocean wave forces on piling, Proc. ASCE, Vol. 93, No. WW2, May, 1966, pp. 129~156.