

銚子沖で計測された2010年チリ地震津波の記録と 海洋構造物の耐津波設計

2010 Chili Tsunami Hydraulic data observed at Choshi offshore and their application to Anti-tsunami design of Offshore Structure

福本幸成¹・池谷 毅²・稲垣 聡³

Yukinari FUKUMOTO, Tsuyoshi IKEYA and Satoshi INAGAKI

Water surface profile and velocity distribution of 2010 Chilean earthquake tsunami was observed by using the Ultrasonic-type wave gage and ADCP placed on the sea bottom 11m deep and 3 km offshore of Choshi city, Chiba prefecture, Japan. The following findings were made. 1) Measured data can be linearly separated into tidal and tsunami component and wave component by adapting numerical filter with the threshold period of 60seconds. 2) Existence of tsunami does not have large effects on the wind waves and swells component distribution. 3) Observed tsunami current velocity profile was affected by the tsunami deformation due to the sea bottom topography. 4) The tsunami current velocity vertical distribution follows power law with $1/n=1/5$ to $1/7$. Based on these findings tsunami wave force acting on the small diameter ocean structure was proposed.

1. はじめに

銚子市沖合い3km, 水深11mの海底に設置されている超音波式波高計およびADCPが, 2010年2月27日に発生し2月28日に我が国沿岸に到達したチリ地震津波の波形, 流速の連続データの取得に成功した. この海象計測装置は, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が推進する洋上風力発電の実証研究の一環として, 我が国の近海の手象条件, 気象条件を把握する目的で著者らのチームが設置したものである.

従来, 海洋構造物の設計においては, 地震時あるいは津波時については, 波浪の影響を考慮しないのが通常である. 今回, 津波が銚子沖に襲った際に, 有義波高1.5m程度の風浪が存在しており, 津波と風浪が同時に生じている場合のデータを取得したことになる.

沖合で計測された波形データから津波の特性把握する研究は, 永井ら (1994), 永井ら (1995) がナウファスのデータをもちいたのが最初である. 本研究では, 計測されたデータを基に, 銚子沖におけるチリ地震津波の状態を把握すると同時に, 津波と風浪が同時に生起している場合に洋上風力発電施設に作用する波力算定の基となる流速時系列の評価方法を提案することを目的とした.

2. 海象観測装置

海象計測機器の設置位置を図-1に示す. 設置位置は,

北緯 $35^{\circ}40'53''$, 東経 $140^{\circ}49'18''$, 屏風ヶ浦から3km程度離れた海域である. 設置海域の水深は11m程度であり, 平均的な海底勾配は1/500程度と緩やかである. 海底地盤は軟岩層で, ところどころに比高1.0m程度の砂の堆積層が存在する.

海象観測機器は, 波浪条件の把握を目的とした超音波式波高計と海潮流の特性把握を目的としたADCPの2種である. 計測されたデータは, 計測器内のメモリーに記

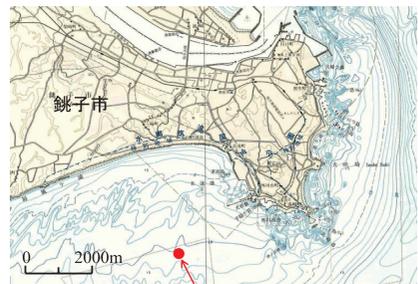


図-1 海象観測機器設置位置

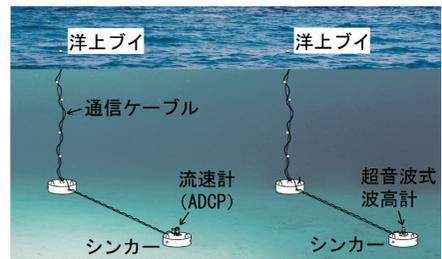


図-2 海象観測機器の設置状況

1 正会員 工修 東京電力(株) 技術開発研究所
2 フェロー 工博 鹿島建設(株) 技術研究所
3 正会員 工修 鹿島建設(株) 技術研究所

表-1 海象観測機器の仕様

項目	超音波式波高計	ADCP
形式	アイオーテック社製 WaveHunter08-Σ	TRDI 社製 ADCP センチネル 600kHz
水位変動計測原理	超音波および水圧	サーフェストラック
水位変動計測頻度	連続計測 (2Hz)	1分間平均 (10分毎)
流速計測原理	水平2成分電磁流 速計	ADCP3成分
計測点数	1点	最大19点
流速計測位置 (海底から)	1.4m	2.8m~11.8m 0.5m 間隔
流速計測頻度	連続計測 (2Hz)	1分間平均 (10分毎)

録されると同時に、携帯電話データ通信網を用いて地上のサーバに転送されるシステムを用いた。図-2に示すとおり、超音波式波高計およびADCPは、海底面上に設置された円盤型のコンクリート製シンカー上に、専用の設置架台を介して固定されている。また、データ通信システムは、シンカーから係留されたブイ上に設置した。データ通信システムと超音波式波高計およびADCPとはケーブルにより接続されている。計測装置およびデータ収集を仕様を表-1にまとめる。

3. チリ地震津波時のデータの特徴

(1) 超音波式波高計の統計量の変化

図-3に2010年2月の超音波式波高計の統計量の変化を示す。同図で統計量としては、20分間平均の位変水位変動(潮位: η_{20min})、波高(20分間の有義波高 ($H_{1/3}$), 最

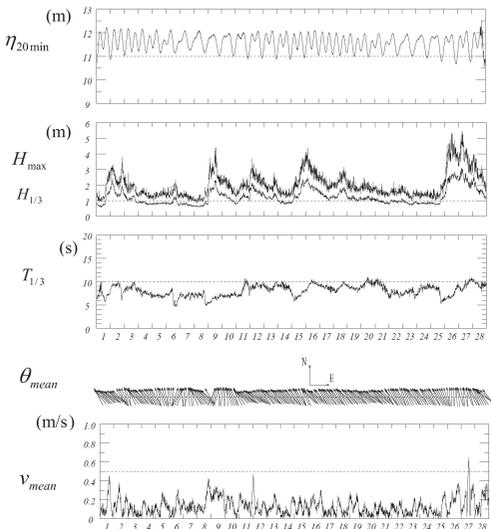


図-3 2月の海象観測統計解析結果

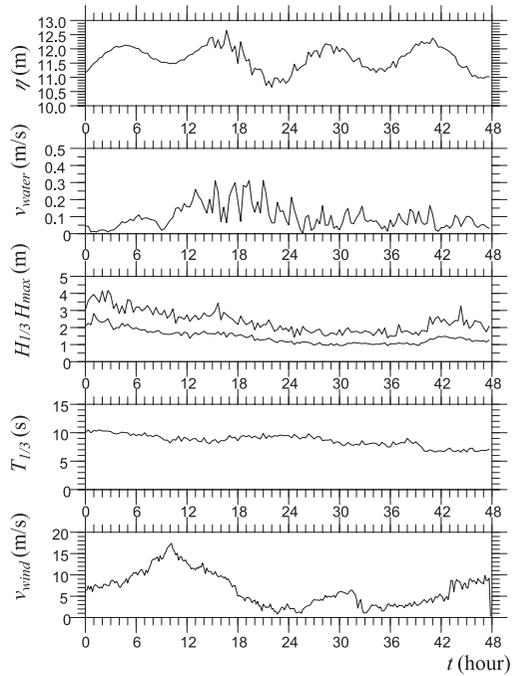


図-4 2月28日, 3月1日の海象気象データ (風速は, 銚子気象台での計測データ)

高波高 (H_{max}), 有義波周期 ($T_{1/3}$), 平均波向 (θ_{mean}), 平均流速 (20分間の平均, v_{mean}) を示す。潮位は、混合潮型の天文潮の変化パターンを示した後に、2月28日の午後に津波の影響とみられる潮汐に比べると周期の短い変動が生じている。波高については、2月には $H_{1/3}=1.5m$ を超える時間帯が月に5回程度あり、2月には、2月26日から27日にかけては $H_{1/3}=3m$ を超えている。その際の有義波周期は、8秒から10秒程度、波向きは南東となっている。平均流速については、潮流と考えられる変化のほか、波高の変動と相関が高い変化パターンもみられる。

津波が来襲したのは、2月28日午後であり、図-3では、右端にわずかにみられるのみであるので、図-4に2月28日と3月1日のデータのみを拡大して示す。同図には、20分間平均された水位 (η_{20min}), 流速 (v_{mean}), 20分間の有義波高 ($H_{1/3}$), 最高波高 (H_{max}), 有義波周期 ($T_{1/3}$), 銚子地方気象台にて計測された10分間平均風速 (v_{wind}) を示している。これを見ると、水位の変動に津波の影響がでるのは、28日の14:00頃からであることがわかる。また、平均流速に与える影響は、この時間帯では津波によるものが大きいことがわかる。

(2) 超音波式波高計の連続計測時系列データ

より詳細に水位と流速の時系列を把握するため、超音波式波高計で2Hzで取得された水位と流速の連続計測データを調べる。2月28日14:00~24:00までの津波襲来時の超音波式波高計で計測された水位、水平方向2成分の

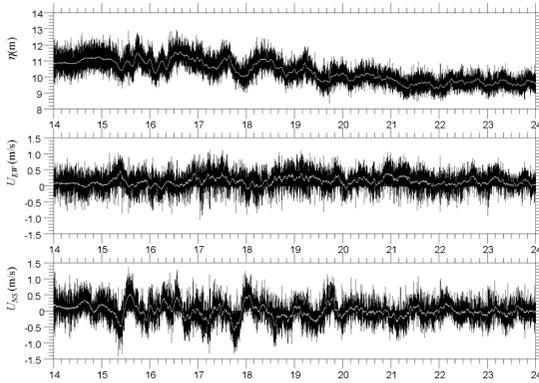


図-5 水位変動と流速の連続計測時系列
(2月28日14:00から24:00)

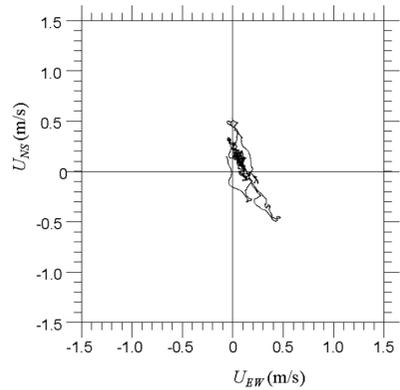


図-7 長周期波のホドグラフ

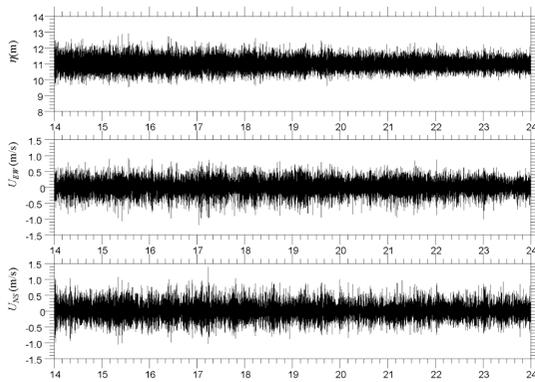


図-6 分離した短周期(波浪波)成分
(2月28日14:00から24:00)

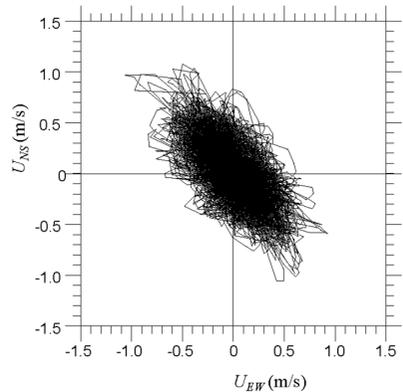


図-8 短周期波のホドグラフ

流速の時系列を図-5に示す。ここで、 U_{EW} 、 U_{NS} は、それぞれ、水平流速の東向きを正とした東西成分、北向きを正とした南北成分を示す。潮汐等や津波による変動と波浪による変動を分離するため、生データに三角形フィルター(±30s)をかけ、長周期(潮汐、津波)成分(図-5中の白線)と短周期(風浪)成分(図-6)とに分離した。フィルターの特性は、有義波周期が10秒程度であることから、風浪成分を除去できるように±30秒に設定した。図-6に、分離された短周期成分の水位変動と平面流速成分を示す。また、平面流速の長周期成分と短周期成分について、ホドグラフを作成した(図-7、図-8)。

これらを見ると、津波の襲来は、14:30頃で、0.3m程度の振幅の押し、引き、押しを経た後に、15:10頃大きな引きが生じ、その後周期30分程度の長周期の振動が発生している。流速変動は、津波による流速変動は、0.5m/s程度で、波浪による流速変動振幅に比べて小さい。変動成分(風浪成分)の振幅は、時間によって大きく変化することなく、概ね定常の信号であることがわかる。定常流成分は、E向き、津波の襲来方向はSSE - NNW方向、

風浪については、平均波向きSEであることが確認される。津波成分と風浪成分とで10度ほど向きがずれている。

(3) 平均流速の時空間構造について

次に、ADCPで10分毎に得られる1分間平均流速(長周期成分)の分布についてみる。図-9に計測された各層の流速の絶対値の鉛直プロファイルの変化を示す。図中で、横軸は、2月28日0時からの経過時間を表しており、水位情報は、ADCPのサーフェストラッキング機能により得られた水面を示している。これを見ると、長周期波成分の流速は、津波襲来前では、0.4m/s以下であるのに対して、津波襲来後は、0.6m/s以上の流速が見られ増加している。

長波理論に従えば、進行波の最大水平流速の出現位相は、水面のクレスト部分であるが、ここで得られたデータを見ると、高流速は水位が低下する位相、すなわち引き波時に出現している。これは、今回計測地点が、沿岸から3kmの位置にあり、海岸線からの反射波の存在など、進行波の条件が満足されていないためと思われる。

図-9を見ると、鉛直方向の流速分布は、津波襲来後の流速が大きい時間、若干水面近傍が若干大きくなる分布となっていることがわかる。津波来襲時の流速の鉛直分

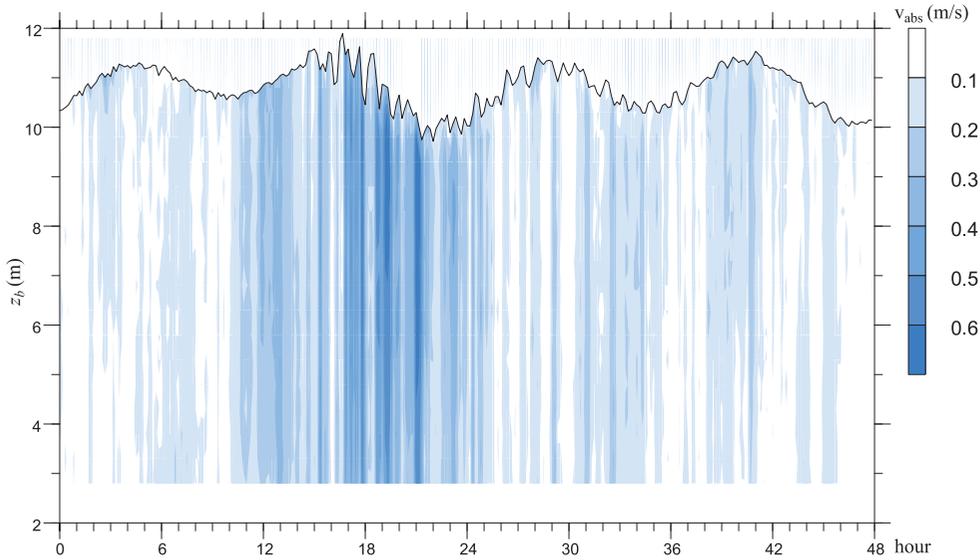


図-9 2月の海象観測統計解析結果

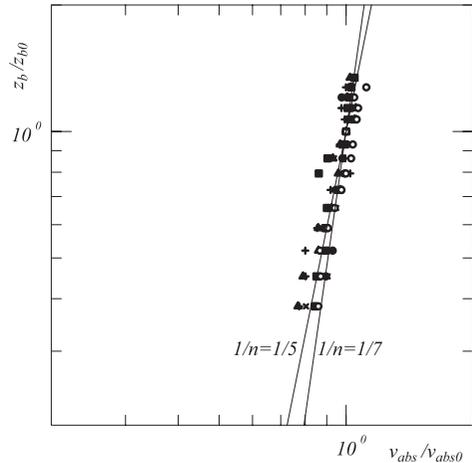
布を確かめるために、図-10に、平均水平流速が大きい(0.55m/s以上)の時間帯における流速の鉛直分布を示した。この図で、基準となる高さは、底面からの高さ $z_b=z_0=7.3\text{m}$ とし、また、基準となる流速は、その高さの流速としている。長波理論に従えば、流速の鉛直分布は一様となるのに対して、計測された流速分布は、境界層内の流速分布に近い。図中には、1/5乗と1/7乗のべき乗流速分布(例えば、日野(1974))を実線で示した。鉛直分布は、1/5乗程度に近く、これから津波時の流速分布は、波浪場というよりは、流れ場に近いことがわかる。

さらに、流速の方法を明らかにするため、津波襲来前と来過後での各層での平面流速のホドグラムを図-11に示す。これを見ると、津波襲来前は、東西方向流れが支配的であるのに対して、津波来過後は、北北西、南南東方向の流れが支配的となる。鉛直位置での流向の差は殆ど見られず、流向は鉛直方向によらず一様であると思われる。

4. 海洋構造物の耐津波設計

海洋構造物として、今回の計測の対象としている洋上風力発電施設の基礎を考える。基礎の形式としては、モノパイル基礎、コンクリート重力式基礎、ジャケット式基礎などが存在する。その特徴は、多くは小口径部材(代表径が波長に対して十分小さい)となる点であり、作用波力はモリソン式で表現される(例えば、関田(2002))。

$$dF = \frac{1}{2} \rho C_D u |u| dA_n + \rho C_M \frac{du}{dt} dV \dots\dots\dots (1)$$



$$\frac{u(z)}{u_0} = \left(\frac{z}{z_0} \right)^{1/n}, z_0 = 7.3\text{m}$$

図-10 平均流速の鉛直分布

ここで、 dF :部材の単位長さあたりの波力、 ρ :海水密度、 C_D 、 C_M :抗力係数、慣性力係数、 u 、 du/dt :水流子速度、加速度、 dA_n :部材単位長さ当たりの流向方向への投影面積、 dV :部材単位長さ当たりの体積である。重要なことは、流速をいかに精度良く表現できるかである。今回の計測データからは、津波流速と波浪による流速は分離が可能であること、津波流速値は周辺の地形の影響を受けたものとなること、津波による流速の鉛直分布は、べき乗則で良好に表現されることが明らかになった。よって、まず、津波による流速は、津波シミュレーションなどをとおして、断面平均流速の時系列を算出する。鉛直方向に分布は、べき乗則により分布を考える。次に、

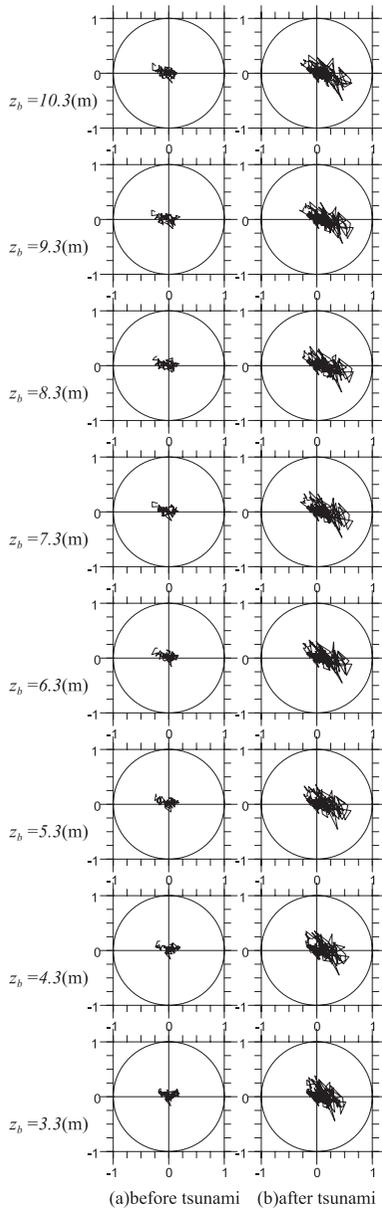


図-11 2月の海象観測統計解析結果

風浪による流速の時系列を算出し、これを単純に足し合わせる。これにより、流速を算出し、式(1)に代入することにより、津波と波浪が共存する場合の波力を算出

できると考えられる。

今回サイトにおいては、津波による流速が波浪による流速に比べて小さいことは自明である。しかし、津波の規模、サイトの条件によっては、津波外力を考慮する必要がある場合がある。特に、津波来襲時において、波浪や風速をどの程度のものにするか、海洋構造物に浮遊体の衝突力を考慮するかなどについては、今後の研究の課題である。確率論による議論が必要であり、他の外力との同時生起性を確率論による評価が重要と考えられる。年間平均的な波高、風速については、加えるべきと思われる。

5. おわりに

銚子市沖合い3kmの海域に設置された海象観測機器(超音波波高計とADCP)により、2010年チリ地震津波による水位変化、流速変化の連続計測データを得た。データの解析の結果、①津波流速と波浪による流速は1分程度周期を数値として数値フィルターにより分離が可能であること、②津波流速値は周辺の地形の影響を受けたものとなること、③津波による流速の鉛直分布は、べき乗則で良好に表現されることが明らかになった。

これらの知見から、津波と波浪とが共存している場合の流速分布、時系列を推定することにより洋上風力発電施設基礎に作用する波力の算定方法について、提案した。

謝辞：本論文で用いた海象観測機器は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が推進する洋上風力発電の実証研究の一環として、設置したものである。

参考文献

日野幹雄(1974)：流体力学，朝倉書店，p.175。
 関田欣治(2002)：海洋構造物—その設計と建設—，成山堂書店，p.42。
 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井 正・東山 茂・戸田和彦(1994)：平成5年北海道南西沖地震の沖合津波波形，海岸工学論文集，第41巻，pp.221-226。
 永井紀彦・橋本典明・平石哲也・清水勝義・市川 武・宮部秀一・久高将信・川俣 奨(1995)：現地観測データに基づく平成6年北海道東方沖地津波の特性，海岸工学論文集，第42巻，pp.351-356。