

港内外長周期波の現地観測とその予測手法

堀 沢 真 人* ・ 佐 藤 典 之** ・ 大 中 晋**
青 野 利 夫*** ・ Eric C. Cruz**** ・ 早 川 淳*****

1. はじめに

近年, 外洋に面した港湾, 漁港において, 港外で発生した長周期波が港内に侵入し, それによる船舶, 周辺施設等の損傷事故や荷役障害が数多く報告されている (例えば菅沼ら, 1995). 太平洋に面した A 漁港 (建設中) においても長周期波の侵入が予想され, 港内に計画されている係留施設や係留船舶への影響が懸念された.

港内の長周期波を推定する方法としては, 既に平面二次元のブーシネスク方程式による港内波浪解析法 (金山ら, 1995; 朝崎ら, 1996) や, 沖合長周期波の実測値を入力として港内副振動計算による水位変動の応答関数から算定する方法 (神谷ら, 1996) などが提案されている. しかし, これらの手法に対する検証事例は少なく, また前者においては多大な計算時間が必要となるため, 実用面で問題があると考えられる.

そこで本研究は, A 漁港において, 港内外波浪の現地観測を実施し, 入射波に含まれる長周期波の特性を明らかにするとともに, 簡便な数値計算手法を用いた港内長周期波の推定法の妥当性について検討することを目的とする. さらに, これらの推定法を用い, 防波堤延長による長周期波低減効果についても検討した.

2. 現地観測の方法

現地観測は, 平成 9 年 3 月 18 日~5 月 18 日の 2 ヶ月間, 図-1 に示す港外 2 点, 港内 4 点の計 6 地点に波高波向計を設置して行った. 測定項目と測定時間を表-1 に示す. なお, サンプルングタイムは各地点とも 0.5 秒である. また水圧波形から表面波形への変換は, FFT 法により水圧スペクトルを求め, これに微小振幅波理論による伝達関数を乗じるにより行った.

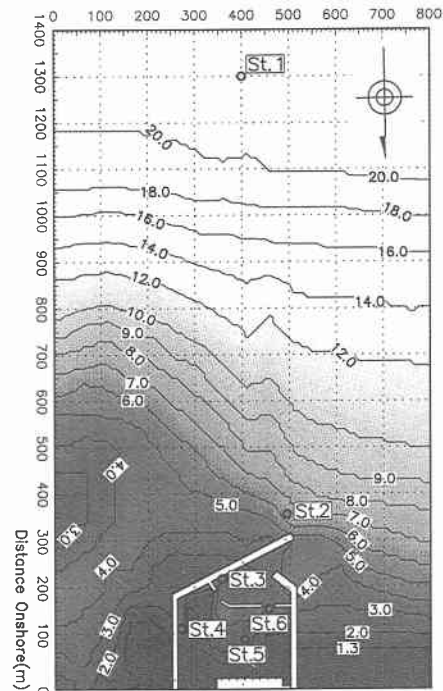


図-1 A 港の平面図と波浪観測位置

表-1 観測ビームの方位

測点	測定項目			測定時間 (時間)	測定間隔 (時間)
	水位	水圧	流速*		
St. 1	○	○	○	1	4
St. 2	○	○	○	1	連続
St. 3		○	○	1	4
St. 4		○	○	1	連続
St. 5		○	○	1	連続
St. 6		○	○	1	連続

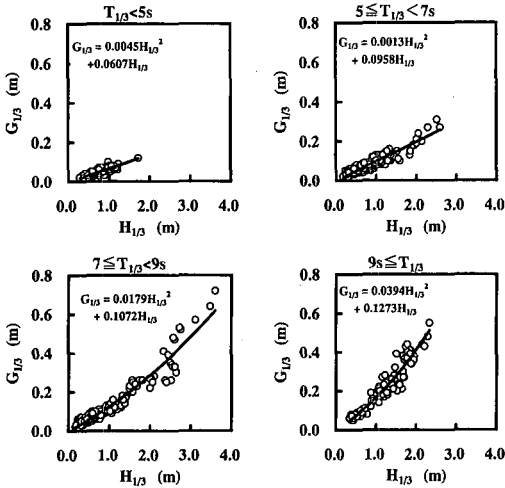
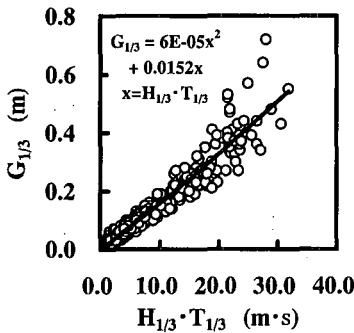
* 流速は水平 2 成分

* 正会員 東亜建設工業株式会社 土木本部設計部 第 4 課 長
** 正会員 工修 東亜建設工業株式会社 土木本部設計部 第 4 課
*** 正会員 工博 東亜建設工業株式会社 技術研究所 数値解析室 長
**** 正会員 工博 東亜建設工業株式会社 技術研究所 数値解析室
***** 正会員 工修 東亜建設工業株式会社

3. 港口地点における長周期成分の特性

(1) 長周期成分波高と通常成分波高の関係

得られた実測波形より, ローパスフィルターにより周期 20 秒以上の長周期成分を抽出し, 有義波高を求め, こ

図-2 港口地点の $G_{1/3}$ と $H_{1/3}$, $T_{1/3}$ の関係図-3 港口地点の $G_{1/3}$ と $H_{1/3} \cdot T_{1/3}$ の関係

れと通常波浪成分との関係について調べた。図-2は、港口部 (St. 2) について、有義周期 $T_{1/3}$ の階級別に通常成分の有義波高 $H_{1/3}$ と長周期成分の有義波高 $G_{1/3}$ との関係を示したものである。ここで図中の実線は実測結果より得られる回帰曲線である。これより、 $G_{1/3}$ は、 $H_{1/3}$ の自乗に比例して増大し、また周期が長くなるにしたがって大きくなっており、長周期成分は、 $H_{1/3}$ とともに $T_{1/3}$ にも依存することがわかる。そこで、つぎに $H_{1/3} \cdot T_{1/3}$ と、 $G_{1/3}$ との関係を示したものが図-3である。両者には、 $T_{1/3}$ の階級別に整理した場合と同程度の強い相関がある。以上より、当地点における港口入射波の $G_{1/3}$ は、 $H_{1/3}$ 及び $T_{1/3}$ から経験的に推定できることがわかる。

(2) 長周期波に対する標準スペクトル

港口部 (St. 2) における、波高・周期階級別の周波数スペクトルを図-4に示す。図中の実線は、その階級に属する実測スペクトルを任意に抽出したものである。これより、長周期成分のエネルギーは、0.01 Hz～0.03 Hz 付近にピークをもち、波高および周期の増加に伴って大きくなっていく。しかし、長周期成分のスペクトル形状は

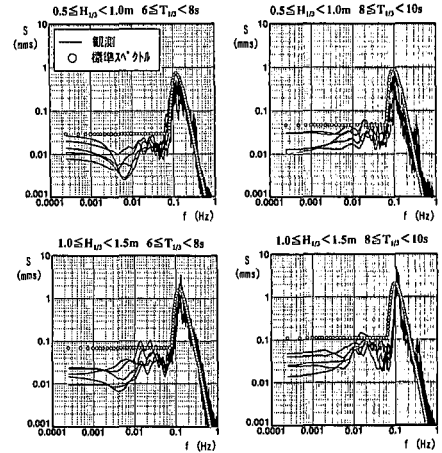


図-4 波高・周期別の周波数スペクトル

一様ではない。

つぎに、港口地点の標準波スペクトルを設定する。

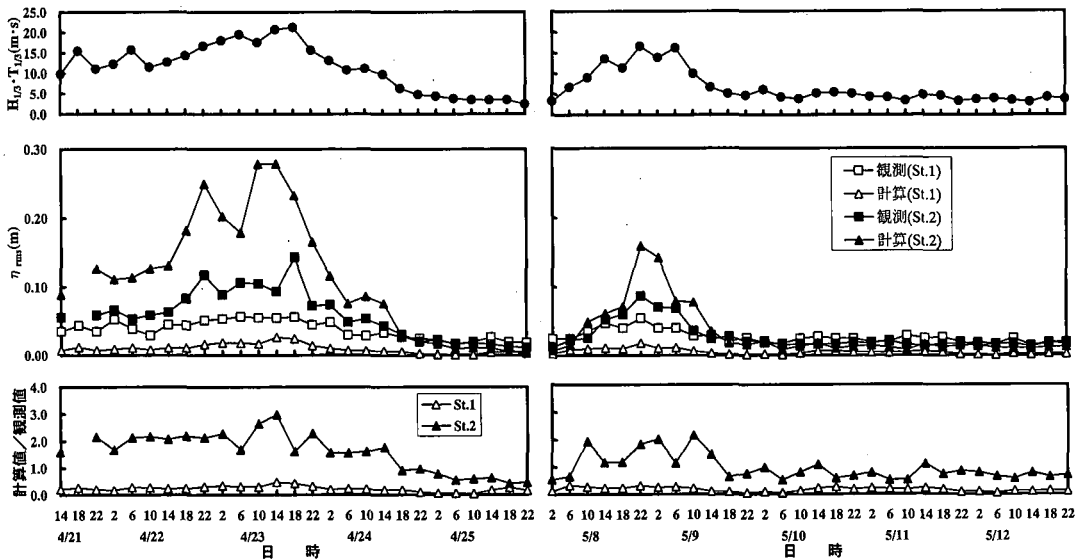
標準スペクトルは、平石ら (1997) と同様に、通常成分と長周期成分の境界周波数を設定し、長周期波のスペクトルについては一定値 S_L をとる形状とした。ここで S_L は、実測結果より式 (1) を用いて算定する。

$$\left. \begin{aligned} S_L &= m_{0L}/f_L \\ m_{0L} &= G_{1/3}^2/16, f_L = 1/30 \\ G_{1/3} &= 0.00006(H_{1/3} T_{1/3})^2 + 0.0152 H_{1/3} T_{1/3} \end{aligned} \right\} \cdots (1)$$

なお、通常波浪成分のスペクトルについては Bretschneider-光型で与えるものとした。図中の○印は、このようにして設定した標準スペクトルを示す。これより、標準スペクトルは実測スペクトルと概ね対応しており、式 (1) により当地点でのスペクトルが推定できることがわかる。

(3) 長周期波と波群拘束波の関係

長周期波が波群に拘束されたものであるとすると、非線形干渉理論によって推定可能となる。そこで、沖合の St. 1 および港口付近の St. 2 における実測波形より、20 秒以下の成分を抽出し、木村ら (1985) による方法を用いて、単一方向波としての 2 次の非線形干渉波を計算した。これらの計算結果と実測値との比較を行ったものが図-5である。ここで上段は、St. 1 における $H_{1/3} \cdot T_{1/3}$ を、中段は、St. 1 および St. 2 における長周期波の η_{rms} 値の実測結果および計算結果を、下段は両地点における実測値に対する計算値の比を示したものである。これより、実測値は、 $H_{1/3} \cdot T_{1/3}$ が小さい場合には、両地点で顕著な違いはみられない。一方、 $H_{1/3} \cdot T_{1/3}$ が大きくなるにつれて、St. 1, 2 とも長周期成分は増大し、その増加は St. 1 に比べて St. 2 の方がより顕著となる。長周期波に占める拘束波の計算値の割合は、沖合の St. 1 では 0.2～0.3 程度であり、港外においては自由波成分が卓越する。ただ



図一5 港外および港口における長周期波の経時変化

し、 $H_{1/3} \cdot T_{1/3}$ の増大にともない、拘束波の占める割合が大きくなる傾向にある。一方、港口部の St.2 では、波高 1 m 以下の場合で 0.5~1.0、それ以上の波高では、計算値が実測値の 2~3 倍と、かなり過大評価となる。同様の傾向は、合田ら (1990) も示しており、その原因として波の非線形性が強い場合には高次の項が無視できないことを挙げている。

以上の結果より、当地点においては港口地点における長周期波を、非線形干渉理論によって得られる拘束波として推定することは困難であるといえる。

4. 港内長周期波の推定

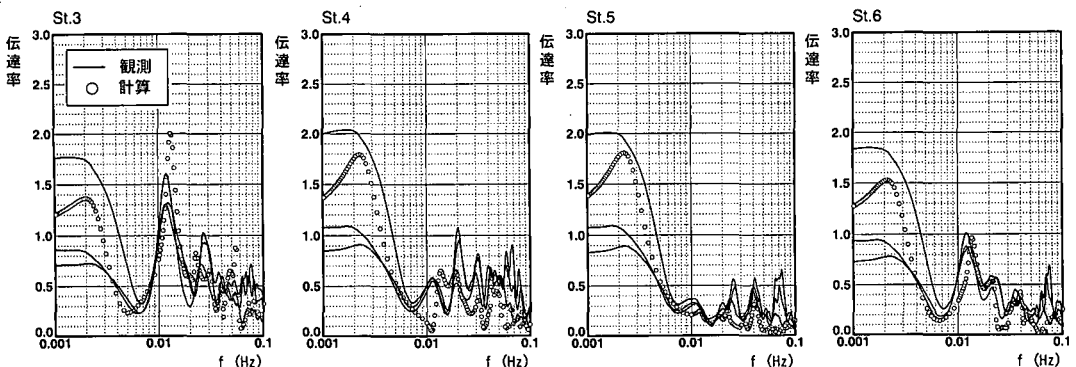
鹿島港 (土田ら, 1997), 苫小牧港 (渥美ら, 1997) などにおける観測結果より、港内長周期波は自由波が支配的であることが知られている。そこで、入射波に対する港内の応答関数と式 (1) の港口地点・標準スペクトル

から、線形重ね合わせにより港内各地点の応答スペクトルを計算することによって、港内長周期波の推定を行った。ここで、港内各地点の $G_{1/3}$ は式 (2) によって与える。

$$\left. \begin{aligned} G_{1/3} &= 4\sqrt{m_0 L} \\ m_0 &= \int_0^{f_L} S_L |R(f)|^2 df = S_L \cdot g_0 \\ g_0 &= \int_0^{f_L} |R(f)|^2 df \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $R(f)$ は港内水面の応答関数、 f は周波数である。以下、式 (2) による港内長周期波の計算法を線形重ね合わせ法とよぶ。港内の応答は、佐藤ら (1988) による緩勾配方程式を基礎式とした港内波浪変形計算法により計算した。ただし、ここでは港口入射波の方向分散性は考慮していない。

図一6 は、港内 4 点 (St. 3~St. 6) の入射波に対する



図一6 応答関数の実測値と計算値の比較

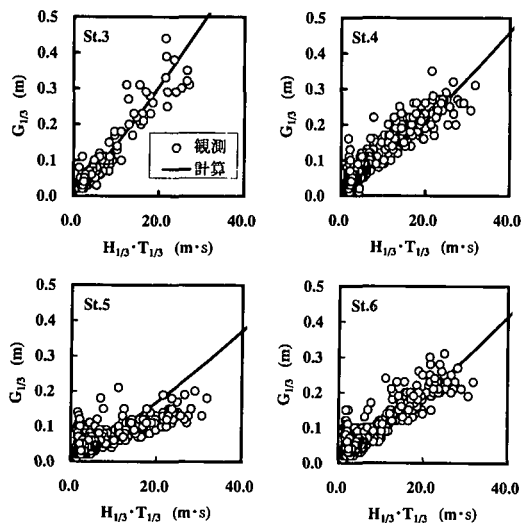
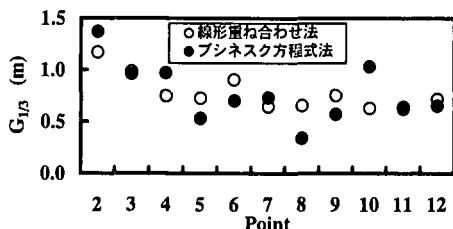
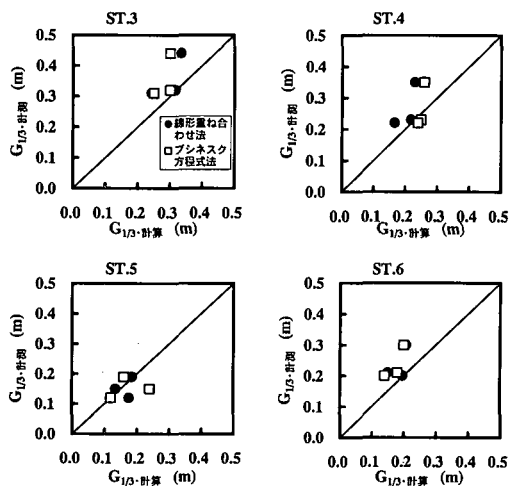
図-7 $H_{1/3} \cdot T_{1/3}$ と $G_{1/3}$ の実測値と計算値の比較

図-9 設計波に対する港内波高計算結果の比較

図-8 $G_{1/3}$ の実測値と計算値の比較

(1998)による拡張プーシネスク方程式を用いた港内波浪解析法および線形重ね合わせ法の両者の計算結果と、実測結果を比較したものである。各地点とも、両者の計算結果は実測結果と概ね一致している。

つぎに、設計波に対する港内長周期波について、プーシネスク方程式による計算結果との比較から線形重ね合わせ法の妥当性を確認する。用いた港口地点における入射波浪諸元は、入射波向：S、 $H_{1/3}=4.3$ m、 $T_{1/3}=14$ 秒である。港内の各地点における長周期波高を示したものが図-9である。多少違いがある地点もあるが、全体として両者はほぼ同様の結果となっている。

以上より、線形重ね合わせ法によって港内長周期波高を推定できることが確認された。

5. 港湾形状変更による港内長周期波の改善効果

港内長周期波は、入射波の $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ がわかれば、ここで示した方法により算定可能であることから、入射波の $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ の出現頻度から港内長周期波の未超過出現率を推定することができる。ここでは、港口地点とほぼ同じ波高、周期を示すことが確認されている付近の波浪観測データ（9カ年統計）を用いた。それによれば、図-9のPoint-8では、 $G_{1/3}$ が0.1 mで86%、0.2 mで96%となった。現状では、漁港機能に対する限界長周期波高が明確ではないが、つぎに静穏度向上が求められた場合を想定し、対策案について検討する。

はじめに、完成時の漁港形状に対する波高比(港内/港外)の計算結果を図-10に示す。ここで、波向はSとし、波高比は、 $\{(m_{0L})_{港内}/(m_{0L})_{港外}\}^{1/2}$ として求めた。長周期波高は防波堤と波除堤で囲まれた領域及び港奥で高く、中

港内応答関数 $R(f)$ について、計算結果と式(3)によって求めた実測結果を比較したものである。

$$R(f) = (S_{SL,i}(f)/S_{SL,2}(f))^{1/2} \quad (i=3 \sim 6) \quad \dots\dots (3)$$

なお、港内は一部直立消波岸壁となっているが、長周期波に対しては反射率低減効果が期待できないため、岸壁は一律に反射率を0.9とし、施工途中の自然海岸は反射率を0.5とした。これより、0.002 Hz 付近のピークについては両者で違いが見られる場合もあるが、0.01~0.1 Hz の応答はよく一致していることがわかる。つぎに港内長周期波高 $G_{1/3}$ について、計算値と実測値を比較したものが図-7である。各地点とも両者は概ね一致しており、本計算手法により港内長周期波を推定できることがわかる。

図-8は波高が比較的高い場合について、Cruzら

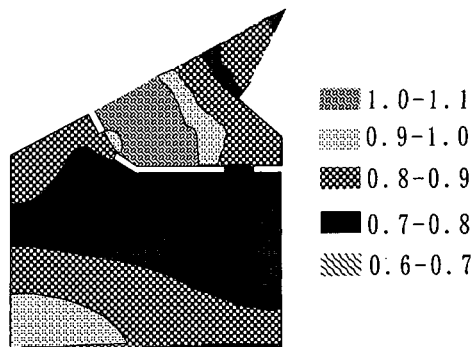


図-10 漁港完成時の波高比・平面分布

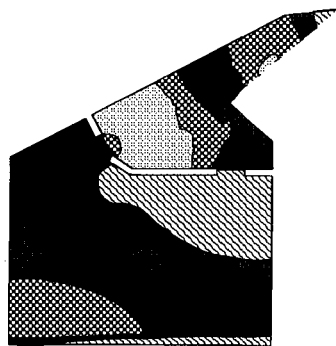


図-11 漁港形状改良案の波高比・平面分布

央部でやや低い傾向となっている。つぎに、防波堤を 50 m 水平方向に延長した場合の計算結果を図-11 に示す。港内全体で波高が低減され、防波堤延長の効果が認められるものの、その低減効果は 1 割程度である。通常成分波の場合、この防波堤延長により 2～4 割低減されることを考えれば、長周期波の低減は容易には実現できないことがわかる。よって、漁港・港湾の建設に当たっては、計画時において、長周期波に対する検討を十分に行うことが極めて重要であるといえる。

6. 結 論

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 港口地点の $G_{1/3}$ は $H_{1/3}$ または $T_{1/3}$ が大きくなるにしたがって高くなる。また $G_{1/3}$ は、 $T_{1/3}$ の階級別に整理した場合の $H_{1/3}$ 、または $H_{1/3} \cdot T_{1/3}$ と強い相関があり、 $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ がわかれば、入射波に含まれる長周期波を推定できる。
- 2) 当地点の港口入射波に含まれる拘束波の割合を検討した結果、拘束波以外の成分を多く含むことがわかった。したがって、長周期波に対する港内静穏度等を検討する場合、長周期波は、非線形干渉理論による推定は困難であり、現状では現地観測によらざるを得ない。
- 3) 港内水面の応答は、緩勾配方程式による計算により推定でき、これと港口での長周期波のスペクトルを基に線形重ね合わせによって、港内長周期成分波高を推定できる。
- 4) 港内長周期波に対する防波堤延長の効果は、通常波浪成分の場合に比べて小さい。

最後に、本研究及び現地調査に際し、ご協力いただいた

関係各位に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 朝崎勝之・松尾憲親・藤畑定生・鶴飼亮行・清水琢三 (1996): 港内副振動に関する現地観測と長周期波を考慮した荷役稼働率の評価, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 886-890.
- 渥美洋一・若山義樹・國田 淳・関口信一郎・川口 勉・平石哲也・青木伸一・上田 茂 (1997): 長周期波の港内侵入過程の現地観測と長周期波高予測式の検討, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 221-225.
- Eric C. Cruz・青野利夫・堀沢真人・早川 淳 (1998): 拡張ブーシネスク方程式を用いた港内長周期波の解析, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 266-270.
- 金山 進・田口 智・清水琢三・長船 徹・植木一浩・中原和彦 (1995): ブーシネスク方程式による港内長周期水位変動の数値計算, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 291-295.
- 神谷昌文・渥美洋一・國田 淳・関口信一郎・木村克俊・平石哲也・白石 悟・上田 茂 (1996): 長周期波に対する荷役稼働率の評価法とその改善策, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 891-895.
- 木村 晃 (1985): 非線形長周期波の 2 次元スペクトル, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 154-157.
- 合田良実・諫山太郎・佐藤慎司 (1990): 砕波帯内の長周期波の発達に関する実験と現地観測, 第 37 巻, pp. 96-100.
- 佐藤典之・磯部雅彦・泉宮尊司 (1988): 任意形状港湾に対する不規則波の港内波高分布計算法の改良, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 257-261.
- 菅沼史典・神谷昌文・渥美洋一・小泉信男 (1995): 現地観測による長周期波の発生頻度と船体動揺発生予測の検討, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 951-955.
- 土田 充・灘岡和夫・西村剛士・佐藤恒夫・山口孝市・平石哲也 (1997): 多点観測による港内外の波浪特性と港内係留船舶の長周期動揺特性について, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 231-235.
- 平石哲也・河野信二・玉城重則・長谷川準三 (1997): 港湾構造物の設計に用いる長周期波の標準スペクトルについて, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 246-250.