

リーフおよび港湾内における現地観測に基づく長周期波対策

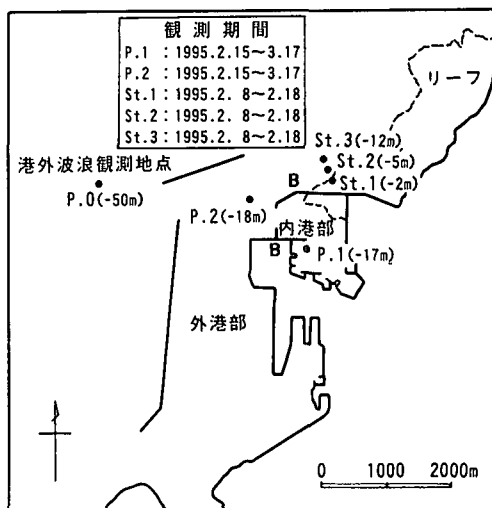
平石 哲也*・林 恒一郎**・栗田 一昭***・河野 信二****

1. はじめに

沖合いに波群性の強い風波が発達すると、波群に拘束されたセットダウン波（拘束波）が生じる（Longuet-Higgins and Stewart, 1962）。この波は有義波周期の10数倍の周期を持つ長周期波となり港湾に伝播する（関本ら, 1990）。港内では、侵入した長周期波そのものだけでなく、港形によっては、副振動現象により励起された長周期水位変動によって、船舶の係留系の共振が起こり、荷役障害や係留索の切断事故が発生する危険性がある（田端ら, 1995）。現在、長周期波による荷役中断現象が顕著な港湾は、苫小牧（松良ら, 1994、菅沼ら, 1995）、仙台（永井ら, 1994）、能代（白石ら, 1995）、新潟、富山（運輸省一港建局, 1994）、細島、志布志港（運輸省四港建局, 1987）などであり、今後も現地観測を中心とする詳細な検討が必要である。一方、港湾の周囲にリーフ地形が広がり、砕波帯が広く存在する海域では長周期波がより顕著に発達する可能性がある（加藤ら, 1991）。しかしながら、上記の条件に当てはまる海域に位置する場合でも長周期波による荷役障害の発生が報告されていない港湾がある。このような港湾においては、長周期波が発生していないか、港内への伝播が何らかの理由により抑止されていると思われる。そこで、このような港湾で港外と港内で長周期波の観測を行い、その特性を明らかにすることを試みた。もし、港内において長周期波高が減衰しておれば、原因を明らかにし、今後の対策工の開発に資するものとした。

2. 現地観測の概要と解析方法

長周期波の観測は、港湾の外部にリーフが発達しており、顕著な長周期波が生じる可能性があると思われる沖縄県那覇港で行った。図一に那覇港の現地観測地点および観測期間を示す。観測は、定常観測（永井ら, 1995）を行っている港外観測地点（P.0、水深50m）と港外北側のリーフおよび港内で、1995年2～3月に行った。図に



図一 那覇港の現地観測地点

示すように、リーフ上では水深12（St.3）、5（St.2）、2（St.1）mの3地点に、および港内では、沖防波堤の直背後の外港部（P.2、水深18m）と内航船および作業船の船着場がある内港部（P.1、水深17m）に2成分電磁流速計と水圧式波高計を設置して、波高と流速を観測した。観測器の台数に制限が合ったので、P.1～2とSt.1～3の観測期間はずれている。記録は毎正時20分間連続して行った。

まず、20分間の波形記録からゼロダウンクロス法で個々の波を定義し、統計解析によって観測期間中の波高および周期の最大値および有義値を整理した。図二は、港内およびリーフ上で観測を実施したときの沖波観測点P.0における波高と周期の変化である。ほとんど欠測が無く連続したデータが取得され、那覇港内観測期間（1995、2/15～3/17）中の最高有義波高 $H_{1/3}$ は4.1mであり、そのときの最大波高 H_{max} および有義波周期 $T_{1/3}$ はそれぞれ、6.9mおよび9.0sであった。リーフ上の観測期間（1995、2/8～18）では沖波波高が比較的小さく $H_{1/3}$ = 0.4～1.9mであった。

次に、統計解析で得られた結果をもとに港内観測では高波浪時のケースを抽出し、リーフ上の観測では全ケー

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部

** 工修 沖縄総合事務局那覇港工事事務所

*** 沖縄総合事務局那覇港工事事務所

**** 正会員 沿岸海洋調査(株)技術部

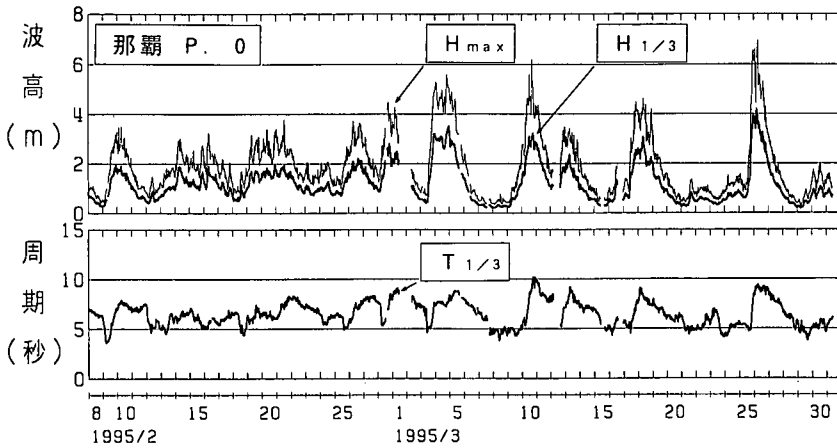


図-2 観測期間中の沖波の波高と周期

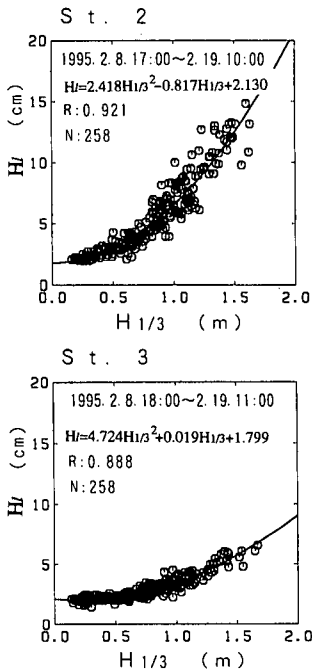


図-3 リーフ上の有義波高と有義長周期波高の比較

スについて周波数スペクトルを求めた。また、港内では流速記録が得られているので、拡張最大エントロピー原理法 (EMEP) (橋本ら, 1993) で方向スペクトルを求めた。高波浪時の定義としては、沖波 $H_{1/3}$ が 3 m 以上になるととした。長周期波の解析にあたっては、観測した波形を有限フーリエ級数に分解し、そのうち着目している周波数帯の成分波について部分級数を再構成し、長周期波形を求めた。そして、ピークツウピーク法で個々の長周期波を定義し、長周期波高および周期を求めた。ここでは、周期 20 s 以上の成分波を長周期波とした。最後

に、港外と港内の長周期波のエネルギーを比較するために以下の計算式で振幅比 $M(f)$ を求めた；

$$M(f) = \{S_{in}(f)/S_{out}(f)\}^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 f ：周波数、 $M(f)$ ：振幅比、 $S_{in}(f)$ ：港内またはリーフ上の観測点の周波数スペクトル密度、 $S_{out}(f)$ ：港外観測点の周波数スペクトル密度である。

3. 現地観測による長周期波の特性

図-3 は、長周期波の生成要因を検討するために、リーフ上の St. 3 および St. 2 における観測から得られた長周期有義波高 H_l と有義波高 $H_{1/3}$ の相関を示したものである。 H_l は $H_{1/3}$ の 2 次式で近似できるものとして相関係数を求めると、St. 3 (−12 m) および St. 2 (−5 m) における相関係数が高く、それぞれ 0.888 および 0.921 である。なお、P. 0 (−50 m) では、 $H_{1/3}$ が変化しても、 H_l は大きく変化せず、ほぼ 5~10 cm であった。St. 1 (−2 m) では、干潮時の引き波時に海底が露出するので解析が困難であった。

図-4 は、観測期間中の長周期波高 H_l の変化を各観測点で示したもので、P. 0 においては $H_l = 5 \sim 10$ cm で、St.

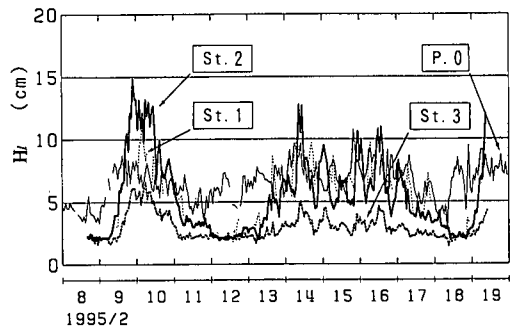


図-4 リーフ上の有義長周期波高の変化

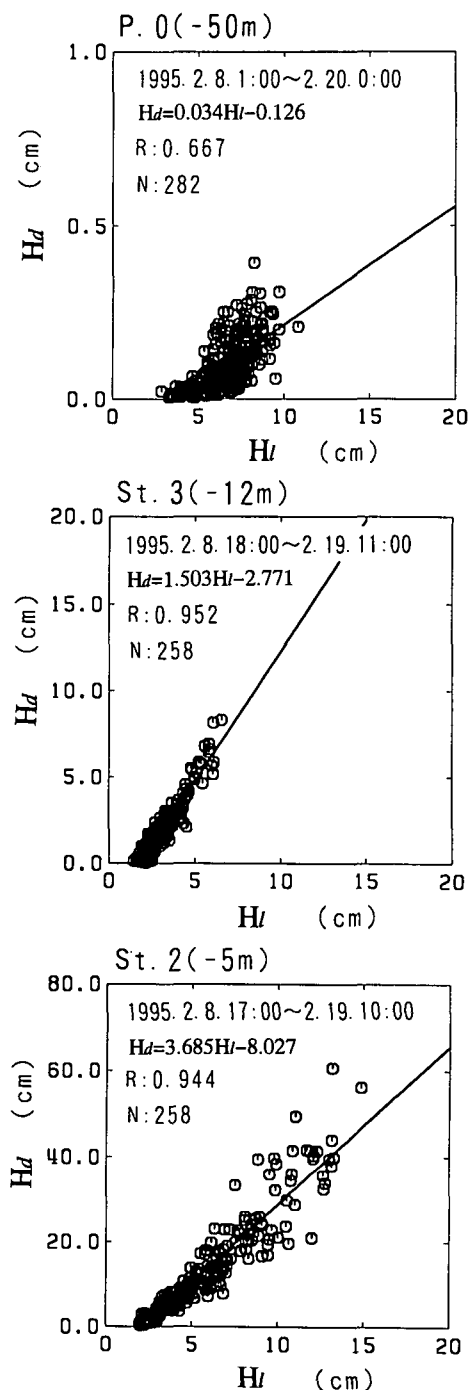


図-5 リーフ上の長周期波高とセットダウン波高の比較

3で少し小さく $H_l = 3 \sim 5$ cm になる。St. 2 では H_l が増大し、10 cm 以上になる。St. 1 は連続記録にはなっていないが、 H_l は St. 2 より若干小さく 5~10 cm になっている。

図-5 は、短周期成分で再構成された波形から

Longuet-Higgins and Stewart (1962) に従って計算したセットダウン波の有義波高 H_d と H_l を比較したものである。P. 0 (-50 m) では、 H_l に比較して H_d が 1/10 以下になり非常に小さく、沖合ではセットダウン波だけで長周期波の生成要因を説明することはできず、より浅い沿岸から反射した長周期波が、長周期波成分の形成に大きな影響を及ぼしていると考えられる。St. 3 はリーフが始まる地点に近いが、砕波帯の沖側にあたる。ここでは、 H_d は H_l のオーダーと一致し、長周期波がセットダウン波として形成されているとみなすことができる。St. 2 では観測期間中、 $H_{1/3}$ は St. 3 とほぼ同じであるが、長周期波高は St. 3 に比べると増大している。ただし、その値は理論計算から導かれた H_d に比べると小さい。St. 2 は、リーフの先端に位置し、ほぼ砕波帯に含まれている。したがって、St. 3 付近で拘束波として発達した長周期波の拘束が徐々に解かれ、自由進行長波が形成される地点に位置するのではないと思われる。そのために、短周期波成分からのエネルギーの供給が無く、拘束波として推定した理論値 H_d より、実際に観測された H_l は小さくなっているものと思われる。St. 1 においても、自由進行長波となっているので、長周期波の波高 H_l は St. 2 とほとんど変化していない。

長周期波の方向スペクトルは、長周期波成分の水位、水平 2 成分の流速波形から、短周期波成分と同一の手法で近似的に推定できる (Sekimoto, 1995)。そこで、EMEP を用いて、リーフ上の長周期波の方向スペクトルを求めた。図-6 は、自由進行長波が卓越していると思われる St. 2 における方向スペクトルの解析結果を示す。上段は周波数方向に積分し、1.0 を最大値として標準化した周波数平均方向関数を示す。短周期波成分の方向スペクトルは NNW に高いピークを有する一山型であったので、図-6 の NNW に現れるピークが入射する長周期波を示している。図-6 では SSE に低いピークが現れ、これは陸地方向から来る成分であり、砕波帯で形成された長周期波が海岸で反射され、沖側へ向かっていることがわかる。

以上のように、港外の波浪観測点 P. 0 における長周期波は、拘束波を主な要因とするのではなく、沿岸で形成された拘束波が、砕波帯で自由進行長波となり、それが再度沖側へ向かったものや、他の海域で形成された長周期波が伝播し、重畳されたものとして成り立っていると考えることができる。したがって、長周期波の波向と、方向スペクトル解析から判断できる風波の波向とは一致しないことがあると思われる。

次に、港湾内の長周期波の特性を調べた。図-7 は、那覇港の外港部 P. 2 および内港部 P. 1 における周波数スペクトルの解析例を示す。図では比較のために、港外の

P.0で観測された周波数スペクトルを太い実線で示した。P.0における周波数スペクトルは、0.13 Hz 程度にピークを有しており、 $f < 0.05$ Hz の長周期波側のスペクトル密度は一定で、短周期波側のピーク値に比較すると、1/1000 以下である。P.2では、沖側の防波堤の効果によ

り、短周期波側のピーク値は小さくなるが、長周期波側のスペクトル密度の値は、P.0とほとんど変化していない。内港部のP.1では、短周期波側のピーク値がP.2より小さくなるとともに、長周期波側のスペクトル密度も1/10以下に低下している。すなわち、長周期波のエネルギーは外港部においても減衰せず、港外で発生した長周期波は沖側の防波堤ではほとんど抑止されずに外港部へ侵入する。観測期間中の有義長周期波高の最大値は0.13 mであったので、もし外港部に大型船が岸壁係留されておれば顕著な荷役障害が生じたものと思われる。内港部では長周期波のエネルギーは減衰しており、有義波高も2ケースを除いて0.5 mを越えることはなかった。

エネルギーの増減をより詳細に検討するために港内の振幅比を求めた。図-8(1)(2)および(3)は、それぞれP.0とP.2の振幅比、P.0とP.1の振幅比およびP.2とP.1の振幅比を示したものである。図-8(1)の場合には、0.01~0.1 Hz すなわち10~100 sの振幅比は大きく、その最大値は2.4程度である。これは、長周期波のエネルギーが若干増幅されていることを示し、この原因としては外港部における港内副振動が考えられる。図-8(2)で内港部P.1における振幅比を調べると、その値は小さく、すべての周波数帯で0.3以下である。20~100 sの成分波では、振幅比は0.2程度である。図-8(3)で外港部P.2と内港部P.1の振幅比を検討すると、10~100 sの長周期波側の値が非常に小さく、0.1~0.5になっていることがわかる。すなわち、長周期波は内港部で顕著に減衰し、係留船舶の荷役障害やフローティングドックの動揺を引き起こす危険性が小さい。現在、内港部では常に、大型貨物船が接岸したり、港湾工事が行われているが、係船障害は報告されていない。那覇港の内港部において長周期波が減衰する要因は、内港部の港口が外港部の開口部の方向を向いておらず、沖側からの長周期波が直接侵入することがないことと、図-1に示した防波堤Bが内港部の開口部を小さくしており、その防御効果が働いていることであると思われる。したがって、現在

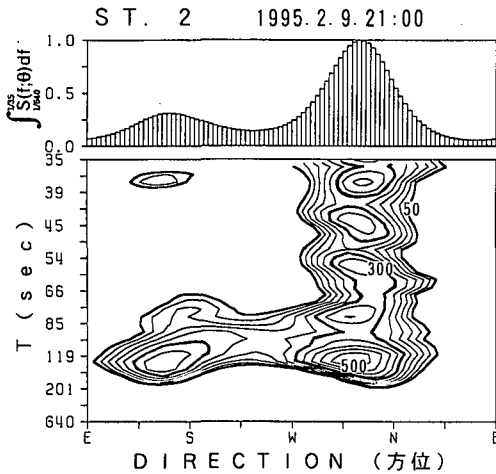


図-6 長周期波の方向スペクトル

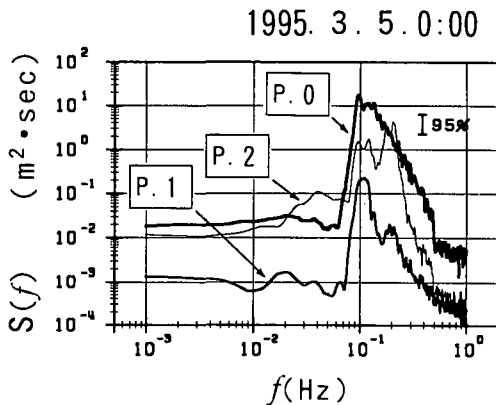
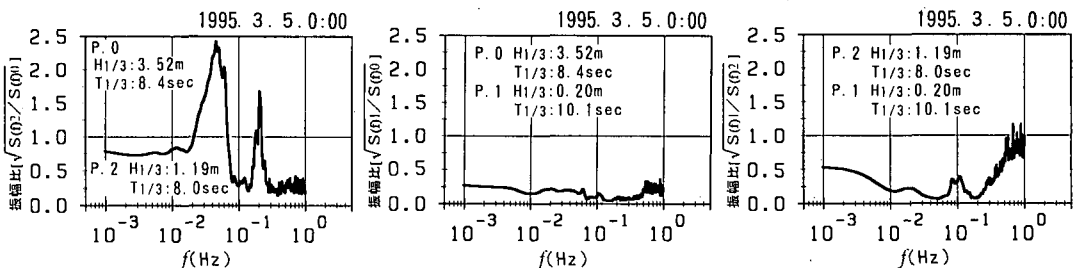


図-7 観測した港内の周波数スペクトル



(1) 港外 P.0 と外港部 P.2

(2) 港外 P.0 と内港部 P.1

(3) 外港部 P.2 と内港部 P.1

図-8 那覇港における振幅比

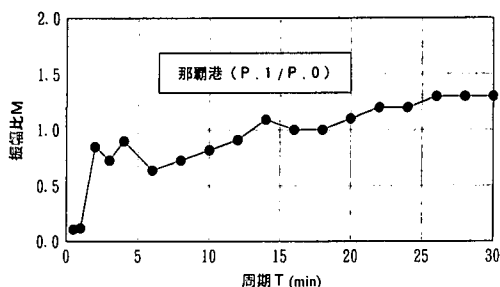


図-9 計算による港内における長周期波の振幅比

長周期波による荷役障害が生じている港湾においても、防波堤を適切に延長すれば長周期波をある程度減衰させることが可能である。

4. 防波堤の長周期波抑止効果の算定法

今後、長周期波による荷役障害を防止するためには、港湾計画の立案段階においても長周期波の影響を検討しておく必要がある。そのために、数値計算によっても防波堤の効果が推定できるかどうかを確認した。ここでは、沖合いから侵入する長周期波は主に自由進行長波として表せるものとして、線形長波の運動方程式と連続式を差分近似した連立式を解く手法（高山ら，1988）で、長周期波の港内における増幅率を計算した。計算では、海底摩擦と次式に示す防波堤開口部におけるエネルギー損失 $\Delta\zeta_i$ を考慮した。

$$\Delta\zeta_i = f_R \frac{u^2}{2g} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 u は港口流速、 g は重力加速度、 f_R は損失係数で、ここでは $f_R = 1.5$ （伊藤ら，1964）とした。

図-9 は、那覇港における長波の増幅計算結果で、横軸に正弦波として仮定した長波の周期、縦軸に港外 P.0 と内港部 P.1 の振幅比を示す。周期が 2 分以上で長くなると、振幅比は徐々に増加するものの、周期 30 分で約 1.3 にしかならない。周期 1 分以下の場合には振幅比が非常に小さく、0.2 程度になる。周期が短くなると振幅比が小さくなるのは、港外の振幅が同一であれば周期が短くなる程、開口部流速が大きくなりエネルギー損失が増加するためではないかと思われる。周期 30～60 s の振幅比の計算値は、図-8(2) に示した内港部と港外の振幅比にほぼ一致しており、開口部損失を考慮した線形長波の近似計算において、現地における長周期波の減衰特性が表せることがわかった。

5. あとがき

本研究では、那覇港において長周期波の観測を行い、2 段に設けられた防波堤の配置が、港内へ侵入する長周期波を減衰させ、港外で長周期波成分が発達しているにも係わらず、港内で荷役障害を発生させていないことを明らかにした。

参考文献

- 伊藤藤行・谷本勝利・木原 力 (1964): 長周期波に対する防波堤の効果に関する計算 (第 2 報), 港研報告, Vol. 3, No. 7, pp. 25-30.
- 運輸省第一港湾建設局 (1994): 日本海における大陸棚セイシュ対策調査報告書, 160 p.
- 運輸省第四港湾建設局 (1987): 志布志港静穏度調査報告書, 95 p.
- 加藤一正・中村聡志・池田直太 (1991): 波の連なりを考慮した長周期波の波高の推定一波崎海洋研究施設における現地観測にもとづく検討一, 港研報告 Vol. 30, No. 1, pp. 137-163.
- 白石 悟・久保雅義・上田 茂・柳原繁樹 (1995): 係留システムに注目した長周期波に対する船舶の動揺抑制対策, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 941-945.
- 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.
- 関本恒浩・清水啄三・窪 泰浩・今井澄雄・島津昌央 (1990): 港湾内外のサーフビートの発生・伝播に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 86-90.
- 高山知司・平石哲也 (1988): 数値計算と現地観測による港内副振動特性の検討, 港湾技研資料, No. 636, 70 p.
- 田端竹千穂・田所篤博・平石哲也・玉城重則 (1995): 港湾における長周期波の増幅現象に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 301-305.
- 永井紀彦・橋本典明・浅井 正 他 5 名 (1994): 現地データに基づく港内係留船舶の動揺に及ぼす港外長周期波, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 931-935.
- 永井紀彦・菅原一晃・清水勝義・橋本典明 (1995): 全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS1993), 港湾技研資料, No. 796, 309 p.
- 橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃 (1993): 海洋波の方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法 (MEP) の拡張, 港研報告, Vol. 32, No. 1, pp. 3-25.
- 松良精三・渥美洋一・菅沼史典・宮本義憲 (1994): 波群に拘束された長周期波の港内における増幅特性と船体動揺に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 71-75.
- Longuet-Higgins M. S. and R. W. Stewart (1962): Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats', J. of Fluid Mechanics, Vol. 13, No. 4, pp. 481-504.
- Sekimoto, T. (1995): Nonlinear effect on the estimation of directional wave spectrum, Proc. of Symposium on Wave Generation, Analysis and Related Problems in Experimental Tanks -especially on directional waves-, pp. 44-59.