

アンケートおよび動揺シミュレーションによる作業船の作業限界条件の分析

Analysis of the Limit Working Conditions of Vessels by Questionnaire and Numerical Simulation of Ship Motions

白石 悟*・石見 剛**・谷口武志***

Satoru Shiraishi, Go Ishimi and Takeshi Taniguchi

Abstract

At coastal areas in Japan, where are sometimes in severe natural environmental conditions such as winds and waves, many marine construction works have been carried out and the schedule of constructions are sometimes affected by sea conditions. To carry out marine construction works smoothly, it is important to understand the limit conditions for marine construction works and to establish countermeasures for safe marine construction works. In this research, the limit conditions of marine construction works are discussed based on the results of questionnaire asking for captains of working vessels and numerical simulations on ship motions in waves and winds.

Keywords: Working vessel, Limit conditions of marine construction works,
Questionnaire, Numerical simulation of ship motions, Ship motions

1. まえがき

沿岸域における港湾および海洋工事は、厳しい自然条件の中で多くの作業船を使用して行っており、その施工工程は常に気象、海象条件に左右される。したがって、作業船の作業限界条件を把握することは、施工計画の策定、施工の可否判定等の実務において非常に重要である。そこで、本研究においては、アンケート調査、および浮体の動揺シミュレーション結果に基づいて作業船の海上作業の限界条件、避難回航の限界条件を検討した¹⁾。

2. アンケートによる作業船の海上作業の限界条件の分析

2. 1 アンケート調査の方法

作業船の作業中止の実態を調査するためアンケートを実施した。

(1) アンケートの内容

アンケートの概要は下記のとおりである。

①調査対象船舶

以下の10船種を調査対象とした。なお、1～10は船種別コードとなる。

1. 起重機船（クレーン台船を含む）、2. グラブ浚渫船、3. 杭打船、4. サンドコンパクション船、
5. サンドドレーン船、6. 深層混合処理船、7. ケーソン製作作業船、8. コンクリートミキサー船、
9. バックホウ船、10. 揚土船

②調査票記載者

アンケート票は（社）日本海上起重技術協会がその会員会社宛に送付した。また送付に際しては、原則として現場の作業状況について最も把握していると考えられる作業船の船長に記載していただくように依頼した。

③作業中止の調査対象期間

アンケートにおいては、実際の作業中止事例に関する質問を行っているが、その対象期間は平成5年4月1日～平成8年9月30日とした。

④アンケートの質問項目

イ. 会社または船団の作業中止基準の有無

ロ. 会社または船団の定める作業中止基準、避難基準の数値

- 1) 風速、2) 波高、3) 視程、4) 降雨量、5) 降雪量、6) 地震（震度）、7) 津波、8) 台風接近時間、
- 9) その他

ハ. 当該作業船の作業限界値（海上作業中、回航中）

- 1) 風速、2) 波高、3) 周期、うねり、4) 視程、5) 降雨量、6) その他

ニ. 作業中止として定めた限界値の他に作業を中止して避難する場合の条件

ホ. 作業中止をする要因の順

* 正会員 運輸省港湾技術研究所構造部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

** 運輸省港湾技術研究所構造部

*** 社団法人日本海上起重技術協会

へ. 作業中止事例（複数回答）

1) 日時, 場所, 2) 中止した際の作業状態（海上作業中, 回航中, その他）, 3) 作業中止時の気象・海象状態（風速, 風向, 波高, 周期, 天候）, 4) 海上作業等の中止要因（風, 波高, 周期, その他）, 5) 中止を判断した際の作業船の状態, 6) 付属船の動揺, 7) 付属船の動揺による作業中止要因, 8) 付属船の船種

(2) アンケートの回収率

アンケートは, 197件の送付数に対して125社から回答があった。回答率は63.5%である。ただし, 複数の船舶から回答があった会社があり, 実際に以下の統計解析に用いた件数は224件である。

2. 2 アンケートの分析結果

アンケートの解析結果を以下に示す。

(1) 回答された船種と船型

図-1は, 回答されたアンケートについて船種別の件数を示している。ただし, 図中のコード番号は前出のとおりであるが, 以下のコード番号を加えている。

11. 多目的船（1. ～10. の複合タイプ）, 12. その他および未記入

アンケートの回答は, 起重機船が133件で最も多く, ついで, サンドコンパクション船の26件が多い。作業限界条件は作業船の種類, 作業工程によっても相違すると思われるが, 起重機船を除いては, 船種ごとの解析を行うほどにはデータのサンプル数が多くないことから, 本報告では船種別の分析は行っていない。

回答があった作業船については, その多くが非自航船（87.1%）であった。自航船と非自航船の違いは, 非自航船の場合は避難時には引船を用いて曳航される点にある。このことから, 今回のアンケート結果の数値は, 全体としては非自航船の作業中止または避難の状況を表しているものと考えられる。

図-2は, 回答があった船舶の排水トン数の分布を示す。排水トン数が1000～3000トンの船が60件で最も多い。ついで, 500～1000トンの船が41件である。500～3000トンは沿岸域で稼働する起重機船の代表的な排水トン数である。

(2) 作業中止基準の有無について

アンケートでは, 作業中止基準として, 会社または船団がどのような規定を持っているかについて質問している。図-3は, 作業中止基準の分類を示す。規定を定めているとする回答は合計で166件で, 特に規定を定めていないとする回答の54件に比べて圧倒的に多い。規定を定めているものにおいては, 会社規定の作業中止基準を持っているのが81件（回答中の36.8%）で最も多く, 船団毎に規定を定めているのが63件（回答中の28.6%）である。規定を定めていないとするものにおいては, その都度の状況判断とするものが52件（回答中の23.6%）で, 全体の約1/4を占めており少なくない。アンケートの回答から, 約75%の船舶は何らかの作業中止基準を定めているが, その都度の状況判断にしたがっている事例も少なくないことがわかる。

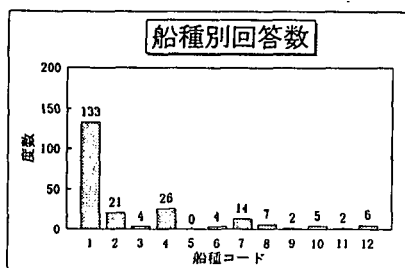


図-1 船種別回答数

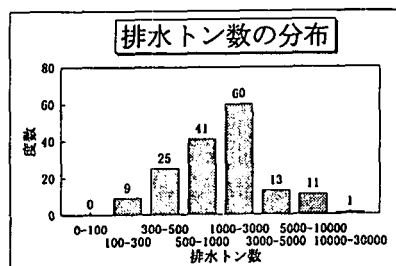


図-2 船舶の排水トン数の分布

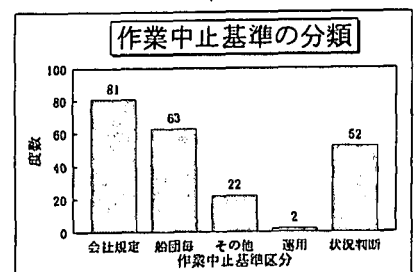


図-3 作業中止基準の分類

(3) 会社または船団の定める作業中止基準

図-4は, 会社または船団の定める作業中止基準として回答された風速（平均風速）を示したものである。作業中止の限界風速を5～10m/sとするものが141件（回答中の74.6%）で最も多い。なお, 5～10m/sの範囲では, 10m/sとする回答が多い。また, 10～15m/sとする回答は45件（回答中の23.8%）である。以上より, 会社または船団が定める作業中止基準の風速としては, 10m/sまたは15m/sとするものが大半を占めることがわかる。

図-5は, 会社または船団の定める作業中止基準として回答された波高（有義波高）を示したものである。作業中止の限界波高を0.5～1.0mとするものが119件（回答中の64.3%）で回答中最も多い。また, 限界波高を1.0～1.5mとするものは, 38件である。会社または船団が定める作業中止基準の波高（有義波高）としては, 1.0mまたは1.5mとするものが大半を占めることがわかる。

表-1は, 会社または船団の定める作業中止基準について各要因ごとの回答値の総数, 要因毎の回答率, 回答値の最頻値および平均値を示したものである。回答率より作業中止基準としては, 風速, 波高, 視程が最も重要な

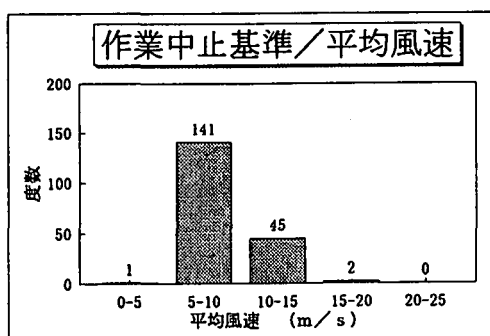


図-4 作業中止基準（平均風速）

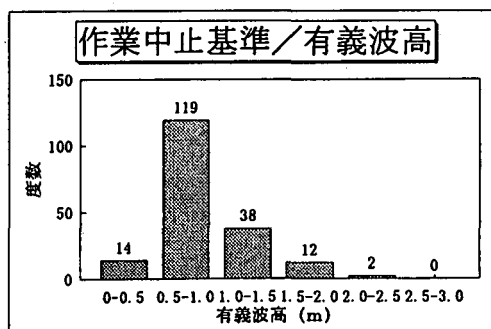


図-5 作業中止基準（有義波高）

要因であり、これについて、台風接近時間が重要であることがわかる。この結果よりアンケートで得られた会社または船団が定める作業中止基準の最頻値は、平均風速10m/s、有義波高1.0m、視程1,000m、台風接近時間24時間前である。

表-1 各要因ごとの回答状況（作業中止基準）

要 因	回答総数	回答率 (%)	最頻値	平均値
風速 (平均風速)	1 8 9	84.4	5～10 m/s	11.0 m/s
波高 (有義波高)	1 8 5	82.6	0.5～1.0 m	1.1 m
視程	1 6 7	74.6	500～1000m	900 m
降雨量	5 8	25.9	～20 mm/hr	31 mm/hr
降雪量	3 8	17.0	～20 cm	18 cm
地震震度	7 5	33.5	3	3.4
台風接近時間	1 2 2	54.5	12～24 hr	29 hr

表-2 各要因ごとの回答状況（避難基準）

要 因	回答総数	回答率 (%)	最頻値	平均値
風速 (平均風速)	1 2 0	53.6	10～15 m/s	14.8 m/s
波高 (有義波高)	1 1 8	52.7	1.5～2.0 m	1.9 m
視程	9 2	41.1	～500m	650 m
降雨量	3 0	13.4	～20 mm/hr	45 mm/hr
降雪量	2 1	9.4	～20 cm	24 cm
地震震度	5 6	25.0	4	3.7
台風接近時間	1 0 7	47.8	12～24 hr	27 hr

表-3 各要因ごとの回答状況（船舶の海上作業の限界値）

要 因	回答総数	回答率 (%)	最頻値	平均値
風速 (平均風速)	2 0 3	90.6	5～10 m/s	11.5 m/s
波高 (有義波高)	1 9 4	86.6	0.5～1.0 m	1.2 m
周期	6 8	30.4	～5.0 s	11.4 s
うねり (波高)	1 2 7	56.7	0.5～1.0 m	1.5 m
視程	1 6 2	72.3	～500m	750 m
降雨量	7 1	31.7	～20 mm	41 mm

表-4 各要因ごとの回答状況（船舶の回航限界値）

要 因	回答総数	回答率 (%)	最頻値	平均値
風速 (平均風速)	1 6 9	75.4	10～15 m/s	12.9 m/s
波高 (有義波高)	1 6 7	74.6	1.5～2.0 m	2.0 m
周期	6 6	29.5	7.5～10.0 s	12.5 s
うねり (波高)	1 1 6	51.8	1.5～2.0 m	2.6 m
視程	1 3 0	58.0	500～1000m	860 m
降雨量	4 9	21.9	40～60 mm	58 mm

（４）会社または船団の定める避難基準

表-2は、会社または船団の定める避難基準について各要因ごとの回答値の総数、要因毎の回答率、回答値の最頻値および平均値を示したものである。回答率より避難基準としても、風速、波高、台風接近時間が最も重要であり、これについて、視程が重要であることがわかる。風速、波高、視程については作業中止基準と比べて回答率がかなり少なくなっているが、台風接近時間については、作業中止基準の回答率とそう大きく変わらない。この結果よりアンケートで得られた避難基準の最頻値は、平均風速15m/s、有義波高2.0m、視程500m、台風接近時間24時間前である。

（５）作業船の海上作業中の作業限界条件

表-3は、個々の作業船の海上作業限界値について各要因ごとの回答値の総数、要因毎の回答率、回答値の最頻値および平均値を示したものである。この結果よりアンケートで得られた作業船の海上作業の限界値は、おおそ平均風速10m/s、有義波高1.0m、視程500m、台風接近時間24時間前である。回答率から風速および波高については海上作業の限界値として極めて重要な要因であり、ついで視程、うねりが重要であることがわかる。

（６）作業船の回航限界条件

表-4は、個々の作業船の回航限界値について、各要因ごとの回答値の総数、要因毎の回答率、回答値の最頻値および平均値を示したものである。この結果よりアンケートで得られた船舶の回航の限界値は、おおそ平均風速15m/s、有義波高2.0m、視程1,000m、台風接近時間24時間前である。回答率から風速および波高が回航の限界値として極めて重要であり、ついで、視程、うねりが重要であることがわかる。

（７）作業中止の要因

作業中止の要因について分析した。これは、作業中止の要因として、各回答者（主として船長）に原因として重要なものから順に複数回答してもらったものを取りまとめたものである。作業中止の要因としては、以下の項目が提示された。

- 波浪（波高、周期、うねり） ○風（風速、風向、強風） ○潮流
- 津波 ○視程 ○雨（降雨、風雪） ○水中透明度
- 気象（気象情報、台風、前線通過、積乱雲）

図-6は、各項目の作業支障要因としての回答数の全アンケート回答数に対する比率を示す。波高の回答比率が最も高く、60%を超える。ついで、風速、視程、うねり、強風の順で回答比率が高かった。表-1で示したように作業中止基準として数値の回答が多かったものは、風速、波高、視程であったが、ここで要因として回答比率の高いものも前記の項目と一致している。

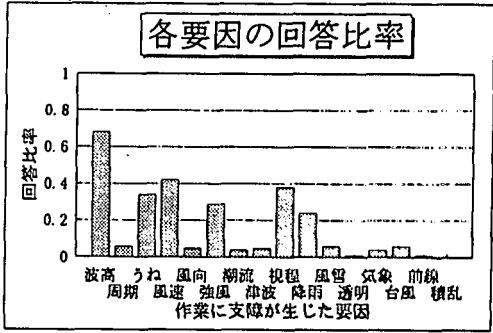


図-6 各要因の回答比率

(8) 実際の作業中止状況について

(3)～(6)では、会社あるいは船団の設定している作業中止基準、避難基準、あるいは、それぞれの作業船において設定されている作業限界条件、回航限界条件についてとりまとめを行ってきた。ここでは、各船舶から報告された実際の作業中止事例について分析する。作業中止事例は、1船あたり複数の回答がなされているものがあるが、ここでは、1船1事例についてのみとりあげて、分析を試みる。

図-7は、作業中止をしたときの風速（平均風速）である。平均風速10～15m/sでの作業中止が70件（回答中の38.5%）で最も多く、ついで、平均風速5～10m/sでの作業中止が61件である。これを図-4に示した会社または船団の定める海上作業の限界風速と比べると、分布がやや強風側にずれていることがわかる。この原因としては、実際の作業においては風速と波高の両者を勘案して作業の継続・中止の判断がなされていること、風速は変動しているので作業船の風速計の表示を読みとった際に平均風速よりも大きな値を読みとっている可能性があること、あるいは、会社または船団の定める作業中止基準における限界値は若干の安全側の余裕を考慮して設定されている可能性があることなどが考えられる。

図-8は、現地で実施に作業中止をしたときの波高の度数分布を示す。有義波高1.0～1.5mでの作業中止が多い。なお、アンケートに際して目視に波高であるか、波高計の観測値によるものであるかについては回答を求めていなかった。しかしながら、波高計が設置されていない海域における回答値も多いことから、回答値の多くは目視によるものと考えられる。

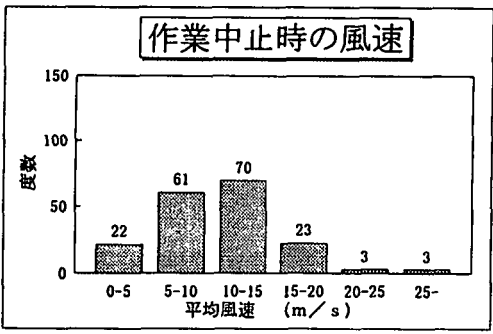


図-7 作業中止時の風速（平均風速）

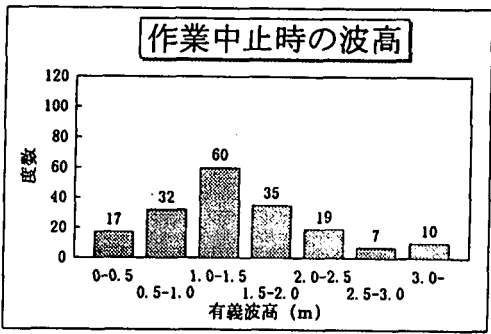


図-8 作業中止時の波高（有義波高）

実際の各作業船における作業中止事例に対しても、海上作業を中止した要因について質問している。その結果を以下に示すが、風速、波高を要因として上げている事例が多いことがわかった。なお、下記の（ ）中はアンケート件数に対する百分率である。また、アンケートでは複数の要因に対して回答がなされているので、全体の総和は100%を超える。

- 風速 97件（43.3%） ○波高 96件（42.9%）
- 周期（うねり） 60件（26.8%） ○その他 16件（7.1%）

また、作業中止を判断した際の作業船の状態を質問しているが、回答は下記のとおりでローリングが大きく作業が困難とするものが多かった。

- ローリングが大きく作業が困難な状態 112件（50.0%）
- 波高が大きく波が舷側に打ちつけていた状態 46件（20.5%）
- 波が甲板を洗う状態 15件（6.7%）
- その他 44件（19.6%）

また、付属船（交通船ほか）が作業中止の要因になっていたかの質問に対しては72件（32.1%）が影響を受けていると回答している。

2. 3 作業限界のまとめ

以上のまとめとして、表-5に、各要因ごとに中央値（50%超過確率値）を示す。表中の－は、その項目は質問されていないことを示す。ただし、数値は丸めて示している。先にも示したように各要因とも回答値にはばらつきが大きかったことから、作業限界値を定めるにあたっては、表-5の数値を参考に海域の気象・海象条件、作業船の作業内容等を考慮してその数値を設定するのがよい。

表-5 回答値のまとめ（中央値）

要因	会社、船団による規定		船舶ごとの作業限界		実際の作業中止
	作業中止基準	避難基準	海上作業	回航	
風速（平均値）	10.0 m/s	15.0 m/s	10.0 m/s	15.0 m/s	12.0 m/s
波高（有義波高）	1.0 m	2.0 m	1.0 m	2.0 m	1.5 m
周期	—	—	7.0 s	10.0 s	6.5 s
うねりの波高	—	—	1.0 m	2.0 m	—
視程	1000 m	500 m	1000 m	1000 m	—
降雨量（注）	20 mm/hr	30 mm/hr	30 mm	50 mm	—
降雪	17.5cm	20 cm	—	—	—
地震震度	3	4	—	—	—
台風接近時間	24 hr	24 hr	—	—	—

注）会社、船団による規定では時間降雨量、船舶ごとの作業限界では1回の降雨量を示す。

3. 動揺シミュレーションによる海上作業の作業限界条件の分析

3. 1 概要

作業船の作業限界条件としては、動揺が作業支障の原因と考えられる作業限界条件、避難回航限界条件、作業場所あるいは避泊場所における係留限界条件などがある。ここでは、作業時および荒天時の起重機船の係留の安全性および係留限界条件を検討する目的で、150 t吊旋回式起重機船について係留時の動揺シミュレーションを行い、起重機船の動揺量および係留索の張力を求めた結果に基づいて考察する。計算の対象とした起重機船は、沿岸域で稼働しているものの中で比較的数量多く存在する諸元のものを選定している。

3. 2 動揺シミュレーションにおける起重機船の諸元等

(1) 起重機船の諸元

計算の対象とした150 t吊起重機船は、長さ（ L ）45.0 m、幅（ B ）18.0 m、型深さ（ D ）3.0 mであり、その満載喫水は2.5 mである。同船の総トン数は1,080 tである。ただし、計算対象の喫水（ d ）は、1.318 mであり、排水量は1062.1 tである。

(2) 起重機船の係留方法および係留系の変位復元力特性

150 t吊起重機船は、図-9に示すように4本の係留索で係留されている。係留索は、直径 $\phi 28\text{mm}$ （6×24フィキ）、長さ150 mのワイヤーロープである。係留索は起重機船の隅角部から船の長軸に対して45°の角度をもって展張され、周辺の海底地盤にアンカリングされているものとした。

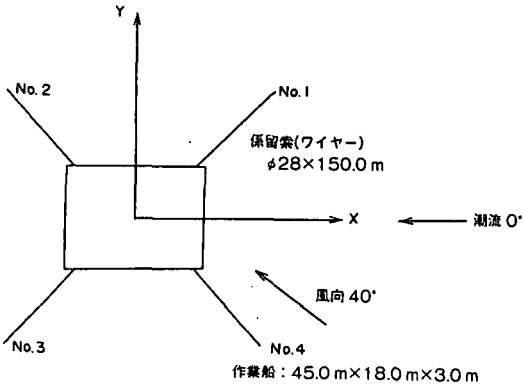


図-9 150t吊起重機船の係留索の配置

3. 3 動揺シミュレーション結果

(1) 動揺シミュレーションにおける流体力係数

起重機船の動揺シミュレーション^{2),3)}において起重機船に作用する波力およびラディエーション流体力（付加質量および減衰係数）の計算は三次元ポテンシャル接続法による計算プログラム⁴⁾を用いて行った。ただし、ローリングの減衰定数については、ポテンシャル接続法による計算値が周期および船型によっても異なるが、 $h = 0.0013$ から 0.0770 の範囲であり小さいことから、これと L/B 、 B/d がほぼ相似な、起重機船の1/50縮尺模型で行った自由振動実験結果⁵⁾（ローリングの減衰定数は、 $h = 0.157$ ）を参考にした。また、起重機船が浅喫水であることから、スウェイに対する付加質量、減衰係数についても修正している²⁾。

(2) 計算結果

図-10(1)～(3)は、横軸に有義波高、縦軸にこの条件で張力が大きくなる風上側の係留索No.3の最大張力を示したものである。この図から係留索の張力からみた係留限界波高が読みとれる。波向0°および45°で、平均風速が20 m/sの場合には、波周期8 sについて、おおむね有義波高1.5 mが係留索の許容張力からみた係留限界波高と思われる。

る。ただし、波周期10sおよび15sについて、係留限界波高は1.0m以下になる。これらの限界条件は、2.で示した作業船の作業限界条件ともおおむね近い値を示している。作業限界条件は作業船の動揺のため作業の継続が困難となることも一つの大きな要因であるが、風速・波高が大きくなるときには、係留中の動揺による係留索の発生張力が大きくなることも制約条件となることがわかる。とくに、作業中止を決定した後の避泊海域における係留においては、係留索に発生する張力について配慮することが必要である。

波向90°では、波周期8s、10sにおいて係留限界波高は1.0m程度と思われる。また、波周期15sにおいては1.0m以下である。波向90°では、係留限界波高が波向0°および45°の場合に比べて小さくなることから、起重機船等の作業船が、作業海域の周辺の海域において避泊係留する際には、できる限り横波(波向90°)を受けない形で係留するのが望ましい。なお、ここで示した計算結果は、平均風速20m/sの場合であるので、平均風速がこれより小さい場合には、係留限界波高はこれよりもやや大きくなるものと思われる。作業船の避泊係留の実施については、海域の風速、波高のみならず、当該海域における波向および波周期の情報に十分留意して判断することが望ましいと言える。

4. 結論

(1) 作業船の船長を対象に海上作業および避難等の条件に関するアンケート調査を行い、その結果をとりまとめた。ただし、本報告でも示したように回答値にはばらつきが大きかったことから、現場の気象・海象条件、個々の作業船の動揺特性、作業の内容・実態を把握した上で適切に作業限界条件を定めることが望ましい。

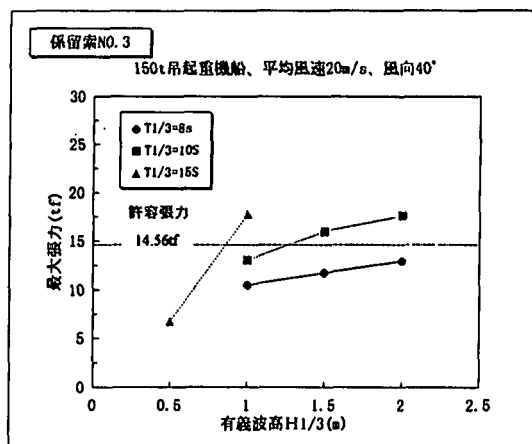
(2) 150t吊旋回式起重機船について、荒天時の波浪条件を変えて動揺シミュレーションを行い、有義波高と係留索の張力の関係について計算結果を示した。計算結果によれば、平均風速が20m/sにおいては、波向0°、45°で波周期8sにおいては有義波高1.5mが、波周期10s、15sにおいては有義波高1.0mが係留限界条件である。また波向90°では、さらに係留限界条件が低下する。このことから、作業船の荒天時の係留については、当該海域の風速・波高の他、波向・波周期にも十分に配慮する必要がある。

5. あとがき

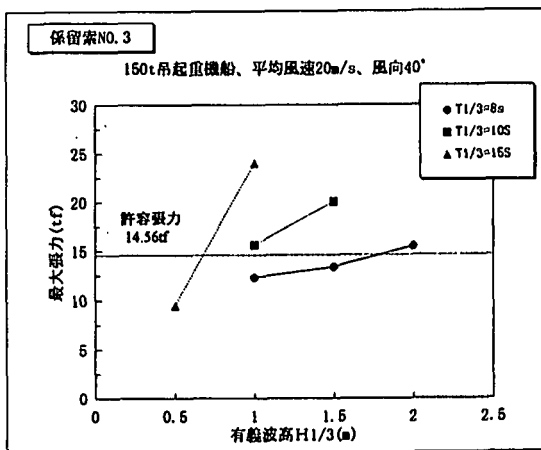
本報告は平成2年度～8年度にかけて実施した調査成果の一部をとりまとめたものである。調査の実施においては、(社)日本海上起重技術協会に設置された「海上起重作業の作業限界および避難指針検討調査委員会」の委員各位より熱心なご議論をいただいた。外洋に面した港湾においては厳しい気象・海象条件の下で作業が実施されており、本調査成果は海上作業の作業工程計画、作業安全管理等の面で参考になると考えられる。最後に、厳しい気象・海象条件の下で実施されている海上作業の安全を願い結語とした。

参考文献

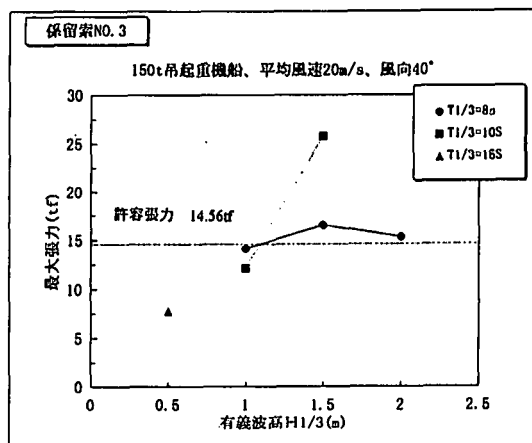
- 1) 白石悟、石見剛：アンケートおよび動揺シミュレーションによる作業船の海上作業限界条件に関する検討、港湾技研資料、No.898, 1998.3, 78p.
- 2) 上田茂、白石悟：係留船舶の動揺計算法とその評価、港湾技術研究所報告、第22巻第4号, 1983.12, pp.181～218
- 3) 上田茂、樋口豊志：起重機船の動揺特性と稼働条件、港湾技研資料、No709, 1991.6, 92p.
- 4) 上田茂、白石悟：大型矩型浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究(第2報)－数値シミュレーション手法について－、港湾技術研究所報告、第19巻第3号, 1980.9, pp.105～143
- 5) 3) 資料p.29



(1) 波向0°



(2) 波向45°



(3) 波向90°

図-10 有義波高と最大張力の関係