

バラ荷貨物の岸壁上載荷重の設計値 に関する研究

DESIGN VALUES OF SURCHARGE FOR BULK CARGO BASED ON FIELD OBSERVATION

森屋陽一¹・長尾毅²

Yoichi MORIYA and Takashi NAGAO

¹ 正会員 工博 五洋建設(株)技術研究所(〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町1534-1)

² 正会員 工博 国土技術政策総合研究所 港湾研究部(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

In the design of port structures, it is important to decide loads rationally. When designing port structures by the reliability-based design method, it is necessary to evaluate probability distributions of loads. In this research, we focused on the surcharge by bulk cargos on a quaywall. Field observation about the surcharge was performed at the berth for bulk cargos of the Kisarazu port in Japan. The observation using two digital video cameras was conducted. An analysis was performed based on the video image and the data offered from some harbor transport companies. The probability distribution of surcharge was evaluated. It was found that the design value of surcharge by bulk cargo was 24.6kN/m^2 as dominating load and 34.4kN/m^2 as non-dominating load according to ISO2394. On the other hand, the design value was 37kN/m^2 as dominating load by the reliability analysis. The difference in the design value is derived from the difference in sensitivity factors and target reliability indices.

Key Words : Design value, surcharge, bulk cargo, field observation

1. はじめに

構造物の信頼性に関する一般原則を記述した国際規格であるISO2394¹⁾では、設計照査法として部分係数法を採用しており、部分係数に荷重の確率特性が反映されている。しかしながら、現在の日本の港湾構造物の設計法は、安全率に基づく方法あるいは許容応力度法が採用されており、すべての荷重が合理的に決められているわけではない。今後、国際規格との整合性を考慮し、部分係数法により港湾構造物を設計していくためには、荷重の確率特性を考慮して合理的に設計値を決める必要がある。

現在、日本における港湾構造物の設計において、係留施設に作用する上載荷重は常時 $10\sim 30\text{kN/m}^2$ としているが²⁾、これらの値は経験的に決められたものであり明確な根拠がない。

これまで、港湾の施設における上載荷重の実態調査は、ほとんど行われていない。唯一、遠藤ら(1977)が過去の上載荷重の設定値の調査やメモーションカメラなどを用いて横浜港、名古屋港、神戸港、小松島港において現地調査を実施し、上載

荷重の設定値の妥当性を検討している³⁾。遠藤らによると、当時の設計では、大型係船岸で常時 $20\sim 30\text{kN/m}^2$ ($2\sim 3\text{tf/m}^2$)、小型係船岸で常時 $10\sim 20\text{kN/m}^2$ ($1\sim 2\text{tf/m}^2$)、地震時は常時の1/2とする例が多く、調査の結果、当時の設定値は十分安全側であると結論付けている。しかしながら、遠藤らの検討では、上載荷重の確率特性の検討が不十分であり、前述した国際規格との整合を図っていくためには、上載荷重の確率特性を評価する必要がある。

そこで、著者らは2000年に雑貨貨物を対象として、現地調査を実施し、上載荷重の従う確率分布を評価するとともに、確率論に基づいた方法であるISO2394に示されている方法に従って、上載荷重の設計値の推定を試みた⁴⁾。本研究では、バラ荷(砂および砂利)貨物を対象として、上載荷重の現地調査を実施し、バラ荷貨物の上載荷重の確率分布を評価し、評価した確率分布に基づいてISO2394に従い上載荷重の設計値の評価を試みるとともに、係留施設の中で上載荷重の影響が最も大きいと考えられる棧橋の杭の支持力破壊を例として、信頼性解析(FORM)を実施し、ISO2394に示されている方法の妥当性を検証した。

2. 現地観測

(1) 観測期間・場所

エプロン上に積荷されるバラ荷貨物の上載荷重の経時変化を評価するために、2001年10月16日～2001年12月26日の約2ヶ月間、木更津港において現地調査を行った。木更津港はバラ荷の取扱量が全国トップである³⁾。木更津港の中でバラ荷を取り扱っている公共バスであり、バス利用頻度が高く、観測におけるカメラの電源や設置場所などが確保できる木更津埠頭FバースのうちGバースに隣接した地点において観測を行った。

木更津埠頭Fバースは、年間の貨物取扱量が約33.5万トンであり、表-1に示すように月に平均して48隻程度の船が着岸し、その内の24隻程度の船が荷役を行っている。観測を実施した10月～12月は、荷役を行っている船舶隻数は年平均に比べて多い。

また、バース長130m、バース幅20m、水深-7.5m、天端高+3.6mの控え杭式鋼管矢板構造で、上載荷重の設計値は常時30kN/m²、地震時15kN/m²である。

対象バースは、砕石および砕砂の荷揚げ専用であるが、管理者が許可した場合は、この限りではない。管理者ではエプロン上への積載はあくまでも短時間

の仮置きを原則とし、長時間の放置を禁止するとともに、積載高さを運用上4m以下に制限している。

(2) 観測方法

エプロン上のバラ荷貨物に関するビデオ観測および参考資料の収集を行った。バース上のバラ荷貨物のビデオ観測には、2台のデジタルビデオカメラを使用した。1台(カメラA)はエプロン背後の休憩所横の電柱の高さ4.0mの地点に取り付け、もう1台(カメラB)は防砂ネットの支柱の高さ3.7mの地点に取り付けた。ビデオカメラの設置位置と撮影範囲を図-1に示す。ビデオ観測システムは、著者らが雑貨貨物を対象に調査を行ったときと同じである⁴⁾。

ビデオカメラによる撮影は、船舶が着岸してからエプロン上での作業が終了するまでとし、その間5分間隔で撮影を行った。

解析に用いるバラ荷の単位体積重量は、実測結果およびヒアリング結果をもとに決定した。砕砂および砕石の単位体積重量の実測結果は15.5～15.9kN/m³であり、船の積載計算に使われている単位体積重量は15.7kN/m³(1.6tf/m³)である。よって、解析に用いる砕砂および砕石の単位体積重量は15.7kN/m³とした。

表-1 対象バースの月別船舶着岸実績(2001年)

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均	計
揚荷	16	31	5	24	14	19	14	15	19	25	22	26	19.2	230
積荷	6	21		1	1	5	2	1	2	5	9	5	4.8	58
係留	36	2	1	22	33	23	19	7	20	52	41	37	24.4	293
計	58	54	6	47	48	47	35	23	41	82	72	68	48.4	581

単位：隻

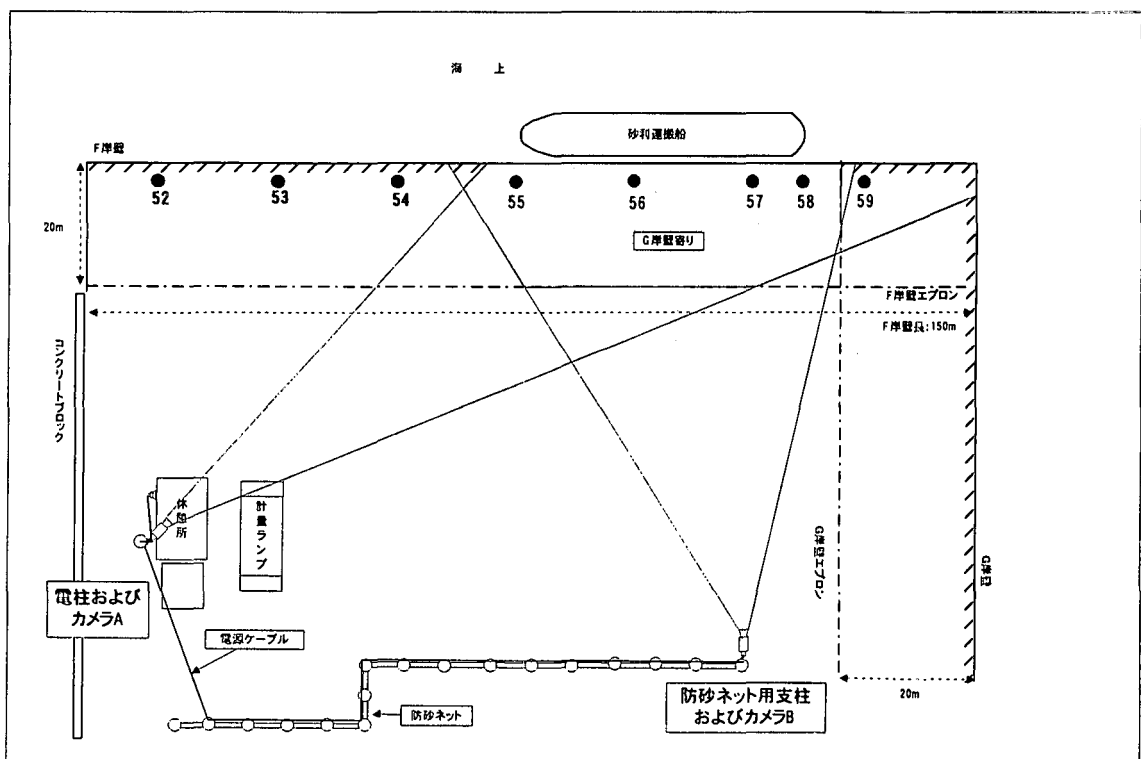


図-1 ビデオカメラの設置位置と撮影範囲

(3) 観測期間中の状況

観測期間中、対象バースでは30隻の船が着岸し荷役を行った。対象バースはほとんど揚荷に使用されており、エプロン上に直接バラ荷を積載する荷役形態（土場切り）をとった船は8隻、他の22隻の船はバラ荷をダンプに直接積載する荷役形態（ダンプ取り）をとった。

土場切りの場合には、船舶上のクレーン（6～9トン/回）を使用し、エプロン上に積み上げられたバラ荷はホイールローダーによりダンプ積みされる。土場切りの場合の特徴は、係留時間は30分～3時間と短い、エプロン上にバラ荷が積載されている時間は6～8時間と長い。ダンプ取りの場合は係留時間とエプロン上での作業時間とはほぼ等しく、エプロン上での作業時間は荷揚げ量が1500トンの場合で約3時間、2000トンの場合で約4時間であった。

また、土場切りの場合には、エプロン幅（20m）全域が使用されるが、ダンプ取りの場合には陸上クレーンを船舶ハッチの前後部横のエプロン上に固定し、クレーン間にダンプを停止させ積載するため、荷役には海側の10m程度が使用され、他は通路路として使用されていた。

3. 現地観測結果の解析

(1) 上載荷重の経時変化

まず、観測結果の解析手法について述べる。

土場切りの場合は、対象バースのエプロン上の47m×20mの領域を対象に、2台のビデオカメラによる画像から、積載されているバラ荷の等高線を作成する。エプロン上の解析対象領域を1m×1mの格子（940領域）に分割し、この格子内の平均高さにバラ荷の単位体積重量を乗じることで、バラ荷の重量分布図を算定する。観測結果の上載荷重は、エプロン上に積載されたバラ荷の重量を全接地面積で除すことにより、接地面積あたりの荷重（圧力）として整理した。

ダンプ取りの場合は、対象船のクレーンの回転時間毎にダンプにバラ荷が積載され、ダンプの最大積載重量に達したら、揚げ荷を中断しダンプはエプロンを離れる。そして、次のダンプがエプロンに入り、揚げ荷が再開され、その繰り返しとなる。ダンプは、常に同じ位置に停止する。よって、ダンプ取りの場合の上載荷重の評価は、ダンプ自重にダンプの積載荷重を加えダンプの接地面積で除したものを1ダンプ分の上載荷重データとし、これをダンプの積載回数（揚げ荷総重量/ダンプ最大積載重量）分継続することで評価した。

本研究では、係留施設の全体安定性の検討に用いる上載荷重を対象としており、エプロンの設計に影響する局所的な上載荷重や移動中のダンプトラックなどの活荷重については、調査対象外とした。

ビデオカメラによる画像の撮影時間間隔は5分であるが、経時変化の評価においては、線形補完する

ことによりデータの時間間隔は1分とした。

図-2および図-3に土場切りとダンプ取りによる上載荷重の経時変化の例を示す。土場切りとダンプ取りで荷重特性が異なるので、以降の解析では、荷役形態が土場切りの場合とダンプ取りの場合を別々に解析した。

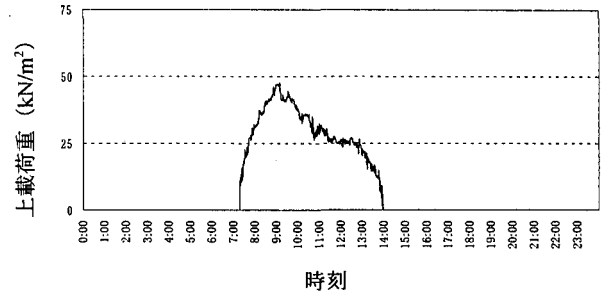


図-2 上載荷重の経時変化の例（2001年10月29日、土場切り）

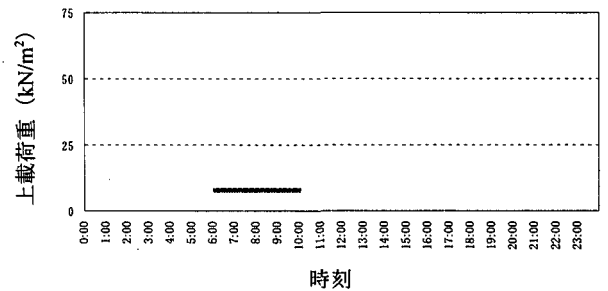


図-3 上載荷重の経時変化の例（2001年11月1日ダンプ取り）

(2) 上載荷重の空間分布

図-4は土場切りの場合の各領域の荷重の全観測期間における時間平均値を示したものである。

土場切りの場合は、エプロン上のほとんどの範囲に荷重が分布し、法線直角（横）方向の最大荷重が出現する位置は海より約14mの地点である。ダンプ取りの場合は、海側の約7m程度にしか荷重は作用していなかった。

(3) 上載荷重の確率密度

図-2および図-3に例として示した上載荷重の経時変化は、観測期間分評価される。その経時変化により上載荷重の確率を評価する。

図-5は土場切りの場合の上載荷重の確率密度を示す。土場切りの場合の上載荷重の確率密度の分布形状のピークは20.0～25.0kN/m²であり、変動係数0.4程度のばらつきを持った分布形状を示す。

図-6はダンプ取りの場合の上載荷重の確率密度を示す。ダンプ取りの場合は、ダンプトラックが何も積載せずに、エプロン上に停車している場合が、上載荷重の最小値として存在する。また、上載荷重の確率密度は、そのほとんどが6.0～9.0kN/m²であり、土場切りに比べて上載荷重のばらつきは小さい。

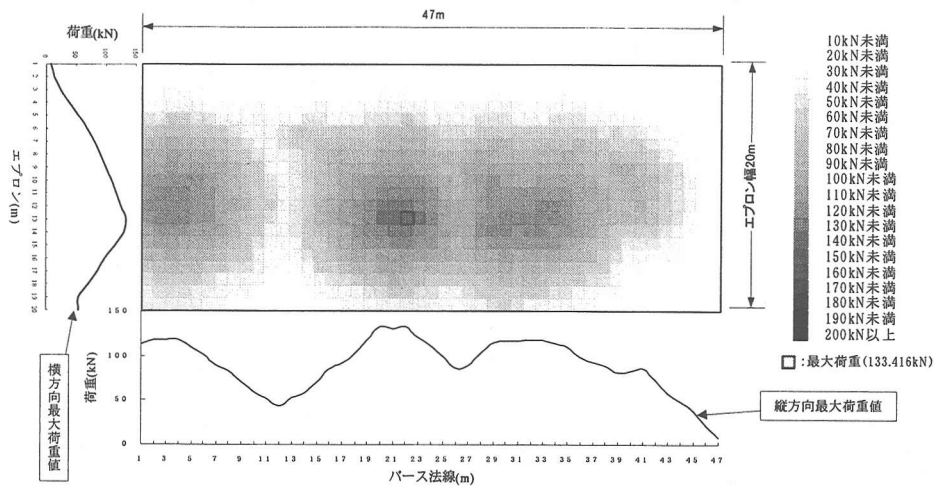


図-4 単位時間あたりの上乗荷重の空間分布図（土場切り）

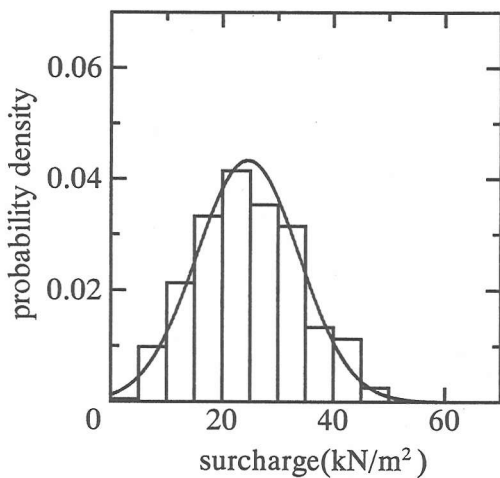


図-5 上乗荷重の確率密度（土場切り）

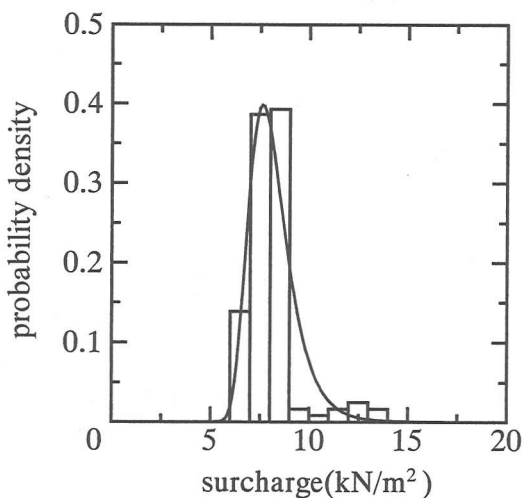


図-6 上乗荷重の確率密度（ダンプ取り）

次いで、評価した上乗荷重に対して確率分布のあてはめを行った。確率分布のあてはめは、合田

（1990）に従い、最小自乗法により行った⁶⁾。あてはめを試みた分布型は、正規分布、対数正規分布、グンベル分布、ワイブル分布である。図中の実線は、評価した上乗荷重に確率分布をあてはめた結果、最も相関の高かった分布型である。土場切りの場合は、正規分布、ダンプ取りの場合は、グンベル分布が最適な分布となった。表-2にあてはめた分布型の平均と標準偏差を示す。

表-2 分布型のあてはめ結果

荷役形態	分布型	平均 (kN/m ²)	標準偏差 (kN/m ²)	R ²
土場切り	正規	24.599	9.217	0.989
ダンプ取り	グンベル	7.617	0.924	0.889

土場切りとダンプ取りを比べると、土場切りの場合の上乗荷重の確率分布は、ダンプ取りの場合に比べて平均値が大きいだけでなくばらつきも大きい。土場切りの上乗荷重を用いた方が大きな設計荷重となるので、以降の検討は土場切りの結果を用いて行う。

4. ISO2394に従った設計値の評価

ISO2394による常時の荷重の設計値の評価方法を以下に示す¹⁾。

常時の荷重はその特性値 Q_d に荷重係数 γ_Q （荷重に対する部分係数）を乗じることにより、設計値になる。常時の荷重の設計値 Q_d は、

$$Q_d = \gamma_Q Q_k = F_Q^{-1} \{ \Phi(\alpha \cdot \beta) \} \quad (1)$$

である。特性値を（例えば平均値と）設定すれば、(1)式より荷重係数を決定することができる。ここで、 F_Q は荷重が従う確率分布、 Φ は標準正規分布関数、 α は感度係数、 β は安全性指標である。感度

係数は、その荷重の構造物への影響度合いを表す係数であり、FORMなどの信頼性解析により評価することができる。しかしながら、上載荷重の感度係数は、岸壁の構造形式などにより値が異なるため、ISO2394およびEurocode 1⁷⁾では標準値を示している。主たる荷重に対する感度係数の標準値は-0.7、従たる荷重に対する感度係数の標準値は-0.28である。ただし、対象とする荷重が主たる荷重か従たる荷重かは、設計者などが判断する必要がある。また、構造物の安全性の目標値となる目標安全性指標 β は、破壊確率を 10^{-4} 程度に想定し、その標準値は3.8である。よって、ISO2394の標準値を用いた場合の常時の荷重の設計値は、 $\alpha=-0.7$ の場合、

$$Q_d = F_Q^{-1}(0.9961) \quad (2)$$

$\alpha=-0.28$ の場合、

$$Q_d = F_Q^{-1}(0.9503) \quad (3)$$

となる。

上述の考えに基づいて評価した土場切りに対する上載荷重の平均値と設計値を表-3に示す。現在の日本の港湾構造物の設計では上載荷重の設定値は $10 \sim 30 \text{ kN/m}^2$ としているが、今回の観測結果を用いてISO2394に従って設計値を求めると、上載荷重を主たる荷重と考えた場合 49.1 kN/m^2 であり、従たる荷重と考えても 34.4 kN/m^2 であるので、現在日本の港湾構造物の設計で用いている設定値に比べて大きくなる。

表-3 上載荷重の平均値と常時の設計値（土場切り）

平均値	設計値（主たる荷重）	設計値（従たる荷重）
24.6 kN/m^2	49.1 kN/m^2	34.4 kN/m^2

5. 信頼性解析による設計値の評価

ISO2394に示された上述の標準値の妥当性の検証のため、係留施設の中で上載荷重の影響が最も大きいと考えられる栈橋の杭の支持力破壊を例として、信頼性解析により安全性指標および感度係数を評価し、上載荷重の設計値の評価を行った。本研究における解析では一次信頼性法（FORM）を用い、1次ガウス近似法により破壊点を収束計算によって求めるHasofer-Lindタイプの安全性指標⁸⁾を算出する。安全性指標の算出方法については、星谷・石井（1986）やHaldar and Mahadevan（2000）が参考となる^{9), 10)}。なお、本研究においてFORMの計算には、RCP GmbH社製のプログラムCOMRELを用いた。

栈橋の支持力破壊に対する性能関数は、

$$B = \eta_1 30NA_p + \eta_2 2\bar{N}A_s - d - q \quad (4)$$

である。ここで、 η_1 は先端支持力の算定精度を表すパラメタ、 η_2 は周面摩擦力の算定精度を表すパラメタ、 N は杭先端地盤の N 値、 \bar{N} は杭根入れ全長に対する平均 N 値、 A_p は杭の先端面積、 A_s は杭周の全表面積、 d は床版自重、 q は上載荷重である。

確率変動する設計変数は、上載荷重、床版自重、先端支持力算定精度、周面摩擦力算定精度とし、上載荷重の確率分布は観測結果を用い、それ以外の変数の確率分布は、既往の研究成果^{11), 12)}を参照し、表-4の通りとした。ここで、平均値のズレとは各変数の平均値と従来の設計で用いられる設定値（公称値）の比により定義される値である。

設計条件としては、杭先端部の N 値は50、杭周囲の N 値は10とし、杭一本の床版の分担面積は $5\text{m} \times 5\text{m}$ 、杭径は0.5m、床版の単位面積当たりの自重は 20 kN/m^2 とした。

表-4 設計変数の確率分布

	平均値のズレ	変動係数
上載荷重	1.0	0.4
鉄筋コンクリートの単位体積重量	0.98	0.02
先端支持力の算定精度を表すパラメタ η_1	0.93	0.2
周面摩擦力の算定精度を表すパラメタ η_2	1.6	0.35

港湾の技術基準に従い栈橋の杭の支持力破壊に対する安全率を2.5とし、上載荷重を 30 kN/m^2 として必要杭長を求めると 5.72m となる。この杭長に対して信頼性解析を行った結果、安全性指標 β は3.2、感度係数 α は-0.38となった。部分係数法では、設計値 X_d は(5)式により求められる。

$$X_d = (1 - \alpha\beta V)\mu \quad (5)$$

ここで、 μ は平均値、 V は変動係数である。(5)式に従って求めた上載荷重の設計値は 37 kN/m^2 となった。

信頼性解析結果の設計値は、平均値 30 kN/m^2 、変動係数0.4に対して従たる荷重に対する標準値（ $\beta=3.8$ 、 $\alpha=-0.28$ ）を用いて算定した設計値 42.8 kN/m^2 より小さい値となる。これは、ISO2394の感度係数と安全性指標の標準値が信頼性解析結果と異なるためである。

本研究で対象とした栈橋の支持力破壊の例では、作用は上床版自重と上載荷重であり、検討した条件では上床版自重の平均値は 20 kN/m^2 であるのに対して上載荷重の平均値は 30 kN/m^2 であり、上載荷重が一番大きな作用である。感度係数はその荷重の構造物への影響度合いを表すものであるため、最も大きな作用であれば、その感度係数は主たる荷重に対する標準値に対応すると予想される。しかしながら、感度係数は主たる荷重に対する標準値よりも小さい値となった。また、信頼性解析の結果の安全性指標

は3.2となり、ISO2394の標準値3.8より小さくなった。港湾構造物を考えた場合、研究が行われているケーソン式防波堤では、既存の防波堤の安全性指標の平均値は2.4であり、ISO2394の標準値よりもかなり小さい¹¹⁾。ISO2394は建築物も対象に考えており、建築物の崩壊は直接人命に関わるため、安全性指標の標準値は一般の港湾構造物に対して大きめに設定されているものと考えられる。

以上より、港湾構造物に対してISO2394の標準値を用いて設計値を決めることは、精度上問題があり、設計値を精度よく評価するためには、信頼性解析を行い、感度係数と安全性指標を合理的に決める必要があると考えられる。

ただし、ISO2394の標準値を用いて算定した上載荷重の設計値は、上載荷重を過大に見積もっているものの、安全性指標や感度係数等を考慮した上であれば、概算値として設計に用いることができると考えられる。

6. おわりに

本研究では、バラ荷（砂および砂利）貨物を対象として上載荷重の現地調査を実施し、バラ荷貨物の上載荷重の確率分布を評価し、評価した確率分布に基づいてISO2394に従い上載荷重の設計値の評価を試みた。また、係留施設の中で上載荷重の影響が最も大きいと考えられる棧橋の杭の支持力破壊を例として、信頼性解析（FORM）を実施し、ISO2394に示されている方法の妥当性を検証した。得られた結論は、以下である。

① 観測の結果、バラ荷貨物の上載荷重は、土場切りの場合平均 24.6kN/m^2 、標準偏差 9.2kN/m^2 の正規分布になり、ダンプ取りの場合平均 7.6kN/m^2 、標準偏差 0.9kN/m^2 のグンペル分布になった。

② ISO2394に従うと、バラ荷の上載荷重の設計値は、主たる荷重と考えた場合 49.1kN/m^2 となり、従たる荷重と考えた場合 34.4kN/m^2 となった。また、棧橋の杭の支持力破壊を例として、信頼性解析（FORM）を実施した結果、設計値は 37kN/m^2 となった。

③ 港湾構造物に対してISO2394の標準値を用いて設計値を決めることは、精度上問題があり、設計値を精度よく評価するためには、信頼性解析を行い、感度係数と安全性指標を合理的に決める必要がある。

本研究は一つのバースでの観測結果に基づいているため、結果の汎用性については疑問が残る。しか

しながら、観測を行った木更津港はバラ荷の取扱量が全国トップであり、観測を行ったバースは、木更津港の中で利用頻度が高い公共バースである。また、観測を行った期間の荷役船舶隻数は年平均に比べて多い。よって、本研究は大きな荷重レベルに対する観測結果に基づいており、本研究結果を係留施設の信頼性設計に適用することには十分妥当性があると考えられる。

最後に、本研究の実施に当たり、国土技術政策総合研究所の山本修司氏に有益な意見を多数いただいた。現地観測においては、千葉県土木部港湾整備課および木更津港港湾事務所の関係者に協力していただいた。また、現地観測およびデータの解析において、（株）日本海洋科学の津金正典氏をはじめ多くの方に協力していただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) ISO : ISO2394, General principles on reliability for structures, 1998.
- 2) 国土交通省港湾局監修：港湾の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，1999.
- 3) 遠藤博・笹田彰・石塚修次：係船岸の上載荷重調査，港湾技研資料，No.268，1977.
- 4) 森屋陽一・山本修司：雑貨貨物の岸壁上載荷重の設計値に関する研究，海洋開発論文集，第18巻，pp.683-688，2002.
- 5) 国土交通省総合政策局：港湾統計（年報）平成8年，1996
- 6) 合田良賢：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，1990.
- 7) JCSS : Background documentation Eurocode 1 (ENV1991) Part 1, Basis of Design, 1996.
- 8) Hasofer, A. M. and N. C. Lind : Exact and Invariant Second Moment Code Format, Journal of the Engineering Division, ASCE, Vol.100, No.EM1, pp.111-121, 1974.
- 9) 星谷勝・石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986.
- 10) Haldar, A. and S. Mahadevan : Probability, Reliability and Statistical Method in Engineering Design, John Wiley & Sons Inc., 1999.
- 11) 長尾毅：ケーソン式防波堤の外的安定に関する信頼性設計の提案，土木学会論文集，No.689/I-57，pp.173-182，2001.
- 12) 森屋陽一・長尾毅：係留施設の信頼性設計における地震時上載荷重，海洋開発論文集，第19巻，2003（掲載予定）。