

# 雑貨貨物の岸壁上載荷重の設計値に関する研究

## DESIGN VALUES OF SURCHARGE FOR GENERAL CARGO BASED ON FIELD OBSERVATION

森屋陽一<sup>1</sup>・山本修司<sup>1</sup>

Yoichi MORIYA and Shuji YAMAMOTO

<sup>1</sup> 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 actions rationally. When designing port structures by the reliability design method corresponding to international standards, it is necessary to evaluate probability distributions of actions. Moreover, in order to determine rationally the partial factors used for the partial factor method, the probability distribution of actions is required.

In this research, we took the focus to the surcharge by cargos on a quaywall. Field observation about the surcharge was performed in the berth for general cargos of the Yokohama port in Japan. The observation using a digital video camera was conducted. Analysis was performed based on the video image and the cargo size and weight data offered from some ship companies. The probability distribution of surcharge was evaluated. The design values of surcharge at normal time and earthquake time were estimated using by the probability distribution.

*Key Words* : design value, surcharge, general cargo, field observation, partial factor

### 1. はじめに

港湾構造物の設計において、合理的に荷重を決定することは重要である。合理的に荷重を決定するためには、荷重の確率変動を考慮することが必要である。国際規格 (ISO2394) では、設計の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いる。また、設計に用いる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、荷重の確率分布を用いて部分係数や組み合わせ係数を算定し、合理的に荷重の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は、岸壁の上載荷重の設計値は、常時 $10\sim 30\text{kN/m}^2$ 、地震時は常時の $1/2$ としている<sup>1)</sup>。しかしながら、 $10\sim 30\text{kN/m}^2$ という値は経験的に決められたものであり、地震時は常時の $1/2$ にするというのも明確な根拠がない。

本研究では、従来、経験的に決められた値を用いて設計を行っている岸壁上に作用する雑貨貨物の上

載荷重を検討対象とした。そして、横浜港の山下埠頭7号バースにおいて上載荷重に関するビデオ観測と資料収集を行い、その結果を整理することにより上載荷重の経時変化を評価し確率分布関数の算定を行った。また、算定した確率分布関数から、部分係数や組み合わせ係数を算定し、常時および地震時の上載荷重の設計値の評価を行った。

設計法の国際整合性を考えた場合、対象となる国際規格はISO2394である。しかしながら、構造物の設計法においては、ウィーン協定によりEurocodesが国際規格の原案になることが定められている。よって、本研究では、ISO2394のみならずEurocode1も参照して設計値の評価を行った。ISO2394およびEurocode1は、設計法として部分係数法を採用している。以下に、ISO2394およびEurocode1による常時および地震時の荷重の設計値の評価方法を示す<sup>2), 3)</sup>。

常時の荷重はその特性値に荷重係数 (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、

$$Q_d = \gamma_Q Q_k \quad (1)$$

と表される。ここで、 $\gamma_Q$ は荷重係数、 $Q_k$ は荷重の特性値である。上載荷重は変動荷重であるため、その特性値は、対象とする構造物の供用期間を50年であると考えると、変動分 (非ゼロ) のデータに対す

る確率分布の98%フラクタル値をとる。つまり、

$$Q_k = F_Q^{-1}(0.98) \quad (2)$$

である。ここで、 $F_Q$ は非ゼロの荷重のデータに対する確率分布関数であり、上付の-1はその逆関数であることを意味する。

荷重係数は、

$$\gamma_Q = F_Q^{-1}\{\phi(\alpha \cdot \beta)\} / Q_k \quad (3)$$

である。ここで、 $\phi$ は正規確率分布関数、 $\alpha$ は感度係数である。感度係数は、その荷重の構造物への影響度合いであり、FORMなどの信頼性解析により評価することができる<sup>2)</sup>。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、ここではISO2394およびEurocode 1に示されている標準値を用いる。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、 $\beta$ は構造物の目標信頼性指標であり、破壊確率を $10^{-4}$ 程度に想定した場合の標準値は3.8となる。(3)式に(2)式および $\alpha$ 、 $\beta$ の標準値を代入すると、 $\alpha=-0.7$ の場合、

$$\gamma_Q = F_Q^{-1}(0.9961) / F_Q^{-1}(0.98) \quad (4)$$

$\alpha=-0.28$ の場合、

$$\gamma_Q = F_Q^{-1}(0.9503) / F_Q^{-1}(0.98) \quad (5)$$

となる。

地震時の荷重の設計値 $Q_{Ed}$ は、

$$Q_{Ed} = \Psi_2 Q_k \quad (6)$$

と表される。ここで、 $\Psi_2$ は準永続値に対する組み合わせ係数である。

組み合わせ係数は、

$$\Psi_2 = F_Q^{-1}(1-\eta/q) / Q_k \quad (7)$$

により算定できる。ここで、 $q$ は荷重が非ゼロである確率、 $\eta$ は全時間に対して荷重が $Q_{Ed}$ を越えている時間の割合である。準永続値の場合、 $\eta$ は0.5である。

## 2. 現地観測

### (1) 観測期間・場所

エプロン上に載荷される上載荷重の経時変化を評価するために、2000年9月18日～2000年11月20日の約2ヶ月間、横浜港において現地観測を行った。本研究では、雑貨貨物を対象にしたので、横浜港の中で雑貨貨物の取扱量が多く、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山下埠頭7号岸壁において観測を行った。

横浜港の山下埠頭7号岸壁は、重機を主要取り扱い貨物としており、年間の貨物取扱量が約12万トン、月に平均して5隻程度の貨物船が着岸する。また、バース長180m、バース幅20m、水深-11.2m、岸壁天端高+3.5mの直杭式栈橋構造で、上載荷重の設計値

は常時20kN/m<sup>2</sup>、地震時10kN/m<sup>2</sup>である。

### (2) 観測方法

現地調査は、バース上の貨物のビデオ観測および参考資料の収集により行った。バース上の貨物のビデオ観測には、デジタルビデオカメラを使用した。ビデオカメラに遠隔操作および画像転送機器を接続し、携帯電話を経由して、他所のパソコンにてビデオカメラの操作および撮影した静止画像の受信を行った。図-1は、観測システムの構成の模式図である。ビデオカメラ、遠隔操作および画像転送機器はアウトドア用のドームに入れ、バースが見渡せる鉄塔の高さ14.9mの位置に設置した。ビデオカメラによる撮影時間間隔は、岸壁上で貨物の動きが活発な入船時には5分間隔、その他の日には30分間隔とした。また、調査期間中は毎日午前6時～午後5時の間撮影を行った。

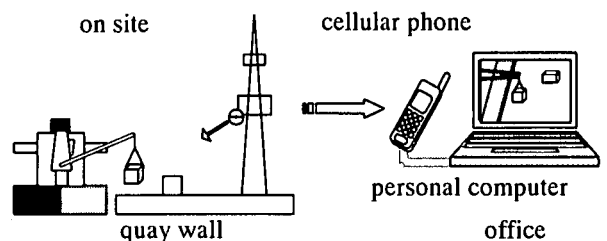


図-1 観測システムの構成の模式図

収集した資料は、横浜市港湾局から提供してもらった入船スケジュールと貨物の積みおろしに係わる代理店もしくは荷役会社から提供してもらった積荷目録や荷役書類である。これら資料により、入船日時、入船船舶諸元、荷役貨物の種類・寸法・重量、船体への積み込み位置などの把握を行った。

### (3) 観測期間中の状況

観測期間中、対象バースには10船が入船した。船舶への荷役作業および上屋からの搬出入作業は、平日のおよそ午前8時過ぎから午後5時にかけて行われており、夜間作業および土日祝日作業は行われていなかった。

エプロン上で、貨物はほとんど海側に置かれ、上屋側は主に交通路として利用されていた。また、船舶が着いていないときも、荷さばきにエプロン上を利用してはいたが、トラックやコンテナへの積み込み作業は海側で行われていた。上屋側は、主として雨天時や海側に荷役貨物が積まれている場合に、上屋への荷物の搬出入に利用されていた。

岸壁上での取り扱い貨物は、主に重機、車両、木材、雑貨物などであった。重機や車両などの貨物は、船舶の積み込み作業前日に岸壁上に運び込まれ、夜間も置いたままになっている場合もあった。また、早朝から輸送車両が岸壁内に停車し、荷役・搬出作業を待つこともあった。

### 3. 現地観測結果の解析

#### (1) 上載荷重の経時変化

図-2に示すように、岸壁のエプロン部分(200m×18m)を20m×9mの20領域に等分割し、それぞれにNo.1~No.20の領域番号を付けた。収集した参考資料とビデオ画像から、エプロン上の貨物の置かれた領域、重量、接地面積を評価した。

観測結果の上載荷重は、貨物の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。貨物が2つ以上の領域にまたがって置かれている場合には、面積比に基づいて荷重を配分した。

夜間の載荷状況については、エプロン上がライトアップされていないことから、ビデオ画像による評価ができないため、午後5時と翌朝の午前6時のデータから推測した。移動中のトラックやフォークリフトなどの活荷重については、調査対象外とした。

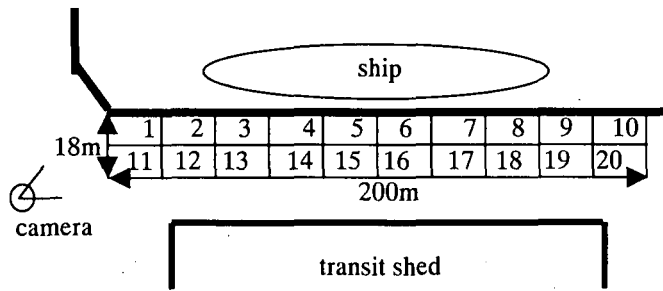
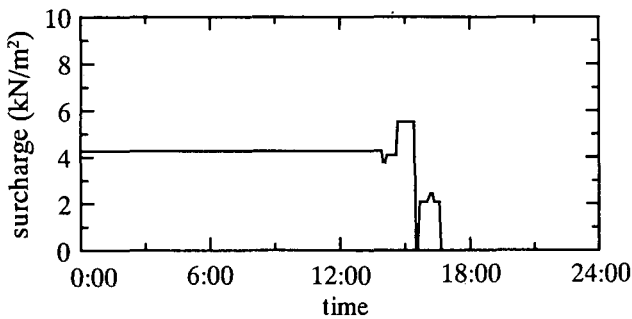
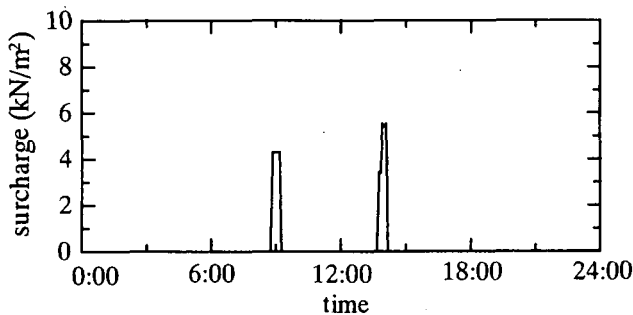


図-2 領域分け(領域番号)の模式図



(a) 領域No.3



(b) 領域No.13

図-3 単位面積あたりの上載荷重の経時変化(9月28日)

図-3は、9月28日の領域No.3とNo.13の上載荷重の経時変化である。本研究では、同様の時系列が観測期間分、領域分得られた。

#### (2) 上載荷重の空間分布

図-4に単位時間あたりの上載荷重の空間分布を示す。横軸は、図-2で示した領域の位置を表し、縦軸は、単位時間あたりの上載荷重であり、領域別に評価した上載荷重の経時変化の時系列の総和を取り、観測時間で除したものである。

No.11を除けば、貨物は、ほとんど海側に置かれていたことがわかる。No.1およびNo.11付近は、No.1を交通路として使っていた場合が多く、上屋側であるNo.11には、空のコンテナなどが数段積み重ねられていた。そのために、No.11は上屋側の他の領域(No.12~No.20)に比べて大きな値を示している。

また、バース方向に着目すると、単位時間あたりの上載荷重の空間分布は、主として、船体上のクレーンの位置になるNo.5~7、通路となるNo.1で小さな値になっている。しかしながら、単位時間あたりの上載荷重は、全体的に見て、バース方向には変化は小さい。

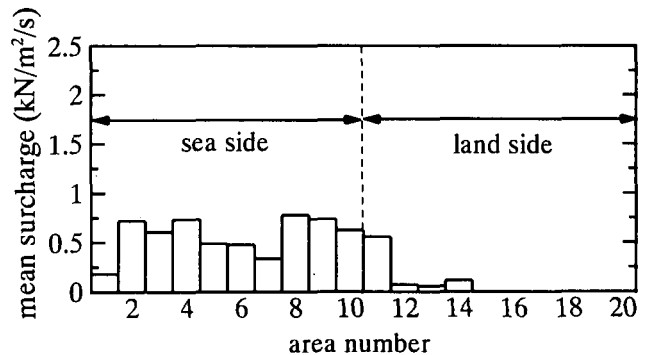


図-4 単位時間あたりの上載荷重の空間分布

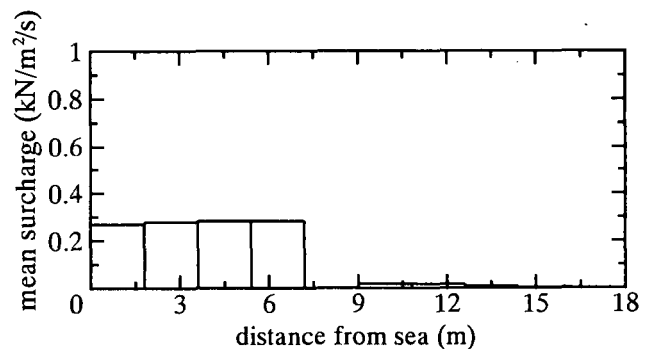


図-5 海-上屋方向の単位時間あたりの上載荷重の空間分布(9月28日)

続いて、海-上屋方向の上載荷重の分布特性を細かく調べるために、領域を細分して上載荷重を評価した。領域の分割は、図-2に示したNo.3とNo.13を合わせた領域を海-上屋方向に20m×1.8mの10等分とした。図-5は海-上屋方向の単位時間あたりの上載荷重の空間分布である。用いたデータは、9月28日の1日(24時間)分である。図の横

軸は海からの距離である。海側から5領域目以降は荷重が小さくなっており、使われているのは海側の7.2m程度であることがわかる。

### (3) 上載荷重の確率分布

港湾構造物の設計は、通常、設計条件、地盤条件などが同一の範囲では同一の構造とし、構造物の単位幅に対して、その安定性の検討が行われる。実際の上載荷重は、図-4および図-5で示したように、空間的に一様ではない。しかしながら、設計において、上載荷重は、考えている断面のエプロン上に一様に分布しているものとして扱われる。そこで、設計に用いるための上載荷重の確率特性の検討にあたり、以下の仮定を行った。

- ① 設定した各観測領域 (No.1~No.20) における上載荷重の載荷頻度は一様である (空間的一様性)
- ② 各領域に置いて観測されたデータは定常である (時間的一様性)

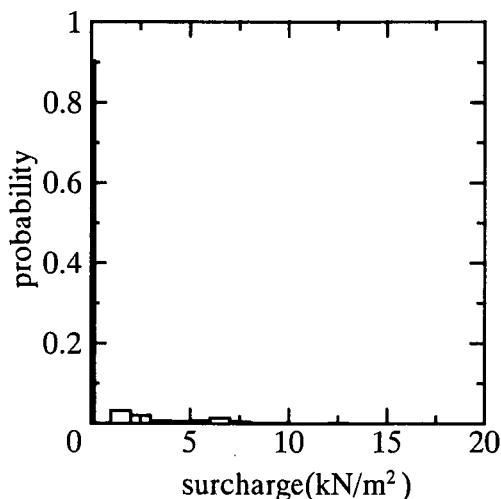


図-6 上載荷重の確率分布 (ゼロであるデータを含む)

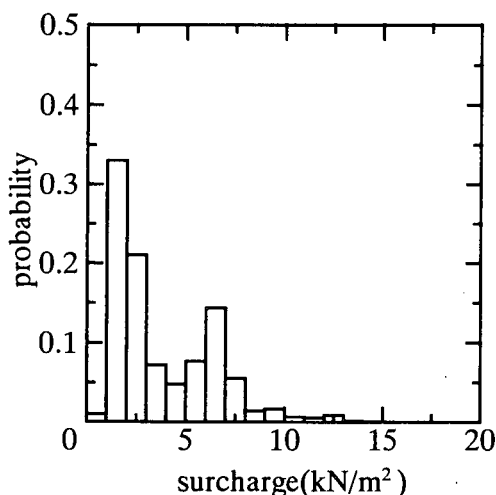


図-7 上載荷重の確率分布 (ゼロであるデータはカット)

前述の仮定により、領域毎に評価した上載荷重の値を20領域分すべてカウントし、エプロン上全体としての上載荷重の確率分布を算定した。また、上載荷重がゼロのデータはゼロのデータのみで確率を算定している。図-6にゼロであるデータも含めたエプロン上の上載荷重の確率密度分布を示し、図-7にゼロであるデータをカットしたエプロン上の上載荷重の確率密度分布を示す。

上載荷重の確率の90.3%はゼロであり、今回の観測および整理方法では、エプロン上に上載荷重が作用していない時間が、全体の約9割を占めるという結果になる。上載荷重の最大値は26.2kN/m<sup>2</sup>であったが、そのランクの確率はゼロをカットして整理した場合でも0.0062と非常に小さく、ほとんどのデータは10kN/m<sup>2</sup>以下となっている。また、上載荷重の確率分布は、2山型になっている。これは、このバースで扱われている貨物が平均7kN/m<sup>2</sup>程度の重いもの (重機・車両) と平均2kN/m<sup>2</sup>程度の軽いもの (木材・雑貨) とに分かれるためであると考えられる。

## 4. 設計値の評価

### (1) 分布関数のあてはめ

ゼロであるデータをカットした上載荷重の確率分布に、確率分布関数をあてはめ、上載荷重の母集団の確率分布の推定を行った。

分布関数のあてはめは、合田 (1990) に従い、最小二乗法により行った<sup>4)</sup>。あてはめを試みた分布型は、正規分布、対数正規分布、ワイブル分布、グンベル分布である。合田 (1990) では、ワイブル分布の母数 $k$ を0.75, 1.0, 1.4, 2.0の4種類に固定しているが、本研究では、さらに母数 $k$ を変化させてより適合度の高い分布形状の評価を試みた。データが二山型であるために、その境界の4.9kN/m<sup>2</sup>でデータを分け、それぞれのデータについて別々に分布型をあてはめた。

それぞれの分布型のあてはめ結果を表-1および表-2に示す。表中の $A$ および $B$ は各分布関数のパラメタである (合田 (1990) 参照)。また、あてはめ結果のグンベル分布とワイブル分布の確率密度関数を図-7に示した確率密度分布に重ねた結果を図-8および図-9に示す。4.9kN/m<sup>2</sup>未満、4.9kN/m<sup>2</sup>以上のデータ共に、ワイブル分布の相関 $R^2$ が最も高くなっている。しかしながら、4.9kN/m<sup>2</sup>以上のワイブル分布の母数 $k$ は1以下になり、分布形状がスパイク状になるため、以下の検討では、次に相関係数が高いグンベル分布を用いることとした。また、グンベル分布の分布関数を式で表せば、

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left(-\frac{x-B}{A}\right)\right\} \quad (8)$$

である。ここで、4.9kN/m<sup>2</sup>未満、4.9kN/m<sup>2</sup>以上にあてはめた二つの分布型に重なる部分があるため、

二つの分布型を数値的に加え合わせ、面積が1になるように正規化している。

表-1 分布型のあてはめ結果  
(4.9kN/m<sup>2</sup>未満)

Distribution type	$k$	$A$	$B$	$R^2$
Normal	-	0.762	2.257	0.855
Log-normal	-	0.319	0.756	0.921
Gumbel	-	0.623	1.897	0.943
Weibull	1.3	1.126	1.216	0.960

表-2 分布型のあてはめ結果  
(4.9kN/m<sup>2</sup>以上)

Distribution type	$k$	$A$	$B$	$R^2$
Normal	-	1.606	6.798	0.728
Log-normal	-	0.210	1.888	0.879
Gumbel	-	1.383	6.000	0.888
Weibull	0.81	1.315	5.321	0.952

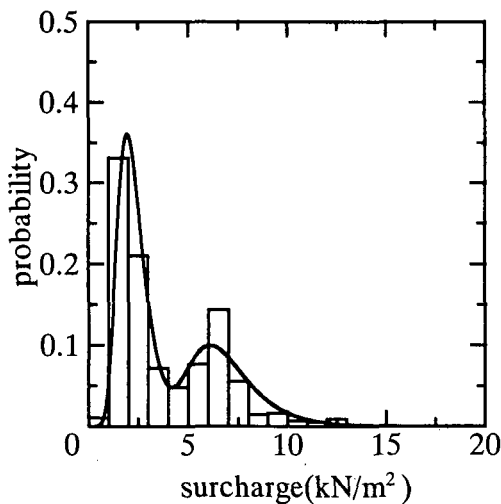


図-8 グンベル分布のあてはめ結果

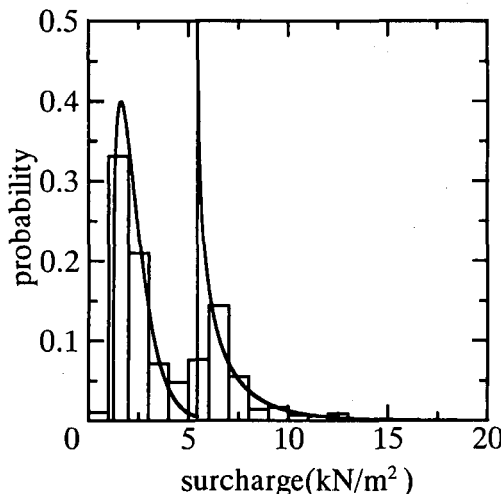


図-9 ワイブル分布のあてはめ結果

## (2) 常時および地震時の設計値の評価

(1)~(7)式で示したISO2394およびEurocode1の方法を用いて、評価した上載荷重の確率分布関数により、特性値、荷重係数、組み合わせ係数を算定し、常時および地震時の設計値の評価を行った。

特性値は、構造物の供用期間を50年と考えると、確率分布の98%フラクタル値を用いることになる。(2)式より、上載荷重の特性値は10.0kN/m<sup>2</sup>となる。

上載荷重の設計値は、(4)式および(5)式より荷重係数を評価し、それを(1)式に用いることにより評価できる。構造物の破壊確率を10<sup>-4</sup>とし、上載荷重を主たる荷重と考えると荷重係数は1.23、常時の設計値は12.3kN/m<sup>2</sup>となり、上載荷重を従たる荷重と考えると荷重係数は0.70、常時の設計値は7.0kN/m<sup>2</sup>となる。

次に、地震時の組み合わせ係数を、(6)式および(7)式より評価する。上載荷重が非ゼロである確率 $q$ は0.097であり(図-6を参照)、 $\eta$ の準永続値に対する標準的な値は0.5であるため、(7)式中の $1 - \eta/q$ が負になり(7)式の計算はできない。よって、組み合わせ係数 $\Psi_2$ は0.0となり、(6)式より地震時の上載荷重の設計値は0.0kN/m<sup>2</sup>となる。

## (3) 組み合わせ係数に関する検討

観測結果から地震時の上載荷重の設計値は0.0kN/m<sup>2</sup>となった。この理由は、上述したが、準永続値に対する組み合わせ係数である $\Psi_2$ の評価に際して、(7)式中の上載荷重が非ゼロである確率 $q$ が $\eta$ (=0.5)より大きくなるためである。

上載荷重が非ゼロである確率 $q$ は、パースの使用頻度により異なる。そこで、今回の観測により得られた上載荷重の確率分布関数を用いて(7)式中の $q$ を0.0~1.0と変化させ、 $\Psi_2$ の評価を行った。

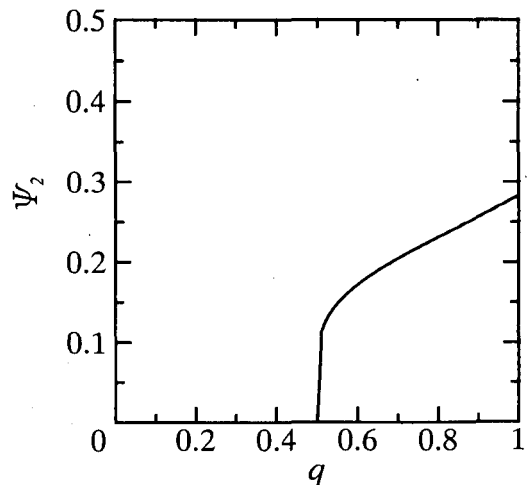


図-10  $\Psi_2$ に及ぼす $q$ の影響

図-10は $\Psi_2$ に及ぼす $q$ の影響を示したものである。当然、 $q$ が0.5より小さければ、(6)式より $\Psi_2$ の評価はできないため、 $\Psi_2$ は0.0である。 $q$ が0.5より大きければ、 $\Psi_2$ の評価は可能であり、 $q$ が大きくなると、

$\Psi_2$ も大きくなる。しかし、上載荷重が常に岸壁に作用しているとして $q$ を1.0としても、 $\Psi_2$ は0.28である。よって、今回の観測結果において、上載荷重が常に岸壁に作用していると考えたとしても、地震時の上載荷重の設計値は $2.8\text{kN/m}^2$ である。

## 5. おわりに

本研究では、雑貨貨物を対象にした横浜港における現地調査により、岸壁上に作用する上載荷重の確率分布を評価した。次いで、ISO2394およびEurocode1に従い、上載荷重の特性値、荷重係数、組み合わせ係数を算定し、常時および地震時の設計値を評価した。

得られた結論は、

- ① 上載荷重は二山型の分布型になる。
- ② グンベル分布を重ね合わせるにより確率分布を表すことが可能である。
- ③ 上載荷重を主たる荷重と考えた場合の常時の設計値は $12.3\text{kN/m}^2$ となり、従たる荷重と考えた場合の常時の設計値は $7.0\text{kN/m}^2$ となった。また、地震時の上載荷重の設計値は $0.0\text{kN/m}^2$ となった。

ただし、この結論は、雑貨貨物を対象にした横浜港山下埠頭の1バースでの観測結果に基づくものである。

今後の課題として、多地点での観測を行い上載荷重の確率分布の信頼性を向上させると共に、雑貨貨物だけでなく、ばら荷やコンテナなどを対象にした検討を行っていく必要がある。

最後に、本研究の現地観測およびデータの解析において、横浜市港湾局の高木勇一氏、(株)日本海洋科学の津金正典氏と佐々木伸宏氏に協力していただいた。ここに記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の技術上の基準・同解説，1998.
- 2) ISO：ISO2394, General principles on reliability for structures, 1998.
- 3) JCSS：Background documentation Eurocode 1 (ENV1991) Part 1, Basis of Design, 1996.
- 4) 合田良實：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，1990.