

棧橋式岸壁の船舶接岸時における変形に関する研究

長尾 毅*・岩田直樹**・岡田達彦***・上田 茂****

船舶接岸時に防舷材反力の作用による安全性照査が必要になる棧橋の設計に関する現地観測を行い、現行設計法による棧橋の固有周期および棧橋の変形量について比較検討を行った。その結果、観測対象の範囲においては現行設計法での固定点は棧橋の固有周期をやや長く与えること、船舶接岸時の棧橋の変形量は現行設計法による変形量と比較して非常に小さいことが明らかとなった。また、船舶接岸時の振動特性から、棧橋振動特性に支配的な要因は現行設計法で推定しているような杭一上部工ラーメンモデルの自由振動に起因するものではなく、船舶を介した波浪による荷重作用による強制振動の性格が強いことがわかった。

1. はじめに

係留施設の代表的な構造形式のひとつである棧橋式岸壁においては、設計において船舶接岸時の安全性照査を行う必要がある。その際、船舶の接岸により生じる杭の応力度や杭先端支持力の照査に加えて、変形量の照査を行い、変形量が許容値以下であることを確認することが多い。棧橋の変形量は、棧橋を杭一上部工のラーメンモデルと考えてばね定数と水平力をもとにして算出される。ここで、設計震度が小さな地域においては、船舶接岸時の棧橋の変形量により断面諸元が決定されることがある。しかしながら、船舶接岸時の棧橋の挙動に関する実測確認はこれまでほとんど事例がなく、変形量照査手法の合理性を確認することが必要と考えられる。このため本研究では、現地観測を行うことにより、棧橋の船舶接岸時の変形について検討を行い、現在用いられている棧橋変形量算出方法の妥当性について検討した。

2. 現地観測試験

(1) 試験の目的

棧橋変形量算出方法の妥当性を検討するにあたり、次の 2 点に着目して現地観測試験を行った。

まず第一に、棧橋の固定点の確認である。船舶接岸時に生じる棧橋の変形量は、棧橋のシステムとしてのばね定数をもとに算出されるが、ばね定数は杭の剛性と自由長により算出される。一般に杭の剛性は品質管理に問題がなければ正確に得られるが、杭の自由長については不確定要因が存在する。現行設計法（港湾基準, 1999）では、棧橋の変形量を算出する際のばね定数を求めるための杭の自由長は、仮想海底面から $1/\beta$ 下方の点を仮想固定点として算出される。ここで、仮想海底面とは、棧橋前面水深と実斜面の高さの $1/2$ の点である。杭 i の横方向ばね定数 K_{Hi} の算出式は式 (1) による。

$$K_{Hi} = \frac{12EI_i}{\left(h_i + \frac{1}{\beta_i}\right)^3} \quad \text{..... (1)}$$

ここに、 K_{Hi} : 杭 i の横方向ばね定数 (kN/m), h_i : 杭 i の杭頭から仮想海底面までの長さ (m), β_i : 杭 i の仮想固定点深さに関係するパラメータで、式 (2) による (m^{-1}), EI_i : 杭 i の曲げ剛性 ($\text{kN} \cdot \text{m}^2$).

$$\beta_i = \sqrt{\frac{k_{hi}D_i}{4EI_i}} \quad (\text{cm}^{-1}) \quad \text{..... (2)}$$

ここに、 k_{hi} : 杭 i に関する横方向地盤反力係数 (N/cm^3), D_i : 杭 i の直径または幅 (cm), EI_i : 杭 i の曲げ剛性 ($\text{N} \cdot \text{cm}^2$).

ここで、横方向地盤反力係数 k_{hi} は、地盤の $1/\beta_i$ 深さ付近までの平均 N 値を用いて、 $k_{hi} = 1.5N$ により算出される。

棧橋の自由長を実際に観測することは困難である。このため本研究では、常時微動より推定することが可能な（長尾・田代, 2002）棧橋の固有周期をもとにして自由長の検討を行い、現行設計法の妥当性を検証する。現行設計法によると、棧橋の固有周期は式 (3) により得られる。

$$T_s = \sqrt{\frac{W}{g \sum K_{Hi}}} \quad \text{..... (3)}$$

ここに、 T_s : 棧橋の固有周期 (s), W : 杭一列が受け持つ自重及び上載荷重 (kN), g : 重力加速度 (m/s^2).

ここで、現行設計法では、固有周期算定の際の杭の自由長は仮想海底面から $1/\beta$ 下方の点をもとにするのではなく、海底面から $1/\beta$ 下方の点をもとに算出されることに注意が必要である。なお、長尾ら (2002) は、横浜港及び川崎港の 2 つの棧橋上の強震観測記録を用いて解析を行った結果、当該棧橋の固有周期は海底面から $1/\beta$ 下方の点ではなく、仮想海底面を固定点としたほうが観測結果に近い結果となることを示している。

現地観測試験の第二の視点は、現行設計法の棧橋の変形量算出方法の妥当性の検証である。現行設計法では、棧橋の変形量は、式 (4) に示すように、作用水平力を棧橋のシステムとしてのばね定数で除することにより得

* 正会員 工博 国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室長
** 国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室
*** 学生会員 鳥取大学大学院工学研究科
**** フェロー 工博 鳥取大学土木工学科教授

られる。この方法の妥当性検証のためには、船舶の接岸力を実測接岸速度などをもとに算出するとともに、棧橋の船舶接岸時の挙動を計測する必要がある。

$$d = \frac{H}{\sum K_{Hi}} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 d ：棧橋変形量(m)、 H ：棧橋に作用する防舷材反力(kN)。

(2) 現地観測試験方法

現地観測試験は、横浜港本牧地区のコンテナ埠頭(A-6、A-7、A-8バース)において7隻のコンテナ専用船を対象に実施した。岸壁の断面図の一例を図-1に示す。本観測の対象とした防舷材は3種類であった。

今回の現地観測では、船舶の接岸エネルギーは防舷材の変位を計測し、その防舷材の変位-復元力特性から推定する方法と、接岸速度より推定する方法の2つの方法を用いた。防舷材の変位は、接岸しようとしている実際の船舶の舷側に棒を突き当て、その変位を計測することにより測定した。接岸時点の特定及び変位の計測のために、ビデオカメラを設置し、船舶及び棒の挙動を撮影している。観測対象施設は、1ブロックに2基の防舷材を設置しており、二点同時接岸を考慮すれば、1ブロック上の両方の防舷材の挙動を計測することが望ましいといえるが、事前調査などから岸壁法線にほぼ平行に接岸することがわかっていたため、二点同時接岸しているものとみなし、計測は1箇所のみとした。

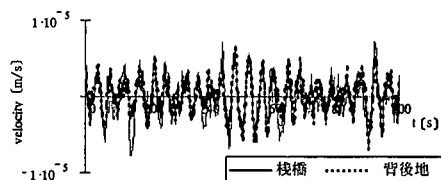
一方、棧橋の挙動については、棧橋上部工上に微動計を設置することにより計測した。計測は、変位及び速度を測定した。また、棧橋の固有周期推定のために、船舶の接岸していない状態において棧橋上部工上および背後地盤上で法線直角方向の振動成分を微動計で同時に観測した。背後地盤の計測位置は、土留めより70 m程度背後の地点である(長尾・田代, 2002)が、物理的な制約から60 m程度の位置としたバースもある。また、計測装置の制約から、棧橋上の記録と背後地盤上の記録には時間

のずれがある。これら観測の際のサンプリング周波数はいずれも200 Hzである。このほか、地盤構造の把握のため、背後地盤上で常時微動アレー観測を実施した。アレー観測は、棧橋の杭設置位置のS波速度構造を把握する観点から、5 mおよび10 mのアレー半径とし、各半径について10分間の計測を行った。ただし、観測場所は、アレーの展開場所を棧橋直背後に求めることが出来なかったため、棧橋より約200 m程度離れた地点とせざるを得なかった。

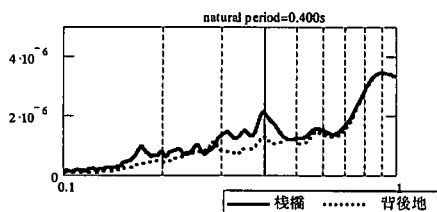
(3) 観測結果

まず、常時微動観測により推定される棧橋の固有周期について検討する。図-2にA-8バースを例として、棧橋上部工および背後地盤上の法線直角方向水平成分スペクトルおよびスペクトル比(H/H スペクトル)を示す。各バースの固有周期は H/H スペクトルのピーク周期およびフーリエスペクトルより推定した。推定した棧橋の固有周期は、A-6、A-7、A-8バースのそれぞれについて、0.28秒、0.34秒、0.40秒である。

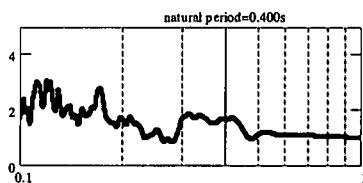
次に、船舶接岸時の状況の例を表-1に示す。また、船舶接岸時の棧橋上部工上の微動測定結果を図-3に示す。変位計として測定したものは変位そのものを、速度計として測定したものは速度をもとに積分した変位をあ



(1) 波形時刻歴



(2) フーリエスペクトル



(3) H/H スペクトル

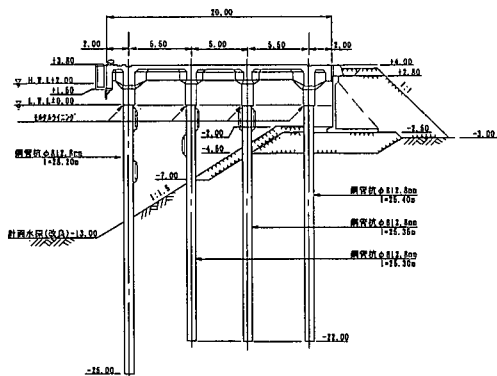


図-1 検討対象棧橋断面図(A-8)

図-2 棧橋固有周期の推定(A-8バース)

わせて示す。積分方法は周波数領域での積分と時刻歴領域で Newmark の β 法により積分した結果のうち、大きな変位が算出されたほうを示している。図には船舶接岸時点を矢印で示しているが、これは船舶が防舷材に接触した時点を示している。また、プラスの値が棧橋が陸側に変形した状態を示している。

図より、船舶接岸時の棧橋変形量は 100 分の数ミリメートル単位の値であることがわかる。図-4 に通常時と船舶接岸時の棧橋挙動を示す。図-4 より、通常時、船舶接岸時ともに、棧橋変形の支配的な周期は 4 秒程度であることが分かる。棧橋固有周期の検討結果より明らかなように、この周期は棧橋本体の固有周期とは大きくかけ離れており、棧橋本体の振動特性に起因するものではないことは明らかである。一般に周期 4 秒程度の地盤に発生する微動は脈動と呼ばれ、ここでの棧橋の周期 4 秒の振動は波浪による影響と考えられる。しかしながら、通常時と船舶接岸時で振幅は明らかに異なり、通常時よりも船舶接岸時のほうが数倍程度以上の振幅を示す。このことより、船舶接岸時の棧橋振動特性に支配的な要因

は現行設計法で推定しているような杭-上部工ラーメンモデルの自由振動に起因するものではなく、船舶を介した波浪による荷重作用による強制振動の性格が強いといえる。

観測変形量として、棧橋本体の振動に起因する成分を求めるため 0.25 Hz (4 秒) のハイパスフィルターを用いて波浪による影響成分を除去すると、棧橋の最大変形量は波浪による影響除去前の振幅の 1/2 から 1/10 程度となる。ローカットフィルター処理後の波形を図-5 に示す。

3. 現行設計法との比較

(1) 杭の固定点

杭の固定点の検討にあたっては、横方向地盤反力係数を算出する必要がある。横方向地盤反力係数は N 値より算出されるが、検討対象地点の N 値にはばらつきが大きい。そこで、別途実施した常時微動アレー観測より長尾・

表-1 船舶接岸状況

場所	接岸船舶	接岸時刻	防舷材変位		接岸速度
			(cm)	(%)	
A-8	JAVA BRIDGE	14:15:06	8	13%	7.3
		14:16:05	12	20%	6.5
		14:16:33	3	5%	3.1

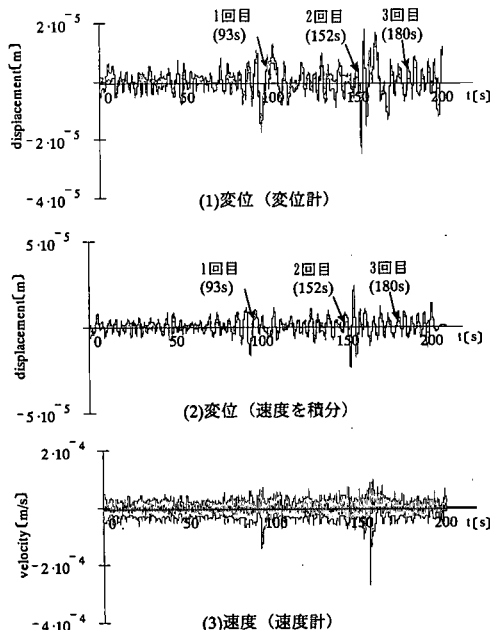


図-3 船舶接岸時の棧橋挙動測定結果

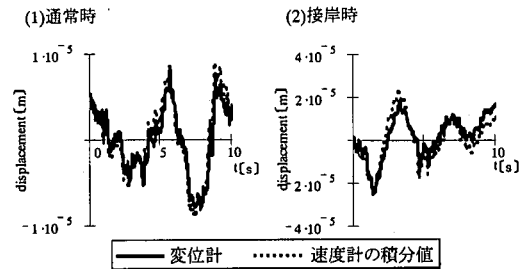


図-4 船舶接岸前後の棧橋挙動(詳細)

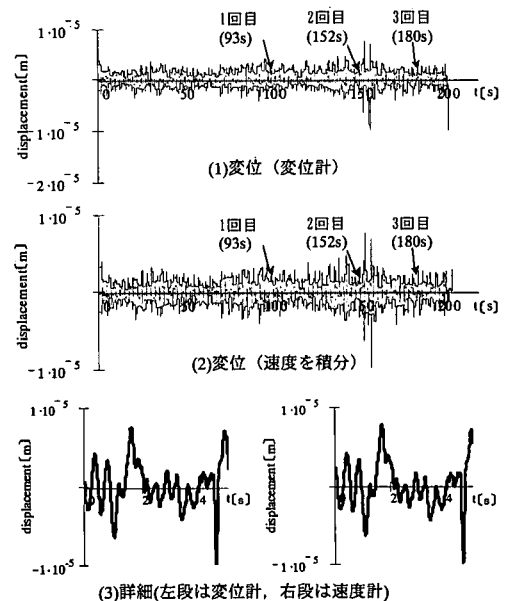


図-5 船舶接岸時の棧橋挙動(フィルター処理後)

紺野 (2003) の方法により S 波速度を推定し、S 波速度より Imai (1977) の関係式を用いて N 値を算出した。

$1/\beta$ の算出方法を N 値実測値 (case 1)、常時微動による N 値推定値 (case 2)、常時微動固有周期による推定値 (case 3) の 3 ケースについて固定点を変えて栈橋の固有周期を算出し、常時微動結果と比較すると図-6 のとおりとなる。水平軸は固有周期観測値、鉛直軸は固有周期算出値である。図より、現行設計法の海底面+ $1/\beta$ を固定点とした栈橋固有周期 (case 1) は常時微動より推定される固有周期に比較的近いものの、常時微動による推定値よりも長い固有周期を与える。また、アレー観測から N 値を推定し計算した固有周期 (case 2) にも同様な傾向がある。このため、栈橋の固有周期については、今後さらに他の港湾においても調査を実施する必要があるものと考えられる。なお、海底面+ $1/\beta$ を固定点とした case 3 では固有周期を $1/\beta$ より逆算しているため、計算値と観測値が一致するのは当然である。

(2) 栈橋の変形量

防舷材の変形量に基づいて算出される栈橋の変形量及び船舶接岸速度より推定される接岸エネルギーに基づいて算出される栈橋の変形量と観測変形量の比較を図-7 に示す。図では、各船舶接岸時に観測されたハイパスを行っていない状態での観測最大変形量を水平軸に、 $1/\beta$ の算出方法を 3 通りとして固定点を現行設計法による仮想海底面+ $1/\beta$ とした場合の計算値を鉛直軸にプロットしている。1 つの観測変形量に対して複数の計算変形量がプロットされているのは、1 つの船舶で複数回の接岸時データが得られたことを示す。このうち、白抜きの記号のデータは各船舶による防舷材反力が最大のときの値である。図より、すべてのケースにおいて計算値は観測値の 10 倍以上の値となる。

変形量の観測値と計算値の違いの原因を検討するため、杭の固定点を海底面+ $1/\beta$ として変形量を再度算出

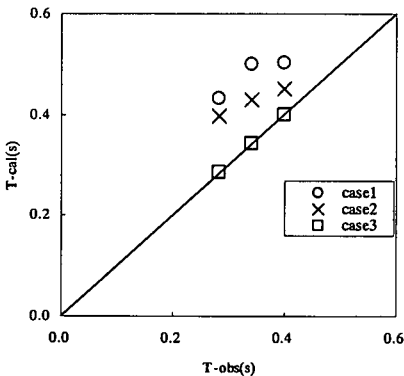


図-6 固有周期比較

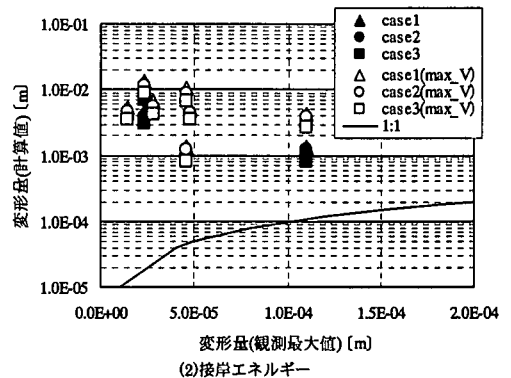
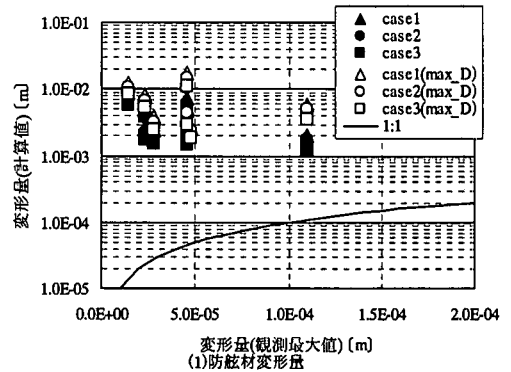
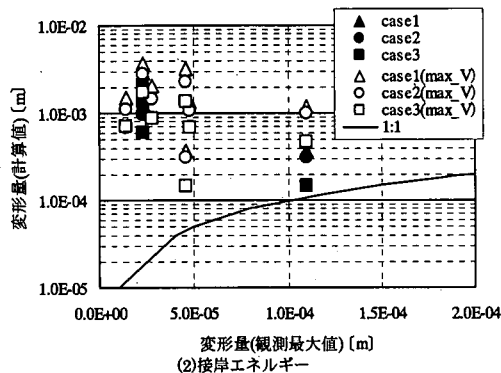
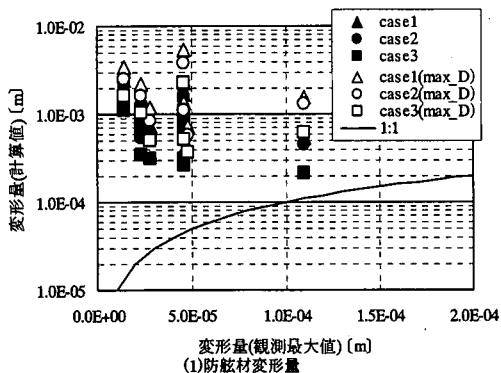


図-7 変形量比較 (現行設計法)

した。海底面+ $1/\beta$ を固定点とした場合、固定点を仮想海底面+ $1/\beta$ とするよりも杭の自由長が短くなり変形量の計算値も小さくなる。また、 $1/\beta$ を常時微動より算出する case 3 の場合には図-6 に示したように固有周期は観測値と一致する。図-8 に変形量の比較を示す。case 3 の 1 つのケースのみ計算値と観測値は近い値となるが、そのケースにおいても通常設計で用いる $1/\beta$ の算出方法である case 1 の場合は計算値は観測値の 3 倍以上である。またこのほかの栈橋の観測値の最大値は、変形量算出値に対して $1/10$ 程度以下であることがわかる。

計算値と観測値の変形量の違いの原因としては、接岸速度等の各種計測誤差、防舷材の劣化に起因する反力の規格値との違いなど様々な要因が考えられるが、7 隻の船舶接岸に際してほとんどの計算値は観測値を大きく上回っており、単なる誤差の影響のみに起因する問題とは考えられない。本研究の範囲では、船舶の接岸速度や防舷材変形量は、通常設計時に考慮する値よりも小さいものであったが、本研究の範囲からは現行設計法による栈橋変形量算出方法が過大な結果を与える可能性があることが示唆される。

今回は 3 パースのみの検討であるためこれ以上の検討は行えないが、今後さらに他の港で観測を継続することが必要であろう。



図一8 変形量比較 (海底面+1/β)

4. ま と め

棧橋の船舶接岸時の設計法の妥当性を検証するため、横浜港において現地観測試験を実施した。現地観測試験の範囲より得られた結果は次のとおりである。

① 棧橋の固有周期を常時微動より推定した結果、棧橋固有周期は現行設計法の海底面+1/βを固定点とした計算値に比較的近いものの、計算値のほうが観測値をや

や上回った。棧橋の固定点については今後さらに他の港湾においても検討を実施する必要があると考えられる。

② ほとんどの棧橋の船舶接岸時の変形量は現行設計法による変形計算値の1/10程度であった。また、船舶接岸時の棧橋の卓越周期は棧橋の固有周期と比較して非常に長いものであった。本研究の範囲では、船舶の接岸速度や防舷材変形量は、通常設計時に考慮する値よりも小さいものであったが、本研究の範囲からは現行設計法による棧橋変形量算出方法が過大な結果を与える可能性があることが示唆される。今後さらに追加試験を行うなどして詳細な検討を行う必要がある。

5. お わ り に

本研究では棧橋式岸壁の船舶接岸時の設計法について現地観測試験により検討を行った。船舶接岸時の棧橋変形の照査方法には今後さらに検討が必要であることが明らかとなったため、さらに追加の試験を実施するなどして合理的な照査法の構築を図る必要があると考えている。

末尾ながら、観測の実施にあたり尽力いただいた横浜港埠頭公社芝崎氏に感謝します。

参 考 文 献

- 運輸省港湾局監修 (1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, (社)日本港湾協会。
- 長尾 毅・田代聡一 (2002): 棧橋式岸壁の耐震性照査手法に関する解析的研究, 土木学会論文集, No. 710, I-60, pp. 385-398.
- 長尾 毅・紺野克昭 (2003): 常時微動を用いた臨海部表層地盤のS波速度構造の推定方法に関する研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1371-1375.
- Imai, T. (1977): P and S wave velocities of the ground in Japan, Proc. IXth ICSMFE