

船体動揺から評価した長周期波対策岸壁の性能

平石 哲也*・国栖 広志**・水谷 将***

石炭火力発電専用バースにおける大型石炭運搬船が、周期十数秒～数十秒程度のうねりや長周期波によって大きな水平運動を生じると、安定な荷役が妨げられ、エネルギーの安定供給に対するリスクが高くなる。港内のうねりと長周期波対策として、護岸や岸壁の長周期波に対する反射率を低下させ、船体の動揺を抑止する工法が提案されている。ここでは、改良された護岸や岸壁構造が船体の動揺低減に果たす役割を定量的に評価するために、改良岸壁に係留された船体の動揺量を計算して、改良前の直立岸壁の場合と比較している。その結果、反射率を0.7とした長周期波対策岸壁を用いると、斜め入射波に対してサージング振幅を低減できることが示された。

1. はじめに

エネルギー供給の安全性を確保するために石炭を用いた大型の火力発電所の重要性が高まっている。苫小牧や常陸那珂に位置する大規模な石炭火力発電所は専用の大型石炭船バースに隣接し、海外から輸入された石炭をベルトコンベアで直接ボイラーに供給できる効率的なシステムを有している。ただし、石炭の消費量が大きいので、備蓄量はほとんどなく、電力を安定して発電するためには、専用岸壁における石炭の荷役が常時可能な状態で行われなければならない。

一方、外洋から港湾に侵入する周期十数秒～数十秒程度のうねりおよび長周期波によって、ナイロン製ロープで岸壁に係留された数万DWTクラスの大型船が動揺し、係留索の切断や荷役障害を引き起こす現象が各地で報告されており、その対策が緊急に必要になっている。2004年4月に発刊された「港内長周期波影響評価マニュアル」(沿岸開発技術研究センター, 2004)では、長周期波対策護岸や岸壁で、港内におけるうねりと長周期波の反射率を低下させ、港内を静穏化させる工法が一つの対策として提案されている。その他の対策は、防波堤延伸による侵入波エネルギーの抑制、係留索や防舷材の材質改善による動揺軽減および波浪予測による荷役時間調整等である。これらの対策を効果的に組み合わせることによって安全な荷役が可能となる。このなかでも護岸や岸壁の改良によって長周期波対策護岸・岸壁を設置することは、荷役事業者には負担をかけずに、港湾全体の静穏度も向上させる効果を有しているので、今後、港奥の遊休岸壁の更新や港湾計画の改訂時に積極的に導入されることを期待している。

これまで、長周期波の反射率を低下させる岸壁や護岸構造が提案され、その前面波高分布は模型実験と数値解析で明らかにされてきたが、実際の船体動揺がどの程度

低減されるのかについて評価はなされていない。本研究では船体動揺量の計算を行い、長周期波対策を目的とした岸壁と護岸の荷役稼働率改善効果を推定した。

2. 長周期波対策岸壁の構造

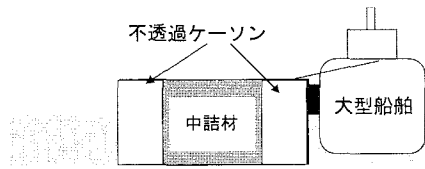
著者ら(平石ら, 2003)は、港湾の長周期波対策工の適用性を検討するために荷役稼働率での定量的評価を提案し、港内の長周期波反射率が0.7以下になると、荷役稼働率で改善効果が表れることを示した。そして、岸壁や護岸の長周期波反射率を低下させるために、二重スリットケーソンの裏込め部にも波を透過させ、砂礫層でのエネルギー損失を活用する長周期波対策護岸・岸壁の反射率を模型実験と数値解析で検討した。その結果、幅50mの適切な粒径を有する砂礫層を用いれば、反射率を0.7以下にできることが判明している。長周期波対策護岸・岸壁の配置場所についても、できるだけ最小の改良で最大の効果を有するように決定すべきである。ここでは、簡単のために船舶が係留されている岸壁を長周期波が吸収されるように改良することを検討した。岸壁長が短い場合には、船体が岸壁を塞いでしまうので、船体から直接反射される波が港内での波の場を変化させる可能性があるが、ここでは岸壁長を無限大として、係留船舶によって港内の波の場は乱されないものと仮定している。

図-1に本研究で対象とした岸壁の構造を示す。図中の(1)は不透波な壁体を用いた直立岸壁で、長周期波に対する反射率 $K_r=1.0$ である。図の(2)は、中詰材まで波を浸透させた長周期波対応型岸壁で、 $K_r=0.7$ とした。図(3)は比較のために、沖合ドルフィンなどで用いられる棧橋式岸壁を示し、背後陸地からの反射波は無く $K_r=0.0$ とした。

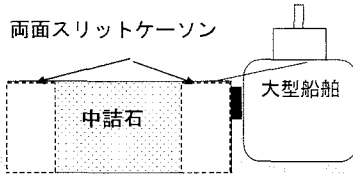
3. 船体動揺計算の内容

本研究では、荷役障害から受ける被害が家庭の電気使用に直接影響を与える石炭船専用バースでの係留について検討した。図-2は対象とする50000DWTの石炭船の係船状況を示す。船体のモデル化は、標準船型を用い

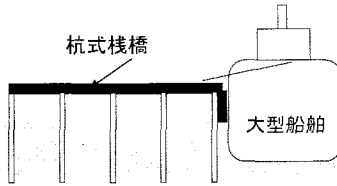
* 正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部
** 正会員 工修 日本海洋コンサルタント(株) 技術開発部
*** 正会員 工博 日本海洋コンサルタント(株) 技術開発部



(1) 不透過な直立岸壁 (反射率 1.0)



(2) 長周期波対応岸壁 (反射率 0.7)



(3) 杭式棧橋 (反射率 0.0)

図-1 検討対象とした岸壁の模式図

て行った。標準船型を定める船体諸元を表-1に示す。表中の数値は船体の形状と大きさを規定する数値で、各パラメータに対応する船体諸要素の図示は、文献(小山ら, 1997a)等を参照できる。作用する波は港内波高を想定して有義波高 0.1 m のうねり・長周期波とし、有義波周期を 10 s~50 s で変化させた。波は Bretschneider・光易型の周波数スペクトルを有する一方向不規則波で、入射波向は、岸壁に直角に入射する向きを 0 度として、0, 45, 90 度とした。船体の係留方向と波向きの関係を前述の図-2に示す。

検討に用いる係留索は、対象船型から設定できる標準ナイロン索とし、索径を 90 mm とした。係船柱の間隔は大型船を想定して 40 m とし、一般的に船舶が所有する 8 本の係留索を、このいずれかに索取りするものとし、

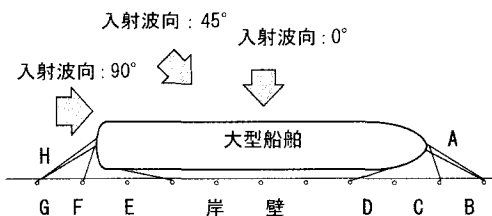


図-2 船体の係留状況と作用波の関係

表-1 標準船型の必要パラメーター

項目		係数	単位
積載重量トン数	DWT	50,000	(ton)
垂線間長	L_{pp}	210.66	(m)
船体中央幅	B	31.06	(m)
船体中央喫水	D	13.4	(m)
中央断面係数	—	0.9745	—
排水量	—	59,529.86	(ton)
船底からの重心 (G) 位置	KG	11.38	(m)
メタセンター高さ (Roll)	GMT	2.2	(m)
〃 (Pitch)	GML	264.591	(m)
横揺慣動半径	k_{xx}	10.87	(m)
縦揺慣動半径	k_{yy}	52.67	(m)
船首揺慣動半径	k_{zz}	52.67	(m)
浮心位置	—	0.175	(%)

係船柱以外に増索はしない。図-3にナイロン索の伸び率と張力の関係を示す。近似的には、船体のサージング方向の固有周期は、次式で示される。

$$T_o = 2\pi \sqrt{\frac{M}{2K}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 M は船体の仮想質量で、載荷重量トンの 1.1~1.3 倍である。 K は前後方向への係船索の合成伸び特性である。合成伸び特性は係船索長、初期張力およびサージング方向への有効索本数で決定される。いま、初期張力を 0 とし、図-3の点線で示すような平均伸び率を係留索は有しており、有効索本数を 1~3 本とする。載荷状態によって仮想質量 M は変化するので、ここでは $3 \sim 5 \times 10^7$ kg で変化させた。表-2に近似式から求められるサージング運動の固有周期を示す。固有周期は、港湾で対象とする長周期波の周期波範囲とほぼ等しく、大型の石炭船はうねりや長周期波の侵入によって共振しやすいことが判る。

つぎに、防舷材の設置間隔は、対象が大型船であることを考慮して 15 m ピッチとした。防舷材のタイプは定反力型である。図-4に検討に使用した標準的な防舷材の反力特性を示す。変位が大きくなるほど吸収できるエネルギーは大きい。

図-5は係留索、防舷材および係留索の索取り位置を示す。係留索は A から H で記号を付ける。サージング方向の運動は主に A, B, G および H で抑止し、索長を 40 m とした。係留索 D および E は、運動抑止のために増索したもので長さは、それぞれ 30 m および 40 m である。係留索 C および F は主にスウェーイング運動に対応するもので、長さは 30 m である。

船体動揺解析には、ストリップ法(たとえば、山本ら、

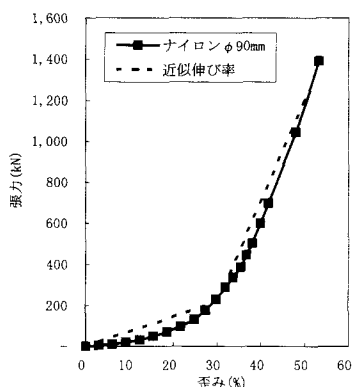


図-3 ナイロン索の伸び特性

表-2 サージング運動の近似固有周期

索長 40 m	荷重重量トン (DWT)	
緩く係留	10,000	50,000
張力 200 kN 伸び 30%	119 s	267 s
きつく係留	10,000	50,000
張力 1000 kN 伸び 20%	44 s	97 s

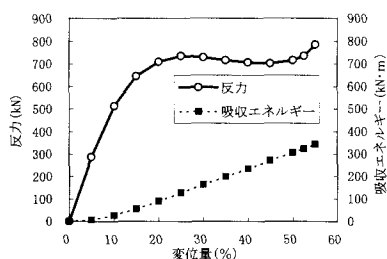
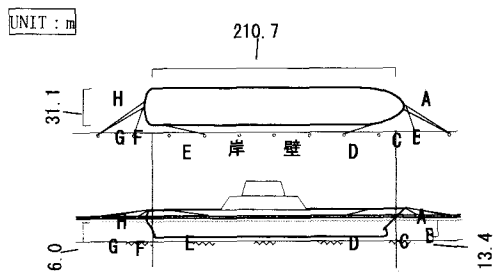


図-4 モデル化した防舷材の反力特性

1997)を用い、6自由度の非線型連度方程式を時間ステップ毎にルンゲクッタ法で解いていく手法を用いるものとし、プログラムは、(株)三井造船昭島研究所製の係船動揺解析システム MOSQ2 (小林ら、1985)を用いた。計算では、船体の断面毎の2次元流体力を特異点分布法 (小山ら、1997b)で求め、船長方向に積分して3次元流体力とした。波浪強制力は、入射波スペクトルに規則波の強制力を掛けた線形重ね合わせ法によって計算する。変動波漂流力は Hsu の手法 (Hsu ら、1970)に従った。運動方程式をマトリックス表記すると次のようになる。

$$(M+A)\ddot{X}+B\dot{X}+CX+D+T=F_E+F_D \cdots (2)$$

ここで M : 船体質量マトリックス, A : 付加質量マトリックス, B : 造波減衰力係数マトリックス, C : 復原力マトリックス, D : 相対速度の2乗に比例する抗力のベクトル, T : 索等の張力, F_E : 線形の波浪強制力, F_D : 変動漂流力である。流体力は周波数の関数になるので運



載荷総トン数: 50,000DWT 係留索 A: L=40m 係留索 E: L=40m
 垂線間長: 210.66m 係留索 B: L=40m 係留索 F: L=20m
 船体中央幅: 31.06m 係留索 C: L=20m 係留索 G: L=40m
 船体中央喫水: 13.40m 係留索 D: L=30m 係留索 H: L=40m

図-5 係船柱、防舷材、係留索の取り付け点

表-3 標準的な荷役限界動揺量

	動揺成分					
	サーージング (m)	スウェーピング (m)	ヒービング (m)	ローリング (°)	ピッチング (°)	ヨウイング (°)
一般貨物船	±1.0	+0.75	±0.5	±2.5	±1.0	±1.5
穀物貨物船	±1.0	+0.50	±0.5	±1.0	±1.0	±1.0
鉱石貨物船	±1.0	+1.00	±0.5	±3.0	±1.0	±1.0
タンカー (内航)	±1.0	+0.75	±0.5	±4.0	±2.0	±2.0
タンカー (外航)	±1.5	+0.75	±0.5	±3.0	±1.5	±1.5
コンテナ船	±0.0	+0.30	±0.3	—	—	—
ロールオン・ロールオフ船	±0.3	+0.20	±0.1	—	—	—
自動車運搬船	±0.3	+0.20	±0.1	—	—	—

動方程式を厳密に解くためには時間領域でのたたみこみ積分が必要になるが、計算が複雑になるので、ここでは作用する波の代表周波数で固定した係数を用いている。

計算でのタイムステップは 0.5 s, 全計算時間は 3600 s, 船体の初期位置は x, y, z 方向ともに 0 とした。また長周期の運動に関して減衰を与えるスウェーピング運動減衰係数を 0.019 kN・s/m, サージング運動減衰係数を 5.0 kN・s/m とした (笹ら、1999)。そして、6自由度の運動に対する方程式を時間ステップ毎に解いて、船体重心のサーージング、スウェーピング、ヒービング、ピッチング、ローリングおよびヨウイング変位を求め、統計解析によって動揺振幅の有義値等を計算した。

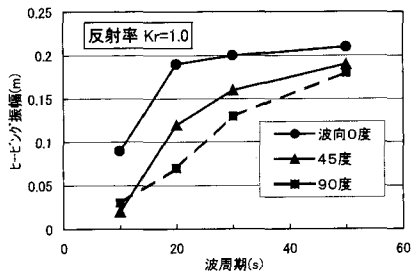
船体の荷役可否判断は、動揺振幅と石炭運搬バケット等の動揺許容限界から設定される荷役限界動揺振幅を比較することによってなされる。荷役に危険を及ぼす限界の動揺振幅の有義値を荷役限界動揺量とする。前述の“港内長周期波影響評価マニュアル”では、表-3のように船種毎に荷役限界動揺量を設定している。石炭運搬専用船の荷役限界動揺量は示されていないので、上田ら (1983)

が示した値を基に採用された一般貨物船の荷役限界動揺量を用いる。一般貨物船に比べて、石炭荷役時には、専用バケットを使用しているため、動揺限界量は小さくなる。ヒアリングによると、 $\pm 0.5\text{ m}$ をサージングについては安全基準としており、安全基準を超えるような船体動揺が生じると実際は荷役作業を中止する。そこで、サージングについては表-3の数値を限界量とし、その1/2を安全許容量とする。

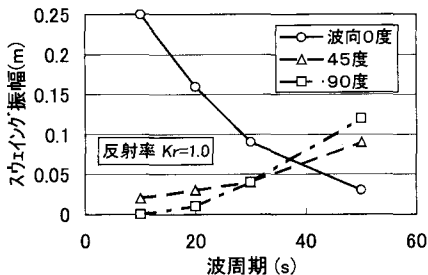
4. 計算結果による岸壁改善効果の評価

図-6に通常の直立岸壁(反射率 $K_r=1.0$) の場合の波周期に対する船体動揺の有義振幅の変化を示す。入射波高が0.1 mで小さく、遮蔽された港内ではヒアリング振幅は小さく、ヒアリング動揺で荷役に支障をきたすことはない。スウェイングは限界動揺量以下であるが、波向

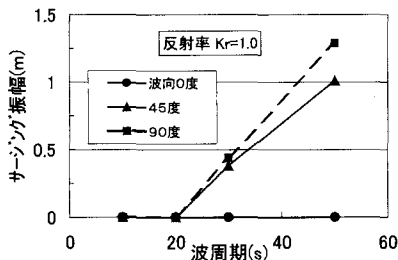
が45および90度のときに長周期波作用時に危険側になる。サージングに関しては、波周期が長くなると、入射角が45および90度の場合に振幅が大きくなり、荷役が困難になるので、岸壁構造改良が必要になる。



(1) ヒアリング振幅



(2) スウェイング振幅



(3) サージング振幅

図-6 波周期による船体動揺量の変化

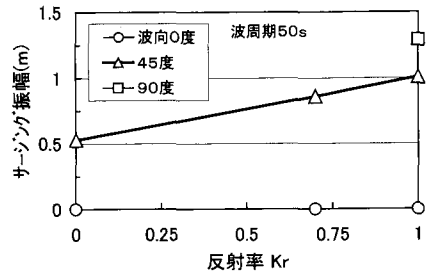


図-7 岸壁反射率によるサージング振幅の変化

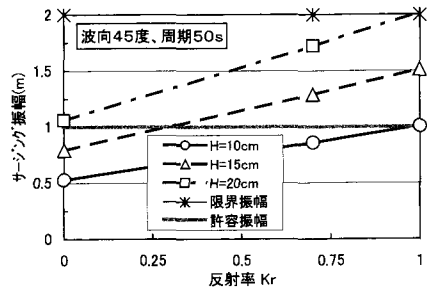


図-8 入射波高によるサージング振幅の変化

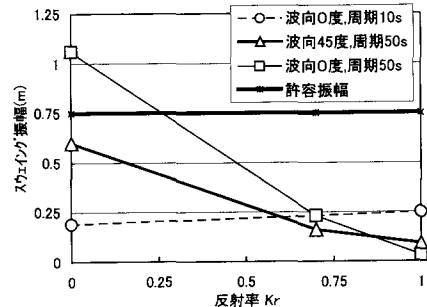


図-9 反射率によるスウェイング振幅の変化

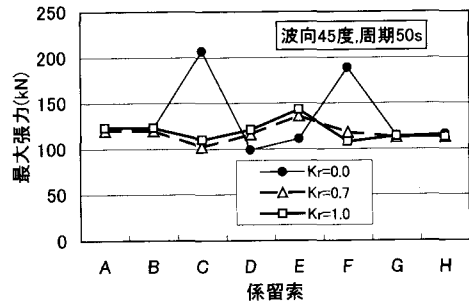


図-10 係留索に作用する最大張力

図-7は、長周期波によるサージング振幅の増大を抑止する目的で岸壁の反射率を低下させた場合の動揺振幅を示す。波向が90度の場合には岸壁反射率が変化しても岸壁前面波高は変化しないので、動揺の改善効果は無い。波向45度の場合には、 $K_r=0.7$ で動揺はやや小さくなり、 $K_r=0$ のときは50%以下に小さくなる。図-8は入射波の波高が大きくなった場合のサージング振幅の変化を調べたものである。港湾計画において岸壁前面の許容長周期波高は10~20 cmとされ、 $H=20$ cmが設定される場合がある。この場合には、 $K_r=1.0$ で振幅が2 mを越え施設破壊の可能性が高いが、 $K_r=0.7$ では限界動揺量を超えることはない。 $H=10$ cmまで小さくなると、 $K_r=0.7$ を採用すればサージング振幅は許容動揺量以下になり安全な荷役が可能になる。

図-9にスウェー有義振幅の変化を示す。スウェー振幅は、長周期波が作用しても許容値以下である。ただし、棧橋式岸壁($K_r=0.0$)の場合には、波周期が長くなると振幅が許容値を超えてしまい荷役ができない。また、長周期波対応岸壁($K_r=0.7$)は、斜め入射波に対してサージング振幅を低減できる効果を有している。また、周期10 sのうねりに対しては、スウェー振幅を低減させ、より安全な荷役を可能とでき、大型船の荷役岸壁の構造形式として採用できる。反射率がより小さくなり棧橋式に効果が一致すると、スウェー振幅が大きくなる場合があり、船体動揺計算を実施して、最適な反射率を求めておく必要がある。

図-10は、波向き45度、波周期50 sの場合に係留索A~Hに作用する最大張力を示したもので、このケースでは許容値を超えておらず、切断の危険性は小さい。しかし、 $K_r=0.0$ のときは、船舶のスウェーイング方向の運動を抑えるために、船体から直角に岸壁へ張られている係留索CおよびFの張力が他の索よりも顕著に大きくなる。これは、スウェーイング振幅の増大によるもので、作

用する索張力が不均一になると1本の索に力が集中し、切断の危険性が高くなる。 $K_r=0.7$ と $K_r=1.0$ の場合を比較すると、 $K_r=0.7$ の場合に係留索張力が全般にわたって低減しており、特定の索に張力が収集している現象は表れない。したがって、岸壁を改良して適切な反射率を持つようにすると係留索に作用する張力も均等に小さくなり係留の安全性が高まる。

5. あとがき

本研究では、6自由度の船体動揺計算を行って岸壁の反射率改善効果が船体動揺に及ぼす影響を調べた。その結果、岸壁を低反射構造に改良することによって、斜め入射時にスウェーイングとサージングの振幅を低減することができることが判明した。

参考文献

- 上田 茂・白石 悟 (1983): 係留船舶の動揺計算法とその評価、港湾技術研究所報告, Vol. 22, No. 4, pp. 181-218.
- (財)沿岸開発技術研究センター (2004): 港内長周期波影響評価マニュアル, 沿岸開発技術ライブラリー, No. 18, 79 p.
- 小林正典・島田 潔・藤平 徹 (1985): 複合外力下における係留浮体の応答シミュレーションプログラム, 三井造船技報, 第125号別冊, pp. 10-18.
- 小山健夫・藤野正隆・前田久明 (1997a): 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂書店, pp. 1-36.
- 小山健夫・藤野正隆・前田久明 (1997b): 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂書店, pp. 66-79.
- 笹 健児・白石 悟・榎原繁樹 (1999): 係留船舶の長周期動揺の各種計算法による再現性に関する比較検討, 港湾技研資料, No. 931, 80 p.
- 平石哲也・永瀬恭一 (2003): 長周期波対策護岸の性能検証実験, 海工論文集, 第50巻, pp. 801-805.
- 山本善之・大坪英臣・角 洋一・藤野正隆 (1997): 船体構造力学, 成山堂書店, pp. 176-185.
- Hsu, F. A. and K. A. Blenkarn (1970): Analysis of peak mooring force by slow vessel drift oscillation in random seas, Proc. OTC, No. 1159, 10 p.