

ケーソンの曳航・据付け時の動揺および索張力

石崎崇志* ・ 荒木英二** ・ 藤原隆一*** ・ 倉田克彦****
永田修一***** ・ 吉田尚史***** ・ 田中 洋*****

1. はじめに

本論文はケーソン曳航・据付けの作業限界に関する検討の第一段階として、ケーソンの動揺量、索張力と波浪、沈設状況の関係を実測値を基に調べたものであり、その結果に熟練技術者の判断を組み込み、ケーソン据付けの作業限界、稼働率の算定に数値的な根拠を与えて、合理的な施工計画の策定に役立たせることを最終的な目的としている。

曳航・据付け作業は海象条件によって大きく影響され、作業の可否は熟練した技術者の経験に基づく判断によるところが大きい。安全な作業のための作業限界条件の設定、稼働率の算定において、経験だけでなく実測、実験、理論の結果に基づく判断基準が得られれば、合理的な施工計画の作成に役立つ。

海上工事の作業限界に関して日本埋立浚渫協会(1985)は、技術者の経験、判断によるものを纏めている。これは実作業の担当者には判りやすいが、詳細な検討を行うには十分でないところがある。石見他(1996)は現地計測と数値計算の結果を基に、ケーソン据付け作業の限界条件を提案しているが、数値シミュレーションにおける減衰係数の設定が難しいとしている。白石・石見(1998)は作業船の作業限界条件を調査と数値計算の結果から提案しているが、ケーソンの曳航・据付けは含まれていない。また堀沢他(1996, 1997)および石崎他(1998, 1999)は曳航・据付け時のケーソンの動揺、索張力を現地計測、水理模型実験あるいは数値計算により求めているが、作業限界の検討までは至っていない。

2. ケーソンの曳航・据付け

太平洋に面した港湾の防波堤、埋立地護岸と岸壁に用いられるケーソン(5種類, 6函)を対象とした。

(1) ケーソン諸元

ケーソンは矩形断面で、その大きさは用途によって異なり、表-1に示すとおりである。

表-1 ケーソン諸元

ケーソン	用途	寸法 (m)			曳航時吃水 (m)	据付け時マウンド上水深 (m)
		幅	長さ	高さ		
①	岸壁	13.0	50.0	14.0	8.0	11.8
②	護岸	9.1	20.9	12.5	9.1	11.2
③	護岸	13.0	20.5	15.0	10.0	13.3
④	護岸	9.3	20.2	12.5	8.9	11.1
⑤	護岸	9.3	20.2	12.5	8.9	11.4
⑥	防波堤	25.0	29.9	22.0	17.8	19.5

(2) 曳航・据付け

ケーソン①は隣接港湾の、ケーソン②~⑥は当港湾の製作ヤード・仮置き場から、図-1に示すような経路を前後に配された曳船によって曳航される。据付け位置付近でロープ取りと曳船の配置を変更した後に、ケーソンを据付け位置まで曳船によって移動し一旦沈める。既設ケーソン上のウインチから図-2のようにワイヤー取りをし、曳船の配置、その他の準備が整った後にケーソンを再浮上させる。ウインチと曳船を使って位置決めをしながら、ケーソン内に注水して所定の位置に沈設する。

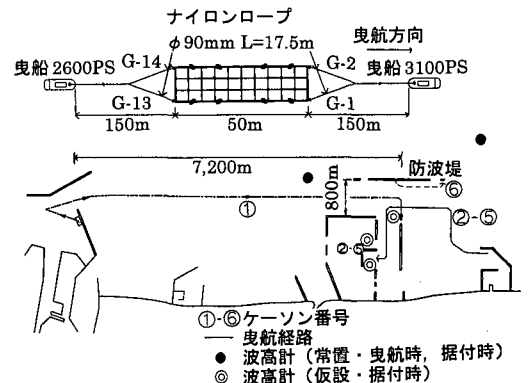


図-1 曳航経路と曳船の配置

* 正会員 工 修 ニシキコンサルタント(株)技術部係長
 ** 正会員 博(工) 東洋建設(株)東京支店土木技術部課長代理
 *** 正会員 博(工) 東洋建設(株)土木設計部課長
 **** フェロー 工 博 東洋建設(株)鳴尾研究所長
 ***** 正会員 工 博 日立造船(株)技術研究所 主管研究員
 ***** 正会員 博(工) 日立造船(株)技術研究所 主任研究員
 ***** 正会員 工 博 日立造船(株)橋梁設計部 部長代理

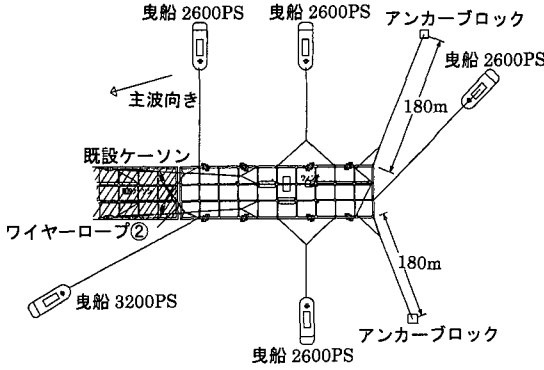


図-2 ロープと曳船の配置 (据付け時)

3. 計 測

(1) 動 揺

ケーソン仮蓋上に設置した慣性測定装置と磁気方位センサーによりケーソン天端における並進運動 (Sway, Surge, Heave) の加速度, 回転角度 (Roll, Pitch) ならびに振れ角 (Yaw) を測定し, その測定値からケーソンの重心周りの動揺量 (Sway : ζ , Surge : η , Heave : ξ , Roll : θ , Pitch : ϕ , Yaw : φ) を計算した。有義波と同じように定義した有義全振幅 (例えば $\zeta_{1/3}$, $\theta_{1/3}$) を, 有義波の波高 $H_{1/3}$ または最大波傾斜角度 $\pi H_{1/3}/L_{1/3}$ によって無次元化したものについて, また動揺の卓越周期についてはスペクトルにより検討した。

(2) 張 力

ロープに働く張力は, その端の連結用シャックルに貼付けた歪ゲージにより測定された歪み量から換算した。

(3) ケーソン位置と曳航速度

曳航中の各時刻の位置を GPS により測定し, その結果を基に曳航経路を求め, 曳航速度を計算した。

(4) ケーソン喫水

ケーソン自身の重量と仮設備の重量に, その深さから換算したバラスト水の重量を加え合わせてケーソン総重量を求めて喫水 d を計算した。

(5) 波 浪

曳航時の波浪は防波堤, 護岸の影響がない位置に設置された波高計 (図-1 中の●印) の記録を, 据付け時には各ケーソンの据付けごとにその近くに設置した波高計 (図-1 中の○印) の記録を解析した。本論文では有義波あるいは周波数スペクトルを用いている。

(6) 記 録

曳航開始時から据付け完了時まで, ケーソン位置と波浪を除きパソコンに連続・同時記録した。位置と波浪は読取り・解析の際に, 他の記録と時刻を合わせた。記録波形の読取りは 0.05 s 間隔である。

4. 曳航時の動揺と張力

(1) 曳航速度

ケーソン①～⑤の曳航速度は 0.8 m/s～1.3 m/s, ケーソン⑥は 0.2 m/s～0.4 m/s である。

(2) 動 揺

a) 動揺量

曳航時の動揺量の例を図-3 に示す。これによれば Heave と Sway は波高と同じ程度の揺れで, 自由浮体に似た動きをしており, 曳航ロープによる拘束が緩いことを示している。波の主方向はケーソン側面に直角に近いので Surge は小さくなっている。

b) 動揺のスペクトル

動揺のスペクトルは Roll を除いて波とほぼ同じピーク周波数を示している。また, 図-4 に示すように自由浮体としての Heave の固有周波数の計算値 (0.14 Hz) 付近においても小さなピークが見られる。このようにケーソンは固有振動と波による揺れが重なった, 先に述べたようにロープによる拘束が緩い自由浮体と似た動揺をしていると言える。Roll のスペクトルには波浪のピーク周波数, 固有周波数の計算値 (0.084 Hz) のいずれよりも低い周波数においてピークが現れている。

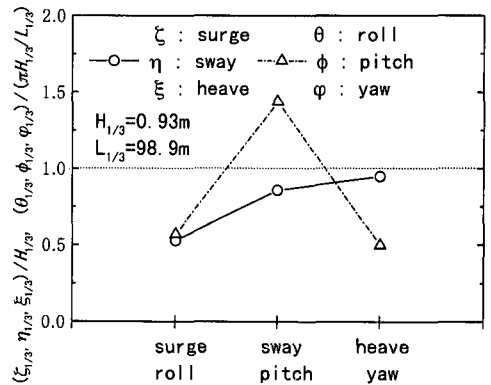
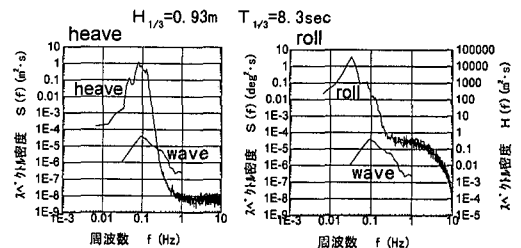


図-3 動揺量 (ケーソン①, 曳航時)



(a) Heave (b) Roll

図-4 動揺のスペクトル (ケーソン①, 曳航時)

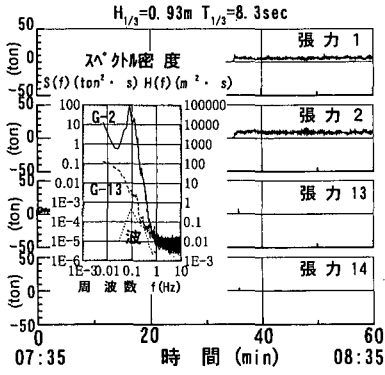


図-5 張力 (ケーソン①, 曳航時)

(3) 索張力

曳航索の張力は図-5のように曳航(上手)側のロープが大きく、前進(曳航)に対する抵抗に波浪による変動成分が重なっている。このことはスペクトルからも判る。下手側のロープには張力はほとんど作用していない。

5. 据付け時

(1) 動揺

a) 動揺量

ケーソンの動揺量と相対間隔(ケーソン底とマウンド天端の間隔 $c=h-d$ とマウンド上の水深 h の比 c/h) の関係の例を示したものが図-6である。図中には石見他(1996)による実測結果から著者が計算したのも含まれている。実測値が少なく、ばらつきはあるが、Swayは相対間隔とともに大きくなるようである。HeaveもSwayと同じような変化を示し、相対間隔が0.2程度以上になれば、波高と同程度の揺れとなるようである。相対間隔

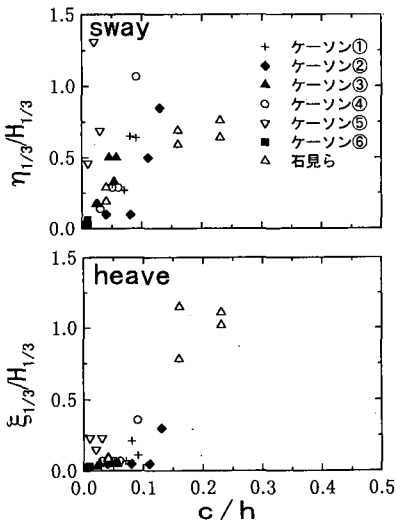


図-6 動揺量 (据付け時)

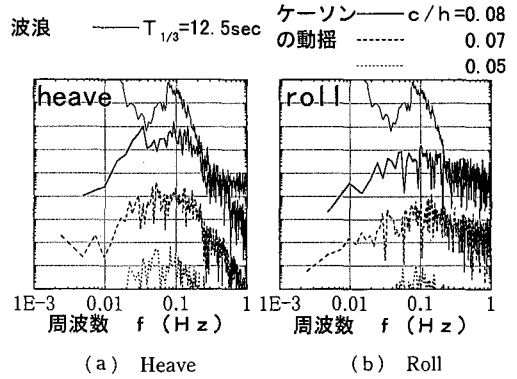


図-7 動揺のスペクトル (ケーソン①, 据付け時)

が0.1より小さくなると Heave の変化は小さくなり、据付け直前の相対間隔0.05以下にまで沈むと、有義振幅で水平方向(Sway)が鉛直方向(Heave)の2~3倍程度、最大振幅では5倍~8倍程度になり、水平方向の動きが際だつようになる。これが「据付け直前の下手側へのスライド」と称される現象に相当すると思われる(石見他, 1996: 堀沢他, 1996)。

b) 動揺のスペクトル

各相対間隔におけるケーソン動揺のスペクトルと波浪のそれを合わせて示したものが図-7である。スペクトルの形状、ピーク周波数の違いを調べることを意図したので、図-7では各段階のスペクトルを重ねないように上下に移動させて描いている。したがって縦軸の値は意味を持たない。

相対間隔が小さくなると並進運動(Sway, Surge, Heave)には波浪のピークより低周波数側にも別のピークが現れるようである。回転運動(Roll, Pitch, Yaw)にはそのような現象は明瞭に見られない。

(2) ロープ破断時

ケーソン①を一に着底させてから再浮上中に図-2に示す既設ケーソンからのワイヤーロープ②が破断した。当時の沖の波浪は $H_{1/3}=0.9m$, $T_{1/3}=8.3s$ であり、他のケーソンの据付け時と大差ない。

a) 時系列

ケーソンの動揺、索張力、ケーソンとマウンドの間隔ならびに据付け時の波浪を時系列として示したものが図-8である。この図に示す波浪は $T_{1/3}=12.5s$, $H_{1/3}=0.3m$ と沖より長い周期である。その波による大きなSwayとYawの揺れが重なり合って、ワイヤーロープ②のケーソン側取り付け点が既設ケーソンから遠去かるように、大きな速度で変位した。そのため、位置決めのためのワイヤーロープ②に急激に大きな張力が作用したため破断したと考えられる。

b) スペクトル

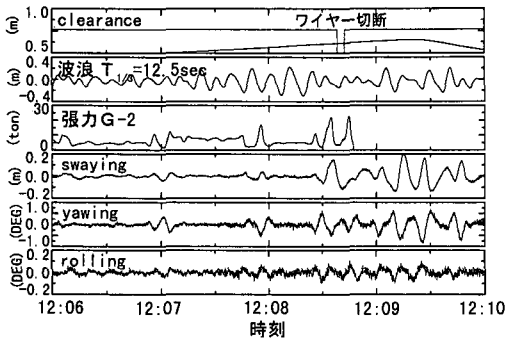


図-8 時系列 (ケーソン①, 破断前)

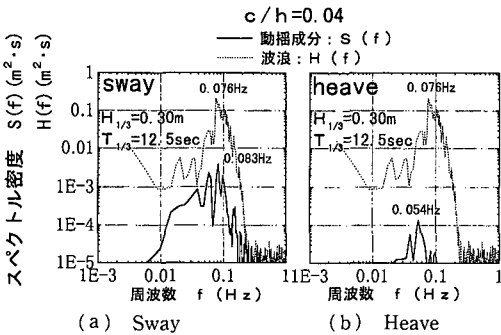


図-9 動揺のスペクトル (ケーソン①, 破断前)

この時のスペクトルは図-9のとおりで、ケーソンは概ね波と同じ周期で動揺している。しかし Heave は、自由浮体としての固有周波数の計算値 (0.070 Hz) あるいは波浪のピーク周波数より低周波数側にピークを持つ小さな揺れをしていることが判る。ただ、0.07 Hz~0.076 Hz の範囲において波浪、動揺のスペクトルはともに、その一部を欠いたような急激な変化を示している。

6. 据付け時の動揺について

ケーソンと既設ケーソンあるいはマウンドの間隔が小さくなると、ケーソン周囲の海水の運動が制限され、動揺抵抗と付加質量が増大する (Svendsen & Madsen, 1981)。このため動揺量が小さくなって、動揺の固有周期が長くなる。この結果として、相対間隔が小さくなるとケーソンは短い周期の波ではほとんど動揺せず、長い周期の波に反応するようになる。このことは図-6における相対間隔による動揺量の変化に、また図-7および図-9における動揺スペクトルのピーク周波数に現れている。このことはケーソン据付けにおいて、波群中の長い周期の波を考慮する必要性を示唆しているように思える。

7. 動揺の数値計算法

(1) 基本仮定

規則波中における動揺解析から求めた周波数応答関数

を持つケーソンに Bretschneider-光易型の周波数スペクトル、 \cos^2 乗の方向分布関数を持つ波浪を作用させてその動揺を予測した。計算では以下のように仮定した。

ケーソンはロープを介して曳船で曳航されるが、曳航速度は小さいのでこれを零とする。沈設時のケーソン喫水は時々刻々変化するが、計算では喫水を段階的に変化させて、計算時間中は喫水が一定とする。また、曳航時、沈設時における曳船の位置は固定されているとする。したがって、ケーソンの動揺は通常の係留浮体のそれと同じように扱える。さらにロープやワイヤーロープを質量を無視した線形バネとして扱う。係留索が1本の場合を直線バネ、3本の索が繋がって一つの係留索を構成する場合をY型バネと称する。

(2) 計算法

n本の直線バネとm本のY型バネで係留された浮体に規則波が入射する場合の運動方程式は次のようになる。

$$\sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk}(\omega)) \cdot \ddot{\eta}_k + B_{jk}(\omega) \cdot \dot{\eta}_k + D_{jk} \cdot \eta_k | \dot{\eta}_k | + C_{jk} \eta_k] = (F_{Wj} + F_{Kj}) \cdot e^{-i\omega t} \quad (j=1 \sim 6) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 η_k は浮体の k モードの運動変位、 M_{jk} は浮体の質量または慣性モーメント、 A_{jk} は付加質量、 B_{jk} は造波減衰力、 D_{jk} は非線形減衰係数、 C_{jk} は復元力係数、 F_{Wj} は波強制力、 F_{Kj} は係留力である。 ω は角周波数で、付加質量、造波減衰力、波強制力は3次元特異点分布法で求めた。

直線バネの場合、係留力は浮体静止時のバネの長さ、バネ両端の座標、初期張力からなる係数と6モードの浮体運動の線形和として表現できる。一方、Y型バネの場合、浮体運動時の3本のバネの交点位置は未知量であるから、交点の静止時からの変位量を (ξ_1, ξ_2, ξ_3) とすれば、浮体に繋がる2本の索の係留力は、直線バネの場合と同様に浮体の運動変位とバネ交点の変位量で表される。他方、バネ交点では3本のバネに関して力の釣り合いが成り立つ。この釣り合い式と係留力が代入された式(1)から、浮体の運動変位とバネ交点位置の(6+3)m個の未知量に対して同数の式が得られるので、その未知量が連立一次方程式の解として求まる。浮体静止時のY型バネの交点位置 (ξ_1, ξ_2, ξ_3) は、それらを未知量として、自然状態からの伸びによる3本のバネのポテンシャルエネルギーの和をそれらで微分することにより3個の非線形方程式が得られるので、Newton-Raphson法を用いた繰り返し計算により解が得られる。

(3) 計算結果

a) 曳航時の動揺計算

ケーソン①は図-1に示すように、2組のY型のロー

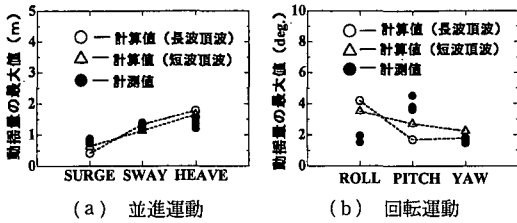


図-10 動揺量の最大値 (ケーソン①, 曳航時)

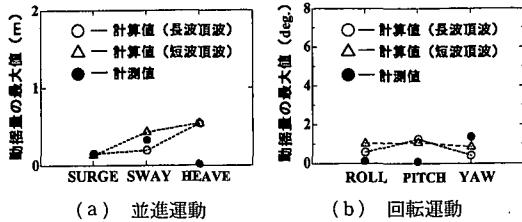


図-11 動揺量の最大値 (ケーソン①, 据付け時)

プで係留されている。計算では喫水 $d=8\text{ m}$ 、ケーソン底面からの重心高さ $KG=5.08\text{ m}$ 、重心を通る船首尾方向とそれと直角な水平軸ならびに鉛直軸周りの慣動半径をそれぞれ $KXX=4.37\text{ m}$ 、 $KYY=15.08\text{ m}$ 、 $KZZ=10.9\text{ m}$ 、横および縦メタセンター高さを $GM=0.68\text{ m}$ 、 $GML=24.96\text{ m}$ としている。 $H_{1/3}=0.93\text{ m}$ 、 $T_{1/3}=8.3\text{ s}$ 、波向 $=N\ 73^\circ E$ で水深は 20 m とした。係留索は $\phi=90\text{ mm}$ のナイロンロープで弾性定数 $E=35\text{ kg/mm}^2$ である。

図-10 に示すようにケーソン動揺量の計算値と実測値は概ね一致するが、Roll と Pitch には差がみられる。計算ではこれらのモードに関するダンピング係数 D_{jk} を池田 (1984) の方法で求めているが、実験値を用いれば両者の一致度は良くなると思われる。

b) 据付時の動揺計算

据付け時のケーソン①は図-2 に示すように係留されている。計算においては $d=11.18\text{ m}$ 、 $KG=6.07\text{ m}$ 、 $KXX=4.83\text{ m}$ 、 $KYY=14.73\text{ m}$ 、 $KZZ=11.93\text{ m}$ で、 $H_{1/3}=0.3\text{ m}$ 、 $T_{1/3}=12.5\text{ s}$ 、波向 $=N\ 75^\circ E$ 、水深 $=18\text{ m}$ 、ケーソンとマウンド天端の間隔は 0.62 m である。特異点分布法による流体力計算では、台形状のマウンドもパネル分割して考慮した。係留には $\phi 90\text{ mm}$ のナイロンロープと $\phi 21\text{ mm}$ と $\phi 36\text{ mm}$ のワイヤーロープ ($E=14,000\text{ kg/mm}^2$) が用いられている。図-11 はケーソン動揺量の計算値と実測値の比較である。ここでも Heave と Pitch に差が生じている。これはケーソンとマウンド天端の間隔が小さいので、通常のパテンシャル理論では付加質量を小さく算定するためと思われる。このことは図-9 に示したスペクトルのピーク周波数の違いからも

推定されることである。Svendsen & Madsen (1981) は間隔が小さくなるにつれて付加質量が著しく増加することを示しており、間隔が小さい場合の流体力係数の算定は今後の課題となる。

8. 結 論

① ケーソンの動揺はケーソン底面からマウンドまでの間隔に影響される。間隔が大きい場合は波の大きさに応じた動きをし、間隔が小さいと動きは小さく、その間隔による変化も小さい。

② 間隔が小さくなるにつれて、動揺のスペクトルは低周波数側にもピークを持つようになる。

③ ケーソンの据付け作業においては、波群中の長い周期の波を考慮する必要がある。

④ 曳航、据付け作業中のケーソンの動揺に関する数値計算法はほぼ妥当な結果を与える。ただ、ケーソンとマウンドの間隔が小さい場合、流体力係数の算定が適切でなく Heave と Pitch に違いを生じる。この点の改良は今後の課題である。

付 記

ケーソンの動揺、索張力の計測にあたって、ご支援、ご指導いただいた運輸省、茨城県、東京電力(株)の関係各位に深甚なる謝意を表します。また、東洋建設(株)東京支店ならびに現地作業所の方々から多大の協力を得た。ここに記して感謝する。

参 考 文 献

池田良穂 (1984): 横揺れ減衰力, 日本造船学会運動性能研究委員会, 第 1 回シンポジウム, pp. 241-250.
 石崎崇志・荒木英二・平野裕茂・藤原隆一 (1998): ケーソンの曳航時動揺特性, 第 53 回年講講演集, VI-259.
 石崎崇志・倉田克彦・荒木英二 (1999): ケーソンの据付時動揺特性, 第 54 回年講講演集 (印刷中).
 石見 剛・白石 悟・名里健吾 (1996): 外洋に面した港湾における防波堤ケーソンの据付時の動揺特性および作業限界, 港湾技研資料, No. 850, 29 p.
 白石 悟・石見 剛 (1998): 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, 78 p.
 (社)日本理立浚深協会 (1985): 作業船の作業限界条件調査報告書, 23 p.
 堀沢真人・佐藤典之・大橋裕寿・赤村重紀・坂間 茂・吉倉敬治 (1996): ケーソン沈設過程の波浪中挙動, 海岸工学論文集, 第 43 巻(2), pp. 1001-1005.
 堀沢真人・佐藤典之・坂間 茂・矢口真光・滑川正倫 (1997): ケーソン据付時の動揺及び索張力に関する現地調査, 海洋開発論文集, Vol. 13, pp. 429-434.
 Svendsen, I.A. and P. A. Madsen (1981): The dynamics of wave induced ship motions in shallow water, Ocean Engineering, Vol. 8, No. 5, pp. 443-479.