

広島建設技術研究所 正員 ○ 三村 長二郎

“ “ 森光 康夫

“ “ 竹田 哲夫

1 まえがき 近年、シーバースが各地で築造されるようになり、従来そのほとんどは泊地や湾内におけるものであった。しかし船舶の大型化あるいは工場の立地条件の関係から、外洋の波浪と直接接する沖合にも築造する要求が出てきた。こうした外洋シーバースでは、係留中の船体がうねりを受け、動揺した時に生じる衝撃力が設計上重要な外力となる。ただしこの種の衝撃力に関する研究はまだまだ少なく、例えば船体が横波を受け、同時に生じる衝撃力は水槽実験で補いながら解析した永井の研究⁽¹⁾、入射波の入射角が考慮されているが船体は固定された階円柱体とみなして解析した合田の研究⁽²⁾、また水槽実験で実験的に調べた谷本の研究⁽³⁾ 等のみられる程度である。そのためこうした外洋シーバースの設計を付ない、また発展させてゆくには、この種の衝撃力に関して種々の面からまだ多くの研究が必要である。ここではこのような観点から衝撃力を解析する方法を検討してみた。すなわち比較的大きな衝撃力をもたらされる場合の船体の運動は、入射波による強制振動と、防舷材に係留索復元力系での自由振動から成るものとして扱い、そして船体、防舷材、係留索の挙動を解析し、その結果としてフレキシブルフィンに作用する衝撃力、それにムアリンク・ドルフィンに作用するけん引力を求めようとするものである。

2 解析方針と運動方程式 この種の衝撃力は船体が横波を受け、場合により船軸方向に偏るにつれて緩和されてくる。前者の場合は係留可能な波浪条件の限界と評価するのに重要であり、後者は係留可能延日数の評価において重要である。ただし係留の構造的な面から主に制約を受けるのは横波あるへばそれに近い場合とみられるので、ここでは前者の場合を解析の対象とする。振動系は船体、水、防舷材、係留索を考慮し、ドルフィンは一概に指んち影響しないので振動系には考慮しない。船体の運動はヒール、スエーイング、ローリングが関与し、またこれらの運動と相互作用する水の運動は、船の長さから十分長く船首尾からの回折波の影響が僅少とみて2次元問題として扱う。そこで座標系を図-1のように選ぶ。そして上に述べた強制振動と自由振動の成分は、それぞれ船体座標系における運動 (z, x, θ) および構造物座標系における運動 $(\bar{z}, \bar{x}, \bar{\theta})$ として考慮する。その場合防舷材と係留索の復元力特性は著しく相違するので、運動方程式は以下に示すように、i) 船体が防舷材から離れている状態と、ii) 船体が防舷材を押している状態に分けて設定する。

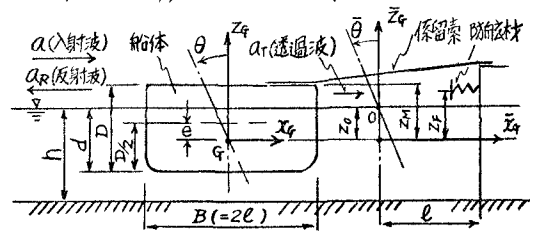


図-1 座標系と運動成分

で、ここでは前者の場合を解析の対象とする。振動系は船体、水、防舷材、係留索を考慮し、ドルフィンは一概に指んち影響しないので振動系には考慮しない。船体の運動はヒール、スエーイング、ローリングが関与し、またこれらの運動と相互作用する水の運動は、船の長さから十分長く船首尾からの回折波の影響が僅少とみて2次元問題として扱う。そこで座標系を図-1のように選ぶ。そして上に述べた強制振動と自由振動の成分は、それぞれ船体座標系における運動 (z, x, θ) および構造物座標系における運動 $(\bar{z}, \bar{x}, \bar{\theta})$ として考慮する。その場合防舷材と係留索の復元力特性は著しく相違するので、運動方程式は以下に示すように、i) 船体が防舷材から離れている状態と、ii) 船体が防舷材を押している状態に分けて設定する。

i) $\{ (x_f - z_f \theta) + (\bar{x}_f - z_f \bar{\theta}) \} < 0$ の状態;

$$\begin{bmatrix} M_0 \\ M_0 \\ I_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_f \\ \ddot{x}_f \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{W}{\alpha} \\ K_M \\ -z_f K_M, z_f^2 K_M + W \bar{G}M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_f + z_0 \\ x_f \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{z}_f + z_0 \\ \bar{x}_f \\ \bar{\theta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ F_0 \\ -z_f F_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{me} \\ P_{sw} \\ P_{ro} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_{me} \\ Q_{sw} \\ Q_{ro} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ii) $\{ (x_f - z_f \theta) + (\bar{x}_f - z_f \bar{\theta}) \} > 0$ の状態;

$$\begin{bmatrix} M_0 \\ M_0 \\ I_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_f \\ \ddot{x}_f \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{W}{\alpha} \\ K_F \\ -z_f K_F, z_f^2 K_F + W \bar{G}M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_f + z_0 \\ x_f \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{z}_f + z_0 \\ \bar{x}_f \\ \bar{\theta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ F_0 \\ -z_f F_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{me} \\ P_{sw} \\ P_{ro} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_{me} \\ Q_{sw} \\ Q_{ro} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 M_0, I_0 は船体の質量および質量慣性モーメント、 K_M, F_0 は係留索のバネ定数および初期張力、また

K_F は防舷板のバネ定数, W は船体重量, GM は傾心高, P は (x_q, θ) 振動成分に関する波力および逆波抵抗, Q は $(\ddot{x}_q, \ddot{\theta})$ 振動成分に関する逆波抵抗である。

ところで, ヒービングはスエーイングおよびローリングと連成させる程でもなく, 主は衝撃力およびけん引力を求めようとは関与しないので, 以下スエーイングとローリングについて記述する。そして係留対象船舶として15~25万DWTタンカーを想定し, 船体の慣性力あるいは復元モーメントと, 防舷板および係留索の復元力と比較すると, (1)式および(2)式には定量的に殆んど影響しない要素がある。したがってこれらの要素を除いて運動方程式を簡略化し, さらに (x_q, θ) と $(\ddot{x}_q, \ddot{\theta})$ 振動成分の分離をはかると次のようになる。

$$i) \text{の状態;} \begin{bmatrix} M_0 \\ I_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_q \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ W\bar{GM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_q \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{sw} \\ P_{ro} \end{bmatrix} \quad \text{----- (3)}$$

ここで(3)式は入射波によって励起される自由浮体の振動であり, (4)式の自由振動に乗ったものである。また(4)式はスエーイングのみに係留索が関与し, 防舷板の反撥力によって励起されるものである。一方ii)の状態

$$\begin{bmatrix} M_0 \\ I_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_q \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_F - Z_F K_F \\ 0, W\bar{GM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_q \\ \theta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{sw} \\ Q_{ro} \end{bmatrix} \quad \text{----- (4)}$$

については, まず①の方法が考えられるが, これは文献(1)の方法に相当するものである。②の方法は

$$ii) \text{の状態で;} \begin{bmatrix} M_0 \\ I_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_q \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_F - Z_F K_F \\ 0, W\bar{GM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_q \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{sw} \\ P_{ro} \end{bmatrix} \quad \text{----- (5)}$$

①の方法は

$$\begin{bmatrix} M_0 \\ I_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_q \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_F - Z_F K_F \\ 0, W\bar{GM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_q \\ \theta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{sw} \\ Q_{ro} \end{bmatrix} \quad \text{----- (6)}$$

(8)式が3項における (x_q) の振れが特徴であるが, (x_q) の大きさが入射波の波長と較べて微小であるもの

$$\text{②の方法, } \begin{bmatrix} M_0 \\ I_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_q \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ W\bar{GM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_q \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{sw} \\ P_{ro} \end{bmatrix} \quad \text{----- (7)}$$

とを考えると, こうした振れも復元力されるものである。そうすると(3), (7)式より (x_q, θ) 振動成分は定常

$$\begin{bmatrix} M_0 \\ I_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_q \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_F - Z_F K_F \\ 0, W\bar{GM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_q \\ \theta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{sw} \\ Q_{ro} \end{bmatrix} \quad \text{----- (8)}$$

振動を扱えばよいことになる。ここでは②の方法によって解析を行なう。

3 (x_q, θ) 振動成分の解析 (x_q, θ) の定常振動は 井島⁽⁴⁾ あるいは伊藤⁽⁵⁾ が解析した浮体波運動などのための運動と同様となる。これらの研究では, 水を完全流体とし微小振幅波理論の規則波を対象にして, 前者では厳密解を求め, 後者では散乱波の影響を省略して近似解を求めている。 (x_q, θ) 振動成分を解析するに, 対象とする入射波の特性を考えれば, こうした振動でも無理が伴わないし, 主に実用的には後者の方法でもその適用範囲に留意すれば有用なのである。したがってここでは後者の方法に準じて (x_q, θ) 振動成分に対する波力および逆波抵抗を与えると 船体の単位長さあたりについて(9)式のようになる。

$$\begin{bmatrix} P_{sw} \\ P_{ro} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 \\ I_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_q \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} W \begin{bmatrix} \frac{1}{2} f_H \\ -f_M \end{bmatrix} \left(1 + \frac{a_R}{a} \frac{a_T}{a} \right) a e^{i\omega t} \quad \text{(9)}$$

ここで, (9)式が1項の I_1 は底層域での付加質量慣性モーメントであり, 第2項の $(1 + \frac{a_R}{a} \frac{a_T}{a})$ は波力係数とも呼べる性格のもので, スエーイングとローリングに共通して位相が入射波の周期に応じて変化するものである。

すなわち, 入射波; $\eta = a e^{i(\omega t + k(x+z))}$

そして対象とする入射波の周期が長いので, 抗力の影響が殆んどないとせば, 文献(1)における補正係数に相当するものである。

$$I_1 = M_0 \frac{g^2}{4\omega^2} \left\{ \frac{l}{5(h-d)} + \frac{h-d}{l} \right\}$$

(P)が(9)式のように与えられると, (x_q, θ) 振動成分の応答は(10)式のようになる。

$$f_H = \frac{1}{d} \int_{-d}^0 \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} dz$$

$$(x_q) = - \frac{1}{2} \frac{g}{\omega^2 l} f_H \left(1 + \frac{a_R}{a} \frac{a_T}{a} \right) a e^{i\omega t}$$

$$f_M = \frac{1}{d} \int_{-d}^0 \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} (z+z_0) dz + \frac{1}{3d} f_B$$

$$(\theta) = \frac{1}{2} \frac{1}{\left(\frac{g}{\omega^2 l} \right)^2 - 1} \frac{f_M}{\bar{GM}} \left(1 + \frac{a_R}{a} \frac{a_T}{a} \right) a e^{i\omega t}$$

$$f_B = \frac{1}{h-d} \int_{-d}^0 \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} dz$$

$$\left(1 + \frac{a_R}{a} \frac{a_T}{a} \right) = \frac{2}{1 - y_{BHR}}$$

$$y_{BHR} = \frac{g}{\omega^2 l} \left\{ \frac{k(h-d)^2}{n} + \frac{kd^2}{n} f_H^2 \right\} + \frac{1}{\left(\frac{g}{\omega^2 l} \right)^2 - 1} \frac{e}{\bar{GM}} \frac{kd}{n} f_M^2$$

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$$

$$(\omega_R)^2 = \frac{W \bar{GM}}{I_0 + I_1}, \quad \bar{GM} = \frac{e^2}{3d} - \frac{d}{2} + z_0$$

4 ($\bar{x}_q, \bar{\theta}$) 振動成分の解析 防舷材と係留索の復元力特性が著しく相違することから ($\bar{x}_q, \bar{\theta}$) 振動成分を解析するための造波抵抗 (Q) は, ($\bar{x}_q, \bar{\theta}$) 振動成分のための波力および造波抵抗 (P) のように導くことができない。しかし参考の意味から、(9) 式で与えらるる (P) から入射波による波力を除いて造波抵抗のみを取り出すと、(11) 式のようになる。すなわち第1項は (9) 式と同様であり、第2項が造波抵抗およびそれに伴う付加質量効果であるが、(Q_{90}) の第2項は船体の復元モーメントと較べて著しく小さい。そのため ($\bar{\theta}$) は大きく励起されることではなく、($\bar{x}_q$) のみを考慮すればよいことと察せられる。またローリングの固有周期も、積載物も液体であるタンカーの傾心高 ($\bar{G}M$) の評価が重要であるが、(9) 式の (ω_R) で評価してよいことがわかる。

$$\begin{Bmatrix} Q_{9w} \\ Q_{90} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} 0, \\ I_1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\bar{x}}_q \\ \ddot{\bar{\theta}} \end{Bmatrix} + W \frac{kd}{n} \frac{i}{1-i\gamma_B} \begin{Bmatrix} -\frac{1}{2} f_H^2, f_H f_M \\ f_H f_M, -\frac{1}{2} f_M^2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{x}_q \\ \bar{\theta} \end{Bmatrix} \dots (11)$$

$$\therefore \gamma_B = \frac{g}{\sigma^2} \frac{k(k-d)}{n} f_B^2$$

$$\therefore (Q_{9w}) \approx - \frac{W}{\ell} \frac{kd}{n} f_H^2 \frac{\gamma_B}{1+\gamma_B} (-1+i\frac{1}{\gamma_B}) \equiv -(-\alpha+i\beta) \dots (12)$$

i) ($\bar{x}_q + \bar{x}_q - Z\bar{\theta}$) < 0 の状態;

$$(M_0 + m_1)(\ddot{\bar{x}}_q) + K_M(1+i\frac{C_1}{K_M})\{\bar{x}_q - (\bar{x}_q)_0\} - F_0 = 0 \dots (13)$$

ii) ($\bar{x}_q + \bar{x}_q - Z\bar{\theta}$) > 0 の状態;

$$(\bar{x}_q) = (\bar{x}_q)_T + (\bar{x}_q)_S \text{ とすると, } \begin{cases} (M_0 + m_2)(\ddot{\bar{x}}_q)_T + K_F(1+i\frac{C_F}{K_F})\{\bar{x}_q - (\bar{x}_q)_0\} - F_0 = 0 \\ (M_0 + m_2^*)(\ddot{\bar{x}}_q)_S + K_F(1+i\frac{C_F^*}{K_F^*})\{\bar{x}_q - K_F/(\bar{x}_q)_0 + (\bar{x}_q - Z\bar{\theta})\} \end{cases} \dots (14)$$

これらの式において、(m, C) の値をどのように与えるかが重要な課題であるが、(14) 式の第1式は船舶接岸時の挙動に相当するものであるから、(m_2, C_2) は船舶接岸時のデータと参考にして与えることができれば、また (14) 式の第2式の方は入射波の周期に対応する振動成分であるから、(m_2^*, C_2^*) をまず (12) 式で近似させることと考えられる。(m_2, C_1) については i) の状態の固有周期が非常に長く、付加質量効果のみが効くと与えられるので、(m_2) から類推することが考えられる。ただしこのような振へ方は衝撃力あるいはけん引力に反発の影響を定量的に調べなければならない。なお ($\bar{x}_q, \bar{\theta}$) 振動成分の応答は、(K_M)、(K_F) が非線形のパラメータであるから、パラメータと非線形近似して線形解析を繰り返すか、あるいは直接数値積分法として求めることになる。

5. 衝撃力とけん引力 これらの力を求める手順としては、まず所定の入射波における ($\bar{x}_q, \bar{\theta}$) 振動成分と、i) の状態の ($\bar{x}_q$) 振動成分に乗せて、衝撃力が最も著しくなる船体梁部と防舷材に接触させる。そして ii) の状態の ($\bar{x}_q$) 振動成分を求め、同時に船体が防舷材から離れる時の ($\bar{x}_q$) 振動成分の速度、すなわち離岸速度を求める。この状況と模式的に描けば図-2 のようになる。続いてこの離岸速度に基づいて i) の状態の ($\bar{x}_q$) 振動成分を求め、同時に船体が防舷材に接触する時の接岸速度を求める。このようにして初めて設定した接岸速度と、その結果として後から求められる接岸速度が等しくなるようなところを探せば、その船体~防舷材~係留索系の挙動を表していることになる。このような場合 K おける応答値を用いて、けん引力は (15) 式により、また衝撃力は (16) 式により得られる。ただし各ドルフィンに作用する力は、これらの力とそれ以外のトルシンの応じて振り分けられるに限り、また係留索の張力はさらに係留索ごとに振り分けられる。

i) ($\bar{x}_q + \bar{x}_q - Z\bar{\theta}$) < 0 の状態;

$$F_M = -F_0 + K_M(\bar{x}_q + \bar{x}_q - Z\bar{\theta}) \dots (15)$$

ii) ($\bar{x}_q + \bar{x}_q - Z\bar{\theta}$) > 0 の状態;

$$F_F = K_F(\bar{x}_q + \bar{x}_q - Z\bar{\theta}) \dots (16)$$

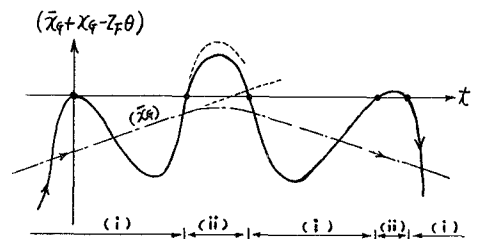


図-2 船体の防舷材接触状況 模式図

6. 計算例 係留対象船舶として15 $\sim$ 25 π DWTタンカーを
考え その代表例として約20 π DWTタンカー(満載時)につ
いて計算してみる。船舶の諸元は $(\frac{D}{L})=0.93$ $(\frac{d}{L})=0.7$
 $(\frac{Z_0}{L})=0.3$ $(\frac{g}{L})=0.4$ $(\frac{Z_1}{L})=0.5$ $(\frac{Z_2}{L})=0.4$ $(\frac{h}{L})=0.7$
 ΣW (満載排水トン)=244,000 t $W(=2\rho g d L)=880\pi m$
 $M_0=90\frac{t\cdot sec^2}{m}$ $I_0=22,700\frac{t\cdot m\cdot sec^2}{m}$ $T_R(=\frac{2\pi}{\omega_R})=12\frac{sec}{}$ である。

(x_4, θ) 振動成分の応答振幅は図-3に示す如くで、スエー
ンクローリングに対して $(T < T_R)$ で逆位相、 $(T > T_R)$ で同位
相となり、 $(T \neq T_R)$ でローリングが最大、 $(T = T_R)$ でスエー
ンクが0になるようなものである。またけん引力や衝撃力に関
係する船腹の横方向揺れは、これらの応答を重ね合せたもの
であり、 $(T = T_R)$ で極大値をとるようなものとなる。ただしこ
のような応答性状において、 $(T \neq T_R)$ 付近では、ローリングによ
る船腹位置での上下動が著しく大きくなるため、その影響を
別に考慮する必要があろう。

次に防舷杖係留索の復元力特性は図-4に示すものとし、
 $(1+\frac{m_0}{M_0})=2.4 \times 0$ および $(1+\frac{m_0}{M_0})=2.3$ $\alpha_2=0$ 、そして (m_0^*, α_2^*) は(12)式で
与え、入射波が $T=10\frac{sec}{}$ ($\frac{T}{T_R}=1.2$)、 $H(=2a)=3m$ の場合について
 (x_4) 振動成分の応答を求めてみる。i)の状態の (x_4) は図-5に示
す如くで、 $(G_0=0)$ としたことより離岸速度が次の接岸速度となり、ま
た係留索の伸縮性能からみて接岸速度は0.3 $\frac{m}{s}$ より少ないものとな
ることがわかる。一方ii)の状態の (x_4) は、接岸速度の初期値として
0.2 $\frac{m}{s}$ を用い 図-2に示した扱いで船体の接岸姿勢を与えると、図-6
に示すようになる。同図で離岸時の速度が接岸速度も若干上回るが
ii)の状態の造波抵抗が僅かな時間でも残っているとすれば、接岸速
度を割るかたちとなる。したがって図-2に示した程度の (F_T) が、この
ケースにおける衝撃力と受取ることになる。

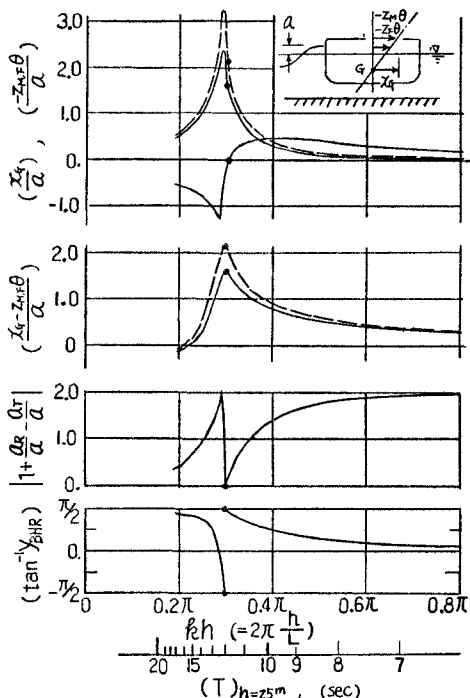


図-3 (x_4, θ) の応答振幅、液力係数、位相特性

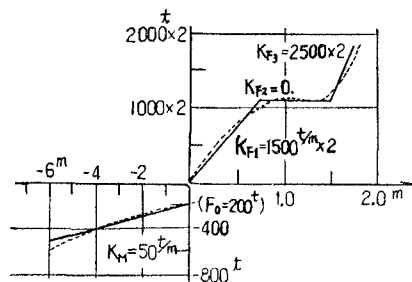


図-4 係留索、防舷杖の復元力特性

<共同研究者>

鹿島建設技術研究所;

野尻 陽一

藤田 時男

<参考文献>

(1) 永井ほか; 第16回海岸
工学講演会講演集(1969)

(2) 合田ほか; 港研報告
第12巻4号(1973)

(3) 谷本ほか; 港研講演会講演集(1973), (4) 井島ほか; 土木学会論文集202号(1972), (5) 伊藤ほか; 港
研報告第11巻2号(1972)

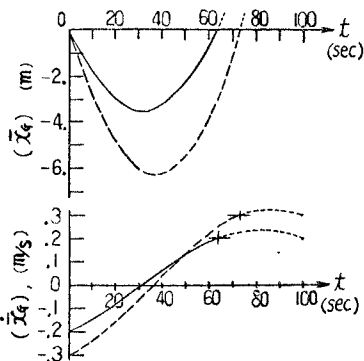


図-5 i)の状態における $(\bar{x}_4)$ と $(\bar{x}_4+Z_4)$ の応答

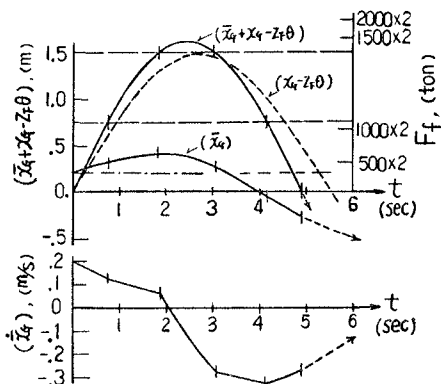


図-6 ii)の状態における $(\bar{x}_4+Z_4+\theta)$, $(\bar{x}_4)$ と (F_T)