

島突端の近くに設置された大型矩形ケーソンに働く波力

小田 一紀*・久保 直**・門口達彦***・巻幡敏秋****

1. ま え が き

本州四国連絡橋児島～坂出ルートの南備讃瀬戸大橋北側橋脚 2P ケーソンは与島南端の崖をほとんど垂直に近い状態（壁面傾斜角約 73° ）に掘削して造った平面岩壁から 6m～13m 沖の T.P. -10m の平坦に整地した海底上に据付けられるが、その直後の来襲波によってケーソンが移動しないように安定性を確保することが施工当初における重要な課題である。

矩形柱体に働く波力問題に関しては井島ら¹⁾が任意形状の堤体による波の散乱問題に関連して Green 関数法を適用して理論的に解析しているが、実験による検証はなされていない。Hogben ら²⁾は正方形柱体に働く波力について Green 関数法による計算値と実験値を比較し、比較的良好一致を見出している。Mogridge ら³⁾も正方形柱体に働く波力を MacCamy・Fuchs の円柱に対する回折波理論を適用して近似的に求め、実験値との比較を行い良好一致を見ている。さらに、Isaacson⁴⁾も Green 関数法を適用して任意形状柱体の波力問題を取り扱い、矩形柱に対して計算値と実験値の良好一致を確認している。

しかし、以上の研究は回折波領域の波力問題を取り扱ってはいるが波長に対する柱体断面の大きさが $b/L < 0.38 \sim 0.85$ (b : 矩形断面の長辺長あるいは正方形断面の辺長, L : 波長) の比較的小断面の柱体を対象としており、本研究で対象とするような b/L が最大 4.1 にもなるような大断面の矩形柱に働く波力に関する研究はほとんどなされていない。さらに、前述のように、ケーソンが島突端のすぐ近くに設置されるため、広い海域に単独に置かれた矩形柱の場合と境界条件が異なり、島突端の存在が波力にどのような影響を及ぼすかが興味ある問題である。

以上のように、本論文ではまず島突端に設置された 2P 橋脚ケーソンに働く波力特性を実験的に明らかにするとともに島のない単独ケーソンの場合の波力特性を調

べて島突端が波力に及ぼす影響を調べる。

また、前述の Green 関数法を用いて単独ケーソンに働く波力を計算し、実験値との比較によって大断面矩形ケーソンに作用する波力解析への Green 関数法の適用性を検討する。

2. 実験装置と実験方法

実験に用いた水槽は長さ 32.0m、幅 22.3m、深さ 0.8m の平面水槽である。与島突端とその周辺の海底模型は水槽の底に適当に砂を盛り、その上に図-1に示す範

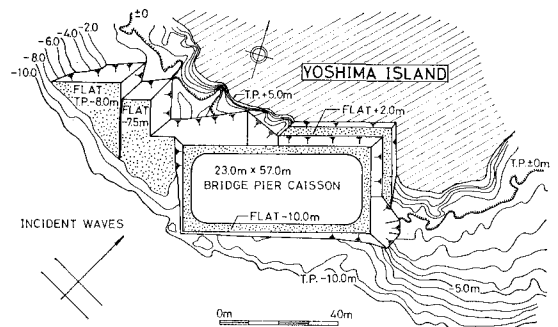


図-1 与島南端の海底および 2P ケーソン設置平面図

囲のものを縮尺 1/25 でモルタルで製作した。陸上は T.P. +5.0m までとし、海底は今回対象とする $T=3\text{sec} \sim 4\text{sec}$ の現地波浪特性から考えて、これらの波がほぼ海底影響を受け始める T.P. -10m より浅い部分を製作し、それより沖側は T.P. -10m の一様水深域とした。水槽内におけるケーソン模型の位置はその中心が水槽の長軸方向のほぼ中央に、短軸方向には長軸平行壁面から約 8m の位置になるように設定した。ケーソン模型は図-2に示す寸法（実物断面寸法で 23m×57m、高さ 15m）のものを鋼板等で作り、図に示すようにその底が水底に接触しないように僅かに隙間を開けて剛性の大きな架台で吊り下げた。さらにケーソン内側の垂直な 2 本の H 型鋼柱に取付けた合計 6 個のロードセル（共和電業製 LU-50KE 型、容量 50 kgf）とケーソン壁面とをターンバクルと適当な長さのチェーンで結び、それぞれ約 25 kgf の初期張力を与えてケーソンの水平移動を拘束し

* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 大阪市立大学講師 工学部土木工学科

*** (株) 奥村組

**** 正会員 工修 日立造船(株)技術研究所

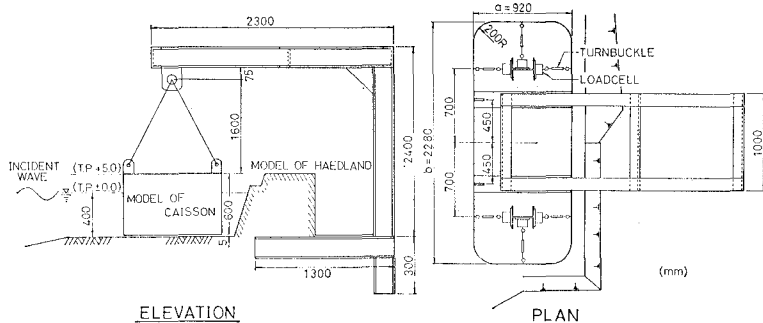


図-2 2P ケーソン模型および波力測定システム

同時に水平波力が計測できるようにした。このような波力測定方法はケーソンの水平移動および回転運動に対する吊材系の剛性がロードセル、ターンバクル等から成る水平波力測定系の剛性に比べて無視できる場合に限りて正しく機能するが、この点については水平荷重載荷装置による載荷試験によって十分精度良く測定しうることを予め確認した。

各ロードセルからの出力は動歪計を経て磁気テープに収録し、これをマイクロコンピュータ (SORD 社, M223) で処理して $\Delta t = 0.01 \text{ sec}$ でプリンターに打ち出させ、同時に XY プロッターで波力の時間波形を描かせた。

実験条件は、ケーソン設置位置における水深を現地換算値で 10 m (潮位 M.S.L. = T.P. $\pm 0.0 \text{ m}$)、入射波特性は推算結果に基づいて周期 $T = 3.0 \text{ sec} \sim 4.0 \text{ sec}$ 、波高 $H = 0.6 \text{ m} \sim 2.4 \text{ m}$ の範囲に設定し、ケーソンに対する入射角度は $\beta = 0^\circ \sim 90^\circ$ まで 15° 刻みに変えた。

以上の条件で島突端を含む海底模型のある場合と海底模型を撤去して一様水深状態でケーソン単独の場合の波力測定を行い、両者を比較検討した。

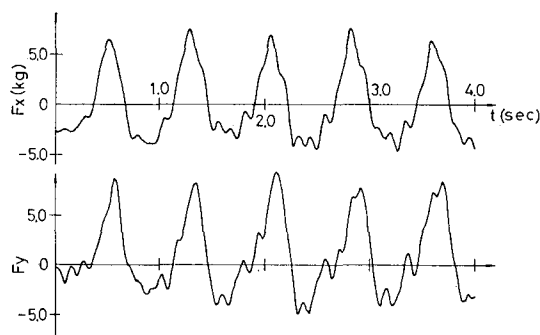
また後述の Green 関数法による理論解析結果と比較するため、単独ケーソンの場合は現地換算周期で $T = 6.0 \text{ sec}$ 、 $H = 1.2 \text{ m}$ 、および $T = 8.0 \text{ sec}$ 、 $H = 1.0 \text{ m}$ の波に対しても実験を行った。

3. 実験結果と考察

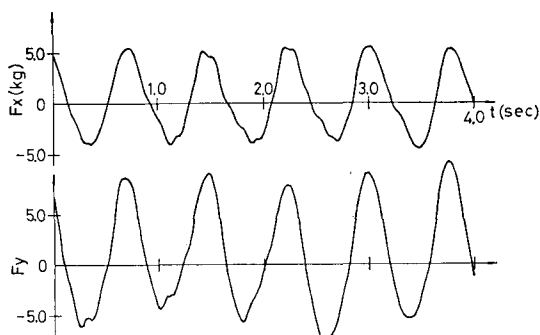
3.1 波力の時間変化と最大波力の定義

磁気テープに記録された各ロードセルの張力変動をマイクロコンピュータで処理して XY プロッター上に出力させた波力の x 成分 (ケーソン長軸方向成分) F_x および y 成分 (短軸方向成分) F_y の時間波形の一例を示すと 図-3 (a) および (b) のごとくである。何れも波の条件は現地換算で $T = 4.0 \text{ sec}$ 、 $H = 2.5 \text{ m}$ 、入射角度 $\beta = 45^\circ$ であるが、図-3 (a) は島突端のある場合、図-3 (b) は島突端のない単独ケーソンの場合の時間波形であり、+の値はそれぞれ x 軸、 y 軸の正の向き (図-4 参照) に働く力を表わしている。これらの図によると、

図-3 (a) には波力測定系の固有振動 (卓越振動は長軸周りのローリング振動、固有振動数 7.7 Hz) が重なり波形はやや複雑であるが、図-3 (b) ではほとんど固有振動波形は見られず波形は滑らかである。このような波力波形に測定系の固有振動が重なるのは必ずしも島突端のある場合だけとは限らず単独ケーソンの場合にも生じた。また、この場合の波力波形は



(a) 島突端のある場合



(b) 単独ケーソンの場合

図-3 波力成分の時間波形 ($T_m = 0.8 \text{ sec}$, $H_m = 5.0 \text{ cm}$)

F_x 、 F_y ともに+側と-側とは非対称で+側の方が若干大きな値を示している。図-4 は波力合力 $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ の時系列の一例を示したものであるが、これからも明らかに波力ベクトルの波形も岸向きと沖向きとが対称でなく、極大波力もこの例では沖向きより岸向きの方が大きい。この原因は主として波の非線型性によると思

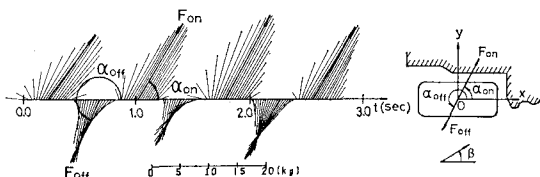


図-4 波力ベクトルの時間変化の一例と最大波力の定義

われるが、今回はこの点については深く考察しなかった。

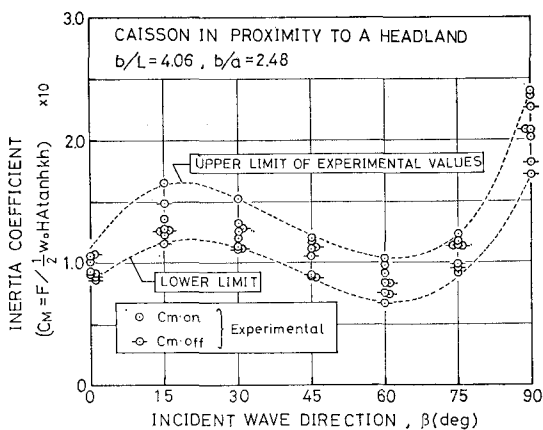
何れにしろ波力の大きさと作用方向は一周期の間に变化するが、その極大値は岸向きと沖向きに一つずつ存在し、空間的にほぼ 180° の差がある。図-4 に示すようにここではこれらをそれぞれ岸向き最大波力および沖向き最大波力と呼び F_{on} および F_{off} と表わす。同時にそれぞれの作用方向を α_{on} および α_{off} と表わす。岸向きおよび沖向き最大波力は後のケーソン単独の場合の理論の数値解析結果との比較が便利のように式(1)のように質量力係数の形に無次元化して用いる。

$$\left. \begin{aligned} C_{M\cdot on} &= F_{on} / \left(\frac{1}{2} w_0 H A \tanh kh \right) \\ C_{M\cdot off} &= F_{off} / \left(\frac{1}{2} w_0 H A \tanh kh \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

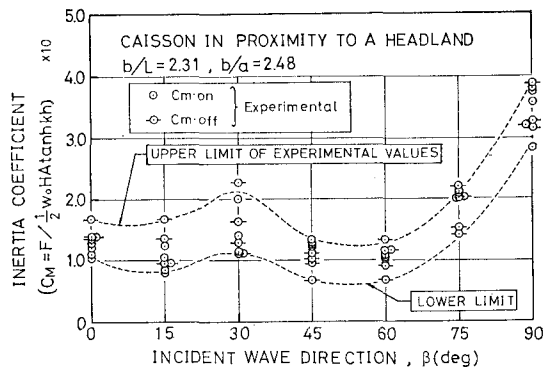
ここに、 $C_{M\cdot on}$ 、 $C_{M\cdot off}$ ：岸向きおよび沖向き質量力係数、 w_0 ：水の単位重量、 H ：入射波高、 $A=ab$ ：ケーソンの水平断面積、 a 、 b ：それぞれ水平断面の短辺長および長辺長、 $k=2\pi/L$ ：波数、 L ：波長、 h ：ケーソン設置位置における水深。

3.2 島突端のある場合

与島南端のすぐ沖に設置された橋脚ケーソンに働く最



(a) $T=3.0$ sec の場合



(b) $T=4.0$ sec の場合

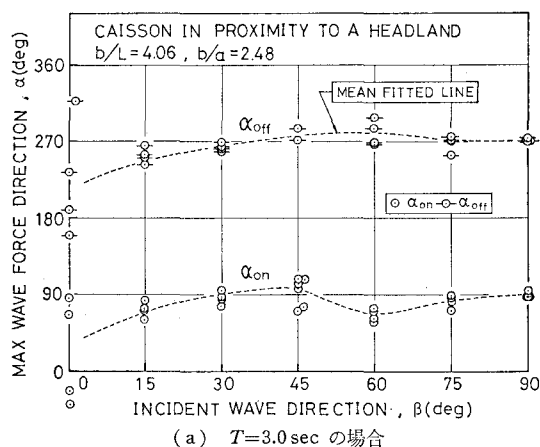
図-5 島突端のある場合の質量力係数と入射角度の関係

大波力の質量力係数 C_M と波の入射角度 β との関係を実地周期 $T=3.0$ sec および 4.0 sec の場合について表わすと図-5 (a) および (b) に示すごとくである。これらの図によると実験値はかなりばらついているが、 $T=3.0$ sec の場合は $\beta=20^\circ$ 附近で一旦極大値を示した後 $\beta=60^\circ$ 附近で極小となり、その後 β の増大と共に急激に増加し、 $\beta=90^\circ$ で最大値を示す。 $T=4.0$ sec の場合は極大値を示す β の値が 30° 附近にずれるが、それ以外の傾向は $T=3.0$ sec の場合と類似している。

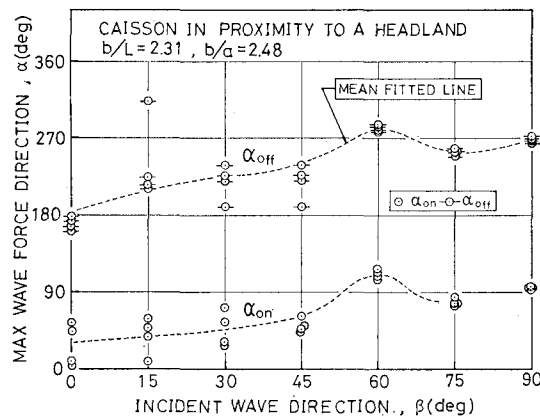
また、最大波力 α の作用方向と波の入射角度 β との関係を表わすと $T=3.0$ sec および 4.0 sec に対してそれぞれ図-6 (a) および (b) のごとくである。図-6 (a) によると、 $T=3.0$ sec の場合は $T=4.0$ sec の場合に比べ β の変化に対する α の変化はかなり緩慢であり、 $\alpha=90^\circ$ あるいは 270° 附近に偏っている。これは $T=3.0$ sec の場合は波長が短いため最大波力はケーソンの長辺面（軸平行面）に働く波圧に支配される傾向が強いためであろうと考えられる。

3.3 単独ケーソンの場合

図-7 (a) および (b) はそれぞれ一様水深条件で T



(a) $T=3.0$ sec の場合



(b) $T=4.0$ sec の場合

図-6 島突端のある場合の最大波力の作用方向と入射角の関係

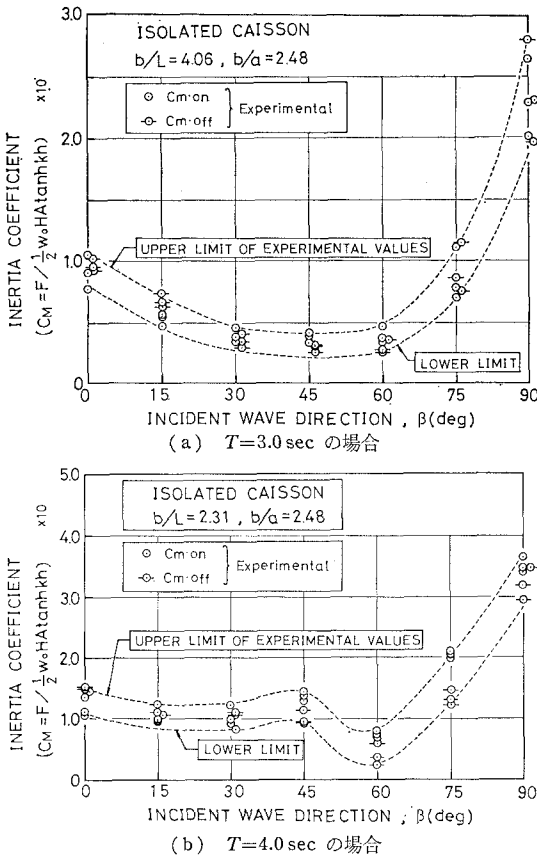


図-7 単独ケーソンの場合の質量力係数と入射角度の関係

=3.0sec および 4.0sec の場合の単独ケーソンに働く最大波力の C_m と β の関係を示している。これらを 図-5 (a) および (b) と比較すると、 $T=3.0$ sec の場合は $\beta < 60^\circ$ の範囲で島突端のある場合の方が大きな値を示し、 $T=4.0$ sec の場合も $\beta < 30^\circ$ の範囲および $\beta = 60^\circ$ 附近ではほぼ同様な傾向を示している。これは島突端のある場合はケーソンの北西隅角部と岩壁の間(図-1 参照)からケーソン背後に侵入した波が岩壁で反射し、侵入波と重なって重複波動的な波を形成し、これが波力を増大させると考えられる。図-1 から判断しても入射角度が比較的小さい場合にこの傾向が強くなるであろうことが推察される。 $\beta > 75^\circ$ では島突端の有る無しによってあまり波力に差が見られないことも上の説明の妥当性を裏付けていると思われる。

4. Green 関数法による理論的解析

4.1 理論の概要

任意断面形の柱体を対象として座標系を 図-8 のようにとる。水深 h は一様、流体運動は無渦運動とし、微小振幅波理論が適用できるものとする。また柱体壁面は不透過性を有するものとする。このとき入射波および散乱

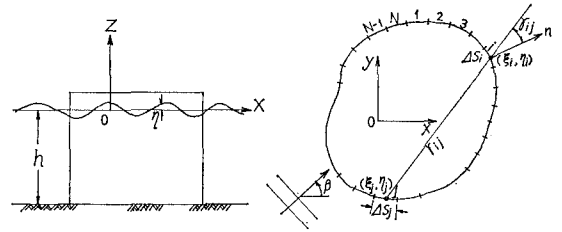


図-8 理論的解析に用いる座標系

波の速度ポテンシャル Φ_w および Φ_s は式 (2) および式 (3) で表わされる。

$$\Phi_w = A \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \phi_w e^{-i\sigma t} \dots\dots\dots (2)$$

$$\Phi_s = A \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \phi_s e^{-i\sigma t} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $A = igH/2\sigma$ 、 $i = \sqrt{-1}$ 、 g : 重力加速度、 H : 波高、 $\sigma = 2\pi/T$ 。

x 軸に対して β の角度で波が入射するものとする、

$$\phi_w = \exp ik(x \cos \beta + y \sin \beta) \dots\dots\dots (4)$$

また、散乱波の速度ポテンシャル ϕ_s は Green 関数を用いると式 (5) で表わされる。

$$\phi_s = \frac{k}{4\pi} \int_s f(\xi, \eta) G(x, y; \xi, \eta) dS \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $f(\xi, \eta)$: 柱体断面周辺上の任意点 (ξ, η) におけるわき出しの強さ、 $G(x, y; \xi, \eta)$: ラプラスの方程式、放射条件、わき出し点での特異性を満たす Green 関数で、ここでは Isaacson⁴⁾ に倣って次の形のものをを用いる。

$$G(x, y; \xi, \eta) = i\pi H_0^{(1)}(kr) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $H_0^{(1)}(kr) = J_0(kr) + iN_0(kr)$: 第一種ハンケル関数、 $r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$: 観測点 (x, y) とわき出し点 (ξ, η) の距離。

柱体壁面における法線速度が 0 であるという境界条件式を柱体周辺の分割要素の中点 (ξ_i, η_i) に適用すると式 (7) が得られる。

$$f_i(\xi_i, \eta_i) - \sum_{j=1}^N \left\{ \frac{1}{2\pi} f_j(\xi_j, \eta_j) \frac{\partial G}{\partial n}(\xi_i, \eta_i; \xi_j, \eta_j) \Delta S_j \right\} = -\frac{2}{k} \frac{\partial \phi_w}{\partial n}(\xi_i, \eta_i) \dots\dots\dots (7)$$

式(7)を柱体周辺の N 個の要素中点に適用して得られる未知数 $f_i(\xi_i, \eta_i)$ に関する N 元連立一次方程式を解き、同じく離散化表示した式 (5) に代入すると (ξ_i, η_i) 点における散乱波の速度ポテンシャルが求められる。これを既知の入射波ポテンシャル Φ_w と共に圧力方程式に代入すると要素中点における圧力 $p_i(\xi_i, \eta_i)$ が求められ、全周辺にわたって積分すると波力成分が式(8)で得られる。

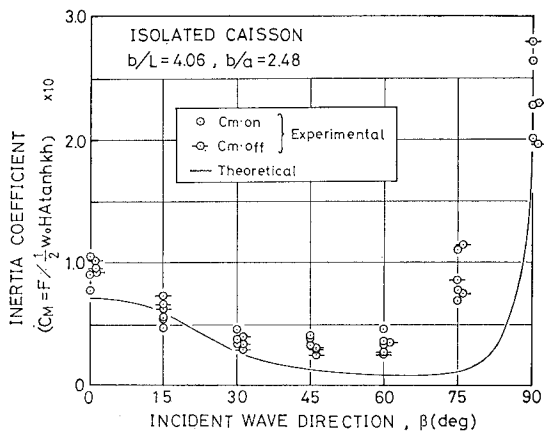
$$\left. \begin{aligned} F_x &= A_0 R_0 (\chi_x e^{-i\sigma t}) \\ F_y &= -A_0 R_0 (\chi_y e^{-i\sigma t}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ここに,

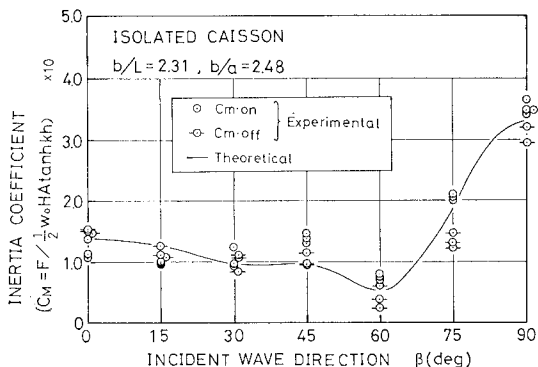
$$\left. \begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{2} w_0 H A \frac{\tanh kh}{kA} \\ \chi_x &= \sum_{i=1}^N (\phi_{wi} + \phi_{si}) \Delta Y_i \\ \chi_y &= \sum_{i=1}^N (\phi_{wi} + \phi_{si}) \Delta X_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

4.2 理論値と実験値の比較

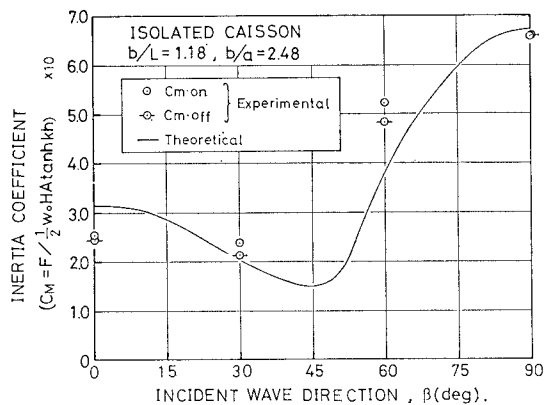
単独 2P ケーソンを対象として, 上記理論を適用し T



(a) $T=3.0$ sec の場合



(b) $T=4.0$ sec の場合



(c) $T=6.0$ sec の場合

図-9 質量力係数の理論値と計算値の比較
(ケーソン単独の場合)

$=3.0$ sec, 4.0 sec および 6.0 sec の場合の C_M と β の関係を求め, 実験値と比較したものが 図-9 (a)~(c) である. 但し, 計算においては分割要素長さが $L/8$ 以下になるように分割数を $N=94$ にとった. これらの図から明らかなように, $T=3.0$ sec の場合は理論値は $\beta=45^\circ \sim 75^\circ$ の範囲で実験値より小さく, 両者の一致度は良くないが, $T=4.0$ sec および 6.0 sec では両者の一致はかなり良好である. $T=3.0$ sec の場合は実験の波力波形にかなり大きな測定系の固有振動が重なっており, これを除去せずにそのまま実験値として採用した点に問題があったと考えられる. 最大波力の作用方向については紙数の制約のため図に示せないが波力と同様に $T=4.0$ sec と 6.0 sec の場合は理論値と実験値の良い一致を見た.

5. あとがき

本研究によって本州四国連絡橋南備讃瀬戸大橋 2P 橋脚ケーソンに働く波力特性が究明されたが, これに関連して以下のことが明らかになった.

1) 2P ケーソンのように島突端と僅かな間隔 ($0.5L \sim 0.9L$ 程度, L : 波長) を開けて設置される大断面矩形柱体に働く波力はこの間隔にある程度波が侵入する波向条件であれば単独柱体の場合より大きな波力が生じるときがある.

2) 水平断面の長辺が $1.2L \sim 4.0L$ の長さを有する単独大断面矩形柱体に働く波力の理論計算値と実験値の比較検証によって Green 関数法がこのような大型海洋構造物の波力算定に非常に有効であることが確認された.

境界周辺長が波長に比べて長いときはかなり大容量の計算機がいるが, 本研究で取扱った 2P ケーソンでは 1 ケース当りの CPU time は 5 sec 程度とかなり短かくてすむ.

終りに, 本研究における実験の遂行と本稿中の図の作製に当って終始熱心な協力を惜しまなかった大阪市立大学工学部の木村龍夫技術職員に対し深く感謝の意を表する.

参 考 文 献

- 1) 井島武士・周 宗仁・湯村やす・田淵幹修: 任意形状の透過および不透過防波堤による波の散乱と波力, 第 20 回海岸工学講演会論文集, pp. 79~87, 1973.
- 2) Hogben, N. and R. G. Standing: Experience in computing wave loads on large bodies, Proc. of the O.T.C., Paper No. OTC 2189, Vol. I, Houston, Tex., pp. 413~431, 1975.
- 3) Mogridge, G. R. and W. W. Jamieson: Wave forces on square caissons, Proc. of the 15th I.C.C.E., Honolulu, Hawaii, pp. 2271~2289, 1976.
- 4) Isaacson, M. de St. Q.: Vertical cylinder of arbitrary section in waves, Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Div., ASCE, Vol. 103, No. WW4, Paper 13973, pp. 309~324, 1978.