

大断面二次元箱形構造体に作用する波力に関する実験

田中柳之助*・儀賀俊成**・伊藤壮一***

1. はじめに

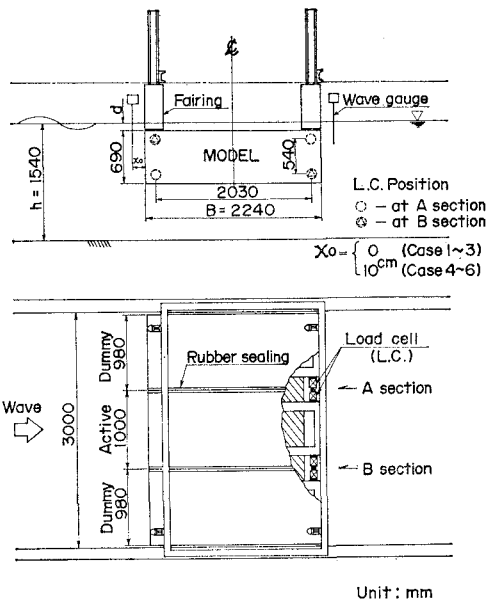
近年、海洋構造物に対するニーズは多様化しており、大断面を持つ大型構造物を、海上、海中に設置することが、可能な状況になってきている。我々は、その一つの例と考えられる、ジャケットで支持する箱形断面の水中トンネルに関して、設計外力を検討する機会を得、水槽実験を実施した。

このような構造物を設計する場合、外力としては、地震荷重と並んで波浪荷重が支配的になることが考えられる。波浪荷重については、構造体が海上付近に位置する場合の衝撃的波力と、海中に位置する時の波力の2種類に分けられるが、水槽実験で検討しようとしたのは、後者の波力である。このような波力、つまり、大断面構造物が水中に存在し、しかも波が通過していくような状況で作用する波力については、これまで幾つかの研究があるが、いずれも着底シリンダー型のものが対象にされている。水平に設置されるような構造物については、余り研究された例がない。波力の算定法としては、Garrison¹⁾、井島ら²⁾による回折理論 (diffraction theory) の適用が考えられるが、一般に設計時に与えられる波は、波形勾配が大きく、微小振幅波理論に基づく境界条件では厳密でない。その適用はほぼ無理と考えて良い。

今回の我々の実験は、その認識に立って、できるだけ大きな波高の波を模型にあてることにより、設計波力外力に対する資料を得ることを目的とした。また、併せて、いわゆる回折波力 (diffraction force) を計算して、波高の比較的小さい場合の実験値と比較検討した。検討結果はいずれも一次処理的なものであるが、余り例のない実験だと思われるので、ここに報告する次第である。

2. 実験装置および方法

実験は、水中トンネルの軸に直角に波があたる場合のみを考えて、二次元実験とし、長さ 60 m、幅 3 m、高さ 2 m の二次元造波水路を用いて行なった。造波板か



図—1 箱形模型の設置状況

ら 32 m の位置に、図—1 に示すように、模型を 4 本の H 鋼 (125 mm×60 mm) により片持ち支持固定した。H 鋼には、波の乱れを減少させるため、フェアリングが付けられている。模型は、中央アクティブ部で断面を縮小したダミー部と、ロードセルを介して支えられたアクティブ部から成る。材料はすべてアルミで、板材 (5 mm, 10 mm 厚) と補強アングル (5 mm×50 mm×板厚 5 mm) で構成されている。ダミー、アクティブ間のゴム (軟質) シールは、アクティブ部内側に水圧が漏れないための処置である。ロードセルは、図—1 に示すように、片側 2 箇所の計 4 箇所に、水平、鉛直、波力モーメントの 3 方向波力が測定できるように、一方向ロードセル (共和 LUB-200 KA) を 2 個ずつ組み合わせたものを配置した。計測器としては、他に、2 台の容量式波高計と波の形状変化を記録するための 8 mm カメラをセットした。

表—1 に、実験の断面寸法及び設計条件、模型の断面寸法及び実験条件、それに実験諸元を示す。実験条件は、フルード則に従って求めている。実験パラメータとしては、波高 H 、波周期 T 、没水深さ d の 3 つを考えた。波高については設計波周期 $T=1.5$ sec に対して、また、

* 鋼管杭協会

** 正会員 新日本製鉄 (株) 開発企画本部

*** 正会員 日本鋼管 (株) 津研究所

表-1 実機及び模型の諸元

	実 機	模 型	
	設計条件	実験条件	実験諸元
箱形断面(m) 高さ(H)×幅(B)	13×42	0.69×2.24	同 左
水 深 h (m)	29	1.54	同 左
波 周 期 T (sec)	6.5	1.5	0.9 ~ 2.4
波 高 H (m)	最大値: 8 有義波: 4.6	0.43 0.24	0.10 ~ 0.32
没水深さ d (m)	—	—	0.84 ~ 0.16
縮 尺	—	1/18.75	1/18.75

表-2 実験ケース

case	1	2	3	4	5	6
没水深さ d (m)	0.84	0.64	0.44	0.24	0.04	-0.16

波周期については波高 $H=10$ cm に対して、それぞれ 6 通りずつ変化させた。没水深は、箱形断面上面の水表面に対する相対位置を意味し、水面上に函体が出ている時は負数で表わす。これは、水中トンネルが水面からの相対位置を変えながら下りていくことに対する考慮である。没水深に対しては、表-2 に示すような実験ケースを規定した。

記録は、アナログデータレコーダーを使って行ない、実験後、A/D 変換をしてデータ処理をした。この時、入射波高については、模型のない状態で、造波板の設定周期、移動ストロークに対して造波波高を検定しておき、その値を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 結果の無次元化表示

結果の整理にあたっては、各測定値を無次元量として

評価した。

$$\text{水平方向波力係数} \quad C_H = F_H / (\rho g H S_H)$$

$$\text{鉛直方向波力係数} \quad C_V = F_V / (\rho g H S_V)$$

$$\text{波力モーメント係数} \quad C_M = M / \left(\rho g H S_V \frac{B}{2} \right)$$

ここで、 F_H, F_V, M は水平、鉛直方向波力及び波力モーメントの振幅、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 S_H は模型アクティブ部分の側壁面積、 S_V は同じく底部面積、 B は模型の幅である。波力係数の他には、 L/B (L : 波長)、 H/h (h : 水深)、 d/h などの無次元量が用いられている。

3.2 回折理論による計算値との比較検討

1. で述べたように、波形勾配の大きい設計波に対して、回折理論による計算値を適用することは、必ずしも正しくないが、波力の特性を知る上で参考になると思われるので、その比較検討を行なった。回折理論による波力の解析法としては、領域分割法、特異点分布法、有限要素法などが確立されている。これらは共通して、下記の仮定に基づいて速度ポテンシャルを計算し、波力を求めるものである。

① 流体は、非粘性、非圧縮性で表面張力のない完全流体である。

③ 入射波は微小振幅波である。

今回、波力を計算した方法は、いわゆる二次元特異点分布法で、高木³⁾によって研究された方法である。波力は、次の Haskind-Neman の関係式によって計算した。

$$F_j = \frac{\rho g}{m_0} \frac{H}{2} \hat{A}_j \left(1 + \frac{2m_0 h}{\sinh 2m_0 h} \right) \quad (1/\text{単位長さ})$$

ここで、 j は波力の方向、 m_0 は波数、 $\hat{A}_j$ は radiation potential に対する発散波振幅比である。

図-2 に、水平方向波力と鉛直方向波力について、計

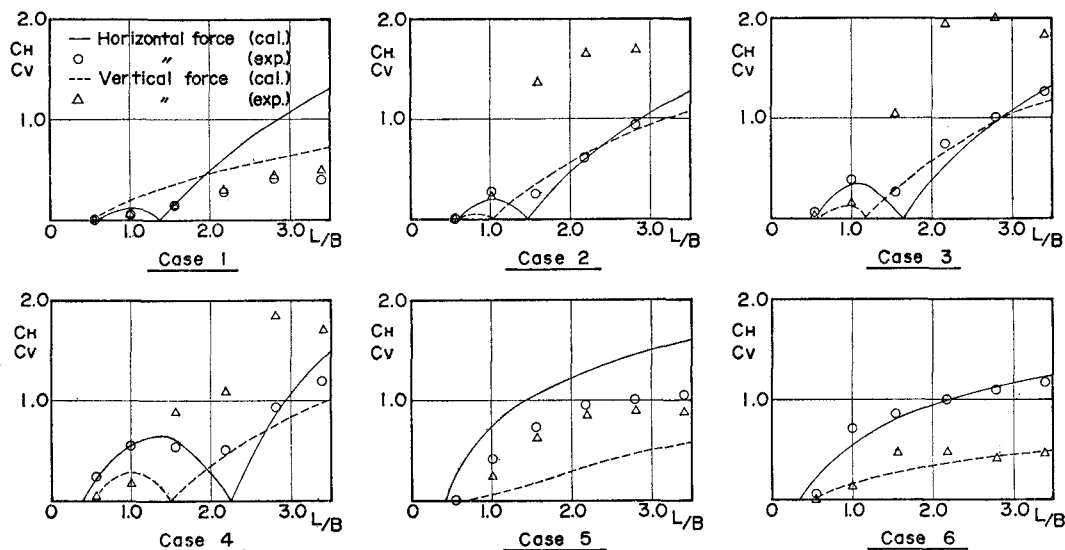


図-2 水平、鉛直方向波力と入射波波長の関係 ($H/h=0.21$)

算値と実験値を比較したものを示す。ここで実験値としてプロットした値は、入射波の波高を $H=10$ cm に固定して周期を変えた時のものである。これらの実験波の条件は、いずれも波理論の適用限界内に照らしてみると、Airy 波の範囲を越えており、厳密には、入射波は計算の仮定を満足していないが、波高自体は小さい ($H/h=0.065$) と判断して計算値との整合性について比較検討した。

水平方向波力については、case 1 を除いて、傾向、係数値とも良く一致する。波力は、周期が長くなるに従って増加する。ただし、没水深さによっては、特定の入射波波長(周期)で波力が零になる傾向が現われる。実験値は、計算値ほど完全ではないが、明らかにその現象が見える。これは、このように入射波波長に較べて、断面代表長さが大きい構造物に作用する波力に特徴的なことで、設計波周期が、この波力が零になる点の付近になる場合、波力外力の算定には注意を要することが分る。case 1 の違いについては、函底部と水路底との隙間が非常に狭いため、速度ポテンシャルの実際に対する近似度

が落ちたことによると考えられる。

鉛直方向波力についても、水平方向の場合と同じ傾向が見られるが、case 6 を除いて全般的に係数値は余り一致していない。特に箱形函上に自由表面がある case 2~5 の場合に、実験値が計算値を大きく上回る。このように函が中間に没水している場合については、従来も同種の実験が行なわれた例がなく、この実験だけから、その原因を究明することは難しい。今後、たとえば圧力分布を測定することなどによって、その原因を検討する必要がある。case 6 の場合は、これまで実験、解析された例があり、良く一致することが報告されており、今回の結果もそれを裏付けている。

3.3 設計波周期の大振幅波に対する波の形状変化と波力

これ以降の議論は、主として設計波周期 $T=1.5$ sec の実験波に対する検討結果である。まず、ここでは、大振幅の入射波が箱形函を通過する時の波の形状変化と、その時の波力の時間変化について述べる。

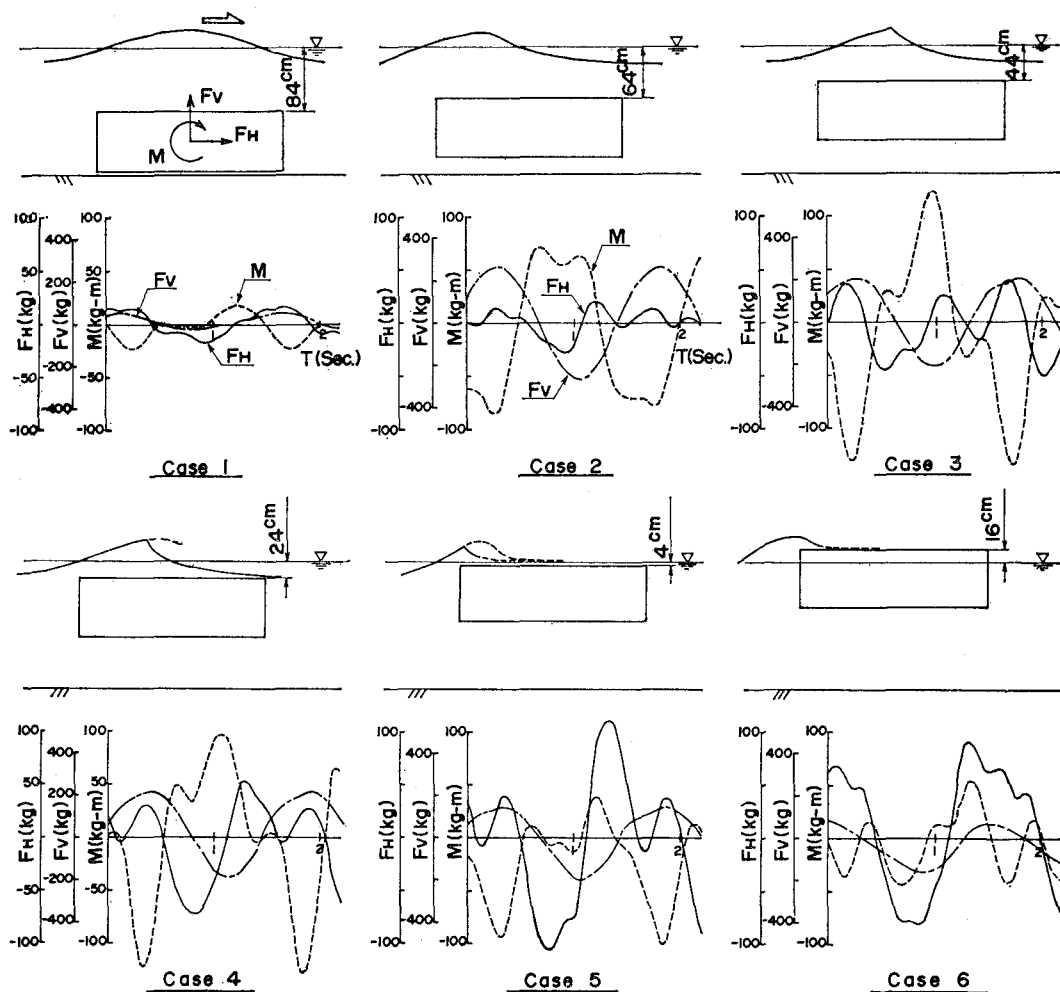


図-3 入射波の形状変化と波力の時系列波形 ($T=1.5$ sec)

入射波の振幅が大きくなると、箱形函回りでの波の形状変化が目立ち、作用波力の時間変化も正弦波状から特徴的な性状を示すようになる。図—3 に、 $T=1.5$ sec, $H=31.8$ cm (水槽の造波能力から今回の実験の最大波高), 波形勾配 $H/L=0.09$ の場合についての各記録を示す。波力は、いずれも入射波の峰が、入射側の波高計を通過する時をプロットの起点にしている。

波の形状変化については、物体が水面近くに位置するほど変形が大きくなり、峰が立ってき (case 3), ついには函上で砕波現象を起こす (case 4, 5) ことが分る。函体がある程度水面上に出ている case 6 については、波が函上に乗り上げて若干の流水はあるが、ほとんどは反射波となって函前面で重複波の様相を呈する。

また、波力の時間変化については、特に水平方向波力に変化が大きい。case 1 では基本周波数成分が卓越しているが、case 2, 3 では、入射波周期が波力の零になる点付近にあるため、高次成分が含まれており、波形は不規則な変化を示す。case 4, 5 では顕著に 2 つの峰が現われ、case 6 では山は崩れるものの、また入射波周期で周期的変化を示すようになる。一方、鉛直方向波力の時間変化は特に目立った変化を示さず、波高が大きくなっても正弦波状である。また、波力モーメントは、水平および鉛直方向波力の組み合わせによる力であり、全般に複雑な様相を呈している。

3.4 波高に対する波力の線形性

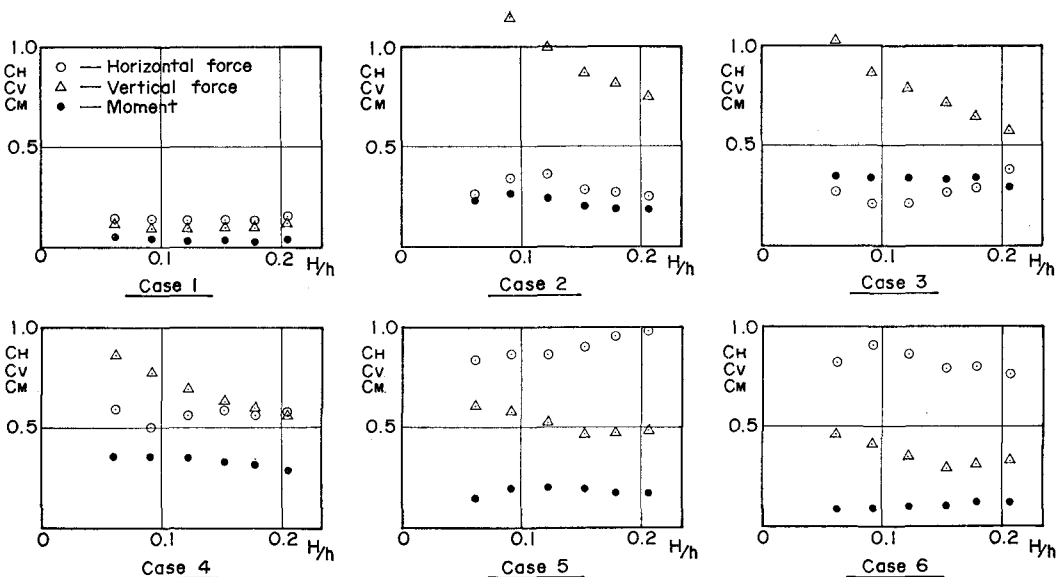
波形勾配の大きい設計波 ($H/L=0.12$) に対する波力を推定するために、設計波周期 $T=1.5$ sec に対して、波高を変化させて作用波力を計測した。図—4 は、その結果を波力係数値として無次元波高に対してプロットし

たものである。各方向波力とも、波高に対しておおむね非線形の傾向を示す。このことは、入射波の形状変化や砕波などの観察された非線形的現象を考えれば、予想されることであるが、変化の程度は各方向波力によって異なる。特に変化が大きいのは、鉛直方向の場合で、波高が大きくなるに従って、係数値が 50% 以下になる場合がある。水平方向、モーメントの場合は、各 case とも変化はそれ程大きくない。

これらの結果によって、波形勾配が実験範囲を越える設計波に対して、その波力値を推定することは単純ではないが、 H/h の大きい領域で係数値の変化が次第に収束することを考えれば、概算値は得られる。ただ、水平方向波力の case 3 と 5 の場合には、今回の実験範囲内で依然収束傾向が見られないので注意を要する。これらはそれぞれ、case 3 については、入射波周期が、波力が零になる点付近にあり、波力の発生機構が過渡的なために生ずる結果であり、case 5 については、箱形函体前面での強い砕波現象による結果と考えられる。

3.5 没水深に対する波力変化

厳密な意味で、設計波に対する波力係数値を得ることは、波高に対する非線形性が十分に明確でなかったためできなかったが、 $H/h=0.21$ (実験最大波高) での波力係数値が、その近似値を与えると考えて、図—5 に作用する波力の没水深に対する特性を示した。この図から、水平方向波力は箱形函体が水表面近くに位置する場合に最大になり、鉛直方向波力は逆に水底面近くの位置で、また、波力モーメントは両者の中間位置で最大になることが分る。位相については、入射波の峰が断面中心線上を通過する時を基準に、波力最大値の位相進みを正



図—4 各方向波力係数と波高の関係 ($T=1.5$ sec)

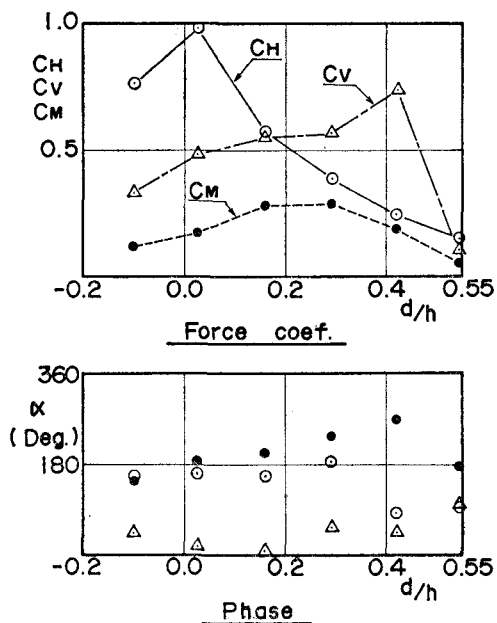


図-5 没水深さに対する波力係数値と位相の変化
($T=1.5$ sec, $H/h=0.21$)

に取っている。例として、水平方向波力の支配的な位相差 160° を考えると、これは、波の峰が函中心より $\alpha/360 \times L(3.49 \text{ m}) = 1.55 \text{ m}$ 前に位置する時、水平波力が最大になることを意味する。なお、水平方向波力で case 2, 3 の場合は、波力が零になる点の影響で波力波形が乱れ

ており、波力最大値も明確でないので、位相差についても不確かな点がある。

4. ま と め

以上の実験結果により、大断面箱形構造体に作用する波力は、入射波周期(波長)、波高、函の没水深さなどにより、波力の最大値、作用波形とも大きく変化することが分った。設計外力の評価という実用的観点からは、近似値ではあるが、図-5の結果を得た。しかしながら、今後、同種の構造体に対する波力を考えるについて、幾つかの問題点が残った。没水深さによって生ずる、波力の波高に対する強い非線型性、入射波の形状変化と波力の不規則性の関係、回折波理論による計算で波力を評価しようとする場合、その適用範囲など、これらは今後更に検討を要する問題である。

参 考 文 献

- 1) Garrison, C. J. and P. Y. Chow: Wave forces on submerged bodies, W.H.C.E. Div., Proc. ASCE, Vol. 98, No. WW3, pp. 375~392, 1972.
- 2) 井島武士: 最近の波浪理論における境界値問題の解法とその応用, 1971年度水工学に関する夏期研修会講義集, 土木学会, 1971.
- 3) 高木幹雄: 浅海域における船体運動について(その1), 西部造船会会報, 第50号, pp. 29~63, 1975.
- 4) たとえば, U.S. Army Coastal Engineering Research Center: Shore protection manual, Vol. II, 7, 3, pp. 7~63, 7~126, 1973.