

箱型着底式海洋構造物に関する波力及び波の打ち上げ

今井 貫爾*・利穂 吉彦**・岩瀬 浩二***・永富 政司**

1. ま え が き

沖合人工島、石油掘削用プラットフォーム等に代表されるような大型海洋構造物を設計する場合、構造物に作用する波力ならびに波の打ち上げ高を精度良く評価することは極めて重要なことである。これらの諸量の評価法としては、一般的に有限要素法 (FEM)、境界要素法 (BEM) 等の線形回折波理論^{1)~2)} が用いられている。その適用限界に関し、近年、非線形回折波理論に関する研究^{3)~4)} が盛んに行われつつあるが、その多くが円柱構造物を対象とし、比較的非線形性が弱いことを前提とした理論的研究である。

本報は、比較的浅海域に設置される断面の大きさが波長と同程度の大規模な箱型着底式構造物を対象として水理実験を行い FEM を用いた線形回折波理論と比較することにより、この種の構造物を設計する際の線形回折波理論の適用性を検討し、併せて簡便な補正方法を示すものである。

2. 実験設備及び実験方法

実験に使用した平面水槽は長さ 58 m、幅 20 m、深さ 1.5 m で水槽端には規則波用のフラップ式造波機が取り付けられている。水槽の概要は 図-1 に示す通りである。水槽内に設置した箱型海洋構造物模型は、寸法が縦横 4.3 m、高さ 1.4 m の鋼製模型である。

波圧の測定は、波の入射方向に対し模型が対称であるために模型前面及び後面の片側半分を対象として行った。測定位置は 図-2 に示すように、水平方向 5 測線、鉛直方向 9 点である。各測線には受圧部径 0.7 cm の歪式波圧計センサーが 3 台埋め込まれた上下にスライドできる合板がセットされている。実験は再現性を確認した上で同じ条件のものを 3 回繰り返して、合板を上下方向にスライドさせて波圧測定を行った。構造物に働く水平波力並びに転倒モーメントは得られた波圧分布を構造物表面上で積分することにより算定した。なお、各測線上に

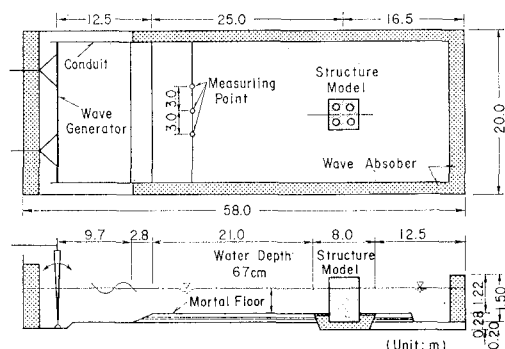


図-1 平面水槽概要

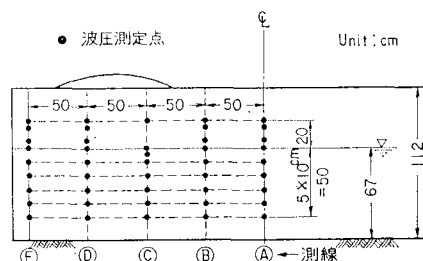


図-2 波高及び波圧の計測位置

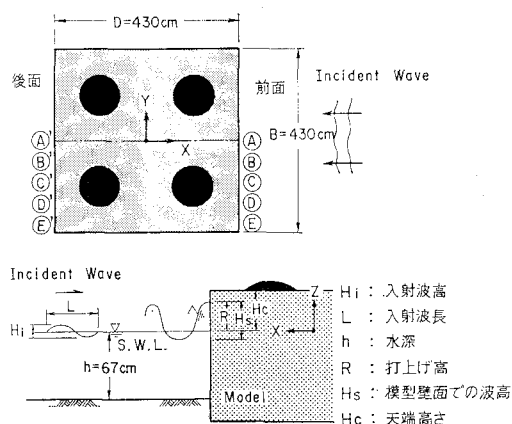


図-3 波の打ち上げ高測定位置と記号説明図

は、構造物への打ち上げを測るために容量式波高計をセットした。図-3 に測線位置及び波の打ち上げに関する諸

* 正会員 工博 鹿島建設(株) 技術研究所

** 正会員 工修 鹿島建設(株) 技術研究所

*** 正会員 鹿島建設(株) 技術研究所

表-1 実験条件

Case No.	水深 h (cm)	周期 T (sec)	波高 H_i (cm)	波形勾配 H_i/L	相対水深 h/L	模型幅波長比 B/L	碎波の有無
1 2 3 4	67	1.00	6.5 8.6 12.4 14.5	0.0419 0.0555 0.0800 0.0935	0.432	2.77	弱い碎波局所的碎波 (3箇所)
5 6 7 8	67	1.20	5.3 11.3 17.3 21.3	0.0245 0.0523 0.0801 0.0986	0.310	1.99	強い局所的碎波 (中央部) 強い局所的碎波 (中央部)
9 10 11	67	1.50	7.9 12.2 18.7	0.0256 0.0396 0.0607	0.218	1.40	碎波 (中央部)
12 13 14 15	67	1.80	7.1 14.3 20.5 27.2	0.0179 0.0360 0.0516 0.0685	0.619	1.08	弱い碎波 碎波 (全体)
16 17 18 19	67	2.00	6.4 12.5 18.9 24.1	0.0141 0.0275 0.0415 0.0530	0.147	0.92	弱い碎波 (全体)
20 21 22 23	67	2.50	6.1 12.1 21.1 25.7	0.0103 0.0204 0.0355 0.0433	0.113	0.71	弱い碎波 (全体)

元の記号を示す。

実験条件は表-1に示す通りで、水深 h を 67 cm に固定し、周期を 1.0~2.5 sec の間で 6 種類設定した。それぞれの周期について模型前面で重複波砕波が発生するまで波高 H_i を 3~4 段階 ($H_i/h \approx 0.1 \sim 0.4$) に変化させ計 23 ケースの実験を行った。なお入射波の方向は模型前面壁に直角である。また、回折の効果を表すパラメータである模型幅波長比 (B/L) は 0.71~2.77 とかなり大断面の箱型構造物を実験の対象としている。

3. 実験結果及び考察

3.1 波の打ち上げ特性

一様水深中に設置された鉛直堤への波の打ち上げについては、海岸堤防のように波長に比べて横方向の幅が十分大きい場合の研究例は多い。しかし、幅が有限な場合を対象としたものとしては、合田等による島堤沿いの波高分布に関する研究⁵⁾等、線形回折波理論に基づく若干のものがあるにすぎない。構造物の波の打ち上げ高に関しては砕波現象を含めた波の非線形性が重要な要因と考えられる。以下に、実験より得られた波の打ち上げ特性について述べる。

図-4 は構造物前面における波の打ち上げ高の実験結果についてまとめたもので

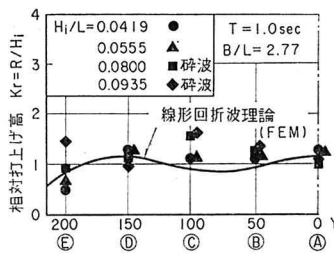
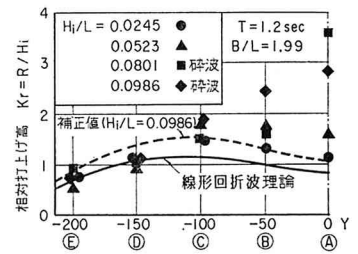
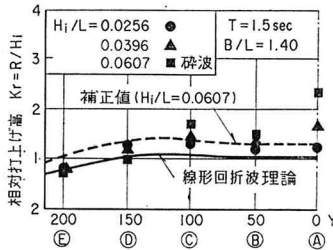
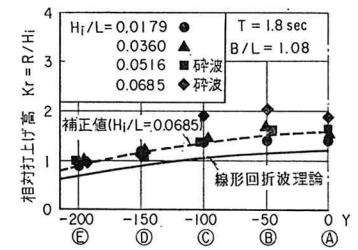
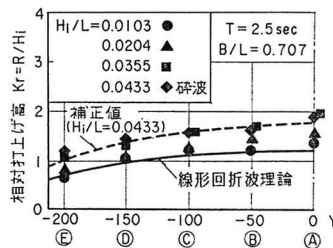
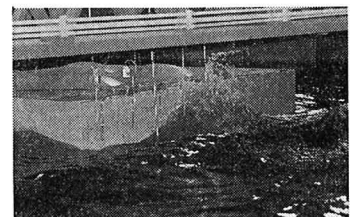
a) $T = 1.0$ sec ($B/L = 2.77$) の場合b) $T = 1.2$ sec ($B/L = 1.99$) の場合c) $T = 1.5$ sec ($B/L = 1.40$) の場合d) $T = 1.8$ sec ($B/L = 1.08$) の場合e) $T = 2.5$ sec ($B/L = 0.707$) の場合写真-1 局所的碎波の状況
($T = 1.2$ sec)

図-4 箱型構造物前面の打ち上げ高分布

ある。図中には線形回折波理論値に基づく FEM 解析結果が実線で示されている。これらより以下のことが判る。

①波の回折現象により、構造物幅波長比(B/L)が変化するに従い打上げ分布状況が変化する。周期 1 秒 ($B/L=2.77$) の場合、構造物端部を除いて概ね一様な打上げ部分となることに對し、 B/L の値が小さくなると打上げ高は中央部でピークを持つようになる。

②波高が大きくなり波の非線形性が強くなると一般に相対打上げ高 (R/H_i) は大きくなる。また、周期 1.2 秒 ($B/L=1.99$) のケースのように打上げ分布形状が異なってくる場合もある。

③砕波しない場合の波の打上げ分布形状に関しては線形回折波理論は現象を説明することができる。担し、定量的には一般に若干過少評価となる。

上記③の項目に関し、線形回折波理論の解析結果に有限振幅重複波理論⁹⁾に基づく波頂高 (η_0/H_i) の補正を施した結果を図中破線で示す。このような補正をすることにより打上げ高を概ね定量的に評価することができることが判る。

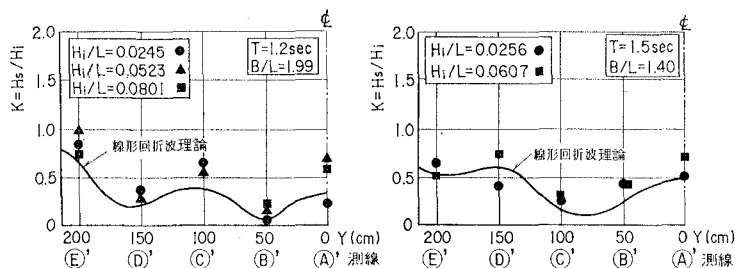
④砕波を伴う場合、打上げ高は理論値よりも大きくなる。特に模型幅波長比 (B/L) が 1.5~2.0 程度のケースでは、構造物前面中央部で局所的に激しく砕波しその打上げ高は入射波の波高の 4 倍近くに達する場合がある (写真—1)。これらの現象に関しては波の回折並びに非線形性効果が相乗的に複雑に関与していると考えられるが現状では理論的に取り扱うことは困難である。

一方、構造物背面における波の打上げ高については、遮蔽効果により波の非線形性の及ぼす影響は小さく、概ね線形回折波理論で評価することができる (図—5)。

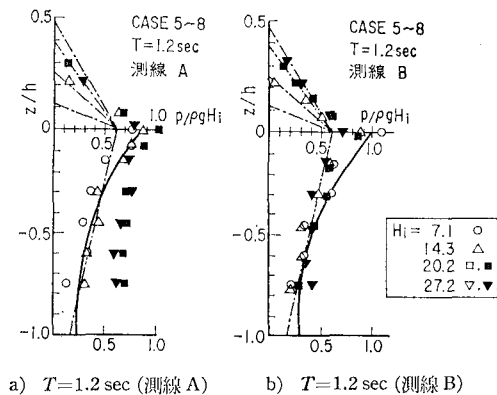
3.2 波圧分布に関する実験結果及び考察

a) 鉛直方向波圧分布

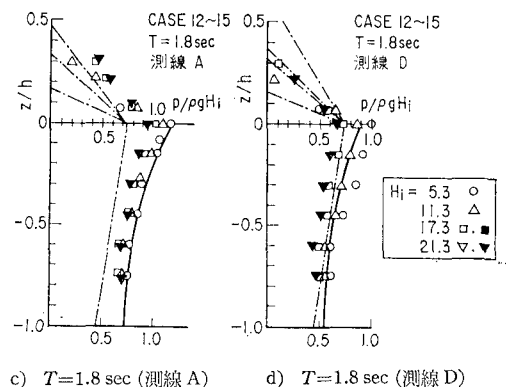
図—6 に実験より得られた模型前面での最大同時波圧の鉛直分布の代表例 ($T=1.2$ sec と 1.8 sec) を示す。同図には線形回折波理論値を実線で、合田式を 1 点鎖線で示した。線形回折波理論値は全般的に波高が小さい時は実験値と一致しているが、波高が大きくなり非線形性が增大すると静水面で波圧を過大評価する傾向にある (図—6 c, d)。ただし、周期 1.2 秒のケースのように $B/L=2$ 付近で局所砕波が生じる模型前面中央部においては静水面下で実験値が過大となっており、水底に近づくにつれてその過大分が増す傾向にある (図—6 a)。但しこの減少は局所的であり、中央部より 50 cm 離れた測線 B では顕著でない (図—6 b)。



図—5 箱型構造物後面での波高分布

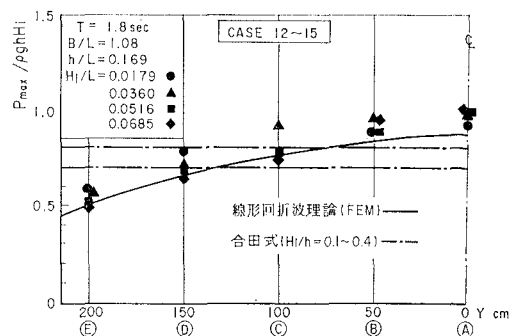


a) $T=1.2$ sec (測線 A) b) $T=1.2$ sec (測線 B)



c) $T=1.8$ sec (測線 A) d) $T=1.8$ sec (測線 D)

図—6 模型前面の鉛直波圧分布例



図—7 単位幅当りに作用する波力の水平分布

合田式は回折を考慮していないため模型前面の隅角部付近で過大評価、模型中央部で過小評価となる。静水面上の波圧分布は概ね直線で近似されることが判る。

b) 単位幅当たり作用する波力

図-7 に模型前面の各測線毎に波圧の最大値を鉛直方向に積分した値(水平方向単位幅当たり作用する波力)の一例を示す。前述したように波圧分布は非線形性の効果により線形回折波理論値と異なっているものの鉛直方向に積分した場合は局所的碎波の部分を除いてほぼ線形理論に近い。言い換えると波の非線形性が增大すると静水面下で線形回折波理論が過大となるが、この過大分は、静水面より上の部分に作用する波圧とはほぼ同等なものになっていると考えられる。

3.3 波力及びモーメント

a) 水平波力

図-8 は波圧分布を水平及び鉛直方向に積分して得られた水平波力の実験結果をまとめたものである。縦軸に無次元水平波力を横軸に模型幅波長比(B/L)並びに水深波長比(h/L)を取っている。表-1 に示したように実験値は6種類の周期に対し波高を3~4段階に変化させて示してある。図中の黒印は正圧の最大値を示し●▲■◆は波高の小さいケースから順次波高の大きいケースを示したものであり、白抜きは最大波高のケースにおける負圧の最大値を示したものである。線形回折波理論(FEM)による計算値を太い実線で、合田式による計算値を破線で示してある。これより次のことが判る。

①線形回折波理論は入射波長が大きくなると若干過少評価となる傾向があるが(10%程度)水平波力に関しては概ね妥当な評価を与える。

② B/L あるいは h/L が大きいケースでは波高が大きくなるに従い無次元水平波力が大きくなる傾向が見られるが、これらのパラメータが小さい所では必ずしもこのような傾向は見られない。

③合田式については今回の実験範囲内では($B/L=0.71 \sim 2.77$)では比較的良い一致を示した。但し、上記②に対し、合田式では波高が大きくなるに従い無次元水平波力が大きくなるため、その適用の際には条件次第で過大評価にも過少評価にもなり得るものであることを念頭に入れておく必要がある。

④ $h/L > 0.25$, $B/L > 1.5$ では、負圧の合力が正圧力の合力よりも大きくなり得る場合がある。このことは、構造物の滑動安定性を検討する際に、波進行方向よりも波入射方向の方が危険となる場合があることを示すものである。なお上記②及びこれらの特徴は2次元有限振幅重複波理論⁶⁾においても理論的に論じられていることである。

b) 転倒モーメント

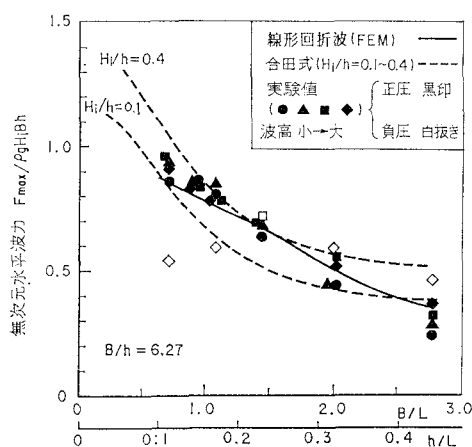


図-8 無次元水平波力と模型幅波長比との関係

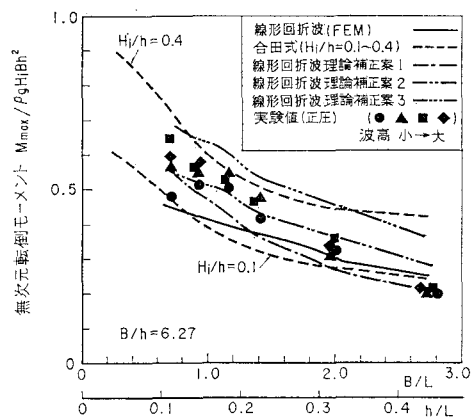


図-9 無次元転倒モーメント及びその補正値

水平波力に関しては線形回折波理論は概ね妥当な評価を与えた。しかしながら、鉛直方向の波圧分布が静水面までしか考慮されておらず実際の現象と異なるために(図-6)、図-9に示すように構造物に働く転倒モーメントに関しては線形回折波理論は過小評価となる傾向がある。この傾向は h/L が小さくなる程顕著となり、最も誤差の大きなケースでは30%程度の過少となった。このことは波力による転倒モーメントが支配荷重となるような構造物の設計においては、線形回折波理論を直接適用することは危険であり、適当な補正を加える必要があることを指摘するものである。

4. 線形回折波理論の補正

以上の水理模型実験結果を踏まえ、浅海域における波圧、波力及び転倒モーメントを線形回折波理論より算定する場合の簡易的補正方法を示す。表-2 は線形回折波理論、合田式、補正案1、補正案2、補正案3の波圧分布の概要である。

表-2 線形回折波理論補正案概要

	線形回折波理論	合田式	補正案1	補正案2	補正案3
波圧の鉛直分布図					
波圧の鉛直分布式	$p = p_0 \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh}$ $p_0 = \rho g K r H_i$ ($z < 0$)	$p_1 = \rho g H_i$ $p_2 = -\frac{p_1}{\cosh kh}$ $\beta_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left(\frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)^2$	$p = p_0 \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh}$ $p_0 = \frac{\cosh kh}{\cosh k(h+K r H_i)}$ $p_1^* = p_0 \frac{\cosh kh}{\cosh k(h+K r H_i)}$	$p = p_0^* \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh}$ $p_0^* = 2 p_0 \tanh kh / (k K r H_i + 2 \tanh kh)$ $p_2^* = p_0^* \frac{\cosh kh}{\cosh kh}$	$p = p_0 \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh}$ $p_0 = \rho g K r H_i$

補正案1は静水深 h に線形回折波理論より求められた波の打ち上げ高($K r \cdot H_i$)を加えた仮想水深を考えた鉛直方向に $\cosh$ 型で波圧が変化するとし、静水面と交わる波圧 p_1^* を求め、静水面ではこれと打ち上げ点を結ぶ三角形分布とする補正法である。

補正案2は、水平波力を変えずに波圧の鉛直分布を補正する案である。静水面上の波圧を三角形分布するとし、その増加分を静水面下の減少分と定義することにより次式が得られる。

$$p = p_2^* \cosh k(h+z) / \cosh kh$$

ここに $p_2^* = 2 p_0 \tanh kh / (k K r H_i + 4 \tanh kh)$

補正案3は、転倒モーメントの過少評価分を補正するため打ち上げ高の静水圧分を線形の理論波圧分布にそのまま加算するものである。

先に示した図-9には各周期における波高が最大のケース(◆ or ■)を対象として、それぞれの補正案による転倒モーメントの計算結果も示されている。補正案1は一般に過少評価となる傾向にある。補正案2は h/L が小さい範囲では過少評価となる傾向にあるが、今回の実験範囲内では概ね実験値と一致している。補正案3は波圧、波力、転倒モーメントのいずれにおいてもやや過大となる。総じて、補正案2はこの種の構造物に働く波圧、波力及び転倒モーメントを線形回折波理論を用いて評価しようとする際における実用的な簡易補正法として用いることができる。

5. 結 び

比較的浅海域に設置された箱型着底式構造物を対象とし、波の打ち上げ、波圧分布、波力及び転倒モーメント

に関する水理実験を行ない、線形回折波理論による解析結果と比較した。限られた実験ケースであるが、線形回折波理論の適用性ならびに簡易補正法に関し以下のことが明らかとなった。

a) 波の打ち上げ高については、線形回折波理論は分布形状は相似であるがやや過少評価となっている。これに対して有限振幅重複波理論による波頂高の補正を施すと実験値に近くなる。

ただし、砕波する場合、特に構造物幅波長 B/L が1.5~2.0付近において構造物前面中央部に局所的に激しく砕波が生じる場合、波の打ち上げ高は線形理論の解析結果の3~4倍に達することがある。

b) 波圧分布については、波高が大きくなり非線形性が増すと、線形理論は局所的砕波の部分を除いて静水面下で実験値よりも過大評価となる。しかし、静水面下の過大分は静水面上の波圧とはほぼ同等なものであるため、水平波力としてみれば非線形効果はそれ程大きくない。

c) 転倒モーメントについては、波圧分布の非線形性により線形理論はやや過少評価となる傾向にある。これに対して打ち上げ高さの位置まで波圧が直線分布することを前提とした線形理論の簡易的補正(補正案2)が妥当であることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 阪東浩造・相河清実・利穂吉彦：有限要素法による波力解析，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 682~686，1985。
- 2) Garrison, C. J.: Hydrodynamic Loading of Large Off-shore Structures; Three Dimensional Source Distribution Method, Numerical Methods in Offshore Engineering, edited by O. C. Zienkiewicz et al., Wiley, pp. 87~140, 1978。
- 3) 山口正隆・土屋義人：大口径円柱に作用する波圧・波力に及ぼす波の非線形性の影響，土木学会論文報告集，第22号，pp. 41~53, 1974。
- 4) 喜岡 渉・石田 昭：円柱に作用する第2次近似回折波力，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 472~476, 1982。
- 5) 合田良美・吉村知司・伊藤正彦：島堤防による波の反射及び回折に関する研究，港湾技術研究所報告，第10巻第2号，1966。
- 6) 合田良美・柿崎秀作：有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究，港湾技術研究所報告，第5巻第10号，1966。