

大水深における重複波を考慮した設計波力算定法

酒井 浩二*・井福 周介**・大釜 達夫***・山崎 耕嗣****

1. はじめに

防波堤は波の力に対して、通常その自重などで滑動や転倒に抵抗している。大水深で比較的静穏な海域において、ケーソン式混成堤を採用する場合、滑動の安全率に余裕が生じることから、堤体の幅を狭くして、フーチングと呼ばれる堤体の下部に張り出し部分を設けた構造形式が経済的に有利となる。フーチングを出来るだけ長くとることができれば、転倒の安全率を確保し、底面反力も低減できる構造となる。しかし、現行の設計法ではフーチング部分に働く波力を無視した設計を行っていることや、大水深の重複波領域においては、冲向き波力が岸向き波力より大きくなるなど、通常の防波堤の波圧と異なり十分な注意が必要である。そのため、本研究では二次元水理模型実験により、水深波長比が0.286~0.750という大水深重複波領域において、現行波力算定法の適合性の検討を行い、ロングフーチングケーソンの合理的な設計波力算定法の提案を行うものである。

従来の波力算定法は、合田が波圧実験結果等より提案した岸向き波力時の波力の算定式として「合田式」と、冲向き時の波力の算定式として「壁面に波の谷がある時の波力算定式」を標準として用いている。しかし水深に対する波高比が小さく明らかに重複波的波力が作用すると考えられるときは、重複波理論式を用いても良いこととなっており、本研究では、有限振幅重複波理論として、合田らによる重複波の速度ポテンシャルの第四次近似解による波力を用いることとする。なお、この理論式では岸向き波力時、冲向き波力時の両方の波力を計算することができる。

なお、本論文においては、簡便のため、岸向き波力時 (onshore)、冲向き波力時 (offshore) として記し、「合田式」や「壁面に谷がある時の波力算定式」を「従来の波力算定式」と称し、それぞれ (Goda) (Trough) と記述

する。また有限振幅重複波理論を「理論」(Theory) と記述することとする。

2. 実験概要

本実験に使用した水路は、運輸省第四港湾建設局水理実験センターの長水路 (長さ 50 m×幅 1 m×高 1.5 m) である。造波機は反射波の吸収制御が可能なピストン型である。

実験の対象とした断面を図-1 に示す。設置水深、潮位、ケーソン天端高および基底高を一定とし、ケーソン直立部の幅 B を一定としてフーチング長 b を変化させた。ケーソン模型は水路幅方向に 3 分割し、中央を測定函とした。実験縮尺は、想定した断面諸元と実験水路諸元との関係や対象とする波浪諸元を考慮して 1/40 を設定し、現地水深 42.2 m に相当する。

本実験は、規則波を用いた波圧・全波力実験であり、非越波条件により実施した。計測は、ケーソン直立部の前方約 1 cm の位置に波高計を設置し壁面水位を測定した。また波圧の測定には圧力計を図-2 に示すように合計 10 個取り付けた。またケーソン全体は背面で三成分検出器に剛結し、ケーソンに働く全波力の水平成分 (F_x)、鉛直成分 (F_z) および三分力検出器のモーメントセンサーまわりのモーメント (M_y) を測定した。

実験のケースは、表-1 に示すように、フーチングの長さを変えた 2 種類の模型を用いて、周期 3 種類に対し波高を 2 種類設定し、合計 12 ケースを実施した。

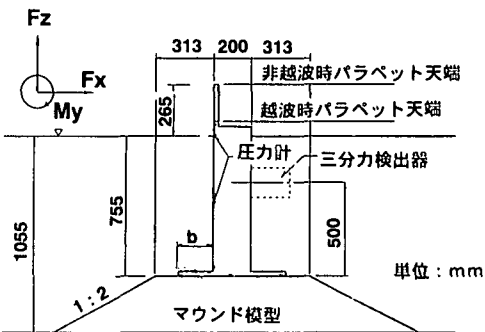
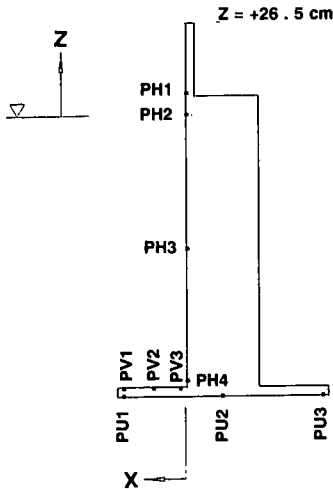


図-1 実験対象の断面

* 正会員 工修 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所技術開発課長
** 正会員 工修 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所長
*** 正会員 工修 運輸省運輸政策局総合計画課専門官 (前運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所技術開発課長)
**** 正会員 (株)三洋コンサルタント



図一2 圧力測定位置と波圧名称 (略号)

表一1 実験ケース

入射波高 H_i	7.5 cm, 12.6 cm
周期 T	0.95, 1.26, 1.58
波長 L	140.7 cm, 245.4 cm, 368.6 cm
水深 h	105.5 cm
水深波長比 h/L	0.286, 0.430, 0.750
波高波長比 H/L	0.020~0.090
フーチング長 b	10.0 cm, 18.8 cm

3. 実験結果

3.1 波力特性

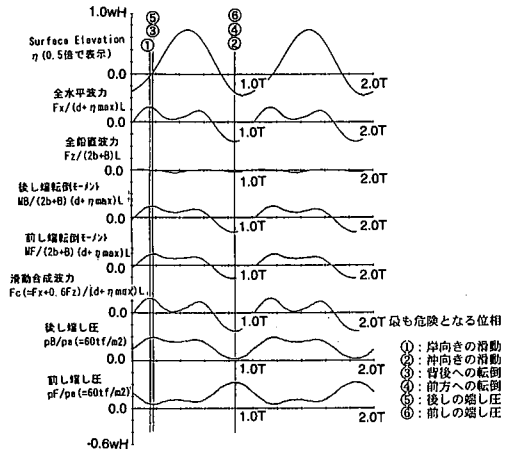
a) 波力波形

図一3 にフーチング長 $b=18.8$ (cm) の構造に、入射波高 $H_i=12.6$ (cm)、 $T=0.95$ (s) の波を作用させた場合の波力等の平均波形 (2 周期分) を示す。ここで、横軸は実験波周期 T で表した時間で、縦軸は単位面積あたりの平均波力強度である。入射波高で無次元化した壁面水位 η 、波浪時許容端し圧 $P_a (=150 \text{ gf/cm}^2, \text{現地値 } 60 \text{ tf/m}^2)$ で無次元化した前し端し圧 p_b 、後し端し圧 p_r を併記する。

まず、ケーソンの滑動、転倒が危険となる位相に着目すると、岸向き波力時の滑動が危険となる位相が若干進んでいるが、沖向き・岸向きの波力時それぞれ危険となる位相はほぼ一致していることがわかる。

次に、その他の実験ケースを含め波力波形図から読みとれる特徴としては、下記のことがあげられる。このうち i) - ii) については、合田 (1966) が有限振幅重複波ならびにその波圧に関して指摘している特徴と一致しているものである。

i) 全水平波力 F_x あるいはケーソン直立部に働く平均波圧強度 p_{HT} の最大時は、壁面水位 η の最大 (最小)



図一3 波力波形図

時に一致せず、前者の方が早く最大となる。

ii) 全水平波力 F_x は岸向き波力より沖向き波力のほうが絶対値が大きい。

iii) 全鉛直波力 F_z や鉛直方向の平均波圧強度 p_{HT} は非常に小さく、特に鉛直方向の平均波圧強度の振幅は波形勾配が大きいほどほとんど零であり、フーチング上面に働く波力と底版下面に働く揚圧力がほぼキャンセルしていることを示している。

b) 波圧分布

図一4 にフーチング長 $b=18.8$ (cm) の構造に、入射波高 $H_i=12.6$ (cm)、 $T=1.26$ (s) の波を作用させた場合の全水平波力 F_x の岸向き波力時及び沖向き波力時の最大時における波圧分布を示す。ここで△印は波圧測定位置と波圧強度および作用方向を表す。また図には「従来の波力算定法」と「理論」による波圧分布を併記する。ここで「理論」ではマウンドの影響を考慮できないため、計算の際の水深のとり方としてはマウンド天端上の水深 $d (=77.5 \text{ cm})$ を与えた。以下のことが特徴として示すことができる。

i) 全水平波力 F_x が岸向き最大になるとき直立部前面の波圧分布は「理論」と同様に静水面 ($Z=0 \text{ cm}$) にピークを有し、下方に向うにつれて小さくなる形状であり、実験値と理論値はよく一致している。また、底版下面に働く波圧は前し端で最大、後し端で零となる三角形分布を示す。沖側フーチング上面は、フーチング中央でやや大きい曲線的な分布である。前し端における上下面の波圧は上面のほうが大きい。

ii) 全水平波力が沖向き最大になるとき、圧力測定点が少ないため負圧の最大値やその発生深度等の詳細は不明であるが、実験値と理論値はよく一致している。

c) 入射波高と波力・波圧の関係

図一5 に周期 $T=1.26$ (s) の波を作用させた場合の、

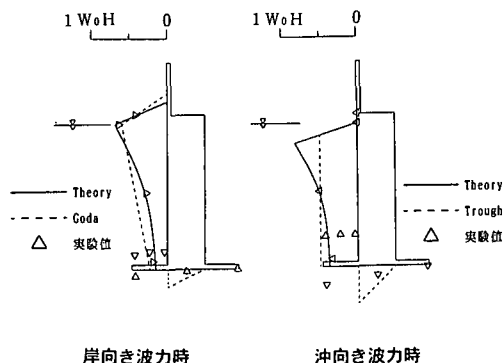
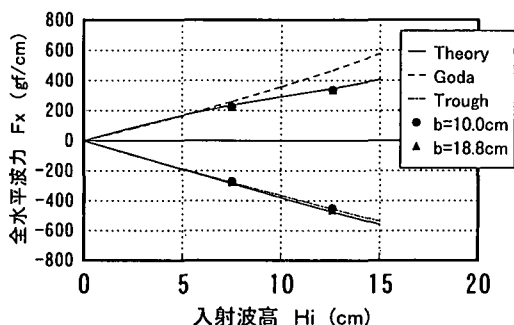


図-4 波圧分布図

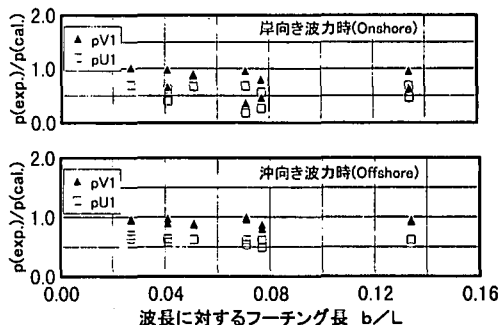
図-5 入射波高 H_i と全水平波力 F_x の関係

全水平波力 F_x の岸向き波力および冲向き波力の最大値を、入射波高 H_i に対して単位幅あたりの波力で示す。

全水平波力 F_x は、入射波高の増大とともに大きくなっている。また、岸向きよりも冲向きの波力が大きい。一方、計算値と比べて見ると実験値は岸向き波力時、冲向き波力時ともに「理論」による波力に合っている。これは、本実験の条件が進行波の非砕波条件であり、完全反射による重複波が形成されていることによる。また「合田式」は重複波領域から砕波領域まで広範に適用できる優れた波力算定式であるが、どちらかといえば砕波圧の算定に重点を置いたものであるため、実験値との適合性が良くないという結果になったものと考えられる。

d) フーチング長と波力・波圧の関係

図-6 に全水平波力 F_x が最大の時のフーチング先端の波圧 (p_{v1} , p_{u1}) を、横軸に波長に対するフーチング長をとり示すこととする。ここで縦軸は $b=0$ の時の「理論」による計算値 $p(\text{cal.})$ と実験値 $p(\text{exp.})$ の比として示す。図の上段は岸向き波力時、下段は冲向き波力時である。図より、プロットが1以下となっていることから、フーチングがあることにより、フーチング先端の波圧は、フーチングがない場合 ($b=0$) に比べ低下することが分かる。これは、今回の実験が重複波の領域で行われているため、

図-6 フーチング長 b とフーチング先端の波圧の関係

フーチングの長さが重複波の節のところである $1/4$ 波長の長さまで伸した場合、フーチングの先端の波圧は 0 に近いものとなることを想定させる。今回の実験条件では、フーチングの長さが重複波の節の部分まで伸ばさなかったためフーチングの長さが長くなるほど波圧が低下するという明確な特徴までは示されていない。

3.3 波力算定式の適用の妥当性検討

次に、三分力検出器で得られたデータを用い、ケーソンの滑動、転倒および端し圧について、「従来の波力算定式」と「理論」の適合性について検討する。

はじめに、図-7 に滑動合成波力について縦軸に実験値 ($F_c(\text{exp.})$) と計算値 ($F_c(\text{cal.})$) の比をとり、横軸に水深波長比をとる。上段は岸向き波力時、下段は冲向き波力時である。なおこの節においては計算値はフーチングなしの条件 ($b=0$) で計算し、フーチング部を除くケーソン底面に作用するものとして算出した。また、図-8 には、岸向き波力時と冲向き波力時のどちらが設計上卓越するか、実験データについて岸向き波力時の滑動合成波力の最大値 ($F_c(\text{exp.})_{\text{on}}$) と冲向き波力時の滑動合成波力の最大値の絶対値 ($|F_c(\text{exp.})_{\text{off}}|$) の比として示す。

これらの図より、「理論」については、岸向き波力時、冲向き波力時ともに適合性が高いことが分かる。また実験ケースに限られているため明確な数字を示すことはできないが、水深が大きくなると、設計で検討すべき位相が岸向き波力時から冲向き波力時になることが分かる。このとき計算値と実験値の比は、岸向き波力時には 1 より大きくなっており、冲向き波力時にはほぼ 1 に等しくなっている。このため水深が大きくなると岸向き波力時の「従来の波力算定式」では過大設計となってしまう領域が生じる可能性がある。

転倒モーメント (M_B , M_F)、端し圧 (p_B , p_F) についても図-9~12 に示す。ここでモーメント、端し圧に関する計算値については、滑動と同じ鉛直波力をあたえ、フーチングを考慮してモーメントを算出した。滑動合成波力と同様の傾向が示されている。

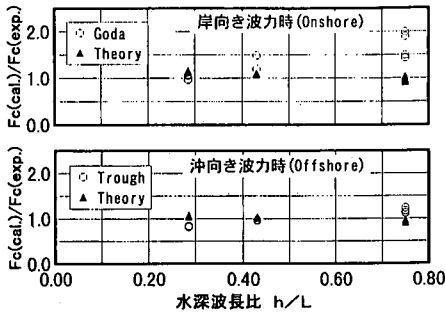


図-7 滑動合成波力の現行設計法の比較

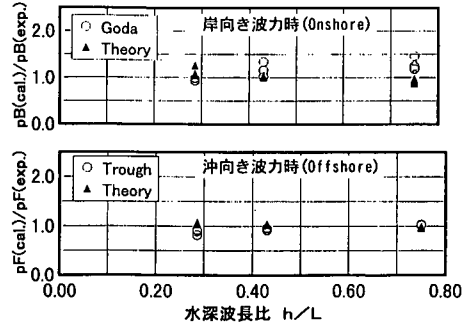


図-11 端し圧の現行設計法の比較

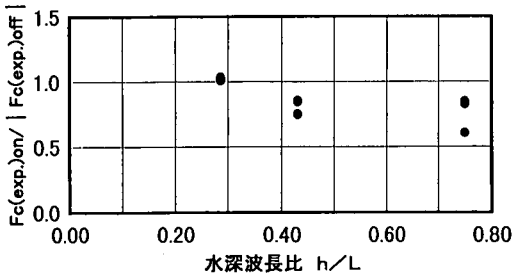


図-8 滑動合成波力の岸向き波力時と沖向き波力時の比較

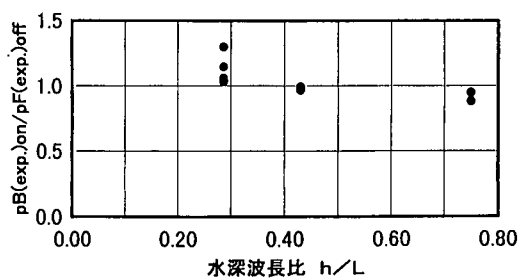


図-12 端し圧の岸向き波力時と沖向き波力時の比較

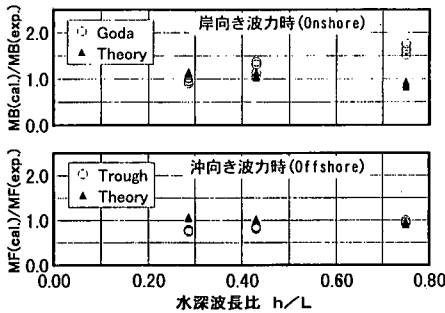


図-9 転倒モーメントの現行設計法の比較

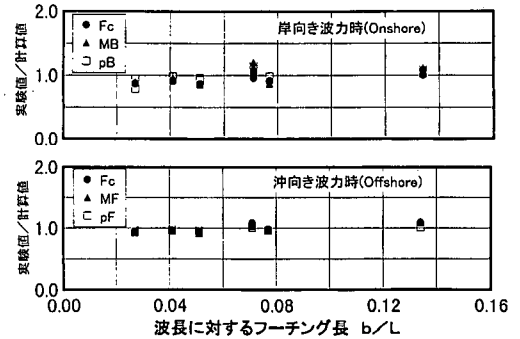


図-13 フーチング長さbに関する現行設計法の妥当性

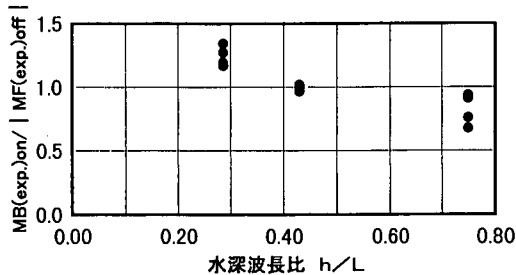


図-10 転倒モーメントの岸向き波力時と沖向き波力時の比較

また、フーチングの長さが滑動、転倒、端し圧に対する影響を図-13に示す。この図からフーチング長さ b を変えても実験値が変わっていないため、フーチング部分に働く波圧を無視する現行設計法は妥当であると考えられ

る。ただし、今回の実験条件ではフーチング部を含め鉛直波力は水平波力に比べて非常に小さかったため、滑動合成波力に影響していないと考えられる。

4. 波力算定方法の提案

これまでの検討により、ロングフーチングケースの設計波力の算定方法としては、有限振幅重複波理論（修正第四次近似解）による波力を用いる場合、フーチング部に働く波力を無視する現行設計法の考え方はほぼ妥当な結果を与えることが分かった。

しかし、フーチング長さ b が重複波の節となる $1/4$ 波長の長さまで伸ばされた場合には、フーチング長の影響が明確に現れる可能性があることなど、今回の実験条件以外ではフーチングの影響を考慮しなければならないこと

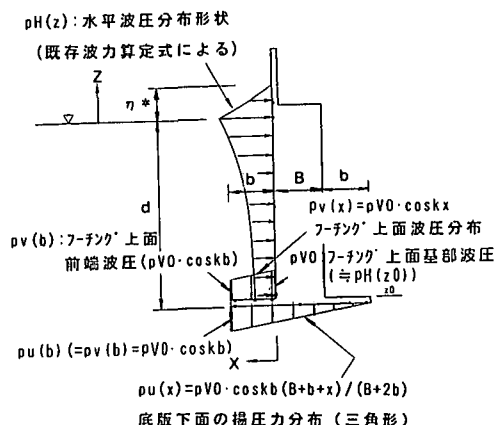


図-14 波力算定式の準用における波圧分布の仮定

も考えられる。そのため、フーチング部に働く波力を考慮した合理的な波力算定法の提案を試みる。

図-14 に提案する波圧分布図を示す。これは以下のような考え方により設けたものである。

- i) フーチング上面の波圧分布形状は、フーチング基部で波圧強度を p_{v0} とし、ケーソン法線から沖向きに座標軸 X をとって、 $p_v(x) = p_{v0} \cdot \cos kx$ なる分布、および $p_{v0} \approx p_H(z_0)$ を仮定する。ここに k は波数 ($=2\pi/L$) である。
- ii) 揚圧力の分布形状は、前し端で最大値 $p_u(b)$ をとり、後し端で零となる三角形分布を仮定する。さらに $p_u(b)$ は対象とした底板厚程度では、フーチング上面先端の波圧 $p_v(b)$ とほぼ等しいと仮定する。
- iii) 直立部に働く波圧については、分布形、絶対値とも実験値と理論の整合性は良好であったので、水平波圧分布 $p_H(z)$ を理論による波力算定によるものと相似であると仮定する。

図-15, 16 は上記 i) - iii) の仮定の妥当性を調べたものである。前者はフーチング上面に働く波圧 p_{vi} 、後者は揚圧力 p_{ui} である。いずれも、理論によるフーチング上面の高さ (z_0) を p_{v0} として、図-14 で示した仮定の波圧を、計算値 $p(\text{cal.})$ と実験で得られた波圧とを比較したものである。図中の直線は、 $p(\text{exp.}) = p(\text{cal.})$ およびデータの一次回帰式を表す。両図とも実験値は計算値にほぼ比例しており (決定係数 $r^2 > 0.98$)、図-14 に示した仮定が妥当であることがわかる。さらに、フーチング上面の波圧 p_{vi} に対する回帰式の傾きは 1 に近く、平均的に実験値と計算値はほぼ一致している。一方、揚圧力の実験値は計算値の 7 割程度になっている。フーチングが模型で 25 (mm) の版厚であることを考慮すると、圧力低下が大きすぎるように思われる。これは、実験手法上マウンド模型とケーソン模型に約 1 (cm) の隙間を設けたため、

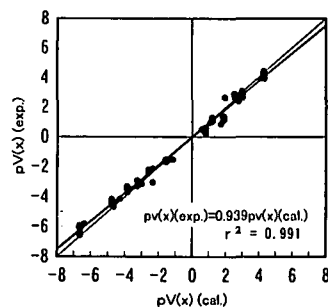


図-15 仮定した波圧分布の検証 (フーチング上面)

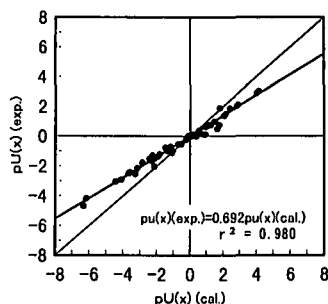


図-16 仮定した波圧分布の検証 (フーチングを含む底板下面)

壁面水位の変動により、この間に生じる流れのための速度水頭分低下している影響と考えられる。

提案した算定法の妥当性については、滑動、転倒および端し圧について実験値と比較を行った。滑動合成波力の比など 0.8~1.2 の範囲に収まっており、提案した算定法はほぼ妥当な結果を与えていることを確認した。

5. おわりに

本実験により、大水深重複波領域におけるロングフーチングケーソンの波力特性について把握され、現行波力算定法の妥当性について検証された。またフーチングを考慮した新しい波力算定法の妥当性について検証された。

本実験に進めるにあたり、運輸省港湾技術研究所水工部高橋重雄室長からは多大な指導を受けた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 合田良実・柿崎秀作 (1966): 有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究, 港研報告, Vol. 5, No. 10.
- 合田良実・福森利夫 (1972): 直立壁および混成堤直立部に働く波圧に関する実験的研究, 港研報告, Vol. 11, No. 2, pp. 3-45.
- 合田良実 (1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港研報告, Vol. 12, No. 3, pp. 3-69.