

ケーソンのフーチングに作用する 抑圧力および揚圧力の検討

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF UPLIFT AND COMPRESSIVE PRESSURES
ON A FOOTING OF A HYBRID CAISSON

江崎慶治¹・高山知司²・金泰民³・荒居祐基¹

Keiji ESAKI, Tomotsuka TAKAYAMA, Tae-Min KIM and Masaki ARAI

¹正会員 工修 住友重機械工業(株)鉄構機器事業本部(〒141-8686 東京都品川区北品川5-9-11)

²フェロー 工博 京都大学防災研究所 教授(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 京都大学防災研究所 研究員(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

New harbor facilities have been requested to develop by introducing new technique concept. A hybrid caisson, which was developed about twenty years ago, is one of new type structures of steel and concrete and has been employed in many harbors. One of important characteristics of the hybrid caisson is to have long footing which is effective on dispersion of self-weight to a foundation and on prevention from overturning failure. The present design only considers these effectiveness, but the long footing may be effective on suppression of horizontal sliding. The present paper investigates effects of the long footing on sliding failure and proposes empirical formulas of wave pressures around the footing for design. Economical effects of the long footing are also evaluated in the paper.

Key Words : uplift pressure, compressive pressure, footing, hybrid caisson

1. はじめに

港湾施設の大水深化や泊地の水域環境保全, 軟弱地盤への施設の築造など, 港を構成する防波堤や岸壁には様々な要求がなされている。これらの要求に合わせて, 防波堤や岸壁は, 数々の新形式構造が開発され, 適用されてきた。中でも, フーチングの張出しを大きくしたハイブリッドケーソンは新形式構造の代表的な例と言える。

ハイブリッドケーソンは, 鋼材とコンクリートで構成される複合構造物で, 主に以下の特徴が挙げられる。①部材厚が薄く進水重量が軽量である。②ケーソンの転倒防止に大きく効果がある。③フーチングを大きく張出すことが可能であるため, 自重を分散でき, 軟弱地盤への築造が可能である。④岸壁・護岸に使用する際, 仮想背面を陸側フーチング先端とできることからケーソン本体幅が比較的小さくなる。これらの特徴より, ハイブリッドケーソンは, 主に軟弱地盤に多く適用されるようになった。

一方, ハイブリッドケーソンのように幅広のフーチ

ングを有したケーソンの波圧算定法に着目すると, 港湾施設の設計基準である港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾において, 図-1に示すようにケーソンのフーチングには波の作用側において, フーチング上面で鉛直下向きに圧力が作用し, 揚圧力は底面前趾が pu' , 後趾が 0 となるフーチングを含めた底面全幅に三角形分布するとされている。また, 基準¹⁾ではフーチングが非常に長い場合を除き, フーチングを有する場合の上記圧力の合力が, フーチングがないとしたときの揚圧力と大差がないとしている。このため, 揚圧力およびフーチング上面で鉛直下向きに作用する圧力の取り扱い, フーチングに作用する揚圧力および鉛直下向きに作用する圧力を無視して, 直立壁前面の延長位置で pu で, 後面の延長位置で 0 の三角形分布として揚圧力を算定してもよいされている。これより, 現行の幅広フーチングを有する波圧の算定においては, フーチングがない, もしくは, フーチング長さが短い(通常, フーチング長さ 1.5m 程度まで)場合と同様に, 合田公式²⁾を適用して算定している。

酒井ら³⁾は, 水深波長比が 0.286~0.750 の大水深に

おける重複波を対象として、二次元水理模型実験を実施し、フーチングを有するケーソンの合理的な設計波力算定法の提案を行っている。酒井らは、揚圧力がフーチングを含む底版全体に作用することやフーチング上面に作用する鉛直下向きの波圧が作用するとし、波圧の定式化まで行っているが、これらを考慮した設計法が、現行設計法と比較して、どの程度影響を与えるのかまでは言及していない。

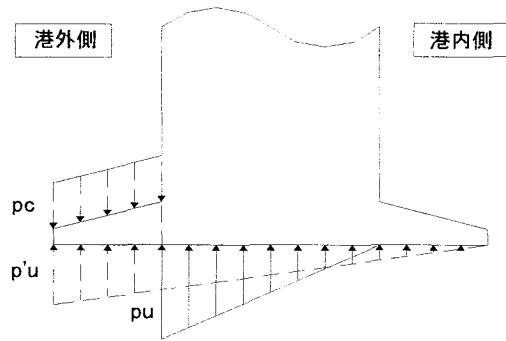


図-1 フーチングを有するときの揚圧力

これらを背景に、本研究においては、幅広フーチングを有するケーソンについて、水理模型実験を行って、水平波力、揚圧力およびフーチング上面に作用する鉛直下向きの圧力（以下、抑圧力と呼ぶ）を詳細に検証し、幅広フーチングを有するケーソンの設計法を提案する。さらに、現行設計法と提案設計法の比較を行うものとする。

2. 実験概要

実験は、京都大学防災研究所宇治川水理実験所内の実験水路を用いて実施した。実験水路の仕様を表-1に示す。

表-1 水路および造波機の仕様

水路	
長さ	50.0 m
幅	1.0 m
高さ	1.5 m
造波機	
造波版	W 1.0m×H 1.5m
造波駆動方式	ピストン型
最大ストローク	2.0m (±1.0m)
最大造波波高	45cm (水深1.0m, 周期2.0sec)
造波周期	0.5～5.0sec
備考	不規則波造波装置

実験に使用したケーソンの模型は、本体側壁をアクリル板($t=15\text{mm}$)で、底版をモルタル($t=50\text{mm}$)で構築している。また、フーチングの有無、長さの変化による

影響を考察するために、フーチングは、ボルトとナットにより本体への取外しが可能な構造とした。表-2に模型本体の諸元およびフーチング長を示す。本研究では、フーチング長さによる揚圧力および抑圧力の変化を考慮するため、フーチング長 b は、0m, 0.2m および 0.4m の3ケースについて行った。

表-2 模型本体の諸元およびフーチング長

縮尺	1/25
高さ	0.4m, 0.55m
幅	0.4m
長さ	0.5m
フーチング	0m, 0.2m, 0.4m

波圧実験時の模型設置状況を図-2に示す。図-2からもわかるように、模型を水路幅中央部に設置し、その両側に幅 0.245m のコンクリート製ダミーケーソンおよびフーチングを設置した。

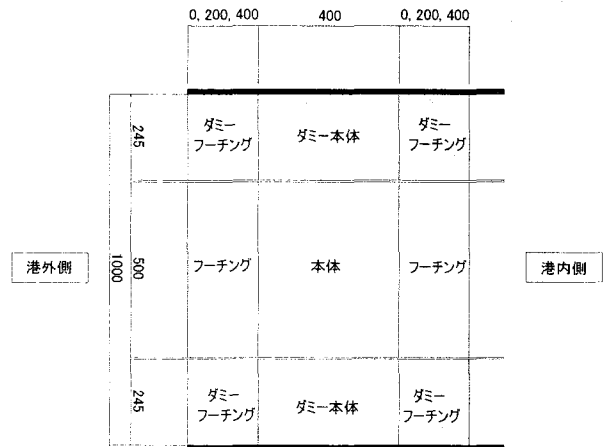


図-2 模型設置状況（上；平面図，下；断面図）

図-2断面図の○印は波圧計の取付位置を示しており、波が作用する側壁、底版下面、およびフーチング上面に合計13個の波圧計を取付けた。また、ケーソン高さが0.4mの実験においては、変位計を港内側に取付け、波圧作用時のケーソンの滑動量も計測した。なお、以降の検討結果は、原点を図-2断面図の $(x,y)=(0,0)$ とし、水路の下手方向を正方向とする。

実験条件を表-3に示す。実験時の水深は、静水位か

らケーソン天端高との差が同様となるように 0.4m および 0.55m とした。また、波高は 0.2m~0.3m, 周期は, 1.5~2.5 としている。

表-3 実験条件

ケーソン高さ=0.40m					
CASE	h(m)	H ₀ (m)	T ₀	L ₀ (m)	Ks
C40-1	0.40	0.20	1.50	3.51	1.01
C40-2		0.25			
C40-3		0.30			
C40-4		0.20	2.00	6.24	1.07
C40-5		0.25			
C40-6	0.40	0.20	2.50	9.75	1.10
C40-7		0.25			

ケーソン高さ=0.55m					
CASE	h(m)	H ₀ (m)	T ₀	L ₀ (m)	Ks
C55-1	0.55	0.30	1.50	3.51	0.98
C55-2		0.20			
C55-3		0.25			
C55-4		0.30	2.00	6.24	1.07
C55-5		0.20			
C55-5		0.20	2.50	9.75	1.03

なお、ここに、h：模型の直立壁前面での水深、H₀：造波される波高、T₀：造波周期、L₀：微小振幅波理論より得られる波長、Ks：浅水係数である。

3. 実験結果

(1)滑動量

幅広フーチングを有するケーソンに作用する波圧を検証する前に、波圧作用時のケーソンの滑動量を調査した。

波圧作用時のケーソン滑動量を算出するに当り、ケーソンが回転変位を起こしている場合、滑動量をどの位置で定義するかが重要となる。一般的には、ケーソンの重心位置の水平変位として滑動量を定義するが、ケーソンの重心位置を正確に求めることができないため、本研究では、図-3 で示すようにケーソン本体の後端趾で定義した。

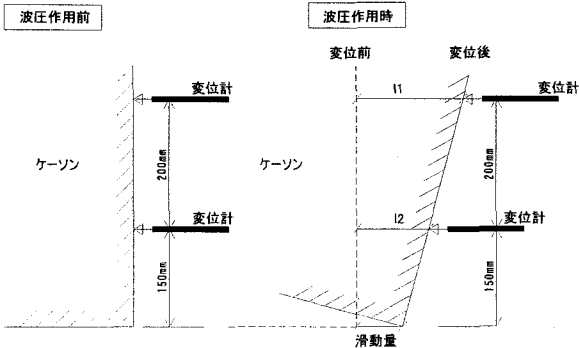


図-3 滑動量の定義

これより、波圧作用時のケーソン滑動量は、次式で与えられる。

$$SD = \frac{7 \times l2 - 3 \times l1}{4} \tag{1}$$

ここに、SD：滑動量、l1：上側変位計測データ、l2：下側変位計測データである。

また、波圧作用時のケーソン模型の気中および水中重量を表-4 に示す。なお、Uは浮力、Wair は気中重量、Wwater は水中重量である。本実験では、フーチングに作用する波圧を検証するため、フーチング長さに関わらず水中重量をほぼ一定とした。

表-4 模型の気中および水中重量

	U(kN)	Wair(kN)	Wwater(kN)
b=0	0.588	1.274	0.686
b=0.2	0.696	1.372	0.676
b=0.4	0.804	1.470	0.666

図-4 に滑動量を示す。縦軸は滑動量 SD、横軸は、波高水深比(H：波高、h：水深)である。なお、図中のプロットは実験結果(*;b=0m, +;b=0.2m, ○;b=0.4m)を示している。

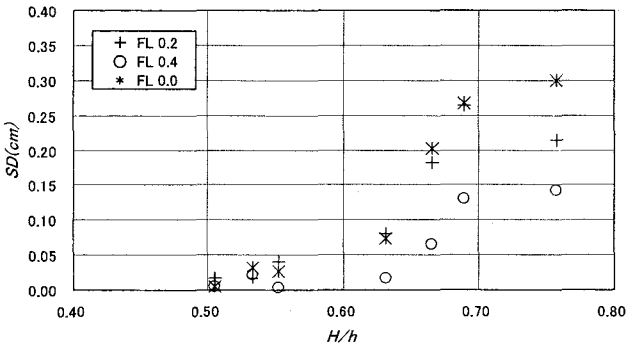


図-4 滑動量

表-4 および図-4 より、フーチング長b=0.4m は、他のケースと比較して、滑動量が最も少ない。また、b=0m とb=0.2m を比較すると、滑動量は、ほぼ同値であるものの若干b=0.2m 方が少ない。これらより、フーチングには、従来より指摘されているように、フーチング上面に鉛直下向きに抑圧力が作用していると言える。さらに、フーチングに作用する揚圧力と抑圧力は、フーチング長さが長くなるにしたがい、両者の合力の差に大きな差が生じると推察できる。

(2)水平波力

図-5 に実験ケース C55-2 の水平波力分布を示す。縦軸は、波圧計を取付けた任意の位置 y で、横軸は、任意の点における水平波力 ph である。なお、図中のプロットは実験結果(*;b=0m, +;b=0.2m, ○;b=0.4m)

を示しており、実線は合田公式により算出した水平波力分布である。

図-5 より、いずれもフーチング長 b に関係なく、ほぼ同じ波圧分布となっていることがわかる。そのため、水平波力は、 b に影響されないと考えられる。また、C55-2 の実験より得られた波圧は、合田公式より得られた値よりも小さいが、実験全体を通じて得られた波圧は、合田公式に平均的に近かった。そのため、ケーソン直立壁前面に作用する水平波力は、フーチングの有無に関わらず合田公式で算定できる。

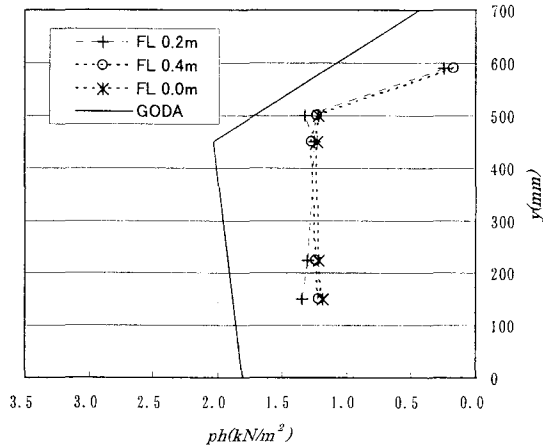


図-5 水平波力分布 (C55-2)

(2) 揚圧力

図-6 に実験ケース C55-2 の揚圧力分布を示す。縦軸 p_U は任意の点における揚圧力、横軸 x はフーチングを含む底版の位置を表している。図中のプロットは実験結果 (* ; $b=0\text{m}$, + ; $b=0.2\text{m}$, O ; $b=0.4\text{m}$) を示し、実線は合田公式によって算出した揚圧力分布である。

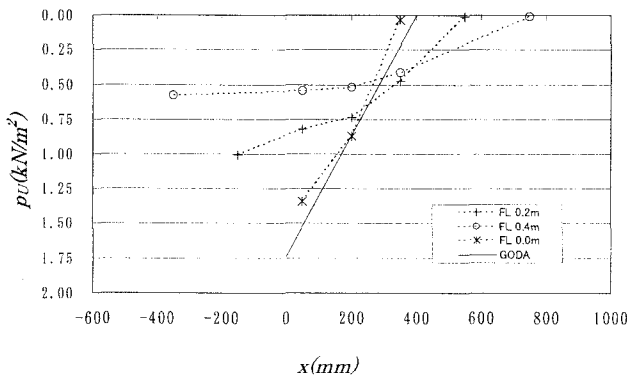


図-6 揚圧力分布 (C55-2)

フーチング長 $b=0\text{m}$ の実験結果は、底面後趾で 0、前趾で最大値となる三角形分布となり、前趾の揚圧力および分布形状ともに合田公式と良く一致している。これより、合田公式は、フーチングがない場合の揚圧力

をよく再現していると言える。

一方、 $b=0.2\text{m}$ および $b=0.4\text{m}$ の場合は、両者ともフーチングを含む底版全体に揚圧力が作用し、揚圧力は、後趾で 0、前趾で最大値となる三角形分布をしている。また、 $b=0.2\text{m}$ および $b=0.4\text{m}$ の前趾の揚圧力は、 $b=0\text{m}$ で得られた前趾の揚圧力よりも小さく、 b が長くなるにしたがい前趾の揚圧力は小さくなっている。これより、幅広フーチングを有するケーソンの揚圧力分布は、底版後趾を 0、前趾を最大値とする三角形分布となり、揚圧力の合力は、フーチングがない場合と同様に、前趾の最大値に依存することがわかる。

図-7 に b を変化させた場合の底版前趾の揚圧力を示す。縦軸は実験より得られた任意計測点の揚圧力 p_{UE} を合田公式より得られる揚圧力 p_{UG} で、また、横軸はフーチング長 b を波長 L でそれぞれ無次元化したものである。

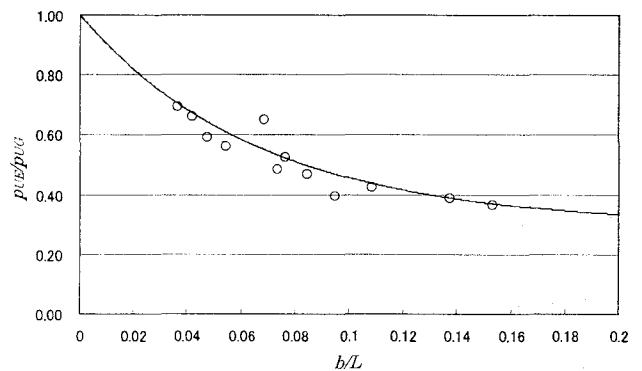


図-7 底版前趾の揚圧力

p_{UE}/p_{UG} は、 b/L の増加に伴い減少し 0.3 に漸近する傾向にあり、 p_{UE}/p_{UG} の減少傾向は、指数関数的な特徴を有している。そこで、幅広フーチングを有するケーソンに作用する底版前趾の揚圧力の近似式として、式(2)を提案する。なお、式(2)は図-7 に示している実線である。

$$\frac{p_{UE}}{p_{UG}} = 0.7 \exp\left(-15 \frac{b}{L}\right) + 0.3 \quad (2)$$

これより、幅広フーチングを有するケーソンの揚圧力は、フーチングを含む底版全体幅の後趾を 0、前趾を式(2)で得られる値の三角形分布として算出することができる。

(3) 抑圧力

図-8 にフーチング長 $b=0.2\text{m}$ および $b=0.4\text{m}$ の抑圧力の実験結果 (+ ; $b=0.2\text{m}$, O ; $b=0.4\text{m}$) を示す。図中の縦軸は、抑圧力 p_c を水平波圧 ph_{80} で無次元化したも

のである。なお、 ph_{80} は、原点より鉛直 y 方向に 80mm 上がった点で、フーチング基部の上面とケーソン本体との接続部の水平波圧である。一方、横軸は、フーチング上面に取付けた任意の計測点 x を波長 L で無次元化したものである。

図中の一点鎖線は、酒井ら³⁾が提案している抑圧力分布であり、式(3)で表現される。

$$p_v(x) = p_{v0} \cdot \cos(kb) \quad (3)$$

ここに、 $p_v(x)$ ：抑圧力 ($=p_c$)、 p_{v0} ：フーチング上面基部の波圧 ($\equiv p_H(z_0) = ph_{80}$)、 k ：波数 ($=2\pi/L$)、 L ：波長である。

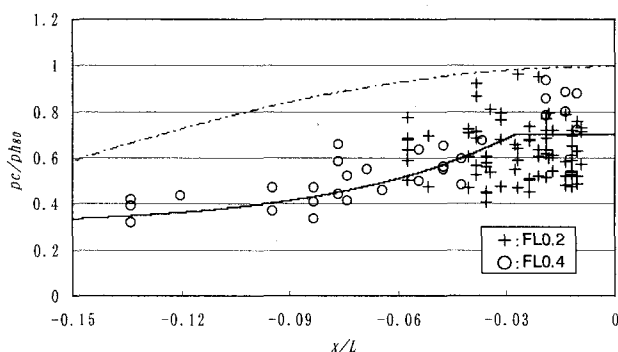


図-8 抑圧力分布

図-8 より $b=0.2\text{m}$ の抑圧力分布は、フーチングの基部から先端に渡って一様の分布をしている。一方、 $b=0.4\text{m}$ の抑圧力分布は、フーチング基部から先端に向かって、抑圧力の値が減少する傾向を呈す。一般的に、抑圧力の分布形状としては、 $b=0.4\text{m}$ の抑圧力分布が示すように、フーチングの基部から先端に向かって、抑圧力は低減すると推察されるが、本結果では、 $b=0.2\text{m}$ の抑圧力は、バラツキが大きいものの、一様の分布をしていることがわかる。

一方、式(3)の酒井ら³⁾の提案式と本実験で得られたデータを比較すると、式(3)が、本実験より得られたデータを上回る抑圧力の値となっている。これは、設計を行う上で危険側となり、実構造物に置き換えて考えると、高波浪来襲時に防波堤の被災が懸念される。また、式(3)が三角関数であるのに対し、本データは指数関数的な減少をしている。そのため、本検討においても、抑圧力の算定式として式(4)を提案する。

$$\frac{p_c}{ph_{80}} = \min \left\{ 0.7, 0.7 \exp \left(20 \frac{x}{L} \right) + 0.3 \right\} \quad (4)$$

式(4)では、フーチング基部付近 ($x/L < -0.03$) で、一様分布させるとともに、フーチング先端に近づくほど、

抑圧力が低減する分布形状とした。

4. 現行設計法と提案設計法との比較

式(2)および式(4)を採用した提案設計法と現行設計法との比較を行うため、安定計算による試設計を実施した。安定計算の条件は、滑動安全率を 1.2 以上、転倒安全率を 1.2 以上、端趾圧の上限値を $700(\text{kN/m}^2)$ とした。なお、ケーソン本体幅およびフーチング長の増分は、煩雑を避けるために、0.5m 刻みで安定計算を実施した。

図-9 および表-5 に、波高 $H_D=10.0\text{m}$ 、水深 $h=20\text{m}$ 、波長 $L=200\text{m}$ 時の安定計算結果を示す。図-9 よりわかるように、現行設計法と比較して、提案設計法では、ケーソン本体の堤体幅が、15.5m から 14.5m となり、1.0m 小さくなる結果となった。また、安全率で断面を比較すると、断面幅が減少することによる端趾圧の増分は若干あるが、ほぼ同程度である。

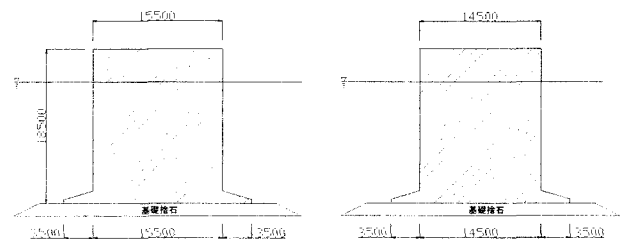


図-9 安定計算結果 (断面比較)
(左図：現行設計法、右図：提案設計法)

表-5 安定計算結果 (安全率)

	現行設計法	提案設計法
滑動安全率	1.21	1.21
転倒安全率	1.55	1.52
端趾圧	609	636

上述と同様の方法で、波高、波長および水深を変化させて、安定計算を実施した。計算条件を以下に示す。

波高は、 $H_D=5.0\text{m}$ 、 10.0m および 15.0m の 3 ケースを対象とした。また、一様水深上を伝播する波の峰の流速が波速に等しいと仮定した場合の碎波条件、および水平床の孤立波に対する碎波条件を用いて、碎波以外の波を想定した。

フーチング長を変化させると、揚圧力および抑圧力の変化とともに、基礎捨石数量も増減することから、基礎捨石厚を 1.5m、肩幅を 3.0m として、フーチング長さによる基礎捨石の増減も考慮した。なお、比較は、断面を構成するためのコストにより行った。

図-10 および図-11 に現行設計法と提案設計法との経済性比較結果を示す。図-10 および図-11 の縦軸は、提案設計法により算出されるコスト $C(Pro)$ を現行設計

法により算出されるコスト $C(Pre)$ で除した値である。一方、横軸は、図-10では最大波高 H_D を水深 h で、図-11では水深 h を波長 L でそれぞれ無次元化した。

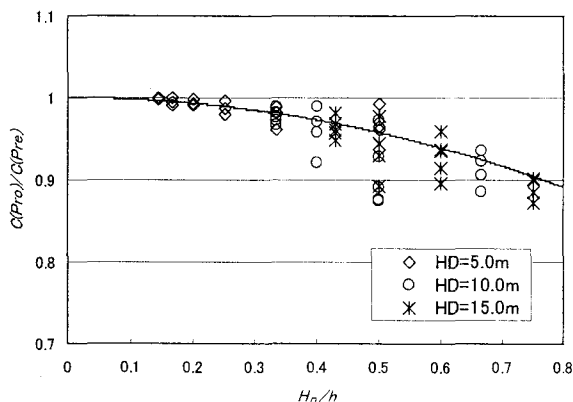


図-10 経済性比較 (横軸 H_D/h)

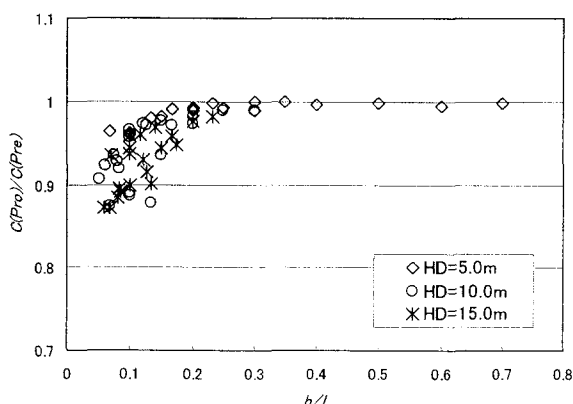


図-11 経済性比較 (横軸 h/L)

図-10 および図-11より、 $C(Pro)/C(Pre)$ のプロットは、全て1を下回っている。また、 $C(Pro)/C(Pre)$ は、0.9を下回るものも見られるが、そのほとんどは $0.9 < C(Pro)/C(Pre) < 1$ の範囲にある。これより、提案設計法は、現行設計法よりもコストの視点から見ると合理的設計法であると言える。さらに、現行設計法と比較し、 $H_D/h=0.8$ 、 $h/L=0.05$ で約1割程度のコストダウンが可能となることが言える。

ここで、図-10 および図-11の波高の違いによる影響に着目すると、 $H_D=10.0\text{m}$ および 15.0m は、 $H_D=5.0\text{m}$ よりも $C(Pro)/C(Pre)$ の値が小さい。これは、 H_D が大きくなると水平波力が大きくなるため、フーチング上面に作用する抑圧力が、堤体の安定性に与える影響も大きくなったと考えられる。また、図-11の h/L に着目すると、 $h/L < 0.2$ では、急激に $C(Pro)/C(Pre)$ の値が低減していることが分かる。これについても、 h/L が小さくなるにしたがい、水平波力が大きくなるため、 H_D による影響と同様に、抑圧力が堤体の安定性を増加させたと考えられる。これらより、提案設計法は、水深が浅く、または波高が大きな領域において、より合理的な設計法であることを示している。

一方、 $H_D/h < 0.3$ や $h/L > 0.2$ の領域においては、 $C(Pro)/C(Pre)$ は、次第に1に漸近していることが分かる。つまり、水深が深く、波高が小さい海域において、式(2)および式(4)で提案した抑圧力および揚圧力は、合力の差がほぼ等しくなり、現行設計法と同様に、フーチングを有したケーソンであっても、波圧は、堤体幅に影響を与えない。

図-10中の曲線は、提案設計法のコストダウン(CD)を示したものであり、式(5)で与えられる。なお、CD率は式(6)である。

$$\frac{C(Pro)}{C(Pre)} = 1 - 0.17 \left(\frac{H_D}{h} \right) \quad (5)$$

$$CD = 0.17 \left(\frac{H_D}{h} \right) \times 100(\%) \quad (6)$$

5. おわりに

本研究は、幅広フーチングを有するケーソンの設計を水理模型実験を通じて検証し、設計法の提案を行うとともに、現行設計法との比較を経済性により行った。以下に、本研究で得られた知見を述べる。

- 1) 幅広フーチングは、防波堤の自重分散や転倒安定性を増大させるだけでなく、抑圧力による滑動安定性も増大させる。
- 2) 幅広フーチングを有するケーソンの直立壁前面に作用する水平波圧は、合田公式で算定することができる。
- 3) 幅広フーチングを有するケーソンに作用する揚圧力分布は、フーチングを含む底版全幅に作用し、後趾を0、前趾を最大値とする三角形分布となる。
- 4) 底版前趾の揚圧力は、式(2)の近似式で与えられる。
- 5) 抑圧力は、海側フーチング上面に鉛直下向きに作用し、作用する抑圧力の大きさは式(4)で与えられる。
- 6) 現行設計法と提案設計法を比較すると、波高が大きく水深が小さい海域において、式(2)、式(4)を採用した提案設計法は合理性を発揮する。

参考文献

- 1) (社) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上巻)，1999。
- 2) Goda, Y. : New wave pressure formulae for composite breakwaters, Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng., Copenhagen, ASCE, pp. 1702-1720, 1974.
- 3) 酒井浩二，井福周介，大釜達夫，山崎耕嗣：大水深における重複波を考慮した設計波力算定法，第45回海岸工学論文集，pp. 746-750，1998。