

大水深重複波領域における縦スリットケーソンの設計波力算定法

諫山 貞雄*・佐藤 孝夫**・石貫 国郎***
柳田 和喜**・池田 高則****・山崎 耕嗣****

1. ま え が き

国土交通省九州地方整備局(旧運輸省第四港湾建設局)では、1996 年から扶壁を用いてフーチング幅を広げた、ハイブリッド構造のロングフーチングケーソン堤の開発に取り組んでいる。ロングフーチングケーソン堤は、別府湾など比較的静穏な大水深海域に適用することが考えられており、フーチングを伸ばすことで端趾圧を軽減できるためケーソン幅を小さくでき、経済的に有利となる。著者らは、混成堤タイプの波力算定法を検討するとともにフーチング上下面に働く波圧を考慮した耐波設計法を提案した(酒井ら, 1998)。しかし、内湾域の防波堤では、前面が漁場であったり、小型漁船の航行が想定されるなど、低反射性が求められることが多い。したがって、さらに直立消波ケーソン構造のロングフーチングケーソン堤の開発が求められている。直立消波ケーソン構造であれば、条件によっては作用する波力の低減の可能性もあり、さらに有利になることも考えられる。

ところで、直立消波ケーソンの現行波力算定法は浅海域が主な対象であり、高橋ら(1991)は大水深域の重複波領域においては通常の合田式と波力が異なるため、有限振幅重複波理論を用いて波力を計算すべきことを指摘している。特に、引き波時の波力が押し波時より大きくなる危険性があり、新たな波圧算定式が必要である。また、別府湾などに適用する場合にはマウンドが高い構造となり、衝撃的な波圧の有無についても検討が必要である。

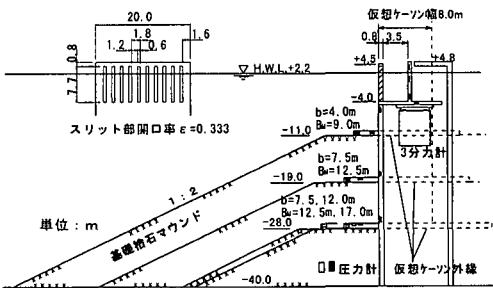
本報告は、縦スリット壁を対象に、水深波長比 $0.286 \sim 0.752$ 、波形勾配 $0.020 \sim 0.089$ という大水深重複波領域にある直立消波ケーソンの安定性検討位相や部材波力を水理模型実験によって明らかにし、合田・柿崎(1966)の有限振幅重複波理論(以下、理論と記す)による波力をベースにした合理的な波力算定法を提案するのである。

2. 波力実験の方法

実験は、長さ 50 m の造波二次元水路で実施した。図一に実験断面図を示す。縮尺 1/40 を想定し、現地換算水深は 42.2 m である。模型は遊水室後壁から沖側を再現し、揚圧力は三角形分布を仮定した。スリット部は 1 種類であり、消波対象波周期を 4 秒・波高を 1 m とし、谷本・吉本(1982)の結果を参照して設定した。遊水室水深 d' は 6.2 m、スリット壁厚を含む遊水室幅 l は 4.3 m、スリットの開口率 ε は 0.333 であり、ほぼ最適断面に近い。

マウンドの影響による波力の増大を調べるため、マウンド上水深 d を 13.2 m、21.2 m、30.2 m の 3 種類に変化させた。順に高・中・低マウンドと呼ぶ。マウンド前肩幅 B_M (とフーチング長 b) は、9.0 m (4.0 m) $\sim$ 17.0 m (12.0 m) である。今回の実験条件の範囲では、マウンド上水深と前面水深の比 $d/h = 0.313 \sim 0.716$ 、マウンドの前肩幅と波長の比 $B_M/L = 0.061 \sim 0.303$ 、フーチング長とマウンド上水深における波長の比 $b/L' = 0.039 \sim 0.214$ である。

波力・波圧の測定は、スリット壁・遊水室後壁・下床版を一括三分力計で、遊水室後壁と下部不透過壁およびフーチング上下面は小型圧力計で行った。図一には、これら計測器の取付位置等も示している。ところで、分力計による波力測定では固有振動数が小さくなりがちで、衝撃的な波力を正確に測定できない場合がある。しかし、今回の測定系の中固有振動数は 190 Hz 程度であり、



図一 実験断面図

* 正会員 国土交通省 下関港湾空港技術調査事務所
** 正会員 工修 国土交通省 (前下関調査設計事務所)
*** 宮崎県 (前運輸省 下関調査設計事務所)
**** 国土交通省 九州地方整備局
***** 正会員 株式会社 三洋コンサルタント下関出張所

実験で得られた波圧波形の振動数より大きく問題は生じなかった。実験には規則波を用い、3種類の周期に対して波高レベルを2あるいは3段階に変化させた。

3. 波圧波形とピークの位相

図-2は低マウンドで長い周期の場合の波圧波形例である。スリット壁・下部不透過壁・遊水室後壁に作用する波力および水平波力合力・鉛直波力合力・滑動合成波力の単位面積あたりの平均波力強度(それぞれ f_{PST} , f_{PHT} , f_{PBT} および f_{FXT} , f_{FZT} , f_c と表す)を水の単位体積重量と波高の積 w_0H で除して無次元化し、2周期にわたって示している。鉛直波力は上向きを正としている。滑動合成波力はケーソン全体の滑動安定性の検討に用いる波力で、滑動限界時の釣合式から導かれ次式で定義される。

$$F_c = \pm (|F_{FXT}| + \mu F_{FZT}) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 F_{FXT} , F_{FZT} , F_c は f_{FXT} , f_{FZT} , f_c の単位幅あたりの波力表示、 $\pm$ は F_{FXT} の正負に対応している。 μ は摩擦係数(=0.6)である。図および文中の位相とその名称は、直立消波ケーソンの現行波力算定法における6つの検討位相(押し波時I, IIa, IIb および引き波時I, II, III)(高橋ら, 1991)に基づいている。

図-2では、まず、スリット壁にやや衝撃的なピーク(押し波時I)が現れ、ほぼ同時に遊水室後壁にやや衝撃的なピーク値(押し波時IIa)が現れている。続いて前面の下部不透過壁の波力が正のピークになり、その後に遊水室後壁に作用する波力が重複波的なピーク(押し波時IIb)を迎える。通常の直立消波ケーソン堤では、押し波時Iとほぼ同時に下部不透過壁でもピークになるが、この場合は顕著な位相差が現れており、特徴的である。特に、この下部不透過壁がピークとなる位相で、水平波力合力がピークとなり、かつ滑動合成波力がピークとなっているため、この位相が重要であり、これを押し波時IIIとして以降の検討対象の位相としている。このケースでは、スリット壁の平均波力強度は、 $0.4w_0H$ 、水平波力合力も $0.5w_0H$ 程度とかなり小さい。

引き波時はスリット壁のピーク(引き波時I)、下部不透過壁のピーク(引き波時II)そして遊水室後壁のピーク(引き波時III)の順に現れるが、 f_c の負のピークは引き波時IIに一致する。また、 f_c の値は押し波時の約1.2倍であり、大水深重複波領域の波力の特徴である引き波時の波力が相対的に大きいという現象が認められる。

図-3は、高マウンドで短い周期の場合の波圧波形例である。スリット壁にややとがったピークが現れているが、衝撃的なものではない。このとき同時に下部不透過壁でもピーク値となっている。その後、遊水室後壁には衝撃的な波力が2回ほど作用して2つ目のピーク(押し波時IIa)で最大値となっている。ただし、遊水室の重複

波的なピーク(押し波時IIb)もほぼ同時に現れていると思われる。水平波力合力や滑動合成波力 f_c の正のピーク時は、遊水室後壁のピーク時(押し波時IIa)ではなくスリット壁のピーク時(押し波時I)に近い。これは、下部不透過壁の波力波形に顕著な双峰性が現れ、IIaあるいはIIbの下部不透過壁の波力は小さな第2のピークにあたりほとんど零に近いことによる。スリット壁の平均波力強度はやはり $0.4w_0H$ 程度と小さく、下部不透過壁ではそれ以下であり、水平波力合力や滑動合成波力も比較的小さい。一方、引き波のピークは図-2と同様な順で現れ f_c が負のピークとなるのも引き波時IIに近い。ただ

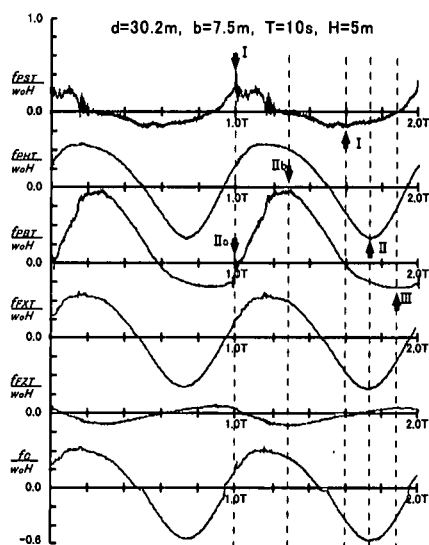


図-2 波力波形の例(低マウンドで周期が長い場合)

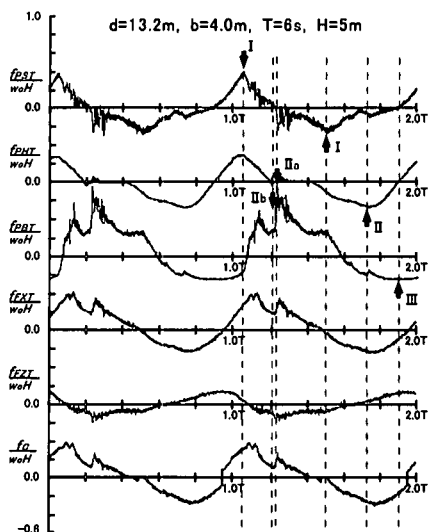


図-3 波力波形の例(高マウンドで周期が短い場合)

しその値は押し波時の8割弱であり、この場合は押し波時の波力が卓越している。

ここには示していないが、低マウンドでも周期が短い場合、遊水室後壁に図-3と同様な衝撃的波形が現れる。逆に高マウンドでも周期が長い場合では、各部材に働く波圧は重複波的となる。滑動合成波力のピーク値は、周期に拘わらず高マウンドでは押し波時が大きく、低マウンドでは引き波時が大きい傾向にある。また、押し波時IIaは実験の範囲では不安定な位相であり、条件によって現れなかったり、IやIIbとの出現順序が変化する。

4. 各部材に働く波力と滑動合成波力の特性

(1) 下部不透過壁に働く波力

図-4(a), (b)は、下部不透過壁に働く平均波力強度の押し波時と引き波時のピーク値 $f_{PHTC}^{(+)}$, $f_{PHTC}^{(-)}$ を、理論で求めた平均波力強度 $f_{PHTC}^{(+)}$, $f_{PHTC}^{(-)}$ でそれぞれ無次元化し、横軸に波高とマウンド上水深の比 H/d あるいは l/L' をとって示したものである。理論による波力の計算には、水深としてマウンド上水深 d を用いている。押し波時のデータにばらつきはあるが、 H/d が大きくなっても波力比はあまり増大せず、平均的に波力比は1.0程度である。消波構造とした波力低減効果は認められない。一方、高マウンドでも波力強度は最大で $0.7w_0H$ 程度であり、衝撃的な波力は作用していない。

引き波時には l/L' の影響が顕著であり、消波効果が強く影響していることが伺われる。また、図中の丸囲みの条件では H/d の影響が大きい。これは、 H/L' の増加に対

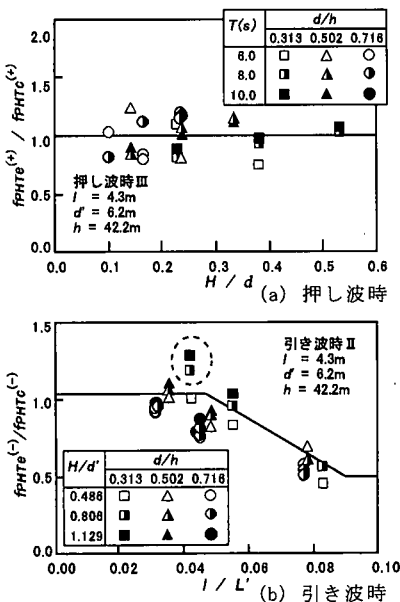


図-4 下部不透過壁に働く平均波力強度のピーク値

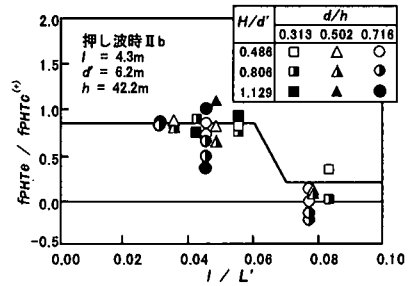


図-5 下部不透過壁に働く平均波力強度 (押し波時 IIb)

して理論による波力 $f_{PHTC}^{(-)}$ が急激に減少するための見かけの変化であり、理論の適用ができないことを示唆する。

図-5は、押し波時IIbの下部不透過壁に働く平均波力強度を $f_{PHTC}^{(-)}$ で無次元化し、 l/L' に対して示したものである。周期が短くて l/L' が大きい場合、波力は小さくあるいは負になっており、図-3で示した波圧の双峰性の影響がマウンド高さに関係なく現れることがわかる。

(2) スリット壁に働く波力

図-6は、スリット部に働く平均波力強度の正のピーク値 $f_{PSTC}^{(+)}$ (押し波時I) を水の単位体積重量と波高の積 w_0H で無次元化し、横軸に波高 H をとって示したものである。数例を除き、波高の増加とともに無次元波力強度も大きくなっている。高マウンドでも波圧波形は極端に衝撃的ではなく、無次元波力強度が大きくなるのには、波高が大きいほど前面水位の上昇速度が速く、遊水室の水位上昇が追いつかずに前面との水位差が大きくなることも影響している。引き波時Iでは、平均的に前面水位が波高の2割ほど低下、逆に遊水室が2割程度上昇しており、スリット壁には静水圧的な波力が働く。

(3) 遊水室後壁に働く波力

押し波時IIbでの遊水室後壁に働く重複波的波力成分 $f_{PHTC}^{(-)}$ は、理論で求めた波力と概ね同じである。衝撃的波力成分のピーク (押し波時IIa) は、最大でも $0.4w_0H$ 程度であり、比較的小さい。ただし、必ずしも高マウンドで発生するとは限らない。波高と遊水室水深の比 H/d が

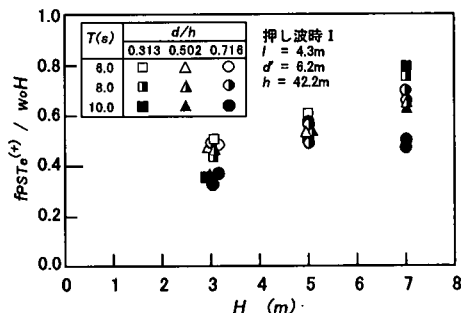


図-6 スリット壁に働く平均波力強度 (押し波時 I)

0.8以上では低マウンド条件でも衝撃的波力が発生し、周期が短いと最大 $0.4w_0H$ に達することもある。

(4) 滑動合成波力

図-7は、実験で得られた滑動合成波力の正負のピーク波力強度 $f_{ce}^{(+)}$ 、 $f_{ce}^{(-)}$ を w_0H で除して無次元化して、横軸に l/L' をとって表したものである。また、波力が最大になる位相を記号を変えて示している。正負のピーク値とも l/L' の増大とともに減少している。 $f_{ce}^{(+)}$ は、概して l/L' が小さい場合は押し波時IIIで、 l/L' が大きくなると押し波時Iで決まっている。 d/h の影響も大きく、低マウンドの波力は $l/L'=0.03$ で $0.5w_0H$ 程度、 $l/L'=0.08$ で $0.3w_0H$ 程度であるが、高マウンドではおよそ1.4倍になっている。 $f_{ce}^{(-)}$ はすべて引き波時IIで決まっており、 $l/L'=0.03\sim0.04$ で $-0.5w_0H$ 以上、 $l/L'=0.08$ で $-0.3w_0H$ 程度となっている。図中では区別していないが、滑動合成波力の正負のピークの大きさにはマウンド高だけでなく波高も影響しており、実験の範囲では概ね $d/h\geq 0.5$ 、 $H/d\leq 0.25$ で引き波時の波力が大きくなっている。

5. 大水深重複波領域を対象とした波力算定法の検討

(1) 波力算定法の考え方

今回提案する波力算定法では、3.で示した7つの検討位相毎に各部材の波圧分布を計算する。押し波時I～IIIおよび引き波時IIの計算においては、合田・柿崎(1966)の有限振幅重複波理論による波圧 p_c に、各位相毎の重複波的波力成分の低減係数 λ_i を乗じて、各部材に作用する波圧 p_c を次式のように補正する。

$$p_c = \lambda_i p_c \dots\dots\dots (2)$$

なお、理論による波圧の計算にはマウンド上水深 d を用いる。また、押し波時IIaの遊水室後壁・下床版には衝撃的波力成分を考慮する必要がある。式(2)で得られる波圧に、衝撃的成分として波圧強度 p_s を加える。

(2) 設計波力分布

実験で得られた各検討位相毎の各部材に働く波力を、理論による波力と比較することによって、式(2)における低減係数 λ_i の値を定めた。表-1はその一覧である。紙面の関係で示していないが、引き波時の各位相では前面と遊水室の水位の関係に基づく静水圧分布を与える。

各部材の波圧合力や滑動合成波力を、それぞれ検討位相毎に求め、引き波時・押し波時のそれぞれの最大値を設計波力として用いる。これらによって、各部材の設計およびケーソン全体の安定性の検討を行うことができる。図-8は、押し波時IIIにおける波力分布を例示したものである。フーチング上面の波圧分布は、酒井ら(1998)が混成堤について提案して今回の実験でも妥当性を確認した、フーチング基部波圧 p_{v0} に $\cos kx$ を乗じる方法で算定する。ここに、 x はフーチング基部から沖側への距離、 k は波数である。揚圧力は三角形分布を仮定し、フーチング先端の揚圧力強度を $p_{v0} \cos kb$ とする。

(3) 滑動合成波力の実験値と計算値の比較

図-9は、今回の波力算定法を用い、押し波時・引き波時

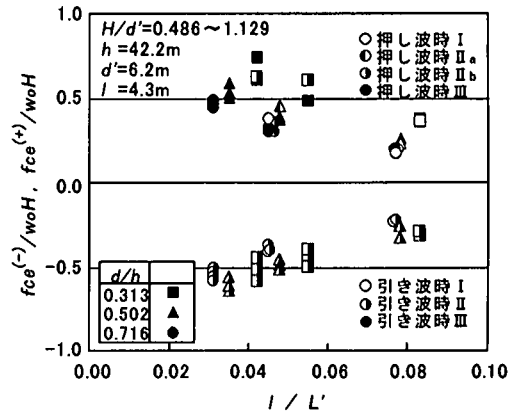
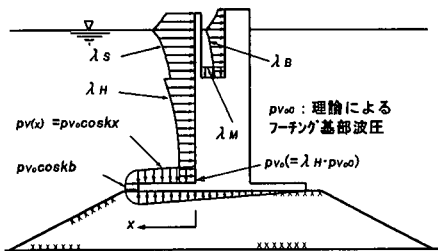


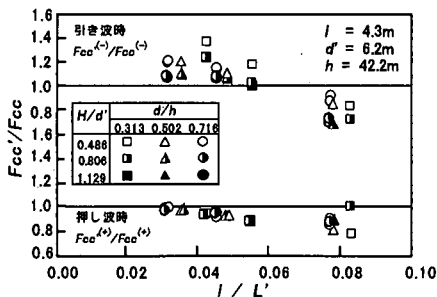
図-7 実験で得られた滑動合成波力

表-1 波力の低減係数等一覧

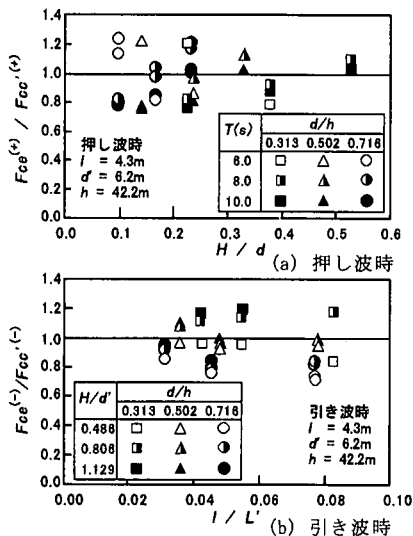
		押し波時 I	押し波時 IIa	押し波時 IIb	押し波時 III	引き波時 II
スリット	λ_n	$50/3((H/L')(H/d/0.6)^{0.7} : H/L \leq 0.09$ $1.5(H/d/0.6)^{0.7} : 0.09 < H/L'$		0.1	$0.4 : H/L' \leq 0.04$ $-2/3 + 80/3(H/L') : 0.04 < H/L' \leq 0.07$ $1.2 : 0.07 < H/L'$	$1.05 : H/L' \leq 0.046$ $13/8 - 25/2(H/L') : 0.046 < H/L' \leq 0.09$ $0.5 : 0.09 < H/L'$ 各々背面静水圧分布
	λ_{u1}	0.8		$0.85 : H/L' \leq 0.06$ $0.91 - 65/64(H/L') : 0.06 < H/L' \leq 0.07$ $0.2 : 0.07 < H/L'$	1.0	$1.05 : H/L' \leq 0.046$ $13/8 - 25/2(H/L') : 0.046 < H/L' \leq 0.09$ $0.5 : 0.09 < H/L'$
後壁	λ_m	0	0.55	1.0	$0.9 : H/L' \leq 0.04$ $2.5 - 40(H/L') : 0.04 < H/L' \leq 0.07$ $-0.3 : 0.07 < H/L'$	静水圧分布
	p_{m2}	0	$0.5(H/d)w_0H : H/d \leq 0.8$ $0.4w_0H : 0.8 < H/d$ 各々波圧強度	0	0	0
下床版	λ_{u1}	0	0.55	0.8	$0.5 : H/L' \leq 0.04$ $7/3 - 130/3(H/L') : 0.04 < H/L' \leq 0.07$ $-0.8 : 0.07 < H/L'$	静水圧分布
	p_{v2}	5	$0.5(H/d)w_0H : H/d \leq 0.8$ $0.4w_0H : 0.8 < H/d$ 各々波圧強度	0	0	0



図一八 設計波力分布の例 (押し波時III)



図一十 混成堤との滑動合成波力の比較



図一九 滑動合成波力の実験値と計算値の比較

時の各検討位相のうち最も大きい値を設計滑動合成波力 $F_{cc}^{(+)}$, $F_{cc}^{(-)}$ として、実験値の滑動合成波力の正負のピーク値 $F_{cc}^{(+)}$, $F_{cc}^{(-)}$ をこれらの値でそれぞれ無次元化したものである。各々、今回の算定法で波力を適切に評価できることがわかる。滑動合成波力が決まる位相は、押し波時の計算値がⅠとⅢであり、実験値とほぼ一致する。引き波時の計算値は、高マウンドの場合にⅢで決まる例が多い。元々ⅡとⅢは近く、データのばらつきや理論の適用限界等によって変動しているものと思われる。

ここには示していないが、現行波力算定法を用いて同様に整理すると、押し波時は周期が短い場合に実験値は計算値の6割程度になる。これは下部不透透壁の波力に双峰性が現れるためであり、これを考慮した今回の算定法は合理的といえる。一方、引き波時は中・低マウンドで周期が短い条件を除いて実験値は計算値の1.5～3倍も大きくなる。これは、現行波力算定法が大水深重複波領域の前面水位低下量を考慮していないためである。

(4) 縦スリットケーソンと混成堤の比較

図一十は、今回の算定法による設計滑動合成波力 F_{cc}

と酒井ら(1998)の混成堤の計算値 F_{cc} との比を示したものである。縦スリットケーソンにすると、押し波時では I/L' が大きいほど波力比が小さく、 $I/L' \approx 0.08$ では10～20%の低下率となっている。引き波時も $I/L' \approx 0.08$ で10～30%の波力低下が見込まれる。設計波の周期が短く消波対象波の周期に近いと、消波効果によって波力の低減を期待できる。遊水室後壁に働く衝撃的波力の影響は小さい。一方、周期が長く I/L' が小さいと、引き波時の波力が20%程度増大する場合がある。これは、遊水室水位が大きく低下し、遊水室後壁に冲向きおよび下床版に上向きの波力が働くためと考えられる。

6. あとがき

大水深重複波領域における縦スリットケーソンの各部材および全体に働く波力を明らかにし、新しい検討位相を考慮した合理的な波力算定法を提案した。この方法を用いると、大水深重複波領域の特徴である引き波時の波力だけでなく、高マウンドで押し波時の波力が卓越する場合の波力も適切に算定できる。ただし、限られた条件の結果であり、適用範囲に留意する必要がある。なお、本研究の遂行にあたり、独立行政法人港湾空港技術研究所、海洋・水工部高橋部長に有益なご助言を頂きました。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所・(株)三洋コンサルタント (2000): 幅広フーチングケーソンの水理特性調査報告書, 151 p.
- 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, 5巻, 10号, 57 p.
- 酒井浩二・井福周介・大釜達夫・山崎耕嗣 (1998): 大水深における重複波を考慮した設計波力算定法, 海岸工学論文集, 45巻, pp. 746-750.
- 高橋重雄・下迫健一郎・佐々木均 (1991): 直立消波ケーソンの部材波力特性と耐波設計法, 港研報告, 30巻, 4号, pp. 3-34.
- 谷本勝利・吉本靖俊 (1982): 直立消波ケーソンの反射率に関する理論および実験的研究, 港研報告, 21巻, 3号, pp. 43-77.