

消波工を有する各種ケーソン防波堤の水理特性

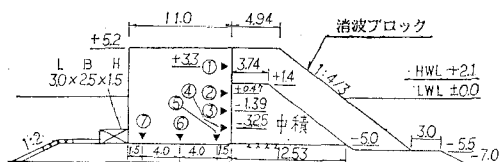
阪本 浩*・永井康平**・福田 功***・親泊正孝****

1. ま え が き

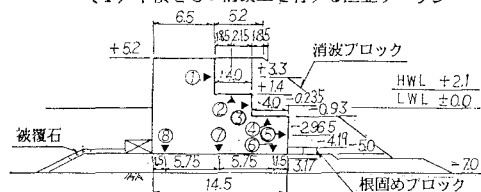
防波堤の設置水深が深くなるに従って、ケーソンや消波ブロックが大型化し、今やその合理化、経済化は重要な課題である。そこで図-1のような空隙率の高い消波ブロックを図-2(1)の消波工の中積に使う構造、さらに経済化するため図-2(2)、(3)のようなケーソンを中積部にもぐり込ませる構造の2方法を検討した。

これらはいずれも特殊防波堤¹⁾と言えるものであるが、(1)の中積に石を使う構造は従来からあり、その水理特性も堀川他²⁾をはじめ研究されている。中積にも表層と同じ消波ブロックを使えば、在来の消波ブロック被覆堤であり、その波力は森平他³⁾、合田⁴⁾に基づく基準⁵⁾、不規則波に関する谷本他⁶⁾等の研究がある。(3)の斜面ケーソン堤は消波工の無い場合について伊藤¹⁾が紹介し、谷本他⁷⁾、森平他⁸⁾、中田他⁹⁾等が模型実験を行い、新潟東港で採用された。しかし、斜面ケーソンに消波ブロックを置いたものや(2)の階段ケーソンは、一部¹⁰⁾以外では未だ研究も施工されていないと思われる。

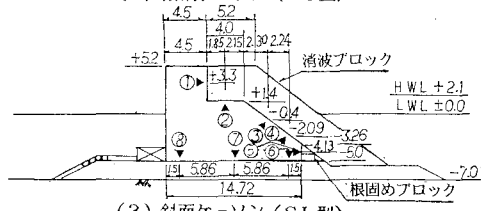
階段ケーソンの特長は、①階段部に働く鉛直下向き波力の効果、②階段上の消波ブロックの自重の効果、③階



(1) 中積をもつ消波工を有する直立ケーソン



(2) 階段ケーソン (ST型)



(3) 斜面ケーソン (SL型)

図-2 検討した消波型ケーソン防波堤

段に作用する水平波力の時間差、④階段部分のブロック数の削減等があげられる。逆効果としては、碎波の促進、揚圧力受圧面の増加、ケーソンの製作据付けの難度等が考えられる。なお階段を増やせば斜面に帰納する。

本論文ではこれら3構造の諸水理特性を模型実験により検討した結果の一部をとりまとめたものである。

2. 実験方法

(1) 実験施設と模型

模型実験は2次元不規則波造波水路(長さ50m, 内幅1m, 深さ1.6m, 海底勾配1/50)で行った。現地は水深7m地点を想定し、模型縮尺を1/30とした。模型は図-2の3種類(図中の○印は波圧観測点)共、水路幅全体に製作したが、3分力計を使うために中央部32.7cmを切断し、波圧合力等を計測できるようにした。消波ブロックは16型(実重量14.5t), S型ブロックは7.8t, T型は7.7tである。中積としては石(5~200kg相当, 空隙率36%)と中空(同100%, 表層の

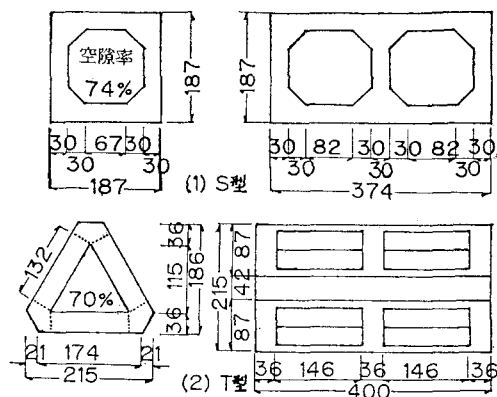


図-1 中積用の高空隙ブロック (単位 cm)

* 正会員 本州四国連絡橋公団調査補償部長
 ** 正会員 工修 (前) 沖縄総合事務局那覇港工事事務所長
 *** 正会員 同局開発建設部港湾計画課建設専門官
 **** 同局那覇港工事事務所建設専門官

消波ブロックは金網で支持)でも実験した。

(2) 水位と波の条件と計測

水位は HWL (+2.1m) と HHWL (+3.2m) で行ったが、本報告では前者の結果のみ紹介する。

波は現地量の周期 T (sec): 波高 H (m) の組合せで 6.0: 3.4, 5.1; 7.5: 3.4, 5.1, 6.1; 10.0: 5.1; 12.5: 5.1, 6.8; 17.5: 3.4, 5.1 の 10 ケース (下線の波高は碎波限界。他の波は h (水深)/ H_0' (換算沖波波高) が 1.6~2.2, H/H_0' が 0.7~1.3 の部分碎波) の規則波を当てた。また消波工の安定を観測するために有義波の周期 $T_{1/3}$: 波高 $H_{1/3}$ が 7.5: 4.0 以上と 17.5: 4.0 以上碎波限界までの 2 ケースの不規則波についても実験した。

消波ブロックの安定寄与度は階段ケーソンの場合にブロックが堤体に接触しないよう金網 (ステンレス製 4.25 mm 角, 太さ 0.75 mm) で約 5 mm 離して実験し求めた。ブロックの被害率は転倒あるいは脱落した被害個数を総個数で除して求めた。波の反射率と伝達率は堤内外の 100 m 離れた地点の各 2 点の波高を測定し、スペクトルの分離推定法により解析した。

3. 実験結果

(1) 中積の種類による直立ケーソンへの波圧の差

図-2 (1) の中積が石, 消波ブロック, T 型, S 型ブロック, 中空の場合の直立ケーソン前壁での水平波圧係数 $p/w_0 H$ (w_0 は水の単位体積重量) の分布を 図-3 に、その平均値の波形勾配 H/L に関する違いを 図-4 に示した。波圧は水面付近で大きい。波形勾配がある限界以上になると波圧は減少しており、これは堀川他²⁾の結果と類似している。この実験の範囲の波形勾配では中積が石の方が消波ブロックよりも波力減殺効果が大い。これは堀川・宮崎 (1973) の結果と似ている。中積部が中空の方がブロック類を置くよりも波圧が低くなるのは注目に値する。高空隙ブロック (S 型) は、0.07 程度より大きな波形勾配では消波ブロックより波圧が小さく、このような波の擾乱領域では石以外では中積部の空隙率が大きい程、波圧は小さくなるようである。波形勾配の小さいところでの $\bar{p}/w_0 H$ は 1.1 で頭打ちのようである。

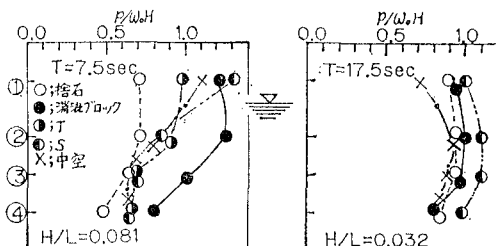


図-3 各種中積の消波直立ケーソンにかかる波圧

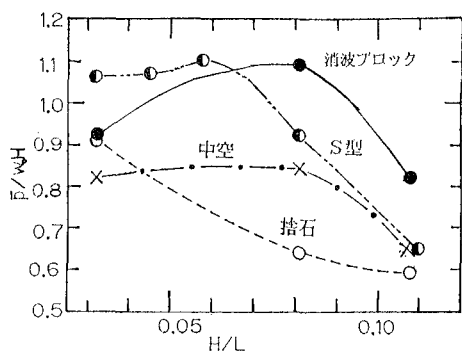


図-4 消波直立ケーソンの波圧と波形勾配の関係

(2) 階段ケーソンにかかる実測波圧

まず、図-2 (2) の階段ケーソン前壁の①, ③, ⑤の点にかかる水平波圧の時間変化を消波ブロックの有無によってどう違うか比較した例が 図-5 である。第一に注目されるのは最上段の①点の波圧が衝撃碎波の様相を呈していることである。特に消波ブロックの無い裸の階段ケーソンの場合、有る場合の 2 倍も振れている。中段③の最初の衝撃波圧はそう大きくなく、常に水中にある壁⑥では衝撃波圧は全く生じていない。第二点は①で最初の衝撃波圧が生じる時に同時に③でも波圧上昇が起ることである。第三は①, ③, ⑤の各壁面の波圧ピークには明白な時間差があり、③→⑤→①の順でピークが生じる。第四に、①, ③のピーク時は消波工があると模型スケールでそれぞれ約 0.16, 0.04 秒遅れて生じる点である。高速ビデオの観察から、ブロック無しの場合のピーク時は波の先端が当たった瞬間であり、有りの場合のピーク時は碎波の波頂が①面上を越える瞬間であることが判っている。第五は、ここでは図示していないが、階段上の②, ④にかかる鉛直下向き波圧の時間変化はそれぞれ①, ③と似ており、衝撃波圧も同時に生じている。その大きさも②では①の約 2/3, ④は③と同じか 1 割位大きい。このように、鉛直壁をもつ階段ケーソン

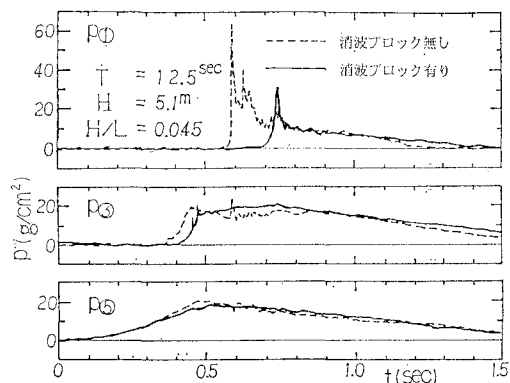


図-5 階段ケーソンにかかる水平波圧 (模型値)

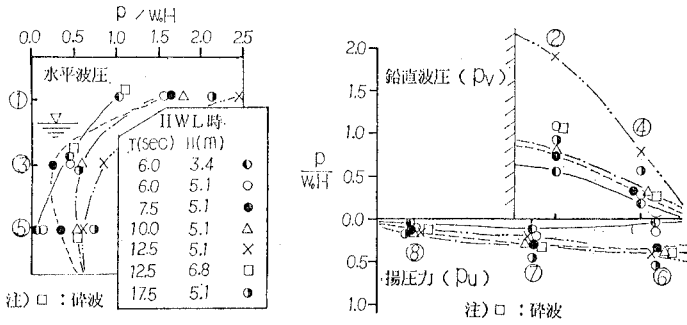


図-6 階段ケーソンにかかる水平、鉛直波圧と揚圧力（消波工無し）

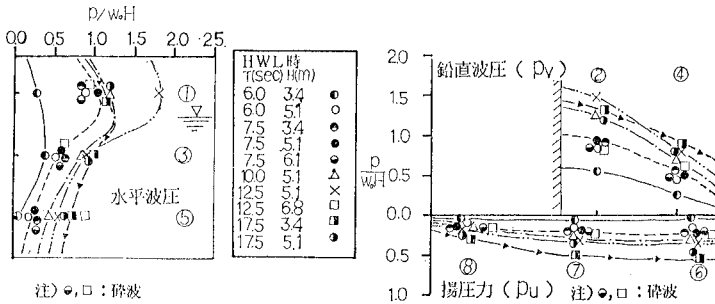


図-7 階段ケーソンにかかる水平、鉛直波圧と揚圧力（消波工有り）

は、衝撃水平波圧を誘引する意味で不利であるが、反面その時間差や鉛直下向き波力を期待できる長所のあることが判明した。

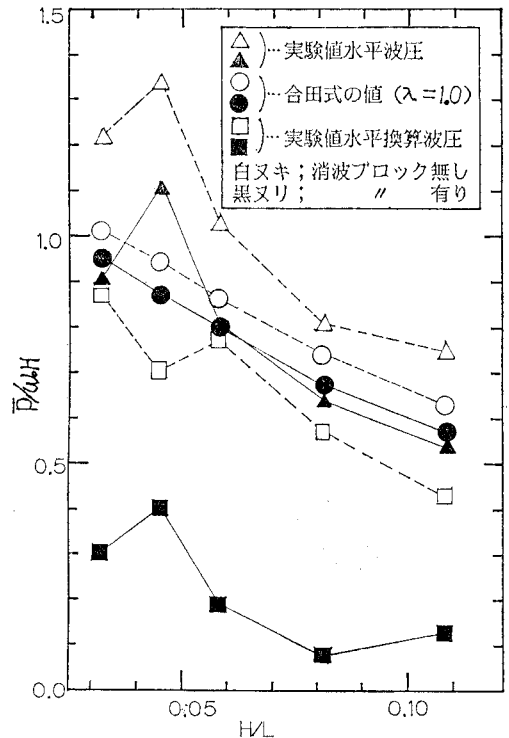
そこで、①の波圧のピーク時の全測点の水平、鉛直および揚圧力（いずれも引き続く2波の平均値）の分布を示したのが、図-6、7である。上述の特徴である上部階段①の水平波圧が大きい。水平波圧は砕波以外では周期に比例しているが、例外的に $T=12.5$ sec では 17.5 sec のものよりも大きい。これは図-5に示したケースであり、堤体上で砕波する波面が最も立った時に、丁度①面に当る衝撃的な、この階段形状に対する特異的な波と考えられる。この波を除くと消波工がある場合は、水平波圧の鉛直分布はかなり滑らかとなり、無い場合の30~75%に落ちる。ただし水中部では余り差はない。階段上②、④の鉛直波圧 p_v も上部階段では $p_v/w_0H=0.5 \sim 1.9$ 、下部階段でも $0.25 \sim 0.8$ というかなり大きな波圧がかかっている。特長的なのは、この鉛直下向き波圧 p_v は消波工があると、上記 12.5 sec の波以外では、大き目である点である。これはブロックの無い場合には水粒子が階段上を水平に動き易いのに対し、有る場合にはブロックに当たって下向きに動くこと、水位上昇を伴い静水圧的な力が増すこと等が考えられる。なお p_v は周期が非常に長い（波形勾配が小さい）と②と④での大きさの差が縮まっている。揚圧力 p_u も砕波を除きほぼ周期に比例し、消波工の有無によっては大差はない。その

絶対値も前趾下面で $p_u/w_0H \leq 0.5$ 程度であり、②、④の p_v よりも小さい。また直立ケーソンでの合田式による揚圧力⁵⁾と比べたところ、消波工無し、有り共に実測値の方が $0.45 \sim 0.65$ と小さい値である。

(3) 階段ケーソンの水平平均波圧と波形勾配の関係

以上のような階段ケーソンの水平平均波圧 $\bar{p}$ を波形勾配（波高は 5.1 m の場合に限る）と関係づけたのが図-8である。実験値は上述の特異点 ($H/L=0.045$ で最大値 $\bar{p}/w_0H=1.1$) を除き、波形勾配に反比例している。これを直立ケーソン堤の場合の合田式による値 ($\lambda=1.0$) と比較すると、消波工が無い場合は階段ケーソンの方が直立壁よりも10~20%（特異点では40%）大きい平均波圧であるが、消波工があるとほぼ等値（特異点では25%大）となる。

ここで、消波ブロックの載っていない場合の階段ケーソンでは、上段②、下段④の鉛直平均波圧 $\bar{p}_v$ の堤体を安定化させる効果を水平平均波圧 $\bar{p}_e$

図-8 階段ケーソンの水平平均波圧 ($H=5.1$ m)

として

$$\bar{p}_e = \mu \times \bar{p}_v \dots\dots\dots (1)$$

(ここで、係数 μ は堤体とマウンドの摩擦係数で 0.6) で換算し(揚圧力の効果は除く)、上の水平平均波圧 $\bar{p}$ より引いたものが 図-8 の白四角である。 $\bar{p}_e$ 即ち階段水平部の抵抗効果は 10~25% の水平逆向き波圧に相当していることが分かる(特異点では $\bar{p}_v$ も相対的に大きい、逆にへこんでいる)。その絶対値は波形勾配に反比例し、すべて 0.9 以下である。

(4) 階段ケーソン上の消波ブロックの寄与度

階段ケーソン上の消波ブロックが直接載っている場合での全鉛直力 F_1 と、堤体とブロックを金網で仕切ってブロックの力が掛らない場合の波力のみによる鉛直力 F_2 を三分力計(消波工無しで固有周波数 $f_n=10\sim12$ Hz)で測定し、その差 F_1-F_2 を求めることにより、ブロックの堤体安定への寄与度を推計することができる。

実験は波高 5.1 m について 表-1 のケース(各 10 波)で行い、①点の波圧のピーク時の消波ブロックの鉛直力への寄与度 ε を

$$\varepsilon = (F_1 - F_2) / W' \dots\dots\dots (2)$$

で定義した。ここで W' は階段上に乗っているブロックの単位幅当りの水中重量 (23 t/m) である。 ε は周期 $T=6.0, 7.5$ sec では平均的に水中重量の 100% (23 t/m), 17.5 sec では 74% (17 t/m) となり、かなり大きい。ただし、周期 6.0 と 7.5 sec の場合、①点の波圧ピーク時よりも以前にブロックを介した最大水平力が働くことが観測されているため、やや危険側の値である可能性がある。

同様に①波圧ピーク時のブロックを介した水平力は、表-1 の周期でそれぞれ -3 (0~-4), -9 (-7~

-13), -8 (-4~-9) t/m となった。これを初期の消波ブロックの階段ケーソンへの「もたれ力」(本ケースでは 11 t/m) から引いてやると、結局、水平力は平均でそれぞれ 8, 2, 3 t/m と求まった。

上記鉛直力 (23, 17 t/m) を (1) 式と同様の考えで水平力に換算すると、それぞれ 0.27, 0.20 $w_0 H$ に相当する滑動に対する抵抗力となる。また水平力は約 0.05 $w_0 H$ であり、この値は消波工をもつ直立ケーソンの場合に島田¹¹⁾が求めたブロックを介する水平力 $0.1 F_0$ (F_0 はブロックの無い直立ケーソン堤に作用する波力) に対応するものである。

以上のブロックを介する鉛直力の換算値および水平力をも考慮した場合(揚圧力の効果は除く)、消波工の有る階段ケーソンにかかる総合的な平均水平圧力は、図-8 の黒四角のようになり、最大でも 0.4 $w_0 H$ という小さな強度となる。このことは消波工を設ける場合の階段ケーソンの一つの有利性を物語るものである。

(5) 斜面ケーソンにかかる波圧

図-2 (3) の斜面ケーソンにかかる波圧を階段ケーソンの場合と比較するために、4 ケースだけチェックしたのが 図-9 である。これを 図-6, 7 と比べると、水平波圧は消波工が無い場合、①点では斜面ケーソンの方が若干大きく、③, ⑤点では逆に若干小さい。消波工があると ($T=7.5$ sec の場合のみであるが) 斜面ケーソンの方が全体的に少し小さい水平波圧を示している。鉛直波力と揚圧力は階段ケーソンの場合と同様なものである。このように斜面ケーソンは階段ケーソンと比べ水理特性に大きな差はなく、必ずしもより有利とは言えないと考えられる。

(6) 消波ブロックの安定性

直立ケーソンの消波工の中積材料の差による消波ブロックの安定性については、規則波の実験ではすべてのケースについて安定であったが、非常に大きな不規則波 ($T_{1/3}=17.5$ sec, $H_{1/3}=6.3$ m) で S 型の場合のみ 1.6 % の被害があった。

階段式ケーソンでも同様であり、上記不規則波の場合のみ 0.6% の被害率であった。斜面ケーソンの場合はすべてのケースで被害はなかった。

実験時の観察によれば、S 型中積ブロックでは微かの動揺があり、石は動かなかった。また斜面ケーソンの方が階段ケーソンの場合より、載っている消波ブロックの動揺は少なかった。しかし、いずれの場合も実際には(現地設計波は $H_{1/3}=4.4$ m, $T_{1/3}=12.4$ sec) ブロックの安定に問題は生じないと判断される。

表-1 消波ブロックの鉛直力寄与度 (単位 t/m)

周期 sec	静水時重量 W	接触時合力 F_1	分離時波力 F_2	寄与度 F_1-F_2	寄与度 (%) $(F_1-F_2)/W'$
6.0	35	31~33	8~13	18~25	78~109
7.5	35	33~34	8~13	20~26	87~113
17.5	35	23~30	5~10	13~25	56~109

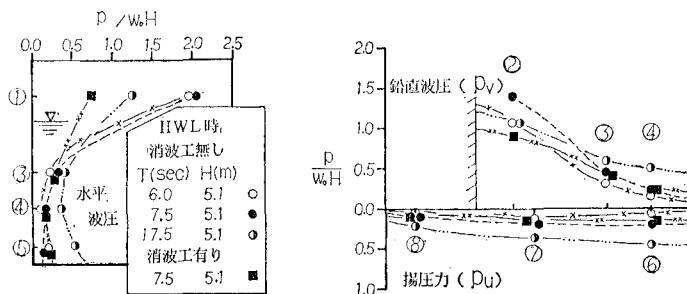


図-9 斜面ケーソンにかかる波圧 (①点の波圧ピーク時の分布)

表—2 波の伝達率と反射率 (HWL, $H=5.1$ m)

周 期 T (sec)		伝 達 率 (%)		反 射 率 (%)	
		7.5	17.5	7.5	17.5
直中立積 ケーソン	石 積	7	6	34	59
	消波ブロック	8	10	35	74
	T型ブロック	8	—	34	—
	S型ブロック	7	17	37	68
	中 空	8	13	29	66
階段ケーソン		11	20	40	71
斜面ケーソン		1	—	39	—

(7) 波の伝達率と反射率

図—2 の各種の防波堤(消波ブロック有り)での波の堤内への伝達率と堤外への反射率を、波高 5.1 m の規則波の実験結果について示したのが表—2である。伝達率も反射率も周期が長く(波形勾配が小さく)なると大きくなっている。これは一般に言われている傾向と一致する。構造形式による差異は、現象のランダム性(表の数値は2回の計測の平均値)を考慮するとそれ程大きくないと考えられる。

4. あとがき

本論文では消波工を有する各種のケーソン防波堤の諸水理特性を考究して来た。実験した防波堤構造(図—2)は(1)中積をもつ消波工を有する直立ケーソン堤、(2)消波ブロックを載せた階段ケーソン堤、及び(3)斜面ケーソン堤である。(1)の中積材として、石、通常の消波ブロック、T型及びS型ブロック(図—1)、中空の5種類を検討した。その結果、以下のような主要な成果が得られた。

(1) 中積材の種類により、消波工内の直立ケーソン前壁にかかる波圧に差がある。その波圧強度は波形勾配が0.07程度以上では波形勾配に反比例し、消波ブロックで大きく、石積では小さい。0.07以下ではS型ブロックが大きく、石積と中空が小さい。平均波圧強度 $\bar{p}$ は大きくても $1.1w_0H$ 程度である。(図—4)

(2) 階段ケーソン堤では、消波工が無いと最上段の壁面に大きな衝撃波圧がかかる可能性がある(図—5, 6)。消波工があればそれが緩和され(図—7)、さらに階段水平面に働く鉛直下向き波力と消波ブロックを介する

下向き力が相乗的に働く。この両鉛直力を式(1)で水平方向に換算したところ、階段に載った消波ブロックの堤体安定効果は非常に大きいことが分かった(表—1, 図—8)。

(3) 斜面ケーソン堤の波圧特性は、階段ケーソン堤のそれと大差は無い(図—9)。

(4) 波の伝達率と反射率は堤体の種類によって大きく変わらない(表—2)。

以上により従来の消波工を有する直立ケーソン堤よりも経済的な高空隙中積ブロックや消波型階段ケーソン堤の実用化に一步を踏み出すことができた。

最後に本研究の遂行に当って有益なご助言を頂いた運輸省港湾技術研究所の合田良実所長と同所水工部谷本勝利防波堤研究室長に深く感謝します。なお、本実験は(株)日本港湾コンサルタントと(株)ゼックスが実施した。担当者の熱意と労苦に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 伊藤喜行: 特殊防波堤論, 土木学会水理委員会, 水工学シリーズ 68-06, pp. 6-1~31, 1968.
- 2) 堀川清司・野口雄二: 直立壁に作用する碎波の波力と波面の関係, 第17回海岸工学講演会論文集, pp. 177~184, 1970.
- 3) 森平倫生・柿崎秀作・菊谷 徹: 異型ブロックの波力減殺効果に関する研究, 港湾技研報告, 第6巻4号, pp. 3~31, 1967.
- 4) 合田良実: 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技研報告, 第12巻3号, pp. 31~69, 1973.
- 5) 運輸省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, pp. 2-115~117, 1979.
- 6) 谷本勝利・北谷高雄・大里睦男: 不規則波による消波ブロック被覆堤の模型実験例, 港湾技研資料, No. 321, pp. 60, 1979.
- 7) 谷本勝利・原中祐人・高橋重雄・小松和彦・轟 正彦・大里睦男: 各種ケーソン式混成堤の反射・越波および波力特性に関する模型実験, 港湾技研資料, No. 246, pp. 29, 1976.
- 8) 森平倫生・国田 治: 斜面壁堤の水理特性に関する模型実験, 第26回海岸工学講演会, pp. 295~298, 1979.
- 9) 中田邦夫・池田龍彦・岩崎三日子・北野雅三・藤田 隆: 上部斜面堤の現地建設に伴う水理模型実験, 第30回海岸工学講演会, pp. 313~316, 1983. なお第五港建でも下田港湾口防波堤で同種の実験(1984)がある。
- 10) 運輸省第四港建・(株)三洋コンサルタント: L型消波防波堤水理模型実験委託報告書, pp. 60, 1986.
- 11) 島田真行: 消波ブロック被覆堤ケーソンに対する作用力の伝達過程について, 第30回海岸工学講演会, pp. 571~575, 1983.