

斜面スリットケーソン堤の現地波力特性と設計法

山本 泰 司* ・ 窪 内 篤**・ 森 昌 也***
岩 本 武 男****・ 水 野 雄 三*****

新しく開発された斜面スリットケーソン堤の水理特性を模型実験により調べた。波浪伝達率は斜面の傾斜が大きく、周期が長いほど大きいのが、斜面没水深の影響は少ない。これらの傾向を用いて伝達率を定式化した。また、反射率が極小となる最適遊水室幅は斜面が傾斜するに従って小さくなる傾向がある。現地に施工された斜面スリットケーソン堤において、約 2 年間にわたり波圧観測を行った。その結果、これまでに提案されていた、直立消波ケーソンと上部斜面堤の波圧補正係数をかけ合わせて波力を算定する方法が、現地においても適用可能であることが分かった。波力に与える波浪入射角の影響については、合田式の波向き補正法を準用できることを示した。

1. ま え が き

混成堤前面に消波ブロックを設置した消波ブロック被覆堤は、波力および反射波を低減する機能に優れ、我が国において広く普及しているが、防波堤設置水深が大きな場合、建設コストの増大が問題となる。

低反射性を有する他の形式の防波堤としては、直立消波ケーソンが代表的である。直立消波ケーソンは透過性の前面直立壁の背後に遊水室を持つ構造で、これまでに、消波特性や波力に関する多くの研究が行われ、現地の条件に適した設計をすることができるようになっている。

一方、大水深、高波浪海域において、耐波性能の向上を目指して開発された防波堤として上部斜面堤が挙げられる。上部斜面堤は、防波堤前面上部を傾斜させることにより耐波性能を高めたもので、波力に対して粘り強い構造であるとされている。

斜面スリットケーソン堤は、直立消波ケーソンの低反射性と、上部斜面堤の耐波安定性をあわせ持つ防波堤構造として考案された新形式防波堤であり、図-1 に示すように、縦型スリットケーソンのスリット壁および遊水室後壁を同じ角度で傾斜させた形状である。消波ケーソンの受圧面を傾斜させるという考え方は、例えば、曲面スリットケーソン（谷本ら、1980）などとして実用化されているものもある。また、本田ら（2000）による上部斜面消波ケーソンも同様のアイデアに基づく。

これらと比較して、斜面スリットケーソン堤は、スリット部材が直線で構成されており、施工性に優れていることに特徴がある。実際、北海道南部に位置する福島漁港において、1999 年にケーソン 2 函が製作され、翌年、防波堤の一部として現地に据え付けられた。関口ら（2000）は、鉄骨とプレキャストコンクリート型枠を用いた工法

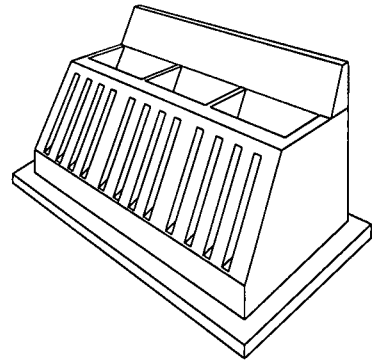


図-1 斜面スリットケーソン堤

を採用したことにより、従来、施工が難しいとされていた斜面部を容易、かつ良好に施工できたと報告している。また、現地施工に先立ち、水理模型実験により波力特性を検討し、波力算定法を提案している。

本報告では、斜面スリットケーソン堤の設計上重要な波浪伝達特性および反射特性を、水理模型実験に基づき検討するとともに、現地の斜面スリットケーソン堤において波圧観測を行い、関口ら（2000）により提案された波力算定法の現地適用性を検証するものである。

2. 水理模型実験の概要

長さ 28 m、高さ 1.0 m、幅 0.8 m の二次元波造波水路において、ケーソン模型に 1 波群約 200 波の不規則波を作用させ、反射率および伝達率を測定した。水路は、仕切り板により、幅 0.55 m の本水路と 0.25 m の通水路に分割され、越波による堤体背後の水位上昇が生じないようにしている。また、堤体位置から沖側の海底勾配は 1/50 とした。

反射率は、造波板と堤体模型の中間に設置した 2 本の波高計により波高を測定し、入反射波分離推定法により求めた。伝達率は、堤体背後 1.5 m の位置から 3 本の波高計により波高を測定し、それぞれの有義波高の平均値と通過波高の比により表した。

* 正会員 工 修 (独法)北海道開発土木研究所環境工部局港湾研究室副室長

** 正会員 (独法)北海道開発土木研究所環境工部局港湾研究室室長

*** 北海道開発局苫小牧港湾建設事務所第二計画課

**** 北海道開発局函館港湾建設事務所第二工事課長

***** 正会員 博(工) 北海道工業大学工学部土木工学科教授

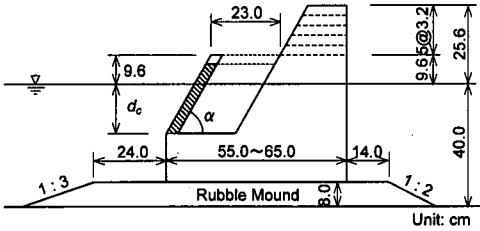


図-2 堤体模型

表-1 堤体形状および寸法

型式	断面構造	斜面没水深 d_s (cm)	斜面傾斜角 (deg)	天端高さ h_c (cm)
A	斜面スリットケーソン堤 (開口比 0.33)	16.0	50	9.6
B			60	12.8
C			70	16.0
D			90	19.2
E			60	22.4
F	消波ブロック被覆堤	21.3		25.6
G		—	—	6.4~22.4

図-2 に堤体模型を示す。模型形状は、表-1 に示すように、斜面が水平となす角 α が 50° , 60° , 70° , 90° の 4 種類と、 $\alpha=60^\circ$ の堤体については、斜面没水深 d_s も変化させた計 6 種類を用意した。 $\alpha=90^\circ$ の堤体は通常の直立消波ケーソンである。各ケーソンの遊水室幅は 23 cm で一定であり、遊水室後壁の高さは 6 段階に変更できる。また、比較のために消波ブロック被覆堤についても実験を行った。

堤体水深 h は 40 cm で一定とした。作用波浪は、伝達率実験においては、波高を $H_{1/3}=16.0$ cm に固定し、周期 $T_{1/3}$ を 2.16, 2.62, 3.12 s の 3 種類に変化させた。反射率実験では、波形勾配が $H_{1/3}/L_{1/3}=0.02$ および 0.04 で一定となるように、 $H_{1/3}=2.7\sim 18.3$ cm, $T_{1/3}=0.94\sim 2.43$ s に変化させた。

3. 波浪伝達特性

図-3 は、周期 $T_{1/3}=2.62$ s の場合について、有義波高に対する相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ と波浪伝達率 K_T の関係を、斜面傾斜角 α をパラメータとして示したものである。相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ が大きくなると、伝達率 K_T は直線的に小さくなる。また、傾斜角 α が小さくなるほど波が斜面を遡上しやすくなるため K_T は大きくなるが $\alpha=60^\circ$ と 70° では、その差は小さい。他の周期についても同様の傾向であった。

図-4 は、傾斜角 α が 60° で一定の場合の、斜面没水深 d_s の影響をみたものであるが、 d_s が変化しても伝達率にはほとんど影響しないことが分かる。上部斜面堤については、高橋 (1997) が α と d_s の影響を考慮した伝達率算定式を示しており、 α が小さいとき、あるいは斜面下端が深いときに伝達率が大きくなるとしている。斜面ス

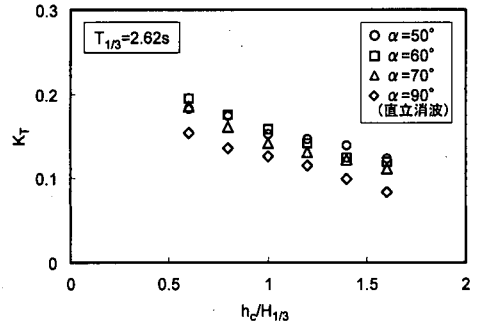


図-3 伝達率に及ぼす斜面傾斜角の影響

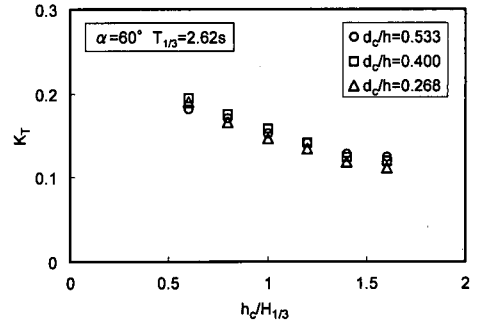


図-4 伝達率に及ぼす斜面没水深の影響

リットケーソン堤においては、伝達波は主として遊水室後壁を遡上した越波により形成されるが、前面スリット部を波浪が透過する際に波浪エネルギーが消耗されるため、 d_s の影響が現れにくいと考えられる。

また、図には示していないが、周期が大きいほど波浪伝達率は大きくなる。

以上の傾向を踏まえて、伝達率 K_T を次式のように定式化し、重回帰分析を行った。

$$K_T = A \frac{h_c}{H_{1/3}} + B \left(\frac{H_{1/3}}{L_{1/3}} \right)^2 + C \sin 2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) + D \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $A \sim D$ は回帰係数であり、それぞれ $A = -0.0685$, $B = -73.1$, $C = 0.0405$, $D = 0.257$ となる。回帰式は有意水準 1% で有意であると判定され、重回帰係数は $R = 0.97$ となり実験結果をよく表すことができた。

なお、図示はしていないが、現地の防波堤では相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ が通常 $0.6 \sim 0.8$ 程度であるが、この範囲では、斜面スリットケーソンと消波ブロック被覆堤の伝達率は同程度であった。

4. 波浪反射率

図-5 は、入射波の波形勾配が $H_{1/3}/L_{1/3}=0.02$ の場合について、波長に対する相対遊水室幅 $B/L_{1/3}$ と反射率 K_R の関係をみたもので、傾斜角 α をパラメータにとって

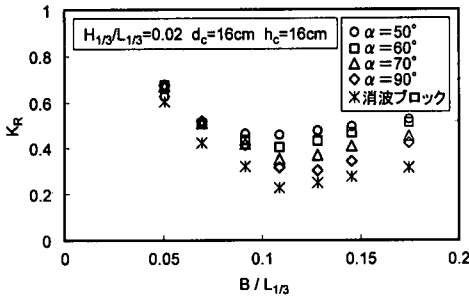


図-5 反射率に及ぼす斜面傾斜角の影響

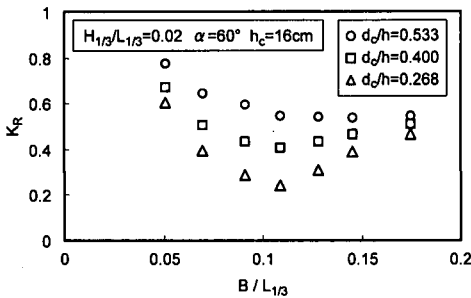


図-6 反射率に及ぼす斜面没水深の影響

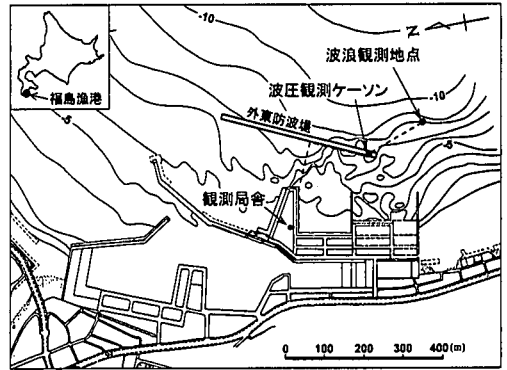


図-7 現地波圧観測位置

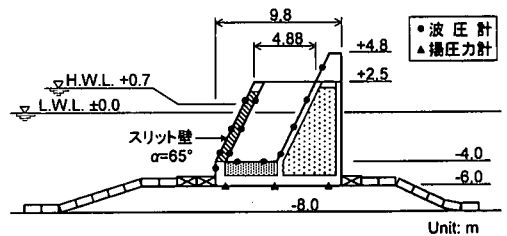


図-8 波圧計取り付け箇所

示している。消波ブロック被覆堤の反射率もあわせて載せているが、この場合の B の値は、斜面スリットケーソン堤と同じ値(=23 cm)を便宜的に使って図示してある。図から、斜面スリットケーソン堤では、直立消波ケーソンと同様に、波長に対して最適な遊水室幅が存在することがわかるが、 α が小さくなるに従って、最適遊水室幅 $B/L_{1/3}$ が小さくなる傾向がある。これは、遊水室の形状が変わることにより遊水室内の水面の振動状況が変化するためと考えられる。また、 α が小さいほど K_R の極小値は大きくなっている。これらの傾向は、 $H_{1/3}/L_{1/3}=0.04$ の場合についても同様である。

図-6は、傾斜角 α が 60° の条件で、遊水室水深 d_c が反射率に与える影響をみたものである。図より、 d_c が反射率に大きく影響しており、 d_c が小さいほど消波性能が良いことが分かる。直立消波ケーソンの反射率については、多くの研究例がある(例えば、谷本ら、1982)。反射率は波浪条件や遊水室形状に強く影響されることが明らかになっており、遊水室幅や遊水室水深のほかにスリットの開口比 ε が影響する。今回の実験は $\varepsilon=0.33$ としているが、開口比が変わればこの傾向も変化すると考えられる。

5. 現地波圧観測

(1) 観測概要

図-7に福島漁港の平面図を示す。斜面スリットケーソンは、延長405 mの外東防波堤の南端に2函設置され

た。ケーソン寸法は $L=15\text{ m}$ 、 $B=9.8\text{ m}$ 、 $H=8.5\text{ m}$ であり、斜面傾斜角は $\alpha=65^\circ$ に設定された。端部から2箇目のケーソンが波圧観測函であり、図-8に示すように、前面スリット壁の両側、前面下部不透過壁、遊水室下床版および遊水室後壁の計13箇所に波圧計を、ケーソン下面3箇所に揚圧力計を取り付けた。また、堤端部より直線距離で140 m、水深-8 mの地点に水圧式波高計を設置して波浪観測を行った。各センサーは海底ケーブルにより陸上の観測局舎に接続されており、毎正時前後の30分間のデータを、サンプリング周波数50 Hzで自動的に収集した。観測された有義波高が0.5 m以上の場合には、続く30分間も連続的にデータを収録するようになっている。観測は、2001年度は4月~9月、2002年度は8月~翌年2月に実施された。

なお、外東防波堤の他の部分はケーソン式の消波ブロック被覆堤であり、観測函に隣接するケーソンは消波ブロックが不連続となっている。このため、平面水理模型実験を行い、不連続消波工による波力増大が生じないことをあらかじめ確認した。

(2) データ解析

波圧および波浪データを、30分間を1セットとして統計処理した。波高計設置水深は観測函とほぼ同じ水深であるため、波浪の観測値を堤体への入射波とみなした。波圧については、波圧計による観測値を積分して各部材に作用する合成波圧を計算し、堤体前面波圧が最大にな

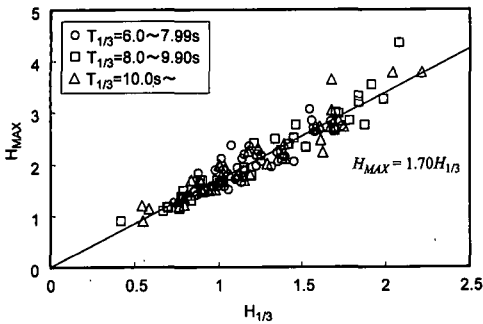


図-9 有義波高と最高波高の関係

表-2 設計に考慮すべき位相とその概要

位相	概 要
押し波時Ⅰ	スリット部の波力が最大となる位相
押し波時Ⅱ a	遊水室後壁に衝撃的な波力のピークが現れる位相
押し波時Ⅱ b	遊水室後壁に比較的穏やかに変化する波力のピークが現れる位相
引き波時Ⅰ	スリット部の波力が負のピークとなる位相
引き波時Ⅱ	ケーソン前面の水位が最も低下する位相
引き波時Ⅲ	遊水室内の水位が最も低下する位相

る瞬間と、遊水室後壁の波圧が最大になる瞬間の同時波圧分布を求めた。ここで、前面波圧とは、前面下部不透過壁およびスリット壁の前後面の合成水平波圧である。

図-9は、2000年度と2001年度の観測波高のうち、比較的大きなものをそれぞれ60ケース程度選択し、有義波高 $H_{1/3}$ と最高波高 H_{max} の関係を示したものである。観測期間中の最大有義波高は $H_{1/3}=2.2\text{ m}$ 、最大最高波高は $H_{max}=4.4\text{ m}$ 、最大周期は $T_{1/3}=12.1\text{ s}$ であった。水深に比べ来襲波浪が比較的小さいため、砕波の影響はみられず、 H_{max} と $H_{1/3}$ はほぼ比例する関係にある。

以下で行う現地波圧の検討は、 $H_{1/3}\geq 1.0\text{ m}$ の84ケースを対象に行う。

6. 現地波圧特性

(1) 提案されている波力算法

関口ら(2000)は、斜面スリットケーソン堤の耐波設計に用いる波力算法として、合田式に対して直立消波ケーソンの波圧補正係数と上部斜面堤の波圧補正係数をかけ合わせる方法を提案している。

直立消波ケーソンの波力については、高橋ら(1991)が、ケーソンに作用する波の位相(表-2)に対して、それぞれ波圧補正係数を与えている。一方、上部斜面堤については、細山田ら(1994)が、ケーソン斜面に作用する波力および下部鉛直壁の波力のそれぞれについて、波圧補正係数を提案している。斜面スリットケーソン堤の波力は、同じ壁高を仮定した直立消波ケーソンの波力に上部斜面堤の補正係数をかけて算定する。なお、本報告

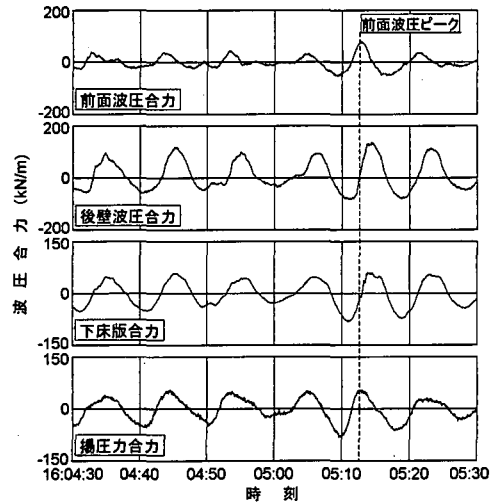


図-10 波圧の観測波形の例(2002年10月21日)

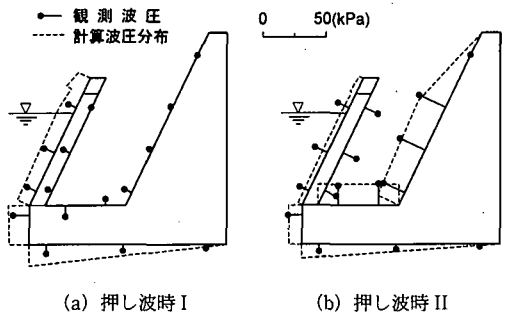


図-11 波圧分布の例

では、引き波時の波力については検討していない。

(2) 波圧波形および波圧分布

図-10は、観測された波圧波形の一例であり、各部材の波圧合力の時刻変化を1分間にわたり示している。このときの有義波高は $H_{1/3}=1.74\text{ m}$ 、周期は $T_{1/3}=7.6\text{ s}$ であり、入射角は $\beta=3.5^\circ$ で、防波堤法線に対してほぼ直角入射であった。各部材波力のピーク時刻に着目すると、前面波圧と揚圧力のピークがほぼ同時に現れ、やや遅れて、後壁波圧と遊水室下床版の波圧のピークが現れる。この遅れが波の作用の位相であり、直立消波ケーソンの特徴と一致している。ただし、図示した例では、押し波時Ⅱ a の位相で作用する遊水室後壁の衝撃的な波力のピークはみられない。

図-11は、前図と同じケースについて、同時波圧分布を示したものである。押し波時Ⅰと押し波時Ⅱともに、作用波圧は計算波圧とよく一致している。ただし、観測データから押し波時Ⅱ a およびⅡ b の位相に相当する時刻を求めることは難しいので、遊水室後壁の作用波力が最大となる時刻を押し波時Ⅱとして整理した。

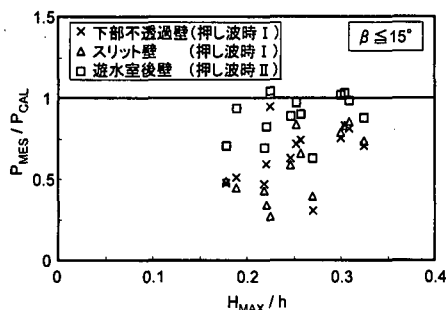


図-12 部材波力の計算値と観測値の比較

(3) 各部材の作用波力

図-12は、防波堤法線に対して直角入射に近い、 $\beta \leq 15^\circ$ の波向きのケースについて、各部材の観測波圧と計算波圧の比を示したものである。データはばらつきが非常に大きく、その範囲は、前面下部不透過壁が0.31~0.95、スリット壁が0.27~0.85、遊水室後壁が0.63~1.04である。波圧の計算には観測された最高波高 H_{max} を使っているが、 H_{max} は変動性が大きく、波浪観測地点と防波堤位置の H_{max} が必ずしも等しくないことが原因のひとつと考えられる。また、特に、下部不透過壁とスリット壁のばらつきが大きいのは、押し波時Iの観測値がそれぞれの部材波力の最大値を必ずしも与えていないことによる。しかしながら、全体的にみると、計算値が観測値のほぼ上限となっており、提案されている波圧算定法は現地に適用可能であると考えられる。

(4) 波浪入射角の影響

図-13は、実測した波圧分布から求めたケーソンの所要重量 W_{MES} と波浪条件から計算した所用重量 W_{CAL} の比を、横軸に波浪入射角 β をとって示したものである。 W_{CAL} の計算においては、合田式の波向き補正法を用いて波向きの影響を考慮している。押し波時I、押し波時IIともばらつきは大きい、計算値が観測値のほぼ上限を表している。また、この傾向は入射角によって変化しないことから、合田式の波向き補正法を準用できると考えられる。

7. あとがき

新しく開発された斜面スリットケーソン堤を対象として、二次元水理模型実験により水理特性を検討した。また、現地において約2年間にわたり波圧観測を行い、提案されている波力算定法の現地適用性を検討した。

(1) 斜面が水平となす角 α が小さいほど、また、波浪周期が大きいほど波浪伝達率は大きくなる。しかし、斜面没水深の影響は小さい。これらの傾向を考慮して、

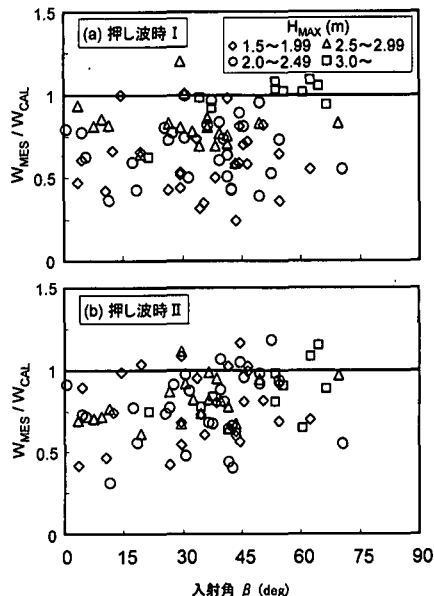


図-13 波力に及ぼす入射角の影響

伝達率を式(1)のように定式化した。

(2) 直立消波ケーソンと同様に、反射率が極小となる最適な遊水室幅が存在する。また、斜面傾斜角 α が小さくなるに従って、最適遊水室幅は小さくなる傾向がある。

(3) 関口ら(2000)により提案されている、直立消波ケーソンと上部斜面堤の波圧補正係数をかけ合わせて波力を算定する方法は、現地において適用可能である。

(4) 波力に与える波浪入射角の影響については、合田式の波向き補正法を準用することができる。

参考文献

- 関口信一郎・渥美洋一・中内勲・宮部秀一・福士昌哉・三輪俊彦 (2000): 斜面スリットケーソンの開発, 海洋開発論文集, 第16巻, pp. 487-492.
- 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, 第30巻, 第4号, pp. 3-34.
- 高橋重雄 (1997): 新構造防波堤とその設計, 土木学会水工学に関する夏期研修会講義集, B-5, pp. 1-20.
- 谷本勝利・原中祐人・富田英治・和泉田芳和・鈴木論司 (1980): 曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究, 港研報告, 第19巻, 第4号, pp. 3-53.
- 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及び実験的研究, 港研報告, 第21巻, 第3号, pp. 43-77.
- 細山田得三・高橋重雄・谷本勝利 (1994): 離島港湾における上部斜面堤の適用性について, 海工論文集, 第41巻, pp. 706-710.
- 本田秀樹・塩崎慎郎・堀内博・辻岡和男 (2000): 高波浪域向け消波型ケーソンの開発, 海洋開発論文集, 第16巻, pp. 245-250.