

二重堤直立部に作用する波力の算定法について

山本 泰司* ・水野 雄三**・鈴木 孝信***

山中 浩次****・吉田 稔*****

1. ま え が き

二重堤は、図-1に示すように消波ブロック被覆堤の消波部を直立部の前面から分離して設置し、面的に波浪制御を行う防波堤形式である。二重堤により創出される遊水部空間は、海水交換の盛んな低波浪海域である。この海域は海洋レクリエーションの場として、あるいは水産生物の生息、増殖の場として期待されており、二重堤はエコポートを形成する外郭施設の重要な構造形式の一つと言える。

二重堤の波力に関する研究には、佐伯ら(1980)の分離堤の研究、中泉ら(1988)および榊山ら(1993)の潜堤付防波堤の研究並びに山中ら(1994)の二重堤の研究等があるが、一般的な波力算定法を提案するに至っていない。

本報告では、不規則波を用いた水理模型実験に基づき、消波部による波高低減効果、消波部背後の水位上昇、直立部の波圧特性および直立部堤体の滑動特性を明らかにするとともに、合田波圧式を基本にして、消波部による波高の変形および水位上昇を取り入れた二重堤直立部に作用する波力の実用的な算定法を提案するものである。

2. 実験方法

2.1 実験の種類

二重堤に襲来する波は、消波部を通過する際に強制碎

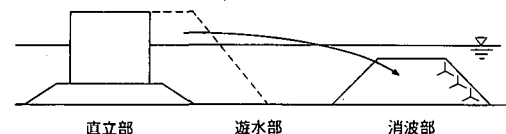


図-1 二重堤概念図

波などの変形を受け、水位上昇を引き起こすとともに波高を減じる。消波部通過後はある領域までは、条件にもよるが波は碎波しやすい不安定な状態で進行する(安田ら, 1992)。その領域を過ぎると波としての安定性を増しながら進行し、直立部に衝突後は一部は反射波として消波部の方に進行し、次の波と干渉し合う。

このような現象の中で直立部に波力が作用するため、波力を算定する手法はできる限り現象に合わせて検討することとした。このため、①消波部による波高低減効果および消波部背後の水位上昇量、②二重堤直立部の波圧、③二重堤直立部の滑動特性のそれぞれについて模型実験により検討した。

2.2 消波部影響実験

実験は、反射波吸収型断面ガラス水路(長さ 28 m, 幅 0.8 m, 高さ 1 m)において行った。模型床勾配は消波部より沖側は 1/50、岸側は水平床とした。水平床における水深は $h=24$ cm で一定とし、通過波高は沖側の水深が 36.4 cm の位置、消波部港外側および港内側法尻の位置でそれぞれ 2 点ずつ測定した。消波部設置時の波高は、沖側水深 36.4 cm の位置と、消波部港内側法尻の位置から 4 分の 1 波長ごとに 5 点の計 6 点で、水位上昇量も合わせて測定した。

消波部の堤体は 3 cm 径前後の碎石で法勾配 1:2 に形成し、碎石の変形を防ぐため表面を金網で覆った。碎石の空隙率は約 45% である。

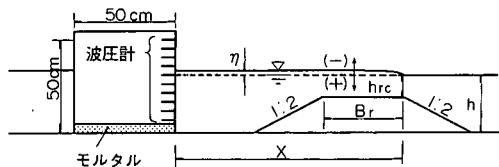
消波部天端水深は $h_{rc}=-3, 0, 3, 8$ cm の 4 種類、天端幅は $B_r=20, 60$ cm の 2 種類に変化させた。実験波はブレッドシュナイダー・光型型の不規則波とし、周期は $T_{1/3}=1.27, 1.84, 2.40$ s の 3 種類; 換算沖波波高は $H_0=6.2\sim12.6$ cm の範囲で 4 種類に変化させ計 96 ケースの実験を行った。

2.3 直立部波圧実験

a) 2次元実験

堤体模型は、消波部影響実験と同様の海底地形上に、消波部と直立部を水深 24 cm の水平床に設置して行った。直立部はアクリル製の堤体(幅 50 cm, 高さ 50 cm, 長さ 79 cm)で、前面に 10 個の波圧計を取り付け、直接模型床に設置した。波圧作用高を検討するため、ほぼ越

- * 正会員 工修 北海道開発局開発土木研究所環境工部水産土木研究室副室長
- ** 正会員 工博 北海道開発局開発土木研究所環境工部部長
- *** 正会員 北海道開発局開発土木研究所環境工部港湾研究室
- **** 正会員 北海道開発局室蘭開発建設部苫小牧港湾建設事務所
- ***** 正会員 (株)西村組



图—2 堤体模型断面

波のない状態で波圧を測定した。消波部の模型は、消波部影響実験と同様に設置した。図-2 に堤体模型の断面図を示す。図中には、本文中で使用する記号を併せて示してある。なお、消波部天端水深 h_{re} の符号は、天端が水中にある場合を正とする。

堤体水深を一定とし、消波部天端水深 h_{rc} 、天端幅 B_r および遊水部長 X は表-1 に示すように変化させて計 166 ケースの実験を行った。

b) 3次元実験

実験は、大型平面水槽(長さ 31.8 m, 幅 23.3 m, 高さ 1 m)において、水槽の一辺に造波機を、他の 2 辺には碎石による消波斜面を設置して行った。海底地形はモルタル製水平床である。直立部は、アクリル製模型(幅 21 cm, 高さ 30 cm, 長さ 33 cm)を 21 個並べ、中央付近の 2 個にそれぞれに 6 個の波圧計を取り付けた。消波部は碎石を用いて形成し、表面を金網で被覆した。消波部の延長は 8 m である。

消波部天端水深は $h_{rc}=0$ cm, 消波部天端幅は $B_r=17$ cm, 遊水部長は $X=100$ cm, 堤体設置水深は $h=19$ cm で一定とし, 実験波周期は $T_{1/3}=1.55$ s の 1 種類, 波高は 3 種類, 入射角は 0, 30, 60° の 3 種類に変化させ計 9 ケースの実験を行った。

2.4 直立部滑動実験

実験は、2次元波圧実験と同様に碎石の消波部と直立部を水路床水平部に設置して実施した。直立部はアクリル製の堤体(幅50 cm、高さ50 cm、長さ79 cmで底板はモルタル製)で、内部に重りを挿入して堤体重量を調整できるようになっており、厚さ5 cmの碎石マウンド上

に設置した。堤体とマウンドの平均摩擦係数は0.639である。

堤体の滑動量は、直立部後部中央のマウンド上 4 cm に設置した変位計により計測した。堤体設置水深は $h=24$ cm, 消波部天端水深は $h_{rc}=0$ cm, 波浪周期は $T_{1/3}=1.84$ s に固定して、天端幅は $B_r=20, 60$ cm の 2 種類、遊水部長は $X=168, 235, 303$ cm の 3 種類、堤体重量は 4 種類に変化させ計 24 ケースの実験を行った。

3. 消波部による波高変化と水位上昇

3.1 波高影響係數 K_H

消波部による波高の低減効果は、構造物前面の波高に対する背後の波高の比で定義される波高伝達率で一般に表せられる。ここでは、高山ら（1988）が広天端幅潜堤の検討に用いた波高影響係数 K_H と同じ考えで消波部による波高変化を検討する。この波高影響係数 K_H とは、消波部がない場合の波高に対する消波部を設置した場合の波高の比と定義し、換算沖波波形勾配 H_0^*/L_0 、相対天端幅 B_r/L_0 、相対天端水深 h_{rc}/H_0^* の 1 次式として、消波部の天端が空中にある条件にまで拡張して算定式を検討する。

消波部背後1波長間の測点の中で、最大の最高波高と最大の有義波高の比 $H_{\max}/H_{1/3}$ は、消波部の天端が水中の場合は $H_{\max}/H_{1/3}=1.8$ 程度で値の変動も小さいが、天端が空中の場合は変動が大きく値も大きくなっている。このため、有義波高と最高波高のそれぞれについて影響係数を求めることとし、次に示す回帰式を得た。

$$K_{H1/3} = 1.753 H'_0 / L_0 - 1.157 B_r / L_0 + 0.414 h_{rc} / H'_0 + 0.418 \dots\dots\dots (1)$$

$$K_{H\max} = 1.263H'_0/L_0 - 1.075B_r/L_0 + 0.349h_{rc}/H'_0 + 0.535 \dots\dots\dots (2)$$

3.2 消波部背後の水位上昇量 η

図-3 は、消波部相対天端水深 h_{rc}/H'_0 と背後の相対水位上昇量 η/H'_0 との関係を全ケースについて示したものである。図から、 η/H'_0 の分布は山形となっており、天端が静水面の付近の時に最大となっている。これは、天端が水中にあるときは、天端が静水面に近くなるほど強制

表一1 直立部波圧実験条件

構造条件		遊水部長 $X(\text{cm})$									$H_{1/3}(\text{cm})$	周 期(s)
		68	101	108	168	235	269	303	370	437		
消波部 天端高 (cm)	-3 (空中)				20 60	20 60		20 60	20 60		7.0~13.7 (4種類)	1.84
	0	20	20		20 60	20 60	20	20 60	20 60	20	4.0~14.4 (1~5種)	1.27 1.84 2.40
	0			60	20 60	20 60	20	20 60	20 60	20	4.0~14.4 (1~5種)	1.27 1.84 2.40
	+3 (水中)				20	20		20	20		7.0~13.7 (4種類)	1.84
		消波部天端幅 $B_r(\text{cm})$										

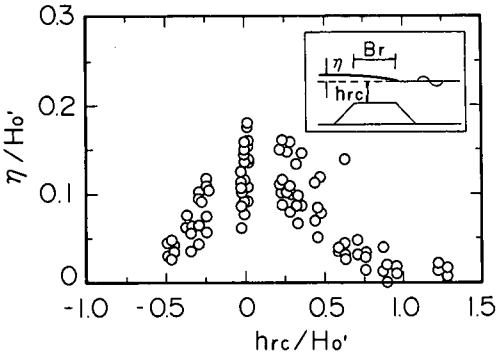
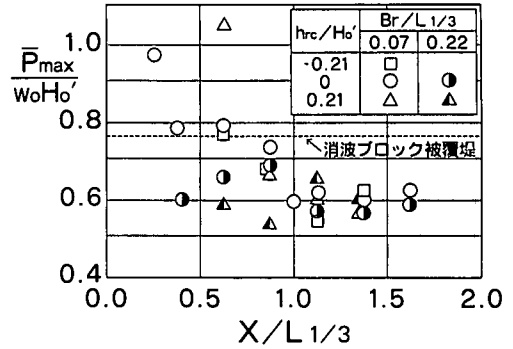
図-3 消波部背後の η/H_0' と h_{rc}/H_0' の関係

図-4 二重堤直立部の波力特性

砕波の影響を強く受け、波も背後に伝達し水位上昇が起きる。しかし、天端が静水面から高くでるに従って、波が背後に伝達しにくくなるため、水位上昇量が減少してくるためと考えられる。

このため、 η/H_0' の回帰式は、天端が水中（静水面も含む）と空中のときそれぞれに求める。ただし、天端が静水面以上の条件にも実験結果を良く表現できるようにするため、 η/H_0' と相関の強い h/H_0' を高山ら (1988) が提案した変数に追加することとし、回帰式として次式を得た。なお、 η の符号は水位が上昇するときを正とし、式の値が $\eta/H_0' < 0$ となるときは $\eta/H_0' = 0$ とする。

$$\eta/H_0' = \min(\eta_1/H_0', \eta_2/H_0') \cdots \cdots (3)$$

ただし、

$$\eta_1/H_0' = -1.190 H_0'/L_0 - 0.044 B_r/L_0 + 0.144 h_{rc}/H_0' - 0.034 h/H_0' + 0.242 \cdots (4)$$

$$\eta_2/H_0' = -1.294 H_0'/L_0 + 0.058 B_r/L_0 - 0.108 h_{rc}/H_0' - 0.021 h/H_0' + 0.207 \cdots (5)$$

4. 直立部の波力特性

4.1 二重堤の構造条件と波力

直立部に作用する水平波力は、消波部の形状や配置の影響を強く受けることは、佐伯ら (1980)、中泉ら (1988)、礪山ら (1993)、山中ら (1994) の研究等により明らかにされている。ここでは、直立部に作用する波力と消波部での構造諸元や波浪条件との関係を平均波圧強度を用いて検討する。ここでは、実験から得られた波圧鉛直分布より、波圧の作用高を個々のケースに対して求め、波圧作用面の平均波圧強度を算定した。

図-4 は、横軸に無次元遊水部長 $X/L_{1/3}$ を、縦軸に無次元平均波圧強度 $\bar{P}_{max}/w_0 H_0'$ (w_0 : 水の単位体積重量) をとり、相対天端水深 h_{rc}/H_0' 、相対天端幅 $B_r/L_{1/3}$ をパラメータにして、二重堤直立部の無次元波圧特性を示したものである。ここで、 $L_{1/3}$ は、消波部背後の水平部の水深に対する波長である。図中には、消波ブロック被覆堤の平均

波圧強度を点線で合わせて示した。

a) 消波部天端幅の影響

同図から、消波部天端水深を静水面と一致させた $h_{rc} = 0$ のケースで、消波部天端幅の影響についてみると、天端幅が広いと波力がより低減されることがわかる。

b) 消波部天端水深の影響

$B_r/L_{1/3} = 0.07$ のケースについて天端水深の影響をみると、 $X/L_{1/3}$ が比較的小さい領域では、天端水深が水中、静水面、空中の順に波圧が小さくなる傾向がある。 $X/L_{1/3}$ が大きくなると $\bar{P}_{max}/w_0 H_0'$ が減少するとともに、波力に与える天端水深の影響は小さくなっている。

c) 遊水部長の影響

$X/L_{1/3}$ が比較的小さい領域では、消波部の波力低減効果がみられず、消波ブロック被覆堤に作用する波力以上の波力が生じるケースもある。これは安田ら (1992) の研究による潜堤通過後の波の不安定領域に直立部が存在しているため、大きな波力が作用していると考えられる。あるいは、遊水部長が短くなると消波部が、混成堤の高マウンドと同じ影響を及ぼすためと考えられる。

一方、直立部と消波部の距離を1波長程度以上離すことで、天端幅が狭いケースでも水平波力を低減できることが分かる。

4.2 波力算定法

a) 仮想換算沖波波高 H_0''

高山ら (1988) の研究によると、潜堤透過後の波高は、水深が浅くなり砕波水深に達すると、再砕波によって再び波高が減少することが明らかにされている。

二重堤においても、遊水部の海底勾配によっては、波の浅水変形や再砕波を考慮しなければならない。今回の実験では、消波部背後の海底は水平としているため再砕波は生じていないと考えられるが、実用上は遊水部における波浪変形を考慮できることが望ましい。このため、消波部の波高低減効果を沖波波高で表した仮想換算沖波波高 H_0'' を求め、これを耐波設計上の沖波とする。 H_0'' は

次の手順により計算する。

- ①消波部がない状態を仮定し、消波部背後の位置の有義波高 $H_{1/3}$ と最高波高 $H_{\max}$ を波浪変形計算で求める。
- ②消波部通過後の有義波高 $H'_{1/3}$ と最高波高 $H'_{\max}$ を次式から求める。

$$H'_{1/3} = H_{1/3} \times K_{H1/3}, \quad H'_{\max} = H_{\max} \times K_{H\max} \quad \cdots (6)$$

ここで、 $K_{H1/3}$, $K_{H\max}$ は前出の式(1)(2)から得られる。

- ③消波部がない状態を仮定し、碎波変形後の波高が求めた $H'_{1/3}$ と $H'_{\max}$ と等しくなるような換算沖波波高をそれぞれ求める。このうち、大きい方を仮想換算沖波波高 H''_0 と定義する。

b) 設計波圧分布

直立部には、図-5に示すように合田波力に準じた波圧（以下、修正合田波圧と呼ぶ）と水位上昇による静水圧が作用すると仮定する。ここで、修正合田波圧は後述する波圧強度修正係数 λ を、式(7)のように合田式の静水面波圧強度 p_1 と波圧の作用高 η^* に導入したものである。

$$p_1 = \lambda(\alpha_1 + \alpha_2)w_0H_0, \quad \eta^* = 1.5\lambda H_0 \quad \cdots (7)$$

設計波高 H_0 は、消波部がない状態を仮定し、 H''_0 を沖波波高として一般的な設計波の計算方法により求める。

c) 波圧強度修正係数 λ

図-6は、実験により得られた最大波圧分布と1/10最大波圧分布の一例を示したもので、実線は図-5で示した修正合田波圧と静水圧の和である。なお、 λ は計算波圧が実験波圧と等しくなるように求めている。同図から仮定した波圧分布は実験結果をよく再現していることが分かる。

λ が $H''_0/L_{1/3}$, $B_r/L_{1/3}$, h_{rc}/H''_0 , h/H''_0 および $X/L_{1/3}$ と直線的な関係にあると仮定し、波圧実験の全データから回帰式を求めると次式を得る。

$$\lambda = -6.466H''_0/L_{1/3} + 0.086B_r/L_{1/3} - 0.471h_{rc}/H''_0 - 0.017h/H''_0 - 0.226X/L_{1/3} + 1.324 \quad \cdots (8)$$

なおここでは、後述する滑動実験結果に基づき、計算波力が1/10最大波圧合力に等しくなるように λ を定めている。すなわち、計算値が最大波圧合力に等しくなるように λ を定めると、波力を過大に見積もる傾向になるためである。

式(8)を用いて推定した修正合田波力と実験により得られた水平波圧合力との相関係数は $\gamma=0.90$ であり、回帰式としてよい相関を示している。

図-7は、一例として波圧実験の λ (実験値) と、式(8)による λ の推定範囲を二本の線で示した。消波部背後の波の不安定領域と考えられる $X/L_{1/3}$ の小さい領域を除いて、よく実験結果を再現している。

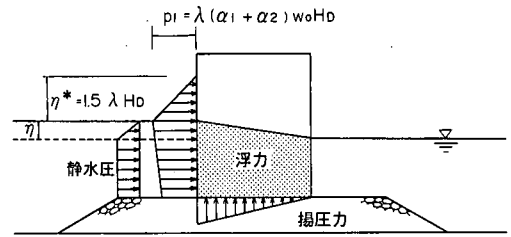
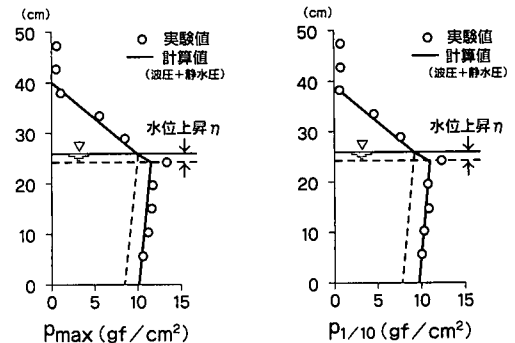


図-5 二重堤直立部の波圧分布



(a) 最大波圧の分布 (b) 1/10最大波圧の分布

図-6 実験波圧分布と計算値の比較

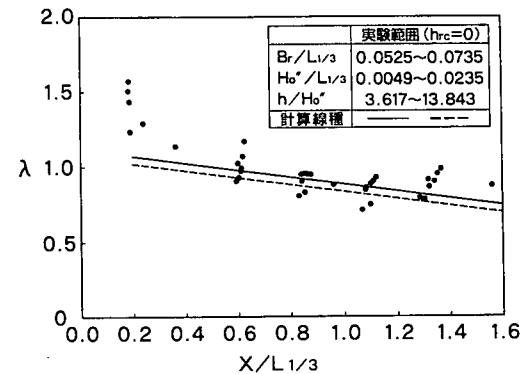


図-7

4.3 滑動実験による波圧強度修正係数 λ の確認

滑動実験結果より、 λ の推定式(8)を用いた波圧式の適合性を検討する。始めに換算沖波波高 H''_0 と滑動量 S との関係から、 $S=1\text{ mm}$ に相当する滑動限界換算沖波波高 H''_{0c} を求め、滑動限界堤体重量と図-5に示す波圧分布から滑動安全率が1になるような λ_{exp} を計算で求める。次に、前述した手順で λ の推定値 λ_{cal} を計算し、 $\lambda_{\text{exp}}/\lambda_{\text{cal}}$ の値で適合性を評価する。

図-8は、横軸に $X/L_{1/3}$ 、縦軸に $\lambda_{\text{exp}}/\lambda_{\text{cal}}$ をとって実験結果を整理したものである。ばらつきはあるが、 $\lambda_{\text{exp}}/\lambda_{\text{cal}}$ 値は概ね1以下となり、提案した波力算定法は妥当であることが確認できる。

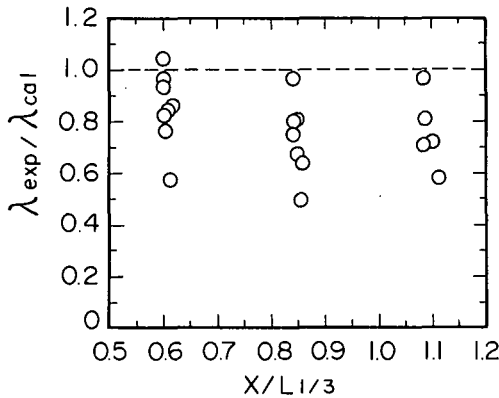


図-8 滑動実験によるλ推定値の適合性

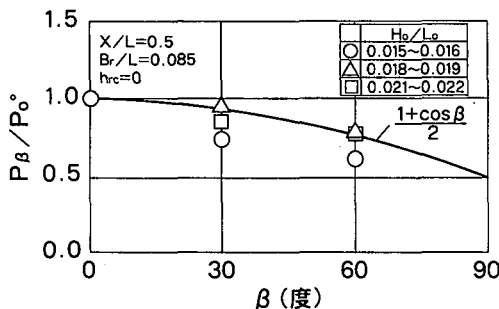


図-9 斜め入射波圧の補正

4.4 入射角の影響

図-9は、波力に与える波の入射角の影響を示しており、縦軸は直角入射時の波圧合力に対する斜め入射時の波圧合力比 P_β/P_0 、横軸は入射角 β である。図中の実線は、合田式の波向補正に用いられている $(1+\cos \beta)/2$ の値を示したものである。同図より二重堤の波向補正は合田式と同様の補正方法を適用できることがわかる。なお、遊水部長 X は波の直角入射時のものを用いることとし、静水圧には入射角補正はしない。

5. まとめ

- (1) 消波部による波の変形と背後の水位上昇
 - ・消波部による波高影響係数は式(1)、(2)で、背後の水位上昇量は式(3)～(5)で算定できる。
- (2) 遊水部長が波力に与える影響
 - ・遊水部長が短い $X/L_{1/3} \leq 0.6$ の条件では、消波ブロック被覆堤に作用する波力以上の波力が生じることがある。

- ・遊水部長が長くなると、直立部に作用する水平波力は減少する。

(3) 二重堤直立部の波圧分布

- ・直立部に作用する波力は、式(7)のとおり波圧修正係数を合田波圧に導入した修正合田波圧と、静水圧の和で、図-5のとおり表わせる。
- ・波圧修正係数は式(8)で算定でき、入射角の補正は合田式と同じ方法が適用できる。
- ・提案した波力算定法の妥当性を、滑動実験により確認した。

6. あとがき

本報で提案した波力算定法は、水位上昇量に相当する静水圧、仮想換算沖波波高 H'' および波圧修正係数 λ を導入したものとなっているためやや複雑であるが、二重堤の越波の解析にも同様の検討が可能と考え採用したものである。

遊水部長が長く、波浪の入射角度が大きくなると、消波部の長さを直立部の長さよりかなり長くするか、消波部を取り囲むように消波部を設置しないと、消波部と直立部の間の遊水部から進入した波が直接直立部に作用することになるので消波部の配置には注意を要する。

二重堤は、面的な多機能防波堤の一つであり、設置条件によっては十分消波ブロック被覆堤の比較対象構造物となるため、本算定法が実設計に活用されることを期待している。

参考文献

- 佐伯 浩・菊地秀明・京谷 修・松井弘夫・尾崎 晃 (1980): 分離式防波堤の水理機能と設計波圧について, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 335-339.
- 榊山 勉・小笠原正治 (1993): 潜堤による衝撃砕波力の低減と実験スケール効果, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 746-750.
- 笹島隆彦・山中浩次・木村克俊・水野雄三・菊地聡一 (1993): 二重堤の水理特性について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 645-649.
- 高山知司・池田直太 (1988): 広天端幅潜堤による波浪変形と彼岸越波流量の低減効果, 港研報告, 第27巻, 第4号, pp. 63-92.
- 中泉昌光・山本正昭・間辺本文 (1988): 潜堤付防波堤の波力に対する実験的研究, 海岸工学講演会論文集, 第35巻, pp. 632-636.
- 安田孝志・原 正典・韓原幸雄 (1992): BIMを用いた矩型潜堤による孤立波の変形と砕波, 土木学会論文集, No. 443/II-18, pp. 73-82.
- 山中浩次・木村克俊・笹島隆彦 (1994): 二重堤の波力特性について, 第37回北海道開発局技術研究発表会, pp. 255-260.